

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد بوقرة – بومرداس –

Université m'hamed bougara – Boumerdes –

Faculté des hydrocarbures et de la chimie



MEMOIRE

Présenté par : **BERKAT Abdelhak** et **CHERDOUDI Rachid**

En vue de l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Géophysique

Spécialité : Hydrocarbures

Sujet

Traitement et interprétation des données de spectrométrie
gamma pour l'exploration de l'Uranium.
« Cas de la région d'Asséou (Hoggar) »

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

.....		Univ. Boumerdes	Président
.....			Encadreur
.....			Co- Encadreur
.....			Examineur
.....			Examineur
.....			Invité 1

2015/2016

Résumé :

La géophysique aéroportée est une méthode d'acquisition de données géophysiques. Différents paramètres naturels des roches peuvent être mesurés. Les données que restitue cette méthode sont classiquement utilisées pour concevoir la cartographie de surface, dans ce travail nous utilisons les données aériennes de la spectrométrie gamma en se basant sur un levé aéroporté réalisé, au-dessus du massif du Hoggar, par la société américaine AEROSERVICE CORPORATION entre 1971 et 1974.

Notre étude a pour but la mise en évidence des anomalies radiométriques dans la région d'Asséou et ce, dans le cadre de la recherche de nouveaux indices Uranifères, ainsi que l'étude structurale de la région.

Dans la chaîne du traitement, les corrections appliquées sur les mesures brutes occupent une place primordiale, ce sont des opérations mathématiques permettant de faciliter la tâche de l'interprétation. Par la suite, une interprétation qualitative et quantitative nous permettra de déduire les caractéristiques relatives des zones anormales dans la région.

Mots-clés : géophysique, radiométrie, spectrométrie à rayon gamma, uranium, exploration, Algérie, hoggar, Asséo, Tahaggar

Abstract:

The Aero-geophysical survey is a method of data acquisition. Different parameters of rocks can be measured, in this work we use the aerial data of gamma ray spectrometry, using an aerial survey realized above Hoggar shield, by the American company AEROSERVICE CORPORATION between 1971 and 1974.

Our study is aimed at the putting in an obvious place of radiometric anomalies in the area of Asséou, in order to research for new Uranium indications, as well as, the structural study of the region. In the treatment chain, the corrections applied on measures occupy a primordial place; allowing us to interpret the data in a good way. Later, a qualitative and quantitate interpretation is used to determinate anomaly's zones in our region.

Key words: geophysics, radiometry, gamma ray spectrometry, uranium, prospection, Hoggar, Algeria, Asseo, Tahaggar.

Remerciement :

Cette étude rentre dans le cadre de la recherche et l'évaluation du potentiel national en matières premières nucléaires. Tout d'abord, nous remercions Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier, Mr. **ALLEK Karim**, Notre promoteur, qui a assuré le suivi de ce travail et qui a mis à notre disposition sa compétence et son expérience dans le domaine de la géophysique en particulier dans l'exploration minière.

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Nous remercions tous les enseignants de l'Université de M'hamed Bougara de Boumerdes, du département de géophysique ; Mr. **AITOUCHE, BOUGUERN, DJEDDI, FERAHTIA et MAALI** pour la qualité de leurs formation. Et notamment notre cher e

Enfin, nous remercions nos collègues de la promotion MAGP11, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

M. **DJEDOU. Abdelkader**, nous vous remercions pour votre confiance, vos conseils et votre expertise et pour l'accueil chaleureux que vous nous avez accordé au sein de l'entreprise nationale de Géophysique de Boumerdes. Merci pour votre gentillesse et votre humour.

Sans oublier **Mme. MEDJOUTI**, ingénieur au niveau de la division d'exploration - Sonatrach, Boumerdes. Merci pour votre aide et soutien.

CHERDOUDI RACHID :

Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers :

- A ma très chère famille :

Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été pour moi

« Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de leur persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier »

A mon grand père et ma grande mère

A la mémoire de grand père et ma grande mère

A mes très chères sœurs : Louiza, Imen , Abir

A mon frère : Mohamed Amine

A mes oncles et mes tantes

A mes cousins et mes cousines : Abd el bassit , Yassin, Hamza ,Ilyas, M'hamed, Mouloud , Hicham,Mohamed, Brahim, Bilal , Alaa , Sohaib et Adnan,Asmaa, Fatima , Nakhla, Meriem , Hanan, Keltoum, maroua,cherifa ,Blequiss,sirine , Zohra et hayam

- A mes amis : Feth ellah, Aziz,Hamdid, Reda , Bilal , Mohamed, Khaled, Amine , Nader , Oussama
- A mon binôme Abdelhak et sa famille
- Et enfin à tous ce qui m'a aidé de prêt ou de loin

Rachid.

BERKAT ABDELHAK :

J'adresse tout d'abord, mes sincères remerciements à ma mère qui m'a toujours soutenu, encouragé et aidé. Elle a su me donner toutes les chances pour réussir. Qu'elle trouve, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de son effort ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude. Ensuite, un grand merci, à mes deux sœurs, Meriem et Sabrina. Et Enfin, je remercie mon oncle Z.RABAH qui a été là pour moi.

Pour conclure, je ne saurais assez remercier mon binôme Rachid, Qui a eu la patience de me supporter, et qui a été très agréable et coopératif. Ainsi mes deux camarades préférés BOUCHIBA Samir et SAADA Azouaou. Sans oublier ALMANSOUR Oussama.

Abdelhak.

Table des matières :

	Page
Introduction générale	08
I. PREMIER CHAPITRE : APERCU SUR LA GEOLOGIE DE L'URANIUM	
1. Introduction	11
2. Minéraux d'URANIUM	12
3. Formation des gisements d'URANIUM	15
3.1. Historique de la cristallisation des minéraux d'uranium.....	15
3.2. Procédés de formation	15
3.3. Schéma de la classification génétique des corps de minerai d'uranium.....	16
4. Classification des corps de minerai d'Uranium en fonction de l'environnement géologique	17
4.1. Schéma de classification de l'AIEA	17
4.2. Schéma de classification modifié.....	18
5. Dépôt filoniens et similaires (classe III).....	19
II. DEUXIEME CHAPITRE : CADRE GEOLOGIQUE DE LA REGION D'ETUDE	
1. Contexte régional	22
2. Région d'étude « Asséo	24
2.1. Situation géographique	24
2.2. Cadre géologique.....	26
a- Le socle précambrien.....	26
b- La couverture sédimentaire paléozoïque	27
2.3. Topographie de la région	31
2.4. La minéralisation	32
III. TROISIEME CHAPITRE : PRINCIPE THEORIQUE DE LA	

PROSPECTION SPECTROMETRIQUE

1. Notion atomique.....	34
1.1. Structure de l'atome.....	34
1.2. Quelques définitions élémentaires	35
1.3. Unités et grandeurs	36
2. Les rayonnements naturels	37
2.1. Les rayons alpha	38
2.2. Les rayons beta	38
2.3. Les rayons gamma	39
3. Interaction des particules avec la matière	41
3.1. Interaction des particules alpha.....	42
3.2. Interaction des particules beta.....	42
3.3. Interaction des rayons gamma.....	42
4. La désintégration radioactive.....	44
5. Activité radioactive.....	45
6. La désintégration successive	47
6.1. Equilibre séculaire.....	48
6.2. Equilibre transitoire.....	48
7. Spectrométrie à rayon gamma	48
7.1. Les levés spectrométriques.....	49
7.2. Instrument de mesure.....	49

IV

QUATRIEME CHAPITRE : DESCRIPTION DU LEVE AEROSPECTROMETRIQUE DE LA REGION D'ASSEO

1. Introduction	52
2. Spécificités du levé de la zone d'étude	52
3. Appareillage.....	53
4. Présentation digitale des données	53

	5. Levé d'acquisition	54
V.	CINQUIEME CHAPITRE : TRAITEMENT DES DONNEES SPECTROMETRIQUES	
	1. Prétraitement des données Aérogéophysiques	56
	2. Traitement des données brutes	56
	2.1. La correction de l'effet de temps mort de l'instrument	57
	2.2. Filtrage des données	58
	2.3. Correction des données du radar altimétrique.....	60
	2.4. La correction d'élévation (height correction)	61
	2.5. La correction du bruit de fond (background correction)	63
	2.6. La correction de l'effet de Compton (stripping correction).....	64
	2.7. La conversion des taux de comptage en concentration apparente.....	67
	2.8. Calcule des rapports [U/Th, U/K, et Th/K]	68
VI	SIXIEME CHAPITRE : INTERPRETATION DES DONNEES SPECTROMETRIQUES	
	1. Conception des cartes	71
	1.1. Cartes brutes	71
	1.2. Filtrage Directionnel	72
	2. Interprétation qualitative	74
	2.1. Comptage total (TC)	74
	2.2. Thorium (Th)	75
	2.3. Uranium (U)	76
	2.4. Potassium (K)	77
	2.5. Les rapports eU/eTh, eU/K et eTh/K	78
	2.6. Distribution des éléments radioactifs dans les roches	81
	2.7. Carte ternaire	83

3. Interprétation quantitative	86
3.1. Analyse statistique des données	86
3.2. Application	86
3.3. Délimitation des zones d'anomalies	93
Conclusion Générale	97
Liste des figures	98
Bibliographie	100

INTRODUCTION GENERALE

L'uranium est une source d'énergie utilisée pour l'industrie nucléaire, environ 17% de l'électricité mondiale est produite à partir des 440 réacteurs électronucléaires répartis dans 30 pays, et compte 8% de l'énergie totale consommée (AIEA, 2007).

Les ressources actuelles en uranium permettent d'assurer la consommation pour le siècle à venir. Au-delà, il existe des ressources à découvrir, et l'effort récent démontre que l'exploration de l'uranium a de longs jours devant elle, grâce à la découverte de nouveaux gisements et par la valorisation de minerais plus ou moins complexes. Bien qu'étant un élément en trace, l'uranium est présent dans divers roches crustales et forme une grande variété de gisements dans des roches magmatiques, métamorphiques et dans des environnements purement sédimentaires.

Les corps minéralisés les plus concentrés en uranium sont des gisements reliés à des discordances et à des grès. Ces gisements ne sont pas très grands, mais leur taille restreinte est compensée par leurs fortes teneurs.

Les stratégies de l'exploration de l'uranium varient en fonction des critères géologiques, génétique et économiques. Malgré la diversité des types de dépôts uranifères, il existe des méthodes classiques qui s'appliquent à tout travail d'exploration. Une exploration a pour base une étude géologique régionale de reconnaissance, des levés aéro-géophysique, une phase de vérification sur le terrain des anomalies par la géophysique et la géologie détaillées et une dernière phase d'analyses chimiques.

C'est à partir de 1954 que le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) français avec la collaboration du BRMA (Bureau de Recherche Minière en Algérie) a lancé le premier programme d'exploration de l'uranium au Hoggar, ce qui a permis de mettre en évidence de timides indices (El Bema, Furon, Timgaouine, etc.) sans intérêt économique.

En 1969, la SONAREM (Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière) a entamé pour la première fois des travaux de reconnaissance générale sur l'uranium qui ont ciblé la vérification des indices déjà connus mais aussi la formation du socle précambrien ainsi que les terrains sédimentaires paléozoïques qui le ceinturent.

C'est sur cette base, qu'à partir de 1971 un vaste programme d'exploration a été élaboré et exécuté. Il comprend notamment un levé aérospectrométrique couvrant l'ensemble du territoire national, un levé radiométrique autoporté effectué sur les structures géologiques les plus potentielles et un levé géochimique des indices les plus intéressants.

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous avons repris les données aéroportées de spectrométrie gamma de la feuille d'Asséo dans le but de fournir une analyse plus précise de cette région en termes de ses potentialités en uranium. Ces anciennes mesures exécutées au début de la décennie 1970 sont de qualité moyenne, entachées de différentes sources de bruit. Elles n'ont fait l'objet d'aucune correction et aucun étalonnage n'a été accompli durant l'acquisition. Tout cela démontre la difficulté à disposer de données parfaitement utilisables pour la problématique envisagée. Pour que les données soient exploitables et aient un intérêt géologique et minier, nous avons procédé à une toute une série de corrections et de traitement des mesures. L'absence de mesures du niveau de bruit de fond radiométrique, de la température et de la pression atmosphérique au-dessus de la région d'étude durant la période du levé a fait que nous avons été amené à faire appel à des procédures empiriques lors du traitement.

Dans le premier chapitre nous exposons la géologie de l'uranium et les différents types de minéralisation, ainsi que l'origine et les classes des dépôts uranifères. Le contexte géologique de la région d'étude est présenté dans le deuxième chapitre. Le principe théorique de la prospection spectrométrique est décrit dans le troisième chapitre, alors que le quatrième chapitre est consacré à la description du levé aérogéophysique, sa mise en œuvre ainsi qu'aux paramètres d'acquisition.

Les différentes étapes de traitement et d'interprétation des données sont détaillées respectivement dans le cinquième et le sixième chapitre. Ces deux derniers constituent le noyau de notre apport dans ce travail. Dans cette partie, une méthode analytique d'interprétation est appliquée; c'est l'analyse statistique des données. Enfin une interprétation globale ainsi qu'un ensemble de conclusions couronnent ce travail.

CHAPITRE I

Aperçu sur la géologie de l'uranium

I. Aperçu sur la géologie de l'uranium

1. Introduction :

L'**uranium** est un élément chimique de symbole **U** et de numéro atomique **92**, de la famille des actinides. C'est le 48^e élément naturel du point de vue de l'abondance, son abondance est supérieure à celle de l'argent, comparable à celle du molybdène ou de l'arsenic, quatre fois moins abondant que le thorium. Il se trouve partout à l'état de traces, y compris dans l'eau de mer.

a- Description :

C'est un métal lourd radioactif (émetteur alpha) de période très longue (4,4688 milliards d'années pour l'uranium 238 et 703,8 millions pour l'uranium 235). Sa radioactivité, additionnée à celle de ses descendants dans sa chaîne de désintégration, développe une puissance de 0,082 watt par tonne d'uranium, ce qui en fait, avec le thorium 232 (quatre fois plus abondant, mais trois fois moins radioactif) et le potassium 40, la principale source de chaleur qui tend à maintenir les hautes températures du manteau terrestre, en ralentissant de beaucoup son refroidissement. (*J. Korenaga, 2011*)

L'isotope ^{235}U est le seul isotope fissile naturel. Sa fission libère une énergie voisine de 202,8 MeV par atome fissionné dont 9,6 MeV d'énergie non récupérable, communiquée aux neutrinos produits lors de la fission. L'énergie récupérable est plus d'un million de fois supérieure à celle des combustibles fossiles pour une masse équivalente. De ce fait, l'uranium est devenu la principale matière première utilisée par l'industrie nucléaire.

b- Les isotopes de l'Uranium :

L'uranium possède 26 isotopes connus, tous radioactifs, dont 3 seulement sont présents à l'état naturel : ^{238}U ; ^{235}U et ^{234}U . On trouve dans une tonne d'uranium naturel pur 7,2 kg d'uranium 235 et 56 g d'uranium 234, le reste étant de l'uranium 238.

- **Uranium 238 et uranium 235 :**

Les isotopes ^{238}U et ^{235}U ont beaucoup d'applications, militaires notamment, mais aussi civiles, comme la datation de l'âge de la Terre à partir de la datation radiométrique par l'uranium-plomb ou par l'uranium-thorium.

Quelles que soient les teneurs en uranium des milieux, les proportions entre les deux principaux isotopes formant l'uranium naturel sont pratiquement les mêmes : ^{238}U : 99,28 % ; ^{235}U : 0,72 % ; ^{234}U : 0,0056 %.

- **Uranium 234 :**

Le troisième isotope, ^{234}U , appartient à la chaîne de désintégration de l' ^{238}U . L'isotope 234 est toujours présent sur Terre, à l'état de traces, bien qu'il ait une demi-vie de seulement 245 500 ans ; car il est constamment créé par désintégration radioactive de l'isotope 238 (après 3 étapes : une transition α donnant ^{234}Th , puis deux transitions β^- donnant ^{234}Pa , puis ^{234}U). Quand il est à l'équilibre séculaire, la proportion entre ^{238}U et ^{234}U est égale au rapport des demi-vies, soit 0,0056 %.

- **Autres isotopes :**

L'industrie nucléaire produit deux autres isotopes artificiels de l'uranium, relativement stables à échelle humaine :

L'isotope 236 est produit en réacteur par irradiation de l'isotope 235, qui dans près de 18 % des cas ne fissionne pas mais absorbe un neutron. Il tend à s'accumuler dans l'uranium de recyclage, dont il augmente fortement la radioactivité et, étant neutrophage, il diminue le potentiel énergétique.

L'isotope 233 est un élément fissile produit en réacteur par irradiation du thorium. Il est à la base du cycle du thorium. Sa demi-vie de 159 000 ans, il est largement supérieur à celle du plutonium.

2. Minéraux d'URANIUM :

Le minerai d'uranium possède une teneur en uranium pouvant varier de 0,1 % jusqu'à 20 %. L'uranium est dit naturel quand il est constitué d'isotopes dans leur proportion d'origine (identique pour tous les minerais d'uranium) : soit 99,2743 % d'uranium 238 accompagné de 0,7202 % d'uranium 235 et d'une quantité infime d'isotope 234 (0,0055%).

Il existe plus de cent minéraux d'uranium connus. Le Pechblende est le principal minéral, caractérisé par sa couleur noir ou marron, ses traits noir à noir verdâtre et son éclat submétallique (**figure. I.1**).



Figure I.1 : Le Pechblende

Les principaux minéraux primaires et secondaires sont donnés ci-après aux Tableaux (I.01) et (I.02) :

Tableau (I.01) : Les minéraux primaires

Oxydes	Pechblende	UO_2
	Uraninite	U_3O_8
Oxydes complexes	Brannerite	U, Ti, Ca, etc.
	Pyrochlore	U, NA, CA, Nb.
	Microlite	U, Na, Ca, Ta.
	Columbite	U, Fe, Mn, Nb.
	Tantalite	U, Fe, Mn, Ta.
Titanates, Columbotantalates, Tantalates	Betafite	U + Ca.
	Euxenite	U + Yt, Ce, Th.
	Polycrase	U + Yt, Ce, Th.

	Fergusonite	U + Yt, Eb.
	Samarskite	U + Groupe Yttrium
	Davidite	Titanate de fer-uranium
	Absite	Titanate hydraté de thorium et d'uranium.

Tableau (I.02) : Les minéraux Secondaires

Oxydes	Gummite	Oxyde hydraté
	Uranium Ocre	
	Curite	Oxyde hydraté de plomb et d'uranium
Phosphates	Torbernite / meta torbernite	Phosphate hydraté de Cu, U
	Autunite / Meta autunite	Phosphate hydraté de Ca, U
	Saléeite / Meta Saléeite	Phosphate hydraté de Mg, U
	Phosphuranylite	Phosphate hydraté d'uranium
Vanadates	Carnotite	Vandate hydraté de K, U
	Tyayamunite	Vandate hydraté de Ca, U
Silicates	Uranophane	Silicate hydraté de Ca
	Soddyite	Silicate hydraté de U
	Coffinite	Silicate hydraté de U

Carbonates	Rutherfordine
------------	---------------

3. FORMATION DES GISMENTS D'URANIUM :

3.1. Historique de la cristallisation des minéraux d'uranium :

Dans les conditions réductrices du magma, l'uranium et le thorium sont tous deux chimiquement stables comme ions tétravalents. Ils ont également de grands rayons ioniques similaires. En raison de leurs rayons ioniques et de leurs haute valence, ces deux éléments ne peuvent pas former des séries de composés chimiques iso-formes avec les autres minéraux de roches. Par conséquent, ils tendent à se séparer en des phases minérales mineures et à se cristalliser dans les dernières différenciations magmatiques, alors que le thorium tend à rester incorporé dans les minéraux primaires, l'uranium peut s'oxyder à sa forme hexavalente soluble et se transformer en solution dans les derniers fluides magmatiques. Finalement, il se cristallise en pegmatite ou forme des dépôts hydrothermaux ou des gites de substitution dans les roches appropriées – sédiments, brèches, etc.

3.2. Procédés de formation :

La plupart de l'uranium présent dans la croûte extérieure a été initialement placé là par les coulées magmatiques et extrusions qui ont formé la principale croûte archéenne antérieure. A la suite du refroidissement et de la cristallisation de ces magmas l'uranium et le thorium se sont concentrés dans les portions les plus acides de la croûte archéenne (granites primaires etc.) (*Kitkham et Rescoe, 1993*). Il y a de cela 2 200 millions d'années environ, l'uranium est resté tétravalent et insoluble. Puis par l'érosion et la désintégration mécanique de ces granites, l'uranium renfermé a été mécaniquement libéré et transporté. Là où les conditions géomorphologiques étaient favorables, les concentrations se firent sous forme de gisements alluvionnaires.

Après cette étape, l'oxygène se libéra dans l'atmosphère de la terre ce qui créa des conditions d'oxydation dans les nappes superficielles. Cela a poussé l'uranium à former des ions hexavalents solubles et à passer rapidement en solution dans les nappes superficielles. Certains des anciens gisements d'uranium de type filonien ont été redéposés à partir des eaux connées. Toutefois, la majorité des gisements d'uranium ont été grandement occasionnés par l'action des eaux météoriques. Les

autres facteurs importants étaient la température et la composition chimique de ces eaux. La solubilité de l'uranium est très augmentée dans les eaux riches en soufre et en carbonate et est diminuée dans les eaux riches en chlore, Vanadium et phosphate.

3.3. Schéma de la classification génétique des corps de minerai d'uranium :

La re-déposition ultérieure et la concentration des minéraux d'uranium ont été fonction des conditions structurales, pétrologiques et géochimiques pour chaque type de corps de minerai. La **figure 1.02** indique les procédés par lesquels les gisements se sont formés. Le **tableau 1.03** donne la classification des corps de minerai les plus connus, en fonction de leur origine. (Cuney M, 2009)

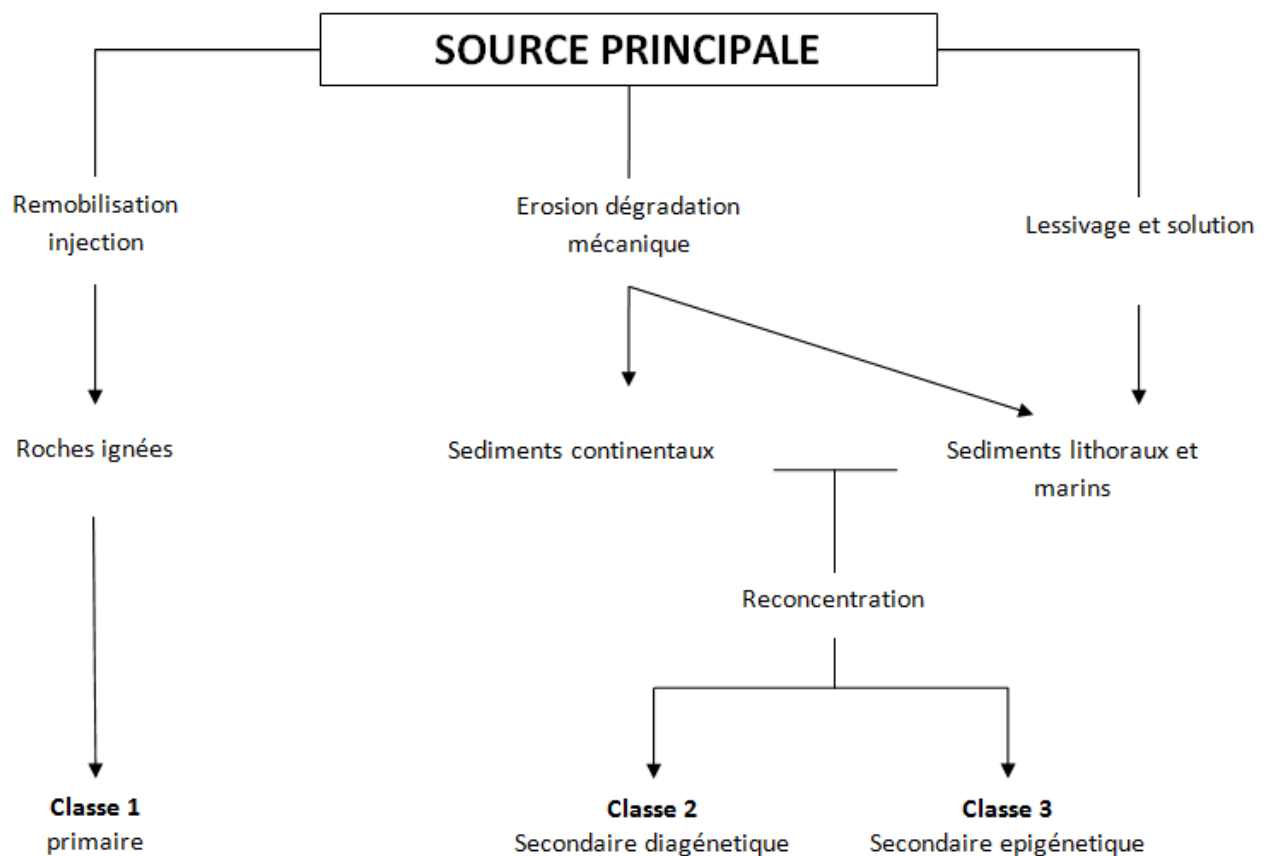


Figure 1.02 : Une proposition d'origine des corps de Minerai d'Uranium

Tableau I.03 : Classification génétique des depots d'uranium

Classe	Origine	Type
PRIMAIRE	Syngénétique	Filonien Granites Carbonatites Peralkaline intrusives
SECONDAIRE	Diagénétique	Grès Conglomerat Quartzeux Argiles noires Calcrètes Lignites Phosphates
SECONDAIRE	Epigénétique	Pegmatites Migmatites

4. Classification des corps de minerai d'Uranium en fonction de l'environnement géologique :

4.1. Schéma de classification de l'AIEA :

La classification universellement acceptée des gisements d'uranium pour une utilisation quotidienne pratique, est celle adoptée par ***l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA)***. Elle n'est pas basée sur les paramètres génétiques, mais sur les gîtes lithologiques et le mode de formation de la minéralisation.

Quatre classes de gisements y sont définies :

1. Gisements gréseux
2. Gisements de conglomérats quartzeux du Protérozoïque
3. Gisement filoniens et similaires.
4. Autres

Une société spécialisée dans l'industrie de l'uranium a amendé cette classification en subdivisant les classes 1, 2 et 3 et en ajoutant trois classes supplémentaires.

4.2. Schéma de classification modifié :

Le schéma modifié se présente comme suit :

Classe 1

- a. Diagenétique ou « Roll Front »
- b. Rolls Epigénétiques
- c. Dépôts Tabulaires In Situ
- d. Dépôts Tabulaires Migrateurs
- e. Dépôts Redistribués

Classe 2

Les gisements de conglomérats quartzeux du Protérozoïque Inférieur forment une classe discrète.

Classe 3

Les dépôts filoniens et similaires comptent à présent trois sous-classes :

- a. Filons dans les failles et les cisailles
- b. Filons dans les adjacents aux dykes et filons-couches ignés
- c. Dépôts de la brèche précambrienne et espace ouvert remblayés.

Dans le schéma AIEA, la catégorie « Autre » est divisée en quatre classes.

Classe 4

Gisements Orthomagmatiques

- a. Sans enrichissement supergène
- b. Avec enrichissement supergène

Classe 5

Gisements supergène du Plio-Pléistocène

Classe 6

Dépôts littoraux marins et paludéens

- a. Dépôts dans le schiste pyriteux carbonneux
- b. Dépôts dans les charbons sub-bitumineux et dans les lignites
- c. Dépôts dans les phosphates.

Classe 7

Autre dépôts.

5. Dépôts filoniens et similaires (classe III)

Dans le cas de notre région d'étude « Asséo », le gisement connu actuellement est celui de « Tahaggart » qui est de type Filonien appartenant à la classe III. Ces types de dépôts sont de faible tonnage mais habituellement avec une grande teneur en uranium (0,2% à 2,3%). Ils représentent par conséquent des cibles de recherche très intéressantes, car leurs réserves peuvent varier de plusieurs dizaines de milliers de tonnes à 200 000 tonnes de minerai d'uranium.

Leurs Dimensions peuvent atteindre **jusqu'à 2 km** de longueur et 50m de largeur, avec une étendue en profondeur considérable. Leurs âges sont généralement du protérozoïque Inferieur (1800 millions d'années), mais quelques dépôts plus jeunes peuvent également se rencontrés. Les granites riches en uranium dans la croûte protocontinentale représentent leur principale source.

Situation régionale: Ceintures géosynclinales entourant d'anciens boucliers avec dômes du socle spatialement associés. Les fissurations et les élévations causées par le dôme, ont produit des cisaillements, des fracturations et des bréchifications dans les méta-sédiments sous-jacents et avoisinants. Les solutions hydrothermales ont ensuite déposé une minéralisation de remplacement de type filonien, cavité et stockwerk.

Critères d'Exploration :

- 1- Le socle régional en dôme est indiqué par les données aéromagnétiques et gravimétriques.

- 2- Le niveau du fond radiométrique est élevé. De discrètes anomalies de canal d'uranium, causées par des corps de minerai sont généralement grandes et distinctes.
- 3- Les unités sédimentaires, stratigraphiquement plus hautes, gisent d'une façon discordante au-dessus des unités minéralisées. Cette discordance significative a souvent une apparence d'escarpement en surface qui apparaît sur les images Landsat.
- 4- Quelques roches basiques volcaniques, souvent des filons de dolérites percent les sédiments. Ces dernières ont des expressions aéromagnétiques.
- 5- La structure de failles régionales est clairement visible sur les images Landsat et les cartes aéromagnétiques.
- 6- Les roches mères de quartz chloroschiste/argile charbonneuses/ roches carbonatées, contiennent souvent assez de matière carbonneuse et /ou de pyrite pour constituer de bons corps conducteurs d'électricité qui peuvent être détectés par des levés électromagnétiques.

CHAPITRE II

Cadre géologique de la région d'étude

II. Cadre géologique de la région d'étude

1. Contexte régional:

Notre région d'étude appartient à un vaste domaine géologique qui est le Hoggar. Il occupe une superficie d'environ 550.000 Km, il s'étend sur près de 1.000 Km d'Est en Ouest et de 700 Km du Nord au Sud, il constitue la principale composante du bouclier Touareg (appelé parfois le bouclier Targui), prolongé au Sud-Est, au Mali, par le massif des Iforas et à l'Est, au Niger, par le massif de l'Aïr.

Le Hoggar fait partie de la chaîne pan-africaine trans-saharienne, il est caractérisé par sa subdivision classique en trois compartiments longitudinaux et l'existence de deux grands accidents tectoniques subméridiens ; (l'accident 4°50' et l'accident 8°30') qui délimitent le Hoggar central polycyclique. A l'Est de l'accident 8°30' c'est le Hoggar oriental et à l'Ouest de l'accident 4°50' c'est le Hoggar occidental (**Figure. II.1**).

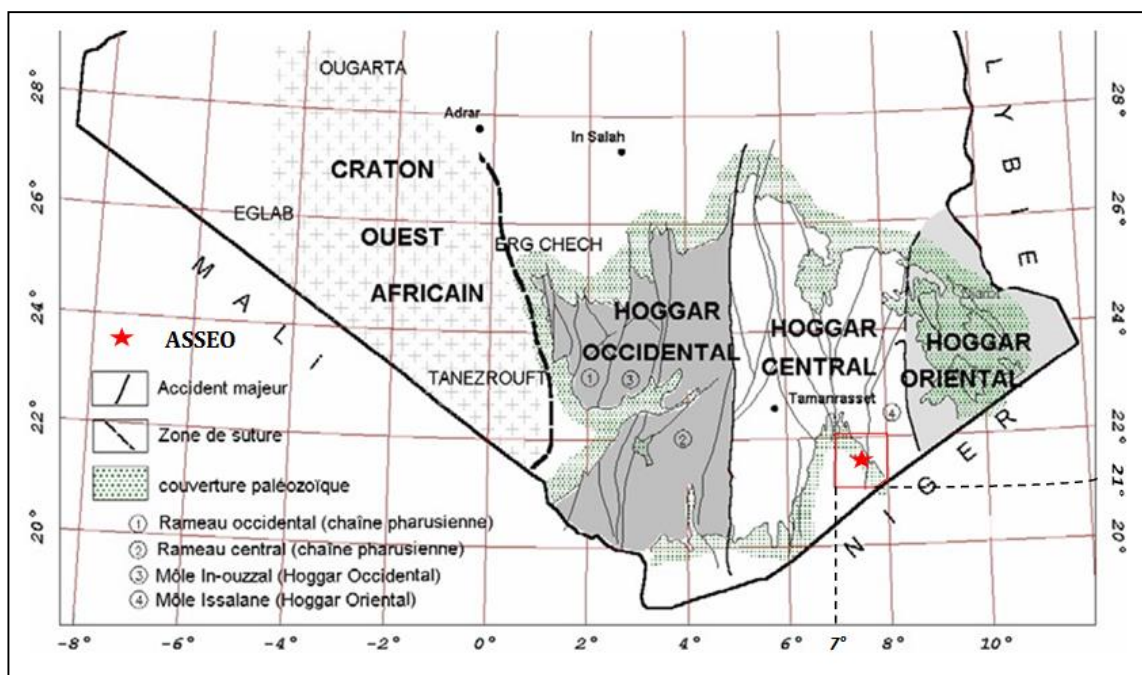


Figure II.1 : Carte des principaux domaines structuraux du Hoggar.

A. Le Hoggar Oriental :

Caractérisé par la chaîne « Tiririniène » d'âge Pan-africain tardif ; chaîne à caractère linéaire encadrée à l'Est et à l'Ouest par deux socles plus anciens et

structuralement différents l'un de l'autre. Dans ce compartiment, trois sous domaines peuvent être distingués :

1. **La chaîne Tiririniène** : Edifiée au Pan-africain tardif, elle est séparée du socle par une discontinuité majeure traduisant un dépôt sur une surface d'érosion qui montre des roches métamorphique et magmatiques très diverses, cette zone est constituée d'Arkoses, de Conglomérats et de calcaires à Stromatholites.
2. **La zone prétiririniène (Tafassasset – Djanet)** : Constituée de larges Batholites de granites calco-alcalins, de dépôts de type Flysch de roches de type calco-silicatées ainsi que de roches volcaniques et plutoniques prétectoniques avec des granites, des gneiss et des roches ultrabasiques.
3. **Le môle Issalane** : Situé à l'Ouest, il est constitué essentiellement de granites et de gneiss ainsi que de formations métasédimentaires (quartzites, marbres, pélites et roches calco-silicatées).

B. Le Hoggar Central polycyclique :

C'est la partie médiane du massif, limité par les deux accidents majeurs (4°50' et 8°30'), le Hoggar Central est plus complexe et hétérogène du point de vue lithologique et structural, il comporte très peu de matériel sédimentaire ou volcanique d'âge protérozoïque supérieur, il est dominé par des formations d'âge protérozoïque inférieur et archéen (**Bertrand et Lassere, 1976**).

Dans ce compartiment on regroupe deux séries types :

1. **La série de l'Arechchoum** : Composée d'orthogneiss tonalitiques ou granitiques, les roches dominantes sont des gneiss gris à grain fin, constitués de quartz, d'oligoclase et de biotite.
2. **La série de l'Aleksod**: Représente une série métasédimentaire de plateforme composée de quartzites, marbres, métapelites et roches volcano-détritiques, le tout associé à un grand volume de roches basiques et de migmatites granodioriques.

C. Le Hoggar Occidental :

Situé à l'Ouest de l'accident 4°50', le Hoggar Occidental (domaine de la chaîne

pharusienne) est un vaste domaine où l'orogénèse pharusienne est la plus complète.

Dans ce domaine, on distingue trois principales composantes ; deux rameaux occidental et oriental (fossé pharusien) séparées par le môle granulitique de In Ouzzal, lequel est constitué de formations archéennes structurées et métamorphisées à l'Eburnéen.

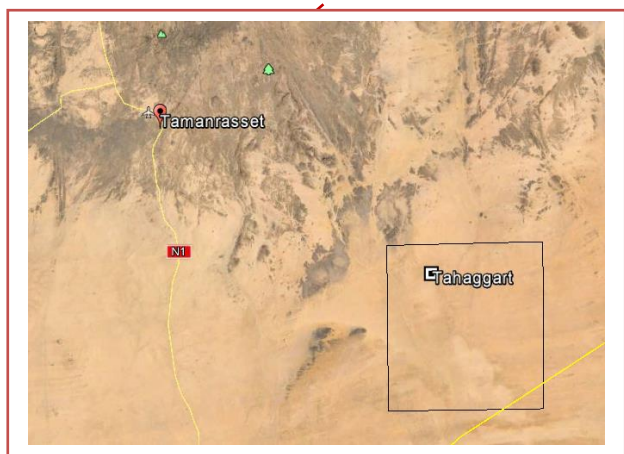
1. **Le môle In-Ouzzal** : Il comporte principalement des roches d'âge Eburnéen, ainsi que plusieurs plutons de granodiorite-granite de diverses générations. La conservation d'un graben de basaltes et d'andésites du « pharusien » (Gara-Akofou) implique que, tout au moins dans sa partie Nord, le môle In-Ouzzal a échappé au rétromorphisme et aux déformations pharusiennes et a été pénéplané avant les épandages de la série pourprée horizontale qui le recouvre.
2. **Le rameau occidental** : Caractérisé par le grand développement des séries quartzites d'âge PR2 et PR3 ainsi que l'existence de champs de dykes sub-méridiens, prolongement de ceux de l'Adrar des Iforas (Mali), qui soulignent notamment la bordure tectonisée du craton ouest africain COA.
3. **Le rameau central** : Situé entre le môle In-Ouzzal et la faille 4°50', appelé le fossé pharusien, cette partie du Hoggar occidental fait l'objet de notre travail, le contexte géologique du fossé sera développé dans ce qui suit.

2. REGION D'ETUDE (Asséo) :

2.1. Situation géographique :

La région d'Asséo est située à environ 300km au SE de la ville de Tamanrasset et à 1600 Km au Sud de la capitale Alger (**Figure II.2**). Le terrain étudié se situe dans le Sud-est du Hoggar. La zone d'étude est délimitée par :

- Au Nord le parallèle 22° ;
- A l'Est la ligne joignant les points 7° 15 et 8° longitudes Est.
- Au Sud le parallèle 21°
- Au Sud-Est la frontière Algéro-nigérienne ;
- A l'Ouest le méridien 7°. (voir **Figure II.1**)



Carte géographique
De l'Algérie

Carte de situation
« Région d'Asséo »

Figure II.2 : Situation géographique de la région d'étude

2.2. Cadre géologique :

La feuille d'ASSEO se situe à la bordure Est du bassin de TIN SERRIRINE, à cheval sur deux unités structurales majeures représentées dans la **figure II.3** :

- Le socle précambrien.
- La couverture paléozoïque.

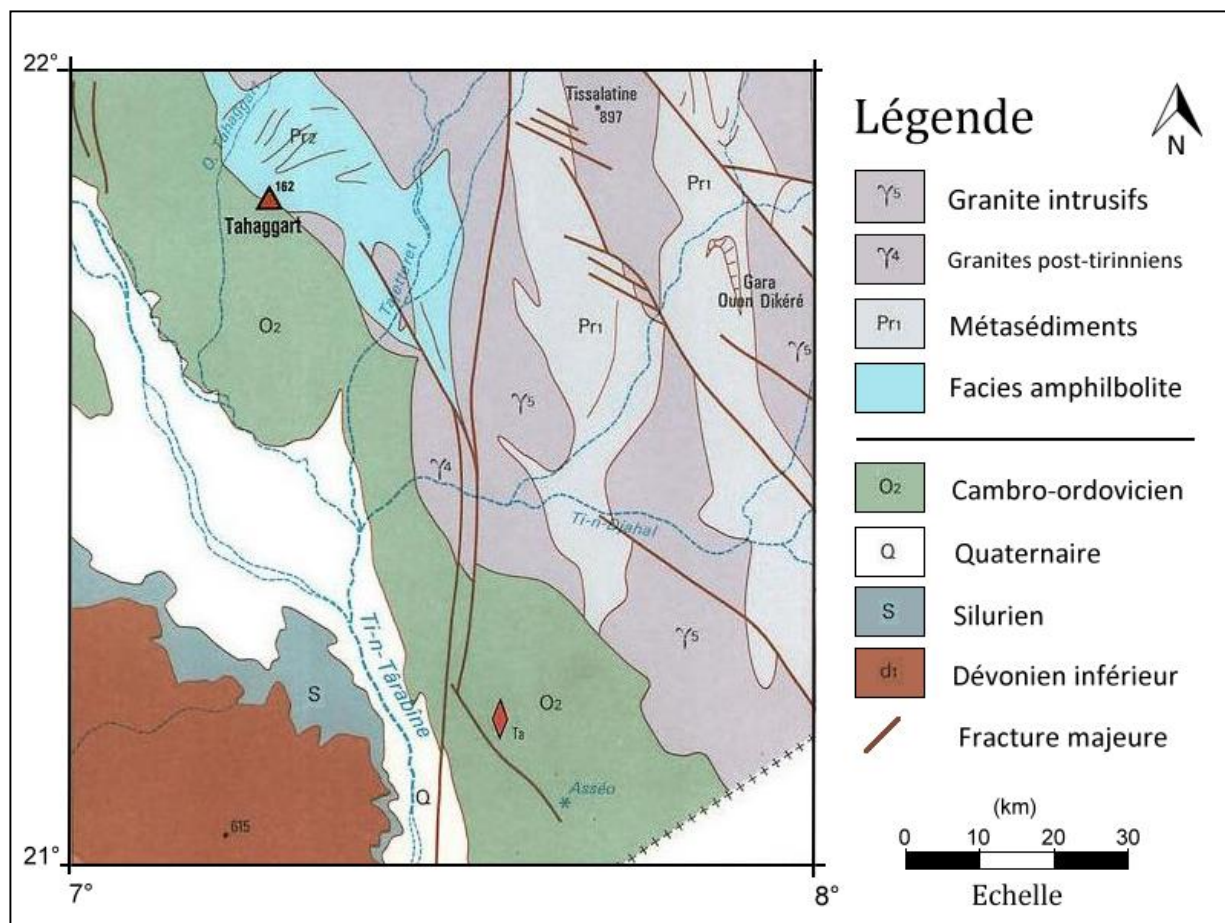


Figure II.3 Carte geologique de la région d'Asséo (Extraite de la carte géologique et gitologique du Hoggar, Société nationale de recherches et d'explorations minière – 1977)

a) Le socle précambrien :

Il occupe la partie Est du périmètre d'étude. Quatre séries ont été distinguées :

1- Le protérozoïque inférieur :

Il est granito-gneissique, intensément métamorphisé et granité. Il affleure à l'Est du grand accident 7°30, et appartient ainsi à une superstructure : le môle

d'ISSALANE que l'on rattache au Hoggar oriental. Les faciès principaux constituant cette série sont granito-gneissiques.

2- Le Protérozoïque moyen :

C'est une série métamorphique intensément plissée, qui affleure dans la partie Nord de la feuille ASSEO. Cette série métamorphique est caractérisée par des alternances où les gneiss prédominent sur les autres faciès (ils représentent 60 à 70% des affleurements de la série). Cependant, dans la série on distingue :

- Une partie inférieure où les gneiss et les amphibolites sont prédominants ;
- Une partie supérieure où prédominent les quartzites et les micaschistes.

b) La couverture sédimentaire Paléozoïque :

Elle représente environ les trois quarts des affleurements de la région étudiée. Elle est constituée de terrains dont l'âge va du Cambro-ordovicien au Dévonien inférieur.

Les formations sédimentaires sont essentiellement gréseuses, continentales, représentant les Tassilis internes (Ordovicien) et externes (Dévonien inférieur) séparés par une sédimentation marine essentiellement argileuse du Silurien (sillon intra-Tassilien).

Dans la couverture sédimentaire on distingue :

1- Le Cambro-ordovicien :

Il repose directement sur le socle pénéplaine, et se subdivise en trois unités majeures :

- **L'unité inférieure :** C'est une formation fluviatile, qui débute par un conglomérat de base à dragées de quartz hétérométriques, monogéniques à ciment siliceux, ferrugineux, parfois argileux. La puissance de ce conglomérat est variable, de quelques centimètres à quelques mètres. Cette unité dont l'épaisseur peut dépasser 60 mètre se termine par une importante surface de ravinement.

- **L'unité médiane** : Au-dessus de la surface de ravinement, l'unité médiane débute par une tillite. C'est un conglomérat hétérométrique, polygénique. Les éléments de ce conglomérat sont soit des galets de l'unité inférieure, soit des galets du socle (granite, gneiss ...). La taille des éléments est variable, de quelques centimètres à près d'un mètre. La matrice est gréseuse, micro-conglomératique. Vers les sommets de l'unité, les grès sont de couleur ocre à brunâtre, à grains grossiers. L'épaisseur de cette unité est d'environ 50 m. L'unité est limitée au sommet par une surface ferrugineuse, ondulée, avec des figures d'érosion glaciaire.
- **L'unité supérieure postglaciaire** : Au-dessus du plancher glaciaire vient un plaquage argilo-gréseux, surtout visible dans le nord et le centre des terrains sédimentaires. Les grès sont en plaquettes, à éléments de quartz fin, riche en micas, à ciment argilo-ferrugineux. La puissance de ces niveaux est d'environ trois mètres. Les niveaux argilo-gréseux sont surmontés par des grès grossiers à fins, à ciment ferrugineux. L'épaisseur de ce niveau ne dépasse pas 6m. Au-dessus viennent des grès blanchâtres à sombre, de granulométrie moyenne à micro-conglomératique. Ils sont constitués de grains de quartz hétérométriques. Arrondis à sub-arrondis, montrant un mauvais classement. Leur puissance maximale est de 4m. L'épaisseur de l'unité supérieure ne dépasse pas dans son ensemble 10m.

2- Le Silurien :

Il correspond à une période de transgression marquée par l'installation d'une mer, Les dépôts argileux marins du Silurien n'ont été observés que sur des carottes de sondage. Le silurien argileux a une puissance de l'ordre de 40 à 50m. A l'Est de l'oued de TIN SERRIRINE, on observe certains « ilots » argileux, sous forme de petites bulles ayant résisté à l'érosion. Il s'agit de minéraux argileux à lits blanchâtres, leur puissance est de l'ordre de 8m.

Les niveaux argileux sont coincés entre la limite supérieure de l'Ordovicien et les conglomérats sombres à galets argileux de la base du Dévonien inférieur. Par contre, la partie supérieure de la série silurienne, régressive, marquant le retour à des conditions continentales, s'observe bien à l'oued de TIN-TARAHINE.

Le silurien y est représenté par une méga-séquence régressive de trois termes :

- Calcaires lenticulaires ;
- Alternances argilo-gréseuses ;
- Argiles blanchâtres.

3. Le Dévonien Inférieur :

Avec le Dévonien inférieur, nous avons un retour à une sédimentation gréseuse continentale. Les dépôts présentent ainsi une grande ressemblance avec ceux de l'Ordovicien. La série a été subdivisée en cinq assises (A-E), toutes gréseuses mais montrant des caractéristiques sédimentologiques différentes et séparées les unes des autres par des surfaces de discontinuités souvent très importantes.

Entre les assises A et B s'installe un épisode volcanique basaltique.

- **L'assise A :** Elle débute par un conglomérat à dragées de quartz blanc, à ciment siliceux et ferrugineux, C'est un conglomérat à éléments arrondis de quartz hétérométriques, relativement bien classés. Au-dessus du conglomérat viennent des grès grossiers rarement fins à passées micro-conglomératique, à stratification oblique. Ces grès sont à éléments de quartz grossiers à ciment siliceux et ferrugineux. L'assise A se termine souvent par un niveau gréseux très silicifié et une surface ferrugineuse. Les grès sont à éléments de quartz, sub-arrondis à arrondis.
- **L'assise B :** Au-dessus de l'épisode volcanique qui s'intercale entre les deux assise A et B vient l'assise B avec une puissance variant de 1 à 7m. L'assise débute par un niveau conglomératique ou micro-conglomératique à éléments de quartz et plus rarement de feldspaths sub-arrondis et mal classés. Le ciment est ferrugineux. Ce conglomérat contient parfois des éléments argileux qui semblent appartenir au niveau d'altération sous-jacent. L'assise se poursuit par des grès à grains moyens à grossiers, qui ont une stratification oblique. Le ciment est siliceux, et on peut trouver aussi des feldspaths altérés et des muscovites. Du point de vu sédimentologique. Les assises A et B sont similaires.
- **L'assise C :** Elle est constituée de grès à grains fins à moyens avec parfois des niveaux conglomératiques en petits bancs. Les grès sont essentiellement constitués de quartz et de rares petits grains de feldspaths rosâtres donnant une teinte rose-violacée. Les grains sont anguleux à sub-anguleux et parfois légèrement arrondis, avec un mauvais classement. Le ciment est argileux ;

l'altération des feldspaths donne à ces grès, une nature arkosique. Les stratifications obliques ne s'observent qu'à la base de l'assise, une importante surface durcie (discontinuité régionale) marque la limite supérieure de l'assise. L'épaisseur totale de celle-ci varie entre 15 à 35m.

- **L'assise D :** L'assise D est composée de grès fins, saccharoïdes mal consolidés friables au coup du marteau. Les bancs sont puissants et les stratifications obliques peu représentées. Les grès composés de grains de quartz sub-arrondis, ils sont relativement bien classés. Le ciment est argileux et ferrugineux. Dans certains bancs on observe de rares micas ainsi que des minéraux opaques en petits grains. L'épaisseur de cette série peut atteindre 30m.
- **L'assise E :** Cette assise n'a été observée qu'au niveau d'une seule bulle. Elle est représentée par des grès très fins, bien liés, de couleur brune à violacée, riche en micas. Vers le sommet des stratifications obliques y sont observées. L'épaisseur de cette série atteint 8m.

➤ **L'épisode volcanique basaltique :**

Entre les assises A et B, un épisode volcanique vient s'intercaler. Les observations de terrain montrent qu'il s'agit d'un volcanisme inter-stratifié dans le dévonien inférieur. Les laves qui constituent la partie inférieure de cet épisode sont basaltiques, de texture doléritique.

La puissance moyenne des basaltes est de l'ordre de 2 à 4m. Ce niveau s'amincit vers le nord jusqu'à disparaître complètement. La partie supérieure de cet épisode est représentée par des niveaux à argiles et hydroxydes de fer, dont la puissance est de l'ordre de 4m, la puissance maximale des formations volcaniques est de 7,5m.

➤ **Tectonique de la région :**

Le bassin de TIN SERIRINE est une structure négative peu inclinée, de type Graben-Synclinal, limitée par des accidents tectoniques importants, d'orientation subméridienne, Le pendage des couches sur le flanc du bassin est doux (10° à 12°) par rapport à son axe ; dans sa partie axiale il est subhorizontal. Les blocs sont très tectonisés de direction préférentielle N-S. L'amplitude des rejets qui va de quelques dizaines à une centaine de mètres et même plus. Dans notre région d'étude le principal axe tectonique qui structure le bassin est :

✓ La faille 7°30'

Outre les accidents tectoniques, de nombreux systèmes dykes, des filons quartzeux au niveau du socle et des zones en partie broyées, fissurées, sont observable dans la couverture sédimentaire (**RAPPORT PRELIMINAIRE 1970-1979, SONAREM**).

L'étude de ces grands ensembles du socle et de leurs limites conduit à admettre des mouvements verticaux pendant et après l'orogénèse du Précambrien (**M.LELUBRE, 1952**).

2.3. Topographie de la région :

La topographie est généralement plane, avec parfois des reliefs constitués soit d'affleurement du socle, soit de buttes tassilliennes formant parfois des chaines continues. Ces reliefs sont représentés dans la **figure II.03** La région est très désertique avec une végétation très rare, clairsemée dans les fonds des oueds.

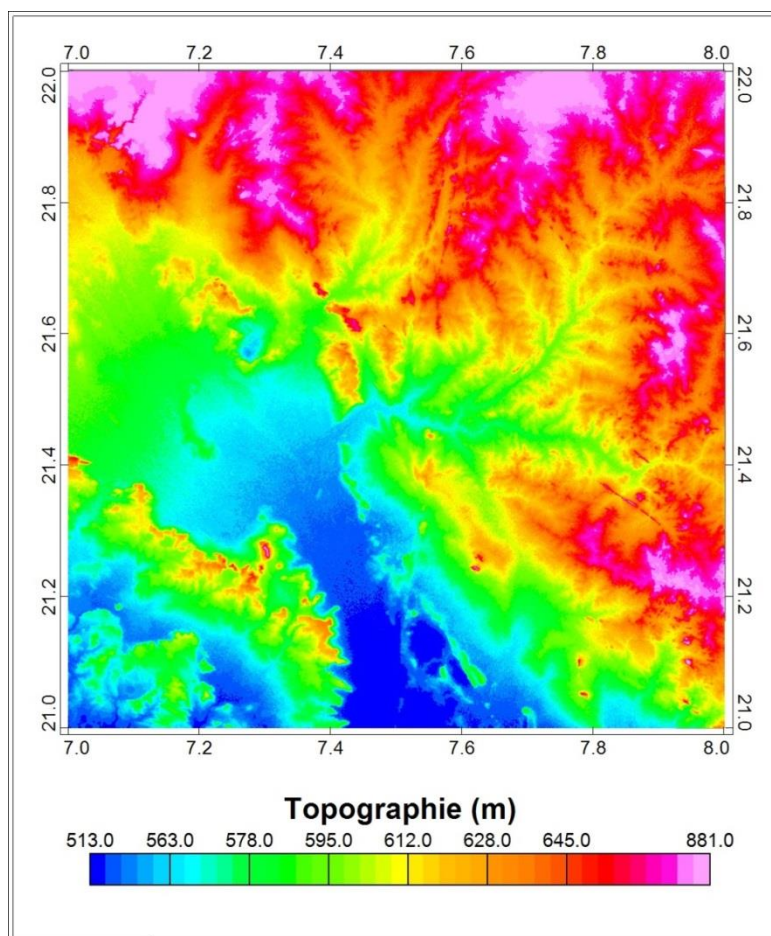


Figure II.04 : Carte topographique de la région d'Asséo

2.4. La Minéralisation :

La minéralisation uranifère peut être localisée aussi bien dans les terrains d'altération que dans les parties marginales des premiers niveaux de base de la couverture sédimentaire paléozoïque.

La minéralisation de la zone de Tahaggart est localisée au contact entre le socle cristallin éburnéen et les sédiments du Cambro–Ordovicien. Elle est représentée par les produits secondaires d'uranium riche en phosphore (autunite, thorbernite) sous forme d'agrégats lamellaires fins, de nids, de plages et en fines imprégnations dans le ciment et veinules (**A.SEMIANI et al**).

Outre le gisement de Tahaggart, d'autres indices (Timouzzeline et Tamart-N-Blis) sont mis en évidence, et font de cette bordure du bassin paléozoïque (plusieurs centaines de Km²) un district minier intéressant.

A la surface, les secteurs minéralisés sont inégalement distribués. Plusieurs corps minéralisés étirés en direction Nord-Ouest - Sud Est, avec un pendage au Sud-Ouest, ont été découverts sur le territoire de l'étude (6 Km²). Il a été établi que les parties frontales de ces couches étaient les plus minéralisées (jusqu'à quelques pourcents), avec diminution des teneurs en uranium dans le sens du pendage.

Les épaisseurs des corps minéralisés horizontaux varient de 1 à 8 mètres. Les minéraux secondaires sont : autunite, sabugalite, torbernite, carnotite. Ces minéraux se trouvent sous forme de nids et de veinules.

CHAPITRE III

Principe théorique de la prospection spectrométrique

III. Principe théorique de la prospection spectrométrique

La radioactivité naturelle et la spectrométrie :

La radioactivité naturelle est- définie comme étant la transformation spontanée d'un isotope instable d'un élément chimique en isotope d'un autre élément avec émission des rayonnements.

La prospection spectrométrique est une méthode d'exploration géophysique basée sur l'analyse des spectres gamma des éléments radioactifs, elle est utilisée dans la recherche des éléments naturellement radioactifs, les levées radiométrique peuvent être pedestre, aéroportés, autoportés ou dans les trous de sondage.

1. Notion atomique :

1.1. Structure de l'atome :

Atome : (Du grec atomos (indivisible)) c'est une particule constituant essentielle de la matière caractéristique d'un élément chimique. L'étymologie grecque de mot « atome » souligne le caractère indivisible de cette « particule fondamentale », qui était considéré comme indestructible. En réalité il n'est pas indivisible puisque il est constitué d'un « noyau central » ou est concentrée la presque totalité de la masse, ce dernier se compose des particules chargées positivement appelées « protons » et d'autres non chargées appelées « neutrons ». Sur des orbites ou couches bien définies situées à différentes distances du noyau, gravitent des particules chargées négativement appelées « les électrons ».

Nous considérerons l'atome comme la petite particule d'un élément déterminé qui puisse participer à une réaction chimique.

a. Les nucléons : ce sont des :

Protons : avec une charge électrique positive égale a la charge élémentaire

$$[e=1.60 \cdot 10^{-19} \text{colomb}]$$

Neutrons : sont électriquement non chargés

Ces deux particules ont presque la même masse : $[m=1.66 \cdot 10^{-27} \text{kg}]$

b. Les électrons :

Un électron est un grain d'électricité négative, sa charge électrique égale en valeur absolue à la charge élémentaire « e » et sa masse « m » :

$$[e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ Colomb}] \quad \text{et} \quad [m = 9.1 \cdot 10^{-37} \text{ kg}]$$

1.2. Quelques définitions élémentaires :

- **Numéro atomique** : il est désigné par le symbole Z, représentant le nombre total de protons de noyau ou d'électrons orbitaux qui caractérisent un élément, c'est le numéro atomique.
- **Nombre de mass** : il est désigné par le symbole A c'est la somme de nombre de protons et le nombre de neutrons, le nombre de neutrons est données par : $A - Z$
- **Nucléide** : C'est un ensemble d'atomes identique, ayant le même noyau et le même cortège d'électrons : on note un nucléide X_Z^A
- **La stabilité et l'instabilité des nucléides** : Lorsque un nucléide reste a son état initial en absence de toute intervention extérieur, on dit que ce nucléide est stable

Exemple : Un nucléide instable est un nucléide qui, spontanément subit une suite de transformation, il est alors appelé nucléide radioactif.

• Les isotopes :

On appelle isotope, les nucléides ayant le même nombre de protons, mais le nombre de neutrons est différent. Alors, Les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques mais leurs propriétés nucléaires sont généralement très différentes.

• L'abondance relative des différents isotopes :

On désigne par abondance naturelle, le pourcentage en nombre d'atomes de chacun des isotopes présents dans le mélange naturel. Cette abondance est équivalente à la fraction molaire de chaque isotope stable.

Exemple : L'uranium naturel est composé de trois principaux isotopes (**Garnier et Laplace, 2001**) :

- l'uranium 238 (99,2739 d'abondance naturelle)
- l'uranium 235 (0,7198 - 0,7202 %)
- l'uranium 234(0,0050 - 0,0059 %)

1.3. Unités et grandeurs :

a. L'activité radioactive :

L'activité d'une source radioactive est le nombre de transformations ou désintégration radioactives qui s'y produisent en une unité de temps (seconde). L'unité d'activité dans le système international est le **Becquerel (Bq)** qui correspond à une désintégration par seconde. Cette unité possède un inconvénient ; elle est très petite, ce qui conduit souvent à utiliser une autre unité qui est le Curie. (**Serra, 1979**)

Le curie (Ci) est l'activité d'une quantité de radioélément ou de nucléide radioactif dans laquelle le nombre de désintégration par seconde est de $3.7 \cdot 10^{10}$

$$1\text{Ci} = 37 \text{ milliard de (Bq)}$$

Cette unité correspond à l'activité d'un gramme de Radium.

b. L'exposition :

L'exposition a pour but de caractériser un faisceau de rayons par l'ionisation que ces rayons provoquent dans l'air, tout au long de leur trajectoire. Son unité est : **coulomb par Kilogramme (C/Kg)**

c. La dose absorbée :

Lorsqu'un rayonnement traverse la matière, une interaction se produit avec les atomes et les molécules du milieu qu'il traverse (**figure III.1**), ceci entraîne une perte d'énergie de la part du rayonnement dans la matière

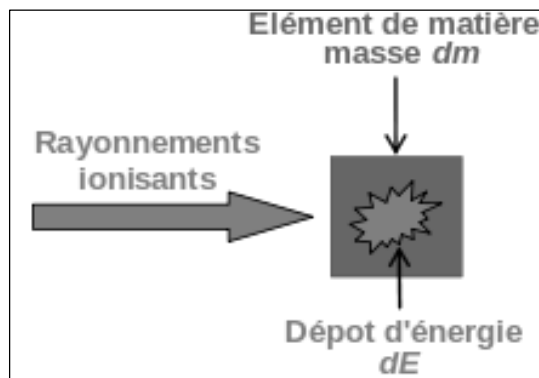


Figure III.1 : Interaction des rayons avec la matière

Si la masse du volume est Δm et l'énergie cédée par le rayonnement dans ce volume est E, alors la dose absorbée sera donnée par l'expression suivante **(1)** :

$$D = \frac{E}{\Delta m} \dots\dots\dots (1)$$

L'unité internationale d'absorption est le **gray(Gy)** qui est la dose absorbée dans un élément de matière de masse (1Kg) auquel les rayonnements ionisants communiquent une énergie de (1 joule)

$$1(\text{Gy}) = 1 \text{ joule} / \text{Kg}$$

Le débit de dose s'exprime en **(Gray/heure)**

d. La dose équivalente :

C'est la dose absorbée multipliée par un facteur de pondération dont l'unité de mesure est le **sievert (Sv)**, afin de tenir compte de l'effet biologique qui s'intéresse à l'effet « nocivité » des différents types de radioactivité sur les tissus vivants. Le facteur de pondération dépend du type de rayonnement.

e. La dose efficace :

La dose efficace qui se mesure également en (Sv) prend en compte le type de tissu soumis à la radiation. Donc, c'est la dose équivalente multipliée par un facteur de pondération tissulaire. Ce facteur dépend de la radiosensibilité de chaque organe et la gravité des effets induits.

2. Les rayonnements naturels :

La désintégration nucléaire est la transformation des isotopes instables avec émission de certaines particules.

Les émissions sous forme de rayonnement des éléments radioactifs naturels ont été étudiées pour la première fois par **Ernest RUTHERFORD (1871-1937)**. Il montre que ces rayonnements sont de 3 types désignés par ces 3 lettres (α , β , γ). Chacun de ces éléments présente une pénétration différente :

2.1. Les Rayons alpha (α) :

Ces particules sont équivalentes à un noyau d'Hélium H_4 , leur charge électrique est de +2 et leur masse est de 4.00389. Ils sont éjectés des noyaux plus lourds pendant leurs désintégrations.

Si on appelle X le noyau père et Y le noyau fils, l'équation de désintégration (2) s'écrit :



(2)

Seuls les noyaux lourds de $A > 200$ subissent une désintégration alpha. Les rayons alpha sont facilement arrêtés par une feuille de papier (ou quelques microns d'une feuille d'aluminium).

2.2. Les rayons β :

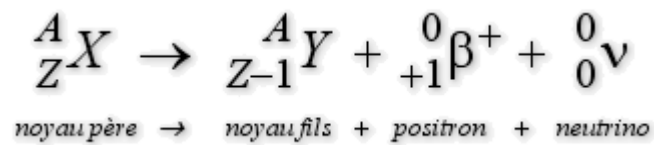
On distingue deux types de rayonnement β :

a. Les rayons β^+ :

La radioactivité bêta plus (β^+) concerne les noyaux instables qui présentent un excès de protons ou, autrement dit, qui possèdent trop peu de neutrons. La particule (β^+) est appelée positron. C'est une particule qui a la même masse que l'électron mais qui a une charge opposée, c'est-à-dire une charge positive.

$$e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Si on appelle X le noyau père et Y le noyau fils, l'équation de désintégration (3), β^+ s'écrit :

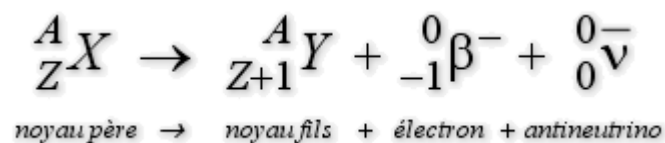


(3)

b. Les rayons β^- :

La radioactivité bêta moins β^- concerne les noyaux instables possédant un excès de neutrons. La particule β^- est un électron. La notation β^- est une notation historique qui a été adoptée alors que l'on ne connaissait pas encore la nature physique de cette particule.

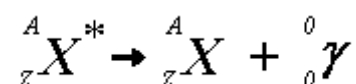
Si on appelle X le noyau père et Y le noyau fils, l'équation de désintégration β^- (4) s'écrit :



(4)

2.3. Les rayons γ :

Le noyau-fils est émis dans un état d'énergie excité X^* , lors de la désexcitation de ce noyau, l'excédent d'énergie se libère sous forme de rayonnement électromagnétique γ , correspondant à l'émission de photons de très haute fréquence : c'est donc un rayonnement très énergétique. L'équation de désintégration (5) s'écrit :



(5)

Le rayonnement γ est très pénétrant, il faut une forte épaisseur de béton ou de plomb (quelques cm) pour s'en protéger.

Le rayonnement gamma s'étend dans le domaine de fréquence (*figure III.2*) à partir de 10^{19} Hz jusqu'à 10^{21} Hz (10^{-10} m à 10^{-13} m).

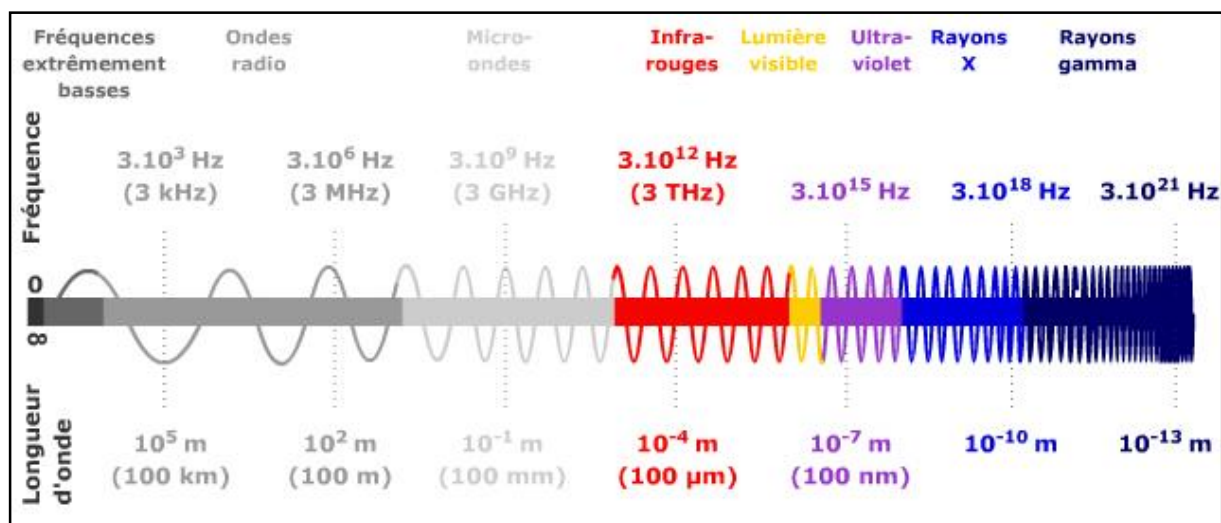


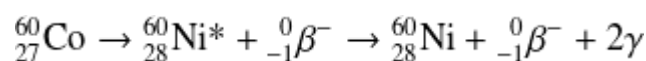
Figure III.2 : Les différents domaines du spectre électromagnétique

Exemple :

Émission gamma du nickel 60 (présent dans une source de cobalt 60)

Les sources de cobalt 60 sont très utilisées dans l'industrie. Le rayonnement gamma émis par le noyau fils du cobalt 60, le nickel 60, est mis en œuvre dans de grands irradiateurs pour diverses applications : modification des propriétés physico-chimiques de certains matériaux, stérilisation du matériel chirurgical, amélioration de la conservation des aliments ...etc.

L'équation de désintégration (6) du cobalt 60 s'écrit :



(6)

Deux photons γ sont émis par le noyau fils de nickel 60, produit à l'état excité. Ces photons ont une énergie respectivement de 1,17 et 1,33 MeV, correspondant aux différences d'énergie des niveaux considérés.

On peut représenter le processus sur le diagramme suivant *figure III.3* :

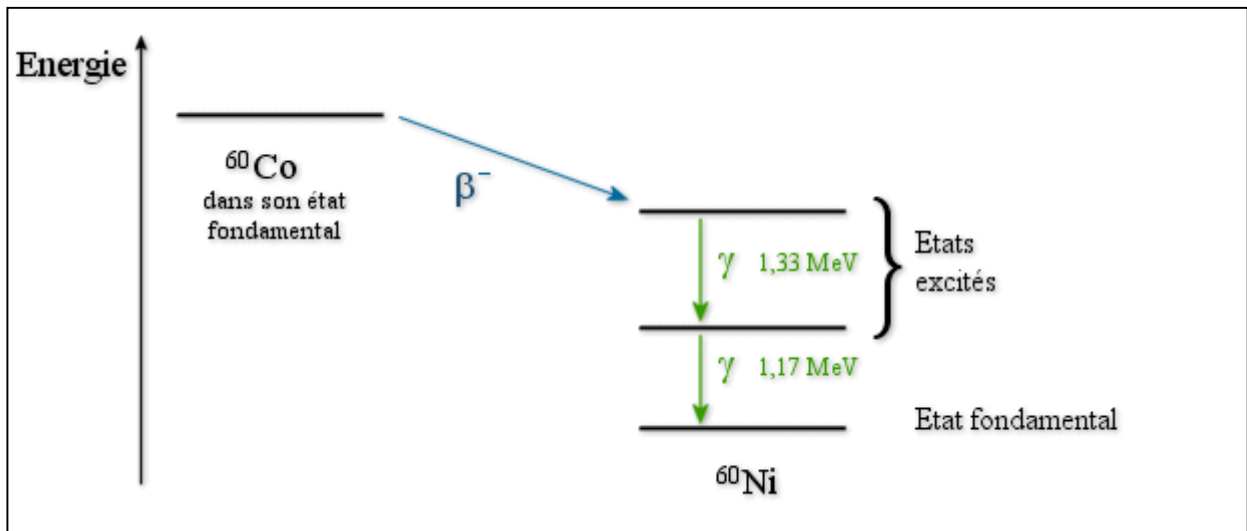


Figure III.3 : Diagramme en énergie du noyau de nickel 60. Emission de deux photos gamma à la suite de la désintégration beta moins.

3. Interaction des particules avec la matière :

Les interactions « particules-matière » sont liées au transfert d'énergie de la particule vers les atomes de la matière, On va s'intéresser à l'interaction des particules α , β , et γ avec la matière.

Le pouvoir de pénétration des rayonnements diffèrent selon le type du rayonnement (**figure III.4**). Pour les particules α la pénétration est faible dans l'air. Une feuille de papier suffit de l'arrêter, pour β la pénétration est aussi faible, les particules peuvent atteindre quelques mètres dans l'air. Une feuille d'Aluminium de quelque millimètre peut l'arrêter. (**Seguin, 1971**)

Pour les rayons gamma la pénétration est très grande. Plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb peut l'arrêter.

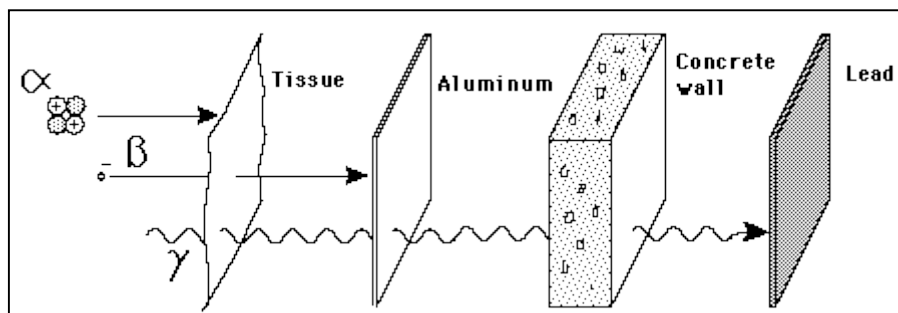


Figure III.4 : Pouvoir de pénétration des rayonnements

3.1. Interaction des particules alpha :

La perte d'énergie essentiellement par l'interaction électromagnétique avec les électrons atomique. Importante création de paires électrons-ions : On dit que le rayonnement alpha est fortement ionisant et les parcours de toutes les particules sont identiques. Dans l'air, le parcours est de quelques centimètres.

Une particule alpha de 5.3 MeV peut traverser une distance de 4cm dans l'air et de 50 μm dans les tissus humains.

3.2. Interaction des particules Beta :

Leur trajectoire est en forme de ligne brisée (**figure III.5**), les particules bêta sont nettement moins ionisantes que les particules alpha.

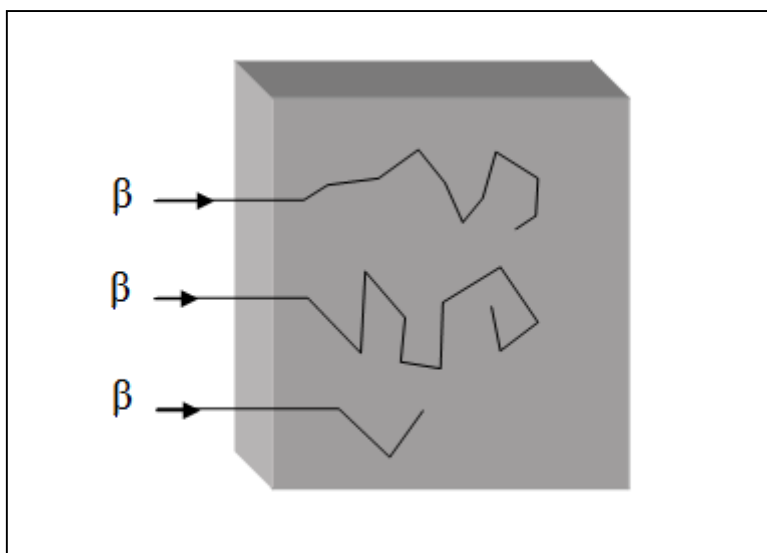


Figure III.5 : Trajectoire imaginaire de la particule β dans la matière

Une particule beta de 2MeV traverse une distance de 6 mètres dans l'air, 1cm dans l'eau et 3mm dans l'aluminium

3.3. Interaction des rayons γ :

L'interaction des photons gamma de haute énergie est pour l'essentiel une interaction avec les électrons atomique, trois types d'interactions peuvent se produire en fonction de l'énergie de photon :

a) L'effet photoélectrique :

C'est un processus par lequel le photon incident, cède toute son énergie à un électron des couches profondes qui est alors éjecté de l'atome : il y a absorption totale du photon et ionisation de l'atome. « **figure (III.6)** » :

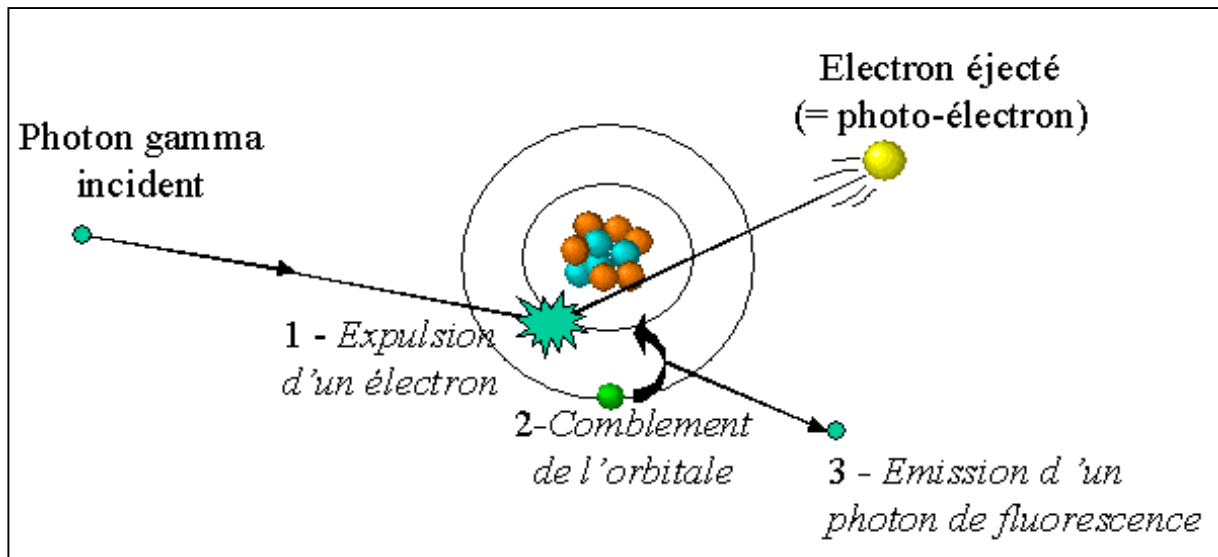


Figure III.6 : Effet photoélectrique

L'énergie de l'électron est égale à l'énergie du photon incident moins l'énergie de liaison de l'électron qui à été éjecté (7):

$$E_{e^-} = h\nu - W_e$$

(7)

L'atome réorganise ensuite son cortège électronique provoquant l'émission des photons secondaire.

b) La diffusion du Compton :

Le photon incident cède une partie de son énergie à un électron des couches périphérique de l'atome, qui est éjecté. Il apparait un nouveau photon diffusé. Il y a donc diffusion du photon incident et ionisation de l'atome. (**Figure III.7**)

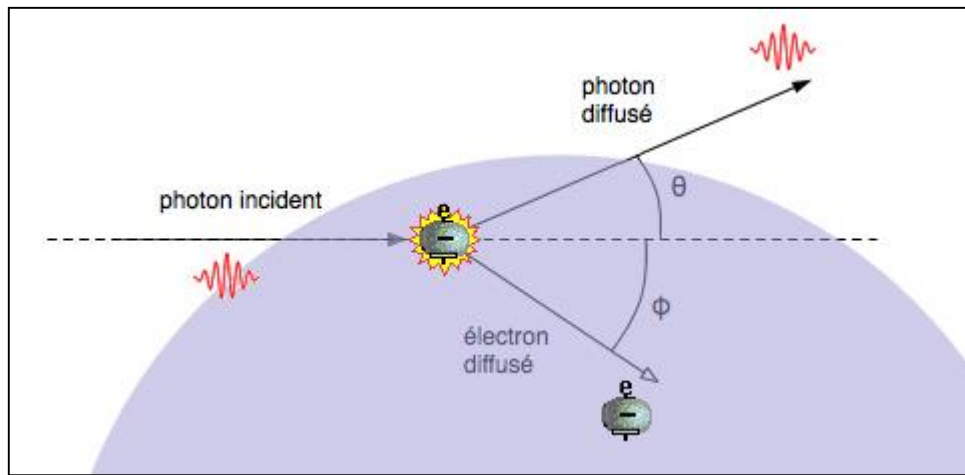


Figure III.7 : Diffusion Compton – Collision d'un photon avec un électron au repos

c) La création de paire e^+ , e^- :

C'est un processus par lequel le photon incident disparaît au voisinage du noyau, son énergie se matérialise pour donner naissance à une paire e^+ , e^- . Ce processus est montré dans la **figure III.8**.

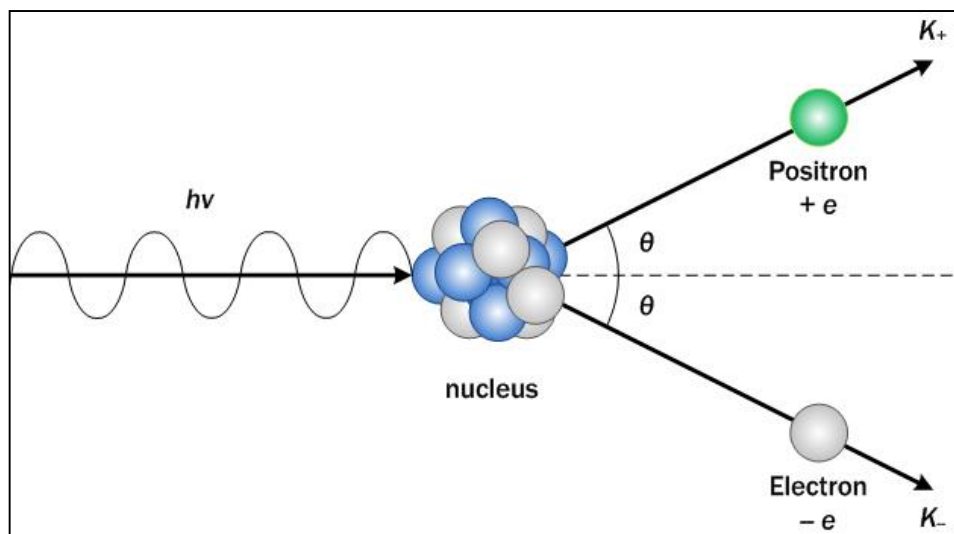


Figure III.8 : Processus de la création de paire

4. La désintégration radioactive

Le taux de désintégration est proportionnel aux nombre d'atomes présents : Soit ∂N le nombre de noyaux s'étant désintégrés dans un court laps de temps ∂t qui est proportionnel au nombre d'atomes « N » qui ne se sont pas désintégrés au temps « t ». (**Curie, 1910**)

La désintégration se fait suivant la loi suivante (8):

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

- λ : est un coefficient de proportionnalité appelé Constante radioactive.
- $N(t)$: Nombre d'atomes à l'instant « t ».
- N_0 : Nombre d'atomes au temps d'origine.
- t : temps.

La période radioactive ou période de « demi-vie » est définie comme la durée nécessaire pour que la moitié des atomes se désintègrent ($t_{1/2}$). L'équation (9) nous montre la relation entre la désintégration au temps $t_{1/2}$ et au temps initial. A partir de cette expression (9) on peut tirer la formule de calcul de la période radioactive (10).

$$\frac{N_{t_{1/2}}}{N_0} = 0.5 = e^{-\lambda t_{1/2}} \dots\dots\dots (9)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \dots\dots\dots (10)$$

5. Activité radioactive

L'activité moyenne A d'un échantillon radioactif est le nombre moyen de désintégrations qui se produisent par seconde, son unité de mesure est le **Becquerel (Bq)**.

On exprime la relation qui définit l'activité radioactive par l'équation (11) :

$$A(t) = -\frac{\partial N}{\partial t} \dots\dots\dots (11)$$

➤ **La loi de l'activité radioactive :**

$$A(t) = -\frac{\partial N}{\partial t} \dots\dots\dots (11)$$

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

On remplace $N(t)$ dans l'expression (11) par l'équation (8)

On obtient :

$$A(t) = -\frac{\partial(N_0 e^{-\lambda t})}{\partial t} = -N_0 \frac{\partial(e^{-\lambda t})}{\partial t} = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$A(t) = \lambda[N_0 \cdot e^{-\lambda t}]$$

$$A = \lambda N$$

$$\text{En particulier : } A_0 = \lambda N_0$$

$$\text{Et comme : } A(t) = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

La loi de l'activité s'écrit comme :

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (12)$$

On constate que l'expression de l'activité radioactive possède une forme exponentielle. La courbe de décroissance radioactive est représentée dans **la figure III.9.**

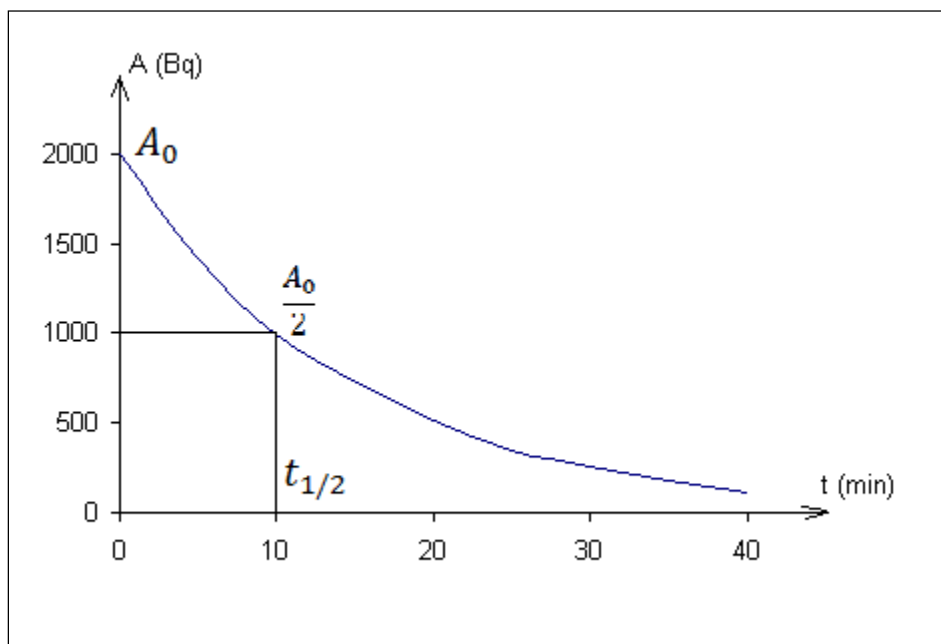


Figure III.09 : Courbe de décroissance radioactive

6. La désintégration successive :

Lors d'une désintégration, l'élément radioactif se transforme en un autre élément appelé produit de désintégration. Une désintégration peut être représentée graphiquement par un schéma de désintégration (**figure III.10**), particulièrement utile lorsque la désintégration peut présenter des variantes complexes. Ce produit de désintégration est généralement lui-même radioactif, et sa propre désintégration conduira à un troisième élément (**figure III.11**), et ainsi de suite. De proche en proche, le noyau radioactif perd ses nucléons en excès (par la radioactivité alpha) ou ses neutrons en excès (par radioactivité bêta), jusqu'à atteindre une configuration stable non radioactive.

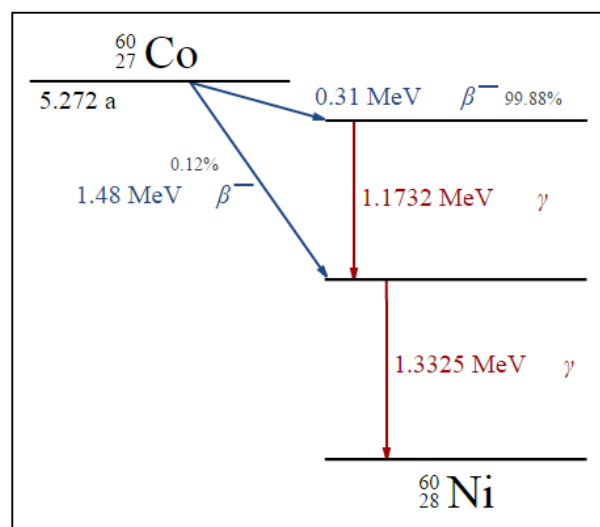


Figure III.10 : Exemple du schéma de désintégration du cobalt ^{60}Co

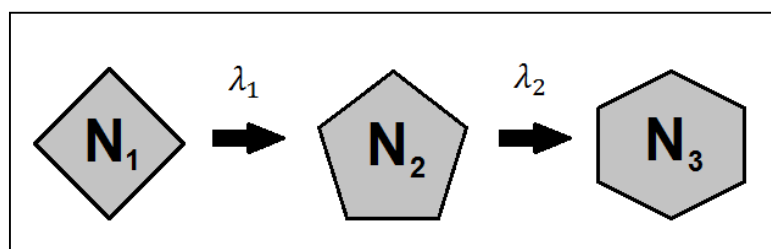


Figure III.11 : Succession de désintégration d'un isotope instable « père »

6.1. L'équilibre radioactif « L'équilibre séculaire » :

Cas où la décroissance du noyau-père est négligeables devant noyau-fils si $\lambda_2 \gg \lambda_1$, c.-à-d. si $T_2 \ll T_1$, c.-à-d. si le noyau B se désintègre beaucoup plus rapidement que sa production par Noyau-père A.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

6.2. L'équilibre transitoire :

Cas où l'activité du noyau-fils est plus grand que l'activité du noyau-père (mais pas beaucoup plus grand)

Si $\lambda_2 > \lambda_1$, c.-à-d. si $T_2 < T_1$, c.-à-d. si le noyau B se désintègre un peu plus rapidement que sa production par Noyau-père A

$$\frac{N_2}{N_1} = cte$$

7. La spectrométrie à rayon gamma :

La spectrométrie gamma est une technique de mesure nucléaire très utilisée pour identifier les éléments radioactifs par la mesure de l'énergie des rayonnements gamma émis, puisque chaque photon du rayonnement γ se caractérise par sa propre énergie qui est caractéristique de la source isotopique.

La radioactivité γ naturelle est due à 3 éléments principaux (^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th) où a leurs descendants qui émettent de nombreux rayons sous des énergies très variées.

L'enregistrement est reproduit sous la forme d'un spectre de tension pulsionnelle complexe (**figure III.12**).

- Le potassium ^{40}K caractérisé par un photon gamma d'énergie 1.46Mev (^{40}Ar)
- L'uranium ^{238}U caractérisé par un photon gamma d'énergie 1.76Mev (^{214}Bi)
- Le thorium ^{232}Th caractérisé par un photon gamma d'énergie 2.62Mev (^{208}Tl)

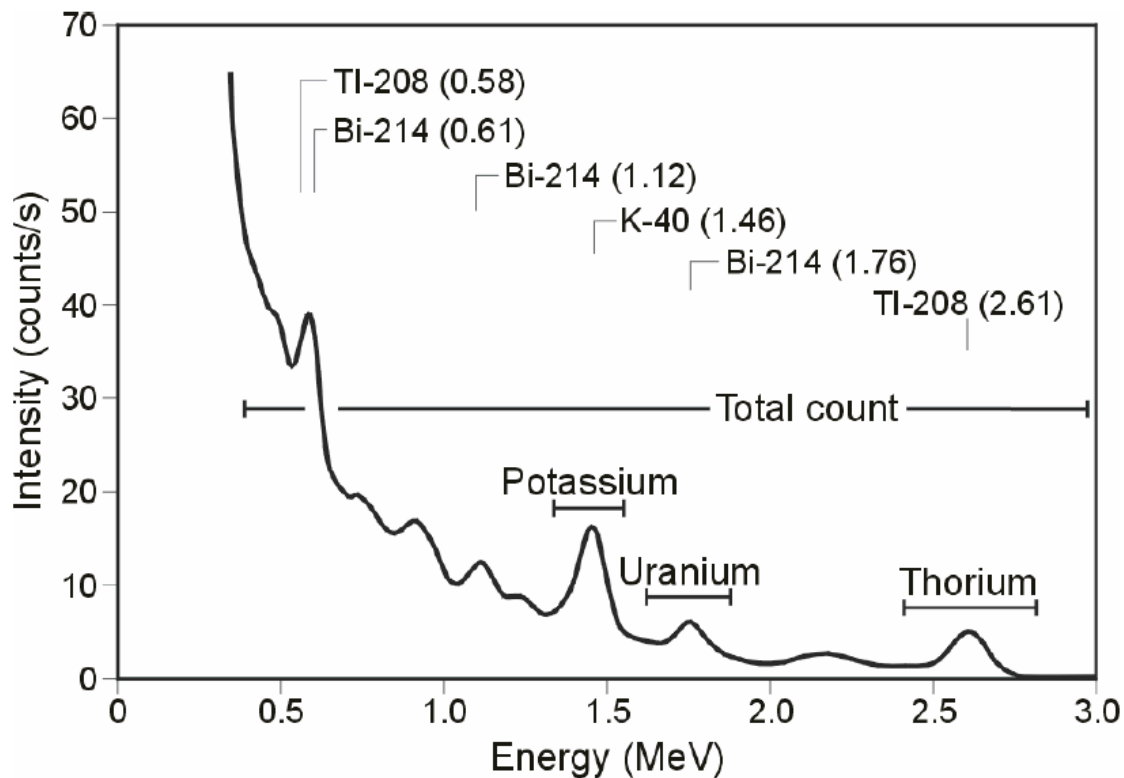


Figure III.12 : Spectre d'énergie de la radioactivité naturelle

Théoriquement l'enregistrement des trois éléments dans des « fenêtres » correspondantes au spectre d'énergie gamma complet permet donc de déterminer la part du rayonnement gamma total revenant à chacun des trois éléments radioactifs principaux, dans la mesure où l'équilibre radioactif est atteint. (**Helmy et Abouelnaga, 2014**)

7.1. Les levés spectrométriques :

Parmi toutes les méthodes de prospection géophysique, la spectrométrie reste une technique la plus simple du point de vue réalisation et la moins coûteuse du point de vue économique.

Un levée spectrométrique peut être pedestre, autoporté ou aéroporté selon la dimension du corps recherché et on peut prendre des mesures dans les trous de forage (radio carottage) à l'aide d'un outil spéciale (sonde de spectrométrie des rayons gamma naturelles).

7.2. Instrument de mesure :

Les rayons gamma sont détecté grâce à leur capacité d'ionisation, de ce fait

plusieurs instrument ont été utilisés à pour la mesure de la radioactivité, à savoir la chambre ionisante, le compteur Geiger, le scintillomètre et le spectromètre à rayon gamma .Ce dernier, dérivé du scintillomètre, actuellement est le plus utilisé. (**Figure III.13**).

Le principe de fonctionnement de cet appareil est basé sur l'utilisation de certains cristaux (généralement l'iodure de sodium activé au thallium) NaI (TI) qui se scintille lorsque des rayons gamma sont absorbés, les photons des cristaux fluorescent sont transformés en impulsion électriques par une photocathode dans une cellule photoélectrique multiplicatrice, ces courant sont amplifiés puis enregistrés. C'est le même principe du scintillomètre sauf que le spectromètre utilise les caractéristiques relatives à l'intensité des rayons gamma des radio-isotopes et donc permet d'identifier les sources de radioactivité et leurs concentrations K, U et Th, en mesurant leurs niveaux énergétique.

Le nombre d'impulsions émises par le rayonnement gamma du K, U et Th ou taux de comptage, est enregistré sur trois canaux, un quatrième canal est utilisé pour le compte total (**SCINTREX,1980**).



Figure III.13 : Spectromètre a rayon gamma GS 256

CHAPITRE IV

**Description du levé aéro-
spectrométrique de la région d'Asséo**

IV. Description du levé de spectrométrie aéroporté de la région d'Asséo « hoggar »

1- Introduction :

L'acquisition spectrométrique peut être effectuée aussi bien au sol qu'à partir d'un aéronef. Bien que le principe ne change pas dans ces deux cas.

En Algérie un levé aérogeophysique a été réalisé dans les années **(1971-1974)** couvrant le territoire Algérien par la société américaine « **Aéro-service corporation** » pour le compte de la société nationale de la recherche et d'exploration minière SONAREM.

Dans notre travail nous sommes intéressés au levé aérospectrométrique qui couvre la région d'Asséo qui fait partie du bouclier du Hoggar.

2- Spécificités du levé de la zone d'étude :

Les survols ont été faits le long des lignes parallèles de direction Est-ouest à une Altitude constante de 150m au-dessus du sol et ils sont accompagnés par des lignes de traverse de direction Nord-sud, les paramètres du levé sont indiqués dans le tableau VI.1. Et une partie des lignes de vol est représentée dans la **figure IV.1**.

Tableau IV.1 : les paramètres du levé réalisé (Bournas, 2001)

Espacement des lignes de vol :	02 Km
Espacement des lignes de traverse :	35 km
Hauteur de vol par rapport au sol (Altitude) :	150 m
Direction des lignes de vol :	Est-Ouest
Direction des lignes de traverse :	Nord-Sud
Distance entre les points d'observation :	46m

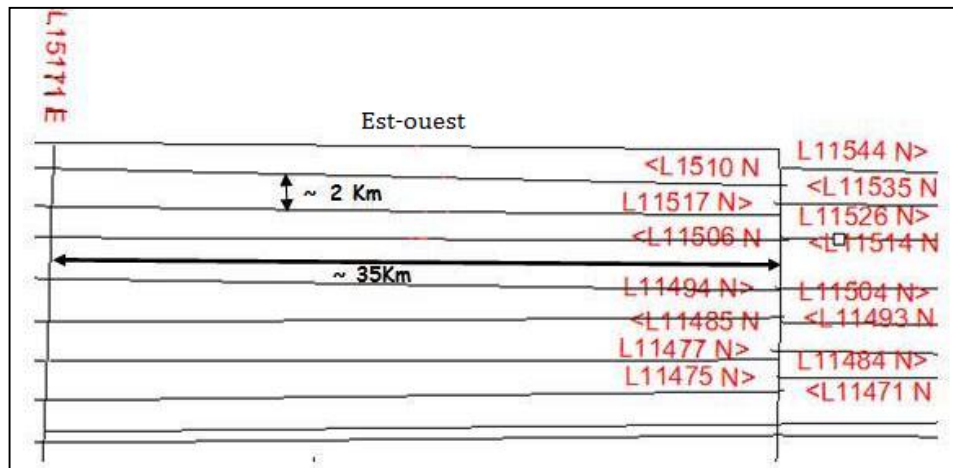


Figure IV.1 : orientation et espacement entre les lignes de vol

3- Appareillage :)

- a) Avion : Deux types,
 - DOUGLAS DC-3 : utilise dans le cas des terrains plats.
 - AERO COMMANDER : utilisé dans le cas des terrains dont topographie variable.
- b) Spectromètre à quatre (04) canaux (TC, K, U, Th) : Utilisé pour l'enregistrement des rayonnements gamma.
- c) Capteur NaI(Tl) d'un volume de 600 pouces pour le DOUGLAS DC-3 et de 800 pouces pour l'AEROCOMMANDER.
- d) Altimètre radar d'une précision de 30 pieds de type HONYWELL MINEAPOLIS pour mesurer l'altitude de vol
- e) Caméra à film continu de 35 mm, possédant un système de numérotage : Enregistre un film pour prendre des photos aériennes.
- f) Boussole magnétique de type SPERRY CL 2, d'une résolution de 1°, Pour contrôler la direction de nord géographique.
- g) Système de navigation : DOPPLER type ADRA-12, pour orienter l'avion et contrôler la distance entre les lignes de vol. (**Bournas, 2001**)

4- Présentation digitale des données :

Les enregistrements d données sont constitués de plusieurs canaux :

- ◆ Coordonnée UTM X en m (mètres).
- ◆ Coordonnée UTM Y en m (mètres).
- ◆ Champ magnétique total en nT (nano – tesla).

- ◆ Compte radiométrique total en cps (coups par seconde).
- ◆ Compte du canal du thorium en cps (coups par seconde).
- ◆ Compte du canal de l'uranium en cps (coups par seconde).
- ◆ Compte du canal du potassium en cps (coups par seconde).
- ◆ Altitude radar en m (mètres).
- ◆ Fiduciel (code ponctuel d'enregistrement).

5- Levé d'acquisition :

Le levé d'acquisition que nous avons traité dans notre cas contient 111 profiles en totalité (*figure IV.2*)

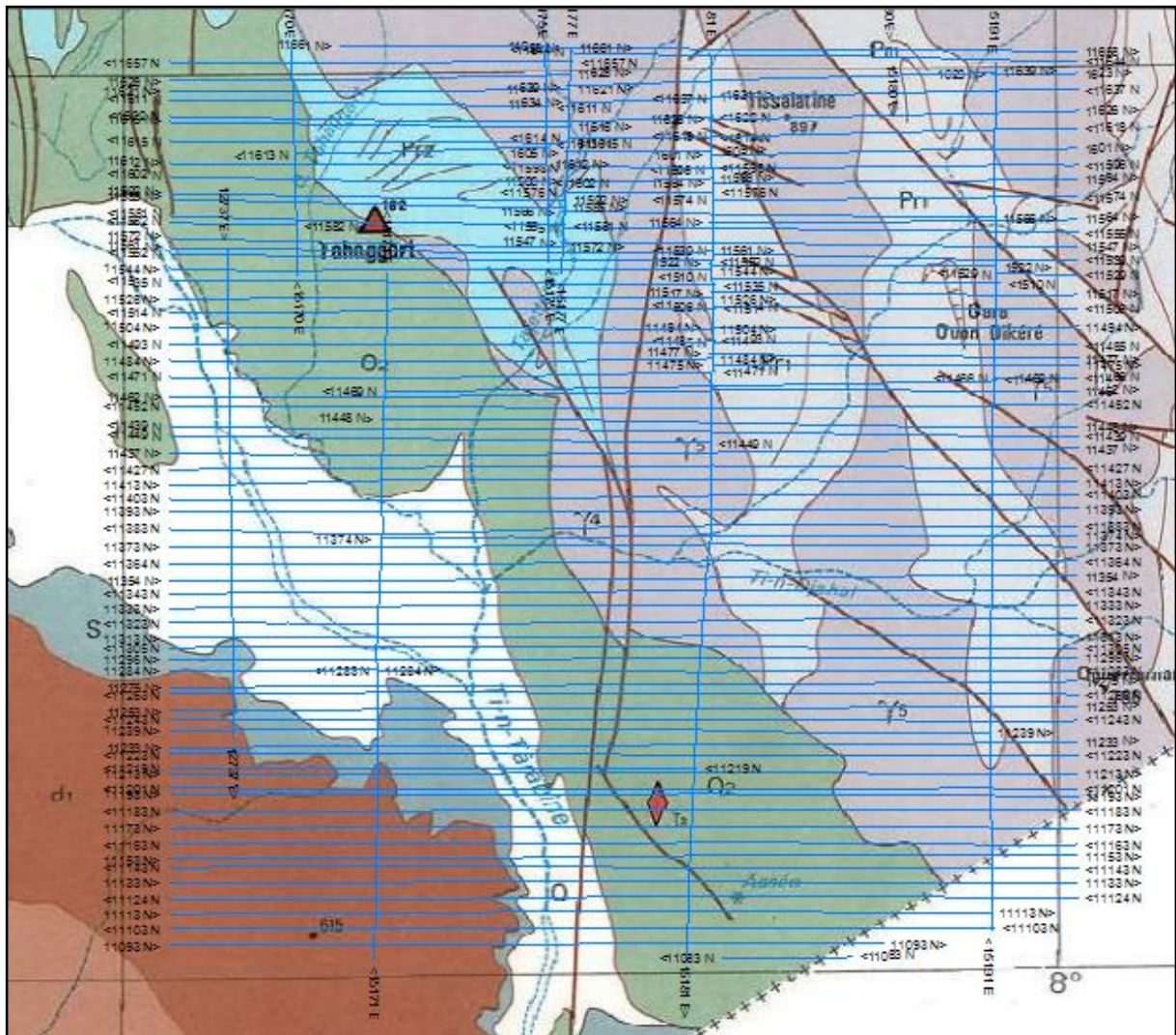


Figure IV.2 – Carte géologique de la région étudiée avec la superposition des lignes d'acquisition de mesure de la spectrométrie.

CHAPITRE V

Traitement des données spectrométriques

V. TRAITEMENT DES DONNEES SPECTROMETRIQUES

1. Prétraitement des données Aérogéophysiques:

Les différentes opérations que nous avons introduit aux fichiers originaux sont les suivantes:

a) Projection des coordonnées:

Les coordonnées **X** et **Y** des points de mesures, sont exprimées en mètre (**Clarke 1880, projection UTM, zone 32 N**), à l'aide du logiciel de traitement (**GEOSOFT**), nous avons calculé les coordonnées géographiques (Longitude, Latitude) correspondantes afin de faciliter la sélection des zones désirées.

b) suppression des valeurs aberrantes:

En utilisant le logiciel, une étude statistique du fichier des données nous permet de localiser les valeurs erronées si elles existent, ces valeurs aberrantes sont dues aux erreurs d'enregistrement. Les valeurs aberrantes peuvent être supprimées manuellement.

2. Traitement des mesures brutes :

Pour que les données soient exploitables et aient un intérêt géologique et minier, il est indispensable de recourir à un étalonnage adéquat du spectromètre et de prendre des précautions drastiques dans l'acquisition et le traitement des mesures. L'examen des enregistrements spectrométriques de la région d'étude montre qu'elles sont affectées par différentes sources de bruit du fait que les corrections qui s'imposent, à savoir, le temps mort, le bruit de fond, l'effet Compton et la correction d'altitude n'ont pas été effectuées.

Aucune indication n'est disponible sur le niveau du bruit de fond, la température et la pression atmosphérique de la région d'étude durant la période du levé. Tout cela démontre la difficulté à concevoir les corrections les plus vraisemblables à appliquer aux mesures, d'où d'ailleurs notre embarras dans le choix des paramètres les plus optimums.

Dans ce qui suit, nous illustrons les étapes du traitement sur une seule ligne (**L11582**) prise comme exemple, cette ligne est représentée dans la **figure V.1**. Toutes les autres lignes ont subi le même traitement.

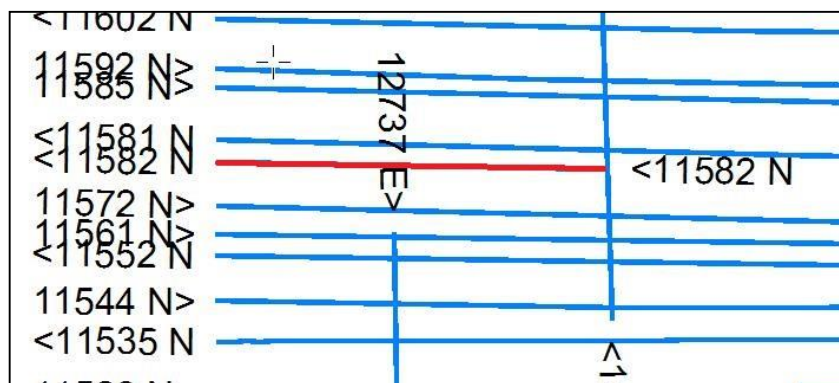


Figure V.1 : localisation de la ligne L11582 sur le GRID

Tableau V.2.1 : Echantillon de mesure (données brutes), profile 11582 :0

11582:0	Longitude	Latitude	Ct	Th	U	K
1	7.08.27	21.48.17	630	19	29	80
2	7.08.25	21.48.17	627	16	48	91
3	7.08.24	21.48.17	624	12	32	79
4	7.08.22	21.48.17	621	11	30	106
5	7.08.20	21.48.17	618	24	25	72
6	7.08.19	21.48.17	614	16	20	88
7	7.08.17	21.48.17	610	12	35	103
8	7.08.15	21.48.17	607	17	22	62
9	7.08.14	21.48.17	604	12	25	95
10	7.08.12	21.48.17	601	11	27	98
11	7.08.10	21.48.17	599	12	24	72
12	7.08.09	21.48.17	598	14	37	59
13	7.08.07	21.48.17	597	16	29	83
14	7.08.06	21.48.17	596	12	38	87

Les différentes corrections appliquées sont :

2.1. La correction de l'effet de temps mort de l'instrument :

La correction du temps-mort consiste à appliquer le temps de comptage effectif aux canaux mesurés. Les mesures spectrométriques sont enregistrées sur un intervalle de temps donné. Pour le traitement de chaque impulsion provenant du

détecteur, le système électronique de l'instrument nécessite un laps de temps durant lequel les autres impulsions qui arrivent sont automatiquement rejetées. Ce temps est appelé « temps mort » de l'équipement, il a pour effet de sous-estimer le nombre de coups enregistrés dans chacun des canaux enregistrés. Le temps d'activité du système (temps d'échantillonnage moins temps mort) est donc par définition inférieur au temps de mesure programmé et évolue en fonction du taux de comptage total (*Minty et al, 1997*). La correction de l'effet du temps mort se fait par la formule (1) :

$$N = \frac{n}{(1 - TC * t)} \quad (1)$$

Avec :

N= le taux de comptage corrigé dans chaque seconde

n= le taux de comptage brute enregistré dans chaque seconde

TC=la valeur de comptage totale brute enregistrée

t=le temps mort de l'équipement (en µs/imp)

Le **temps mort** caractéristique de la plus part des équipements se situe dans l'intervalle 5-15 (µs/imp.). Dans le cas de notre étude, nous avons choisi un temps mort de **15 µs/impulsion**, qui est la valeur la plus commune de plusieurs modèles de spectromètres.

2.2. Filtrage des données :

Pour améliorer le traitement des données nous appliquons deux types de filtres ; Un filtre non linéaire et un filtre passe bas. (*Goldak Airborne survey, 2008*)

- a- Le filtre non linéaire est appliqué avant toutes les corrections pour éliminer les mesures aberrantes.
- b- Le filtre passe bas est appliqué pendant les corrections pour lisser le signal et améliorer les calculs statistique, nous avons illustré ce type de filtrage dans les figures V.2.2 et V.2.3.

Tableau V.2 : Application du filtre non linéaire et le filtre passe bas sur le même échantillon, profile 11582 :0 .

11582:0	Longitude	Latitude	U_filtré	K_filtré	Th_filtré	Tc_filtré
---------	-----------	----------	----------	----------	-----------	-----------

1	7.08.27	21.48.17	33.9	81.3	16.5	636.1
2	7.08.25	21.48.17	35.2	86.2	15.8	632.9
3	7.08.24	21.48.17	34.4	89.8	15.6	629.9
4	7.08.22	21.48.17	31.8	90.5	15.9	626.9
5	7.08.20	21.48.17	28.5	88.9	16.3	623.6
6	7.08.19	21.48.17	25.8	86.5	16.3	619.7
7	7.08.17	21.48.17	24.5	86.0	15.6	615.9
8	7.08.15	21.48.17	24.6	87.8	14.3	612.5
9	7.08.14	21.48.17	25.9	88.6	13.0	609.4
10	7.08.12	21.48.17	27.6	85.0	12.5	606.6
11	7.08.10	21.48.17	29.3	78.6	12.9	604.6
12	7.08.09	21.48.17	30.7	74.3	13.4	603.2
13	7.08.07	21.48.17	31.5	74.0	13.6	602.3
14	7.08.06	21.48.17	31.5	75.1	13.1	601.7

le profile des mesures brutes

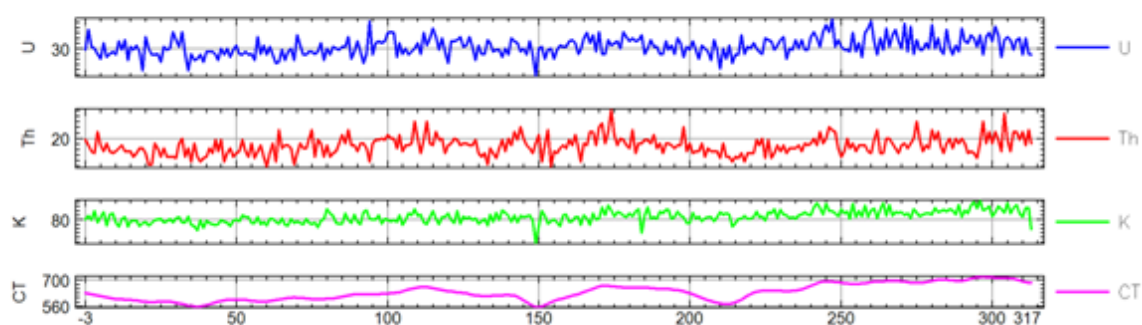


Figure V.2 : Profile L11582 avant le filtrage passe-bas.

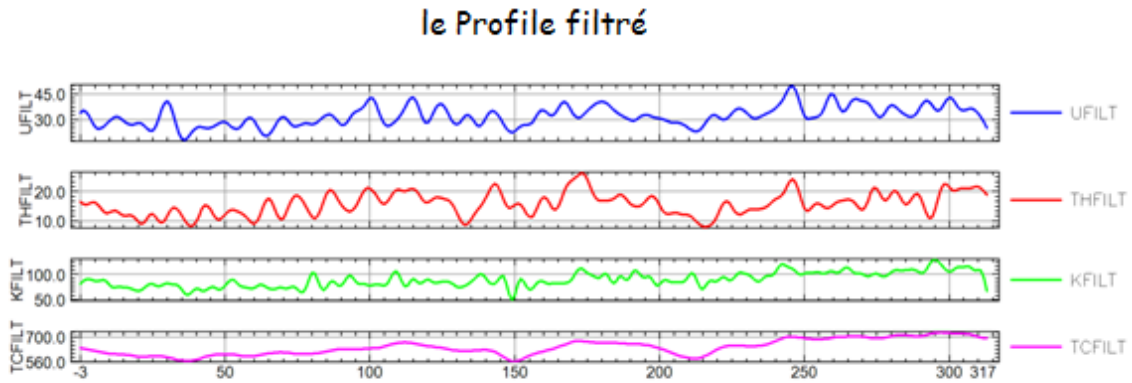


Figure V.3 : Profile L11582 après le filtrage passe-bas.

2.3. Correction des données du radar altimétrique :

Les mesures prises par l'altimètre radar sont corrigées pour tenir compte de la température et de la pression ambiante, étant donné que ces deux facteurs affectent la densité de l'air et donc ses propriétés d'atténuation. Ainsi, la hauteur équivalente h à la température 273.15 °K et pression 101.325 kPa standards (TPS) est déterminé par la relation (2) (AGRS Survey, 1991):

$$h_{TPS} = \frac{273.15 \times P \times h_{obs}}{(T + 273.15) \times (101.325)} \quad (2)$$

h_{obs} : hauteur mesurée par rapport au niveau du sol par le radar altimétrique ;

h_{TPS} : hauteur équivalente à TPS ;

T : température de l'air (°C) ;

P : Pression atmosphérique (kPa)

Les valeurs de la température et de la pression ambiantes sont donc requises pour corriger les valeurs mesurées par l'altimètre radar. Comme ces deux paramètres n'ont pas été mesurés par Aeroservice au cours de la phase d'acquisition, nous avons donc essayé de déterminer des valeurs optimales qui devraient être employées pour les corrections.

Pour les données de pression nous avons utilisé la formule suivante(3) :

$$P = 101.325 e^{-\frac{D}{8581}} \quad (3)$$

Où :

D : est l'altitude barométrique en mètres.

Dont le baromètre est ajusté pour mesurer « l'altitude par rapport à une pression de référence ». A défaut de la disponibilité de mesures de l'altitude barométrique, nous avons déterminé l'altitude de l'aéronef pour tous les points de mesure en additionnant les altitudes topographiques des points correspondants aux élévations données par le radar altimétrique. Les valeurs des altitudes obtenues ne reflètent pas exactement les altitudes barométriques à cause des variations journalières de la pression atmosphérique. Cependant, les erreurs qui en découlent ont un impact relativement minime sur les résultats.

Pour ce qui concerne la température, nous avons opté pour une seule valeur de l'ordre de 30°C. Elle est considérée comme la moyenne saisonnière pour la région d'étude.

2.4. La correction d'élévation (height correction) :

Cette correction a pour but d'éliminer l'effet atténuateur de l'air sur l'intensité des rayons γ et ramener les mesures à la même altitude de référence (**150 m dans notre cas**) étant donné que la hauteur de vol fluctue constamment. Les taux de comptage diminuent presque exponentiellement avec l'altitude ; on applique donc la formule suivante (4) « **AGRS Survey, 1991** » pour corriger chaque canal séparément (K, U, Th et CT (comptage total)):

$$N = N_0 e^{-\mu_{eq}(H-H_{STP})} \quad (4)$$

N : valeur corrigée ramené à la hauteur de référence

N₀ : valeur observée à la hauteur équivalente **H** à TPS (**température et pression standards**)

μ : coefficient d'atténuation de l'air qui est différent pour chaque canal (μ_K, μ_U, μ_{Th} et μ_{CT}).

H : qui est de 150 m pour toute la région d'étude

H_{STP} : hauteur équivalente à une température et pression standards

Les facteurs d'atténuation sont déterminés en enregistrant sur terrain les mesures au-dessus d'une bande d'essai à différentes hauteurs de vol possibles (souvent entre 60 et 200 m). Cette opération est nécessaire pour compenser l'écart

par rapport à la hauteur de vol prévue pour le levé qui n'a pas été accomplie par Aeroservice.

Si ces valeurs ne seraient pas facilement obtenues ou on voudrait tester le système de traitement on peut faire la correction en suivant cette condition« **AGRS Survey** »:

Tableau V.3 : les coefficients d'atténuations μ pour chaque canal

Fenêtre	le coefficient de l'atténuation μ par mètre en (STP)
CT	-0.0070
K	-0.0088
U	-0.0082
Th	-0.0070

Tableau V.4 : variation des différents altitudes selon le profile 11582 :0.

11582:0	Longitude	Latitude	Alt_radar	Topographie	Alt_bar	RALSTP
1	7.08.27	21.48.17	140	646	785.53	115
2	7.08.25	21.48.17	140	646	786.11	115
3	7.08.24	21.48.17	140	647	787.02	115
4	7.08.22	21.48.17	140	649	788.77	115
5	7.08.20	21.48.17	140	649	789.31	115
6	7.08.19	21.48.17	141	648	789.26	116
7	7.08.17	21.48.17	142	649	790.74	117
8	7.08.15	21.48.17	143	650	793.24	117
9	7.08.14	21.48.17	143	651	794.33	117
10	7.08.12	21.48.17	142	652	794.31	116
11	7.08.10	21.48.17	140	655	794.84	115
12	7.08.09	21.48.17	140	657	797.38	115
13	7.08.07	21.48.17	140	659	799.05	115

14	7.08.06	21.48.17	140	661	800.90	115
----	---------	----------	-----	-----	--------	-----

2.5. La correction du bruit de fond (background correction) :

La radioactivité enregistrée provient du sol et d'un fond résiduel, lequel est dû au :

- **Cosmos** : rayonnement cosmique.
- **Radon** : élément radioactive présent dans l'air.
- **Aéronef** : radioactivité des composants de l'avion.

Les mesures radiométriques enregistrées proviennent de sources radioactives présentes dans le sol et d'éléments parasites associées au rayonnement cosmique, au gaz de radon contenu dans l'air et au rayonnement intrinsèque de l'aéronef qui constituent une quantité de rayonnement gamma supplémentaire appelée bruit de fond qu'il faudrait retrancher.

Le niveau du bruit de fond peut être mesuré en survolant une masse d'eau, telle qu'un lac ou un cours d'eau assez large. Dans les zones exemptes de masses d'eau, le comptage parasite peut aussi être déterminé en survolant la zone du levé à haute altitude (1000 m environ) ou en employant un capteur orienté vers le haut. Ce dernier procédé est le plus en vigueur actuellement. Le système de mesure est constitué de deux types de capteurs montés à bord de l'aéronef, l'un prédestiné à enregistrer la radioactivité qui provient particulièrement du sol et l'autre, orienté vers le haut, est réservé à l'enregistrement de la radioactivité cosmique et celle du radon présent dans l'air. Il est clair que ce système est meilleur, car il permet d'enregistrer de façon plus serrée la contribution du radon atmosphérique aux altitudes normales du levé au-dessus de tous les recoins de la région d'étude.

Pour l'ensemble du levé spectrométrique de l'époque, aucune des procédures citées ci-dessus n'a été mis en œuvre par Aeroservice. L'absence de mesures du bruit de fond diminue manifestement la qualité des données et complique d'avantage l'opération de correction des mesures. Après quelques tentatives infructueuses qui consistent à évaluer empiriquement le niveau du bruit de fond par l'examen des enregistrements le long des lignes de vol, et à défaut d'aboutir à un résultat satisfaisant, il a été décidé, qu'au lieu de soustraire des valeurs fortuites attribuables au bruit de fond, ne pas appliquer cette correction. (**AGRS Survey, 1991**)

2.6. La correction de l'effet Compton (stripping correction) :

L'effet Compton est une perturbation qui varie en fonction de l'énergie. Elle est due à l'interaction des rayons gamma avec le cristal du détecteur et les particules de l'air. Chaque source de rayon gamma d'une énergie donnée génère, par diffusion Compton, une partie d'émissions supplémentaires étalées sur le spectre, qui provoquent des excès de comptages parasites dans les fenêtres voisines de plus basse énergie. Par exemple le canal de thorium, étant la radiation d'énergie la plus élevée, est peu affectée par les rayons de la diffusion Compton. Cependant les radiations gamma de la fenêtre de thorium apparaissent sur les deux fenêtres U et K; de même que les rayons γ de la série U apparaissent sur la fenêtre du K. La correction de l'effet Compton consiste à soustraire ces comptages en excès au moyen de coefficients appelés rapports d'enlèvement (*stripping ratios*), et notés (α , β , γ) vers les énergies décroissantes et (a , b , g) vers les énergies ascendantes (**figure. V.4**).

Les rapports d'enlèvement directs (α , β et γ) et inverse (a , b et g) sont spécifiques pour chaque système d'acquisition (spectromètre + aéronef) ; ils sont déduits au niveau du sol à partir d'une série de mesures effectuées sur des dalles d'étalonnage constituées de sources pures de potassium, d'uranium et de thorium. Lorsque le détecteur enregistre les émissions gamma d'une source pure de thorium par exemple, en plus du comptage de la fenêtre typique du Th, une quantité de rayons gamma supplémentaire est enregistrée dans les fenêtres U et K. Ainsi le coefficient α est défini comme le rapport entre le comptage enregistré dans la fenêtre U et le comptage enregistré dans la fenêtre Th à partir d'une source de thorium pure ($\alpha = U/Th$); de la même façon on définit :

$$\circ \alpha = \frac{U}{Th (source pure)} \quad (5);$$

$$\circ \beta = \frac{K}{Th (source pure)} \quad (6);$$

$$\circ \gamma = \frac{K}{U (source pure)} \quad (7);$$

$$\circ a = \frac{Th}{U (source pure)} \quad (8);$$

$$\circ b = \frac{Th}{K (source pure)} \quad (9);$$

$$\circ g = \frac{U}{K (source pure)} \quad (10);$$

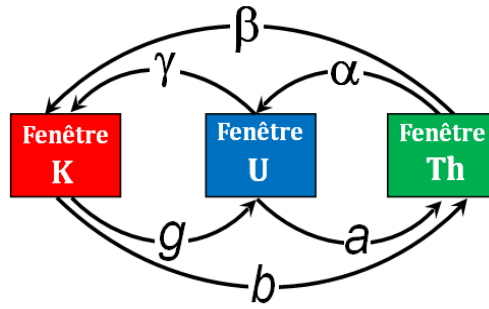


Figure V.4 : Schéma montrant les contributions relatives des rayons gamma dans les trois fenêtres K, U et Th.

Les seuls rapports habituellement utilisés sont α , β , γ et a . Les facteurs b et g sont petits ou nuls et souvent négligés. Les formules utilisées pour corriger les mesures de l'effet Compton sont les suivantes:

$$n_{Th(\text{corrigé})} = \frac{an_u - n_{Th}}{a\alpha - 1} \quad (11)$$

$$n_{U(\text{corrigé})} = \frac{an_{Th} - n_u}{a\alpha - 1} \quad (12)$$

$$n_{k(\text{corrigé})} = n_K - \beta n_{Th(\text{corrigé})} - \gamma n_{U(\text{corrigé})} \quad (13)$$

Pour le cas de notre levé, l'étalonnage des ensembles spectromètre + aéronef ne semble pas être fait par **Aeroservice**, d'où encore une fois la difficulté de prédire les valeurs des rapports d'enlèvement des équipements utilisés. Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation des constantes standards à savoir :

$$\alpha = 0.19 ; \beta = 0.31 ; \gamma = 0.66 ; a = 0.07 ; b = 0 ; g = 0$$

Ces valeurs sont les rapports d'enlèvement au niveau du sol qui sont appelés à varier en fonction de l'altitude de vol. A mesure que la hauteur augmente, la masse d'air entre la source et le capteur s'accroît et donne lieu à l'effet Compton qui réduit l'énergie émise par la source; c'est pourquoi les rapports d'enlèvement directs (α , β et γ) sont plus élevés. Nous avons donc appliqué une correction aux rapports d'enlèvement en fonction de la hauteur de vol conformément aux standards de l'Agence internationale de l'énergie atomique (**Tableau V.5**).

Pour les rapports d'enlèvement inverses (a, b, g), ils présentent une diminution insignifiante avec l'altitude, donc négligeables lors des corrections.

Tableau V.5 : Croissance avec l'altitude des rapports d'enlèvement (AIEA, 2003).

Rapport d'enlèvement	Croissance par mètre
. α	0.00049
. β	0.00065
. γ	0.00069

Le logiciel calcule les valeurs α , β et γ en STP (hauteur équivalent) pour chaque enregistrement et les utilise pour le calcul de l'effet de Compton.

$$\alpha_{eq} = \alpha + 0.00049 \cdot h_{eq} \quad (14)$$

$$\beta_{eq} = \beta + 0.00065 \cdot h_{eq} \quad (15)$$

$$\gamma_{eq} = \gamma + 0.00069 \cdot h_{eq} \quad (16)$$

Avec : h_{eq} = la hauteur équivalente (au-dessus du sol) en STP

Tableau V.6 : Valeurs corrigés pour chaque canal - profile 11582 :0.

11582:0	Longitude	Latitude	K_Corrigé	Th_Corrigé	U_Corrigé	TC_Corrigé
1	7.08.27	21.48.17	2.1	4.5	3.0	13.1
2	7.08.25	21.48.17	2.3	4.2	3.1	13.0
3	7.08.24	21.48.17	2.5	4.2	2.9	13.0
4	7.08.22	21.48.17	2.6	4.4	2.6	12.9
5	7.08.20	21.48.17	2.7	4.6	2.3	12.9
6	7.08.19	21.48.17	2.7	4.7	2.1	12.8
7	7.08.17	21.48.17	2.7	4.5	2.0	12.8
8	7.08.15	21.48.17	2.8	4.1	2.1	12.8
9	7.08.14	21.48.17	2.8	3.6	2.2	12.8
10	7.08.12	21.48.17	2.6	3.4	2.4	12.6
11	7.08.10	21.48.17	2.2	3.5	2.5	12.5

12	7.08.09	21.48.17	2.0	3.6	2.6	12.4
13	7.08.07	21.48.17	2.0	3.6	2.7	12.4
14	7.08.06	21.48.17	2.0	3.5	2.7	12.4

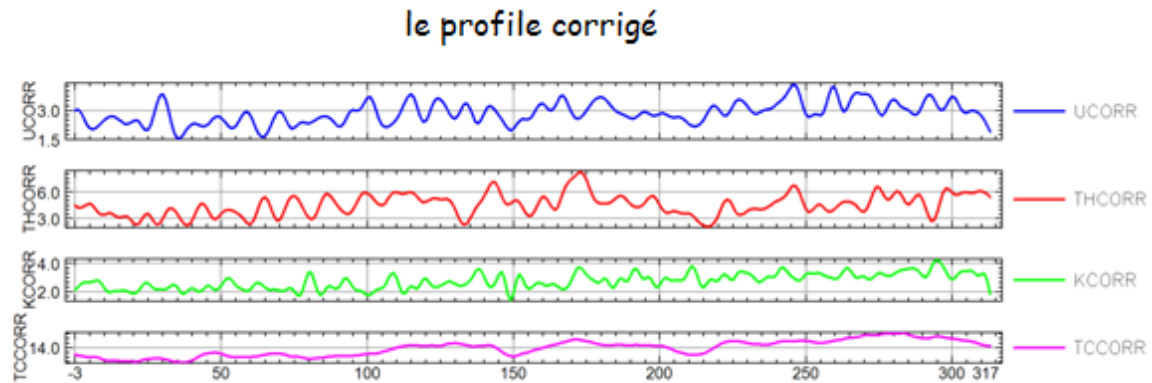


Figure V.5 : Profile L11582 corrigé

2.7. La conversion des taux de comptage en concentration apparente :

Les valeurs mesurées doivent avoir une signification géologique directe, indépendante de l'instrument et des paramètres de vol. En conséquence, les taux de comptage doivent être convertis en concentrations équivalentes en radioéléments. La conversion est effectuée en divisant chacun des 3 canaux finaux corrigés (K, U, Th) par des coefficients de sensibilité. Ces derniers sont déterminés, pour chacune des fenêtres K, U, Th, par une procédure d'étalonnage qui consiste à réaliser une série de mesures à différentes hauteurs de vol au-dessus d'une zone d'étalonnage au moyen du même ensemble spectromètre/aéronef utilisé pour le levé réel. Les données ainsi obtenues sont comparées aux concentrations équivalentes au sol (obtenues à l'aide d'un spectromètre portatif correctement étalonné) et la sensibilité est calculée pour la hauteur à laquelle sera effectué le levé.

Les coefficients sont estimés en divisant les taux de comptages des fenêtres (corrigés du bruit de fond, de l'effet Compton et ramenés à l'altitude de référence) par la concentration équivalente au sol.

$$S = \frac{N}{C} \quad (17)$$

- **N** : représente les taux de comptage corrigés relatifs aux fenêtres CT, K, U, Th ;
- **C** : concentrations équivalentes au sol ;
- **S** : représente les coefficients de sensibilité de l'équipement pour les radioéléments K, U Th ainsi que pour la radioactivité totale CT.

L'absence de tout étalonnage sur terrain lors du levé nous a contraint à opter pour les valeurs suivantes (qui sont les « coefficients typiques » préconisés par Geosoft) :

- ✓ $S_K = 75(\text{cps}/\%K)$;
- ✓ $S_U = 7.5 (\text{cps}/\text{ppm eU})$;
- ✓ $S_{Th} = 4.5 (\text{cps}/\text{ppm eTh})$;
- ✓ $S_{CT} = 23(\mu R/h)$.

2.8. Le calcul des rapports [U/Th, U/K, et Th/K] :

Ces rapports qui reflètent les concentrations relatives dérivés aux fins de l'interprétation sont des renseignements utiles pour analyser les données se rapportant au levé. Leurs calculs permettent de détecter au sein des données des caractéristiques géologiques très subtiles.

Pour éviter d'avoir une valeur extrêmement petite ou nulle au dénominateur lors du calcul des rapports, nous avons fixé un seuil minimal pour chacune des fenêtres (K, U, Th) au-dessous duquel, toute valeur est remplacé par cette même « valeur-seuil ». Nous avons statistiquement défini ces seuils comme étant la valeur moyenne plus deux fois l'écart-type (18) ;

$$A = Moy + 2\sigma \quad (18)$$

Ainsi nous avons obtenu Pour l'**Uranium** : **5.53**

A l'issue de toutes ces tentatives pour corriger les données radiométriques, rendues difficiles par le non étalonnage du système de mesure et l'absence d'enregistrement des paramètres atmosphériques (pression et température), la qualité des données peut être considérée relativement médiocre. Par conséquent, ce levé est peu exploitable pour la résolution de cibles spatialement très restreintes mais, d'un autre côté, en l'utilisant à une échelle régionale il peut fournir une bonne cartographie de la radioactivité pour de larges unités lithologiques.

Tableau V.6 : rapports U/Th, U/K et Th/K - profile 11582 :0.

11582:0	Longitude	Latitude	THKRATIO	UKRATIO	UTHRATIO
1	7.08.27	21.48.17	2.1	1.2	0.6
2	7.08.25	21.48.17	2.0	1.2	0.6
3	7.08.24	21.48.17	1.9	1.2	0.6
4	7.08.22	21.48.17	1.9	1.1	0.6
5	7.08.20	21.48.17	1.8	1.1	0.6
6	7.08.19	21.48.17	1.7	1.1	0.6
7	7.08.17	21.48.17	1.7	1.0	0.6
8	7.08.15	21.48.17	1.6	1.0	0.6
9	7.08.14	21.48.17	1.6	1.0	0.6
10	7.08.12	21.48.17	1.6	1.0	0.6
11	7.08.10	21.48.17	1.5	1.0	0.7
12	7.08.09	21.48.17	1.5	1.0	0.7
13	7.08.07	21.48.17	1.5	1.0	0.7

Le profile des rapports

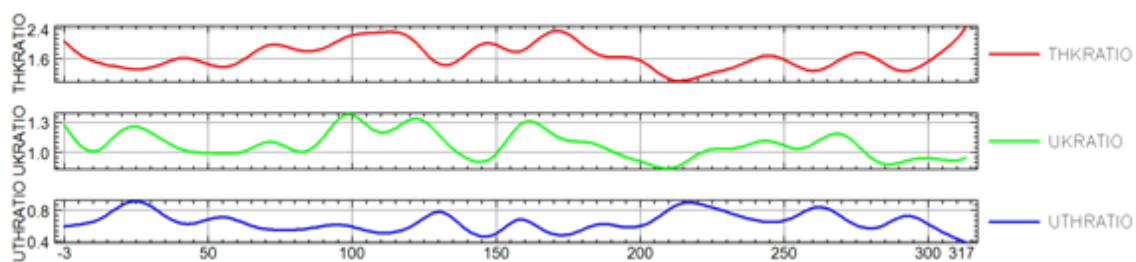


Figure V.6 : les rapports U/Th, U/K, et Th/K sur le profile 11582 :0

CHAPITRE VI

Interprétation des données spectrométriques

VI. Interprétation des données spectrométriques :

1. Conception des cartes :

1.1. Cartes brutes :

L'application des différentes corrections sur les données spectrométriques brutes de notre zone d'étude nous a permis d'établir des cartes corrigées qui sont encore entachées du bruit de fond. Les cartes des concentrations eU, eTh et K sont les plus affectées. Ces cartes sont représentées par la **figure VI.1**.

Pour résoudre ce problème nous avons appliqué un filtre directionnel afin d'enlever l'effet de la non soustraction du bruit de fond en particulier le radon présent dans l'air.

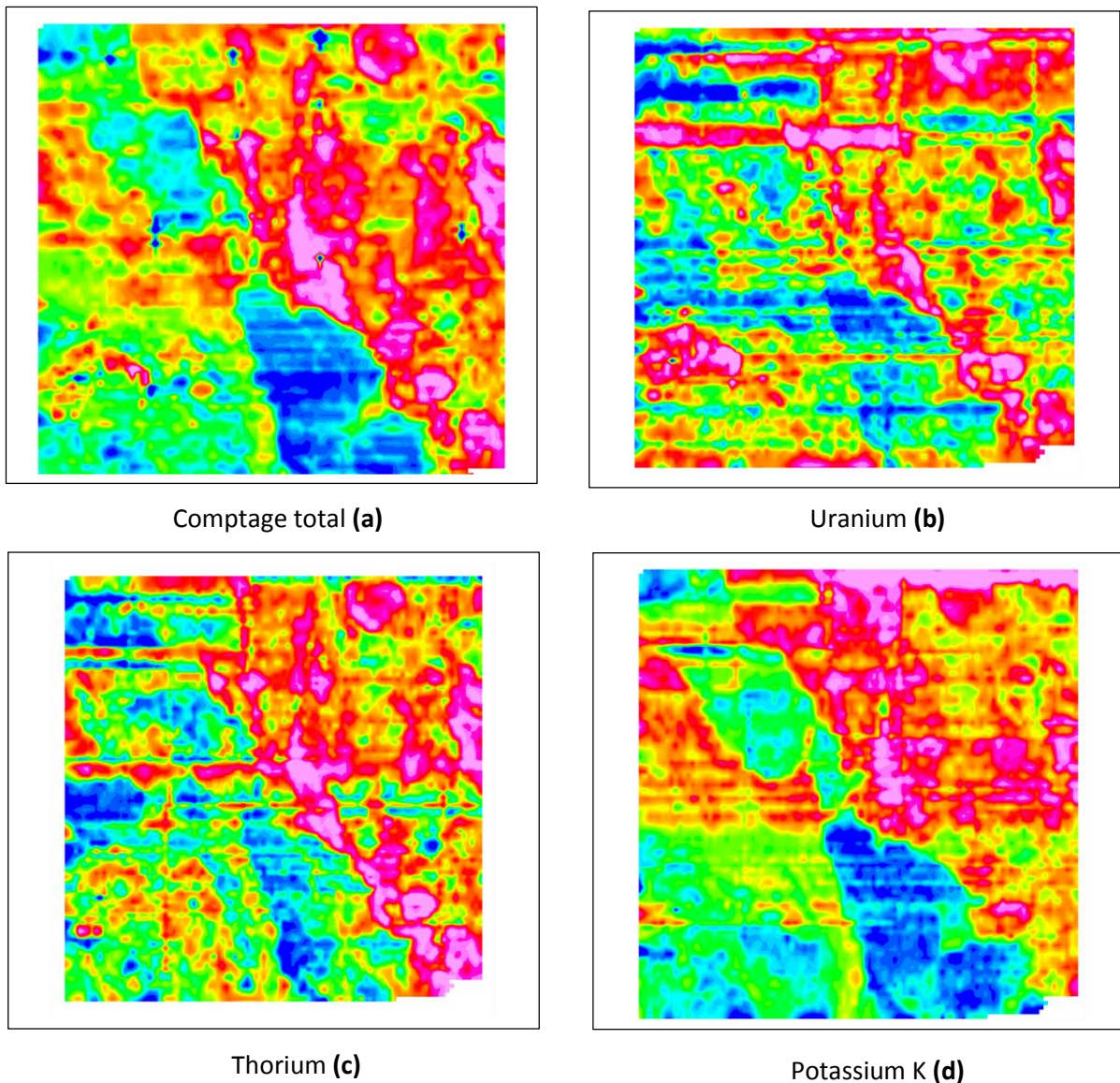


Figure VI.1 : Cartes spectrométriques corrigées non filtrées

Le calcul des rapports spectrométriques (U/Th , K/U et K/Th) est indispensable pour connaître la tendance des zones anormales. Ces rapports jouent un rôle primordial dans l'interprétation qualitative. En effet, les rapports spectrométriques offrent des informations sur la distribution des éléments radioactifs dans les différents faciès de la région d'étude. Les cartes sont représentées dans la **figure VI.2** :

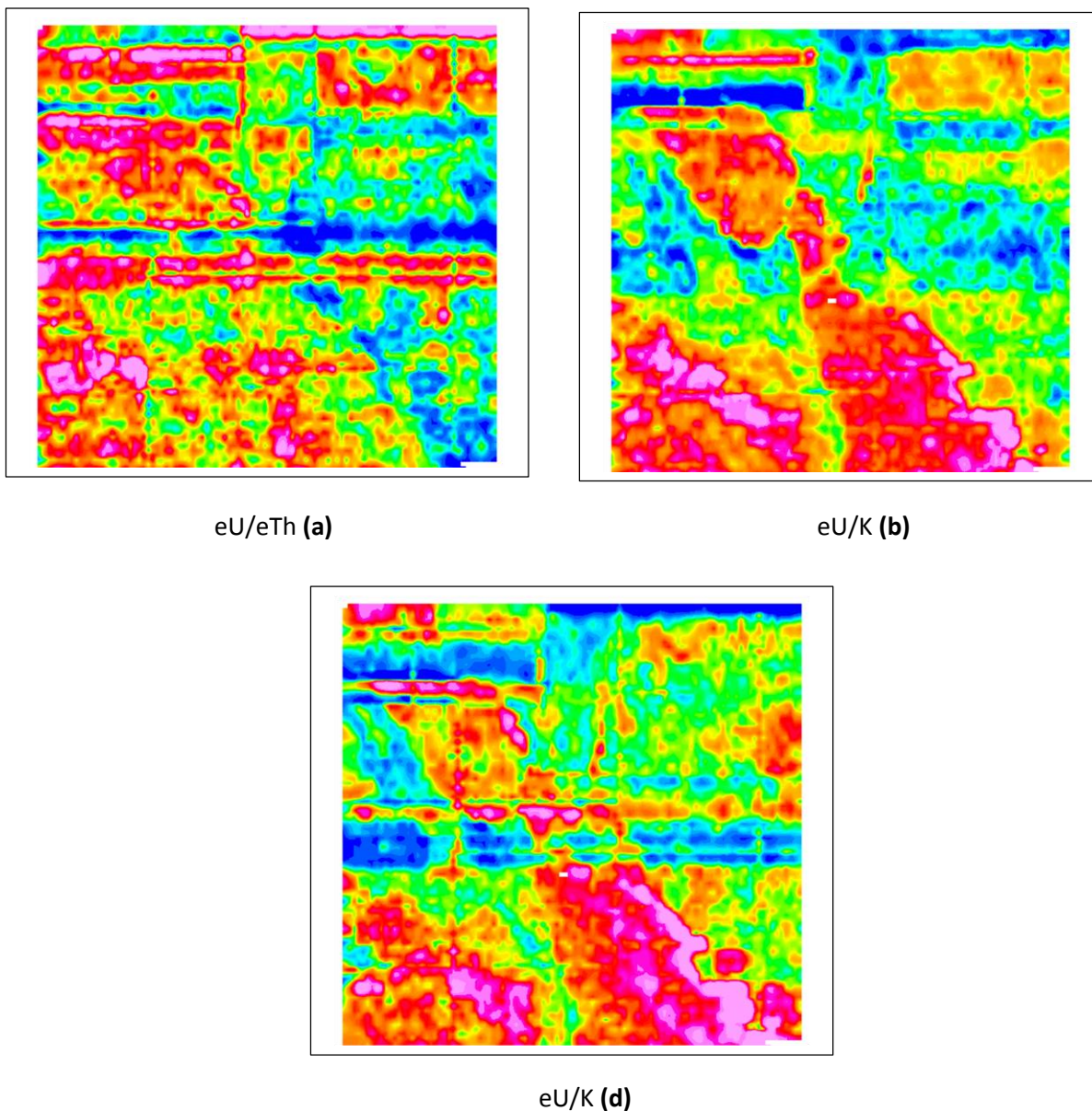


Figure VI.2 : Cartes des rapports radiométriques eU / eTh , eU/K et eTh / K

1.2. Filtrage Directionnel :

Les filtres directionnels sont des opérateurs locaux permettant de déterminer des directions privilégiées de certains pixels dans une image. Ils sont très utilisés pour

détecter des linéaments (géologie) ou plus simplement des objets linéaires caractéristiques.

Le filtre est appliqué soit sur la direction α (Azimuth). Ou bien, sur la direction perpendiculaire. Deux equations mathématiques sont utilisées **(1)** et **(2)**

(1) : Ne pas appliquer le filtre sur la direction α (Reject)

(2) : Appliquer le filtre sur la direction α (Pass)

$$L(\theta) = \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right| \quad (1)$$

$$L(\theta) = 1 - \left| \cos^n \left(\alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right| \quad (2)$$

α : direction du filtre en degré (azimuth - Nord)

n : degré du cosinus (par défaut = 2)

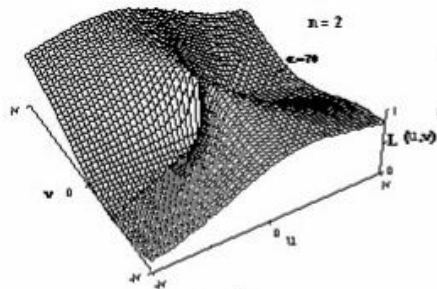
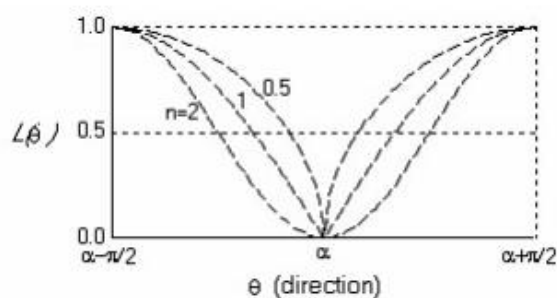


Figure VI.03 : Filtre directionnel en 2D et 3D

Après l'application de ce filtre, nous avons pu générer de nouvelles cartes corrigées filtrées. L'étape qui suit c'est l'interprétation qualitative.

Ces cartes sont :

- Comptage total (TC) ou aussi U_r .
- Uranium (U).
- Thorium (Th).
- Potassium (K).
- eU/eTh .
- eTh/K .
- eU/K .

2. Interprétation qualitative :

2.1. Comptage total (TC) :

La carte du fond radiométrique de notre région « **figure VI.04** » présente un taux de rayonnement élevé dans les granites intrusifs et dans quelques sédiments de la couverture paléozoïque.

Les basses valeurs de la radioactivité sont situées au niveau des sédiments du Cambro-ordovicien et dans les méta-sédiments du socle précambrien. Dans les environnements sédimentaires, les sédiments chimiques ont une radioactivité faible, tandis que les roches détritiques sont corrélativement plus radioactives.

Les régions anomaes prennent une direction N.W - S.E selon la direction des affleurements.

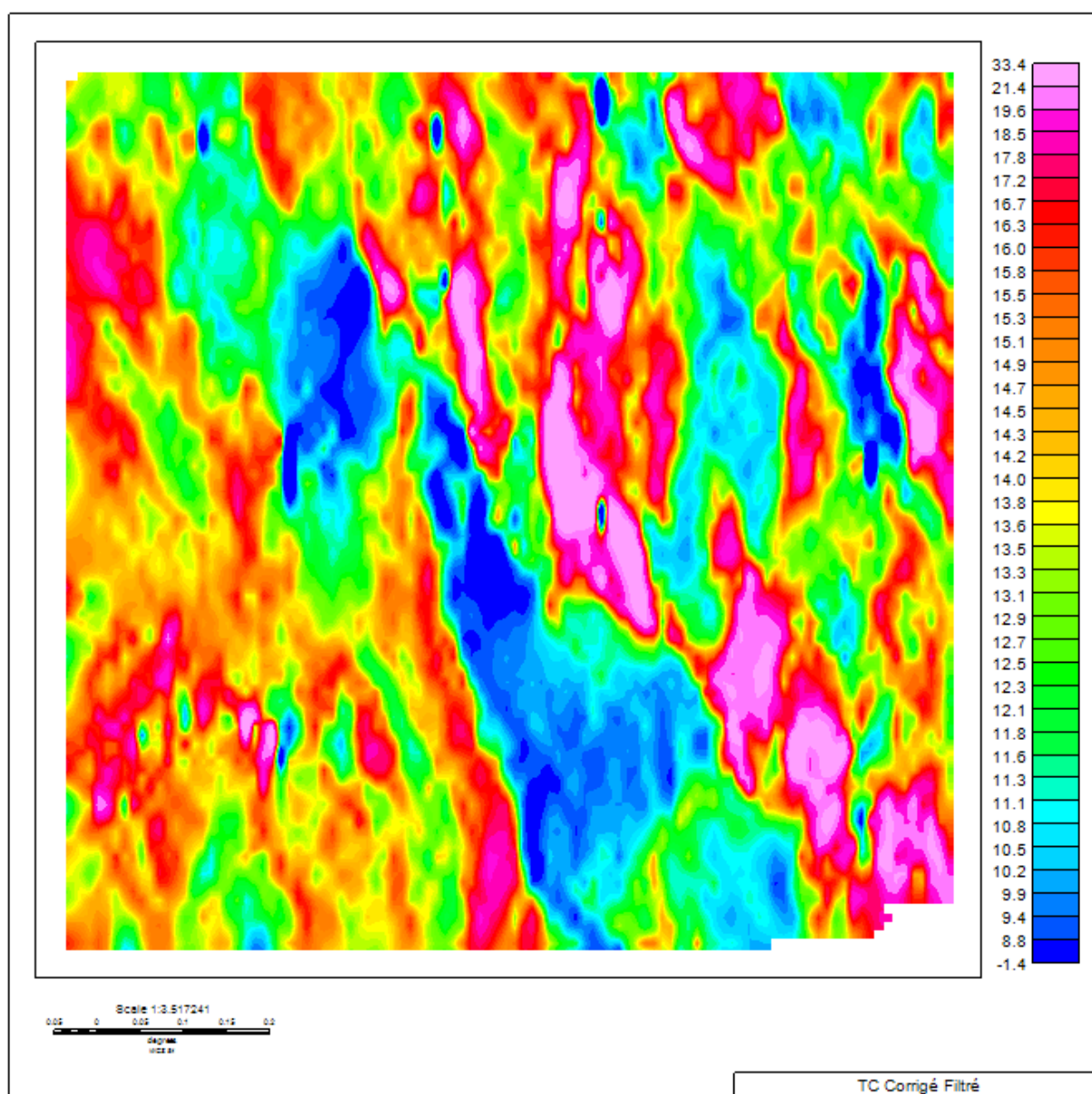


Figure VI.04 : Carte représentant le comptage total (TC) de la région d'Asséo

2.2. Thorium (Th) :

Les fortes concentrations du Thorium représentées dans la **figure VI.5** sont liées aux granites alors que les basses valeurs se trouvent dans les sédiments du Cambro-ordoviciens et dans les méta-sédiments du socle précambrien. Les autres formations présentent des concentrations moyennes à faibles.

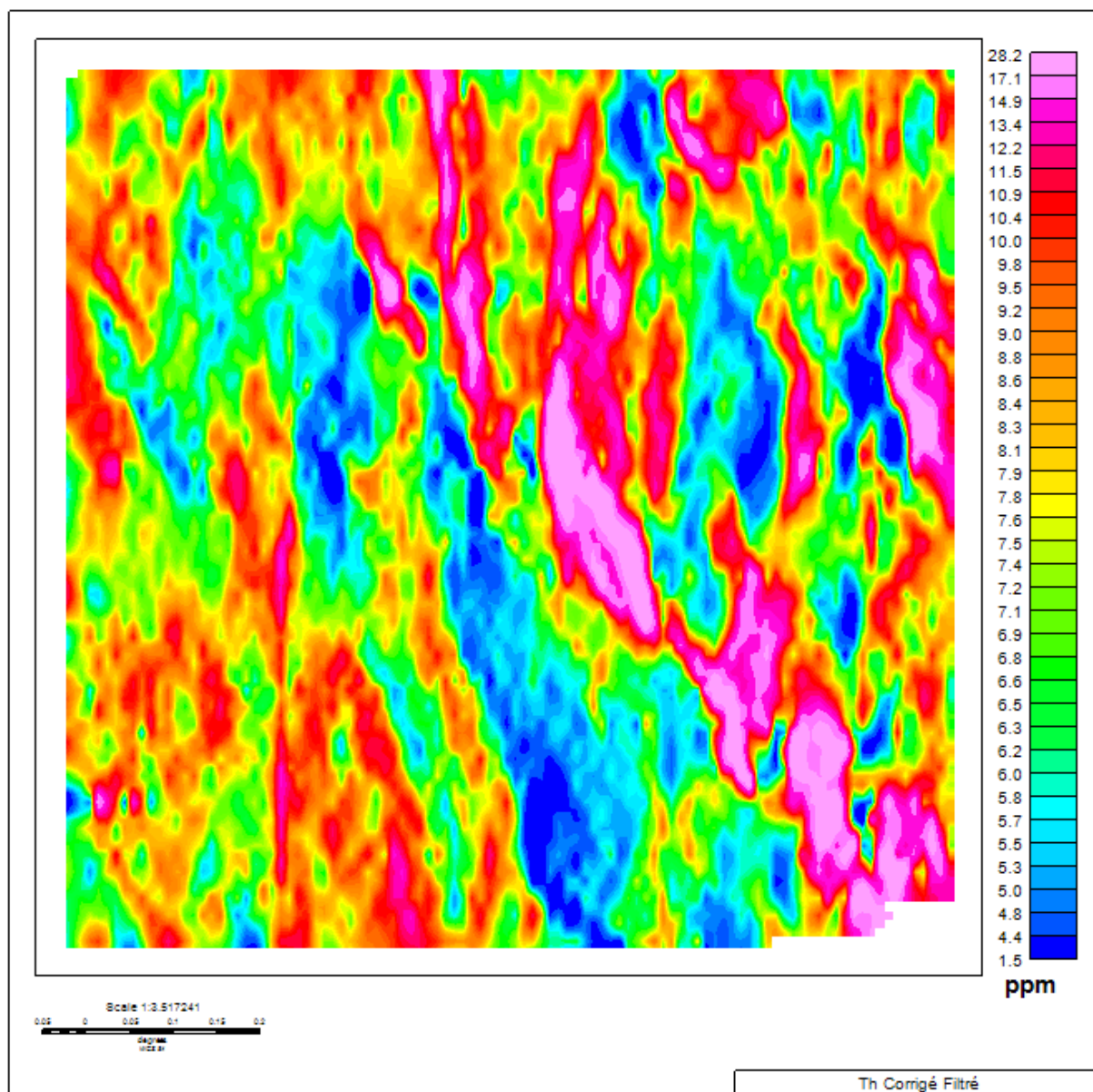


Figure VI.5 : Carte représentant la concentration en radioélément eTh (ppm)

2.3. Uranium (U) :

Les concentrations en uranium (en ppm) sont relativement élevées le long de **la faille sublongitudinale (7°30)**. Elles sont liées principalement aux granites du socle précambrien, et aux sédiments du Dévonien inférieur.

Les basses valeurs de concentration sont liées aux formations sédimentaires du cambro-ordovicien et aux méta-sédiments du précambrien comme nous le montre la **figure VI.6**.

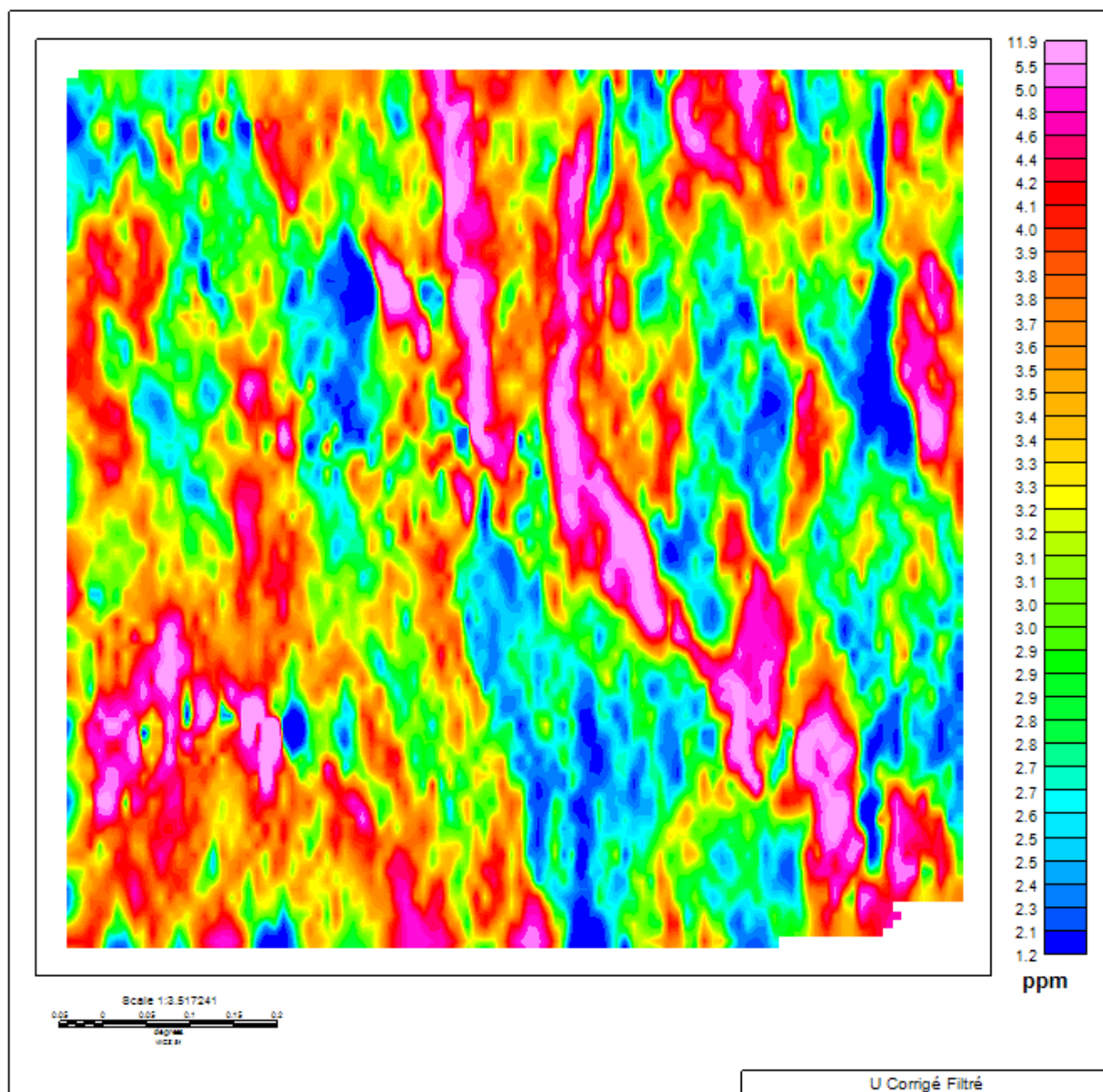


Figure VI.6 : Carte représentant la concentration en radioélément eU (ppm)

2.4. Potassium (K) :

La **figure VI. 7** représente les variations de la concentration du potassium K% dans notre région d'étude.

Le potassium (K) se manifeste notamment dans le minéral d'orthoclase (KAlSi_3O_8), qui est le constituant principal du granite (20 à 25% d'orthoclase).

La concentration du potassium (en %) est élevée au niveau des granites intrusifs et aussi au niveau des sédiments du Quaternaire. Alors que, dans les autres formations tel que le Cambro-Ordovicien, les valeurs sont faibles ou moyennes. Cette carte est en accord avec celle du Comptage Total.

De fortes valeurs du canal ^{40}K peuvent être une indication d'une altération potassique qui serait un fort marqueur d'une altération hydrothermale.

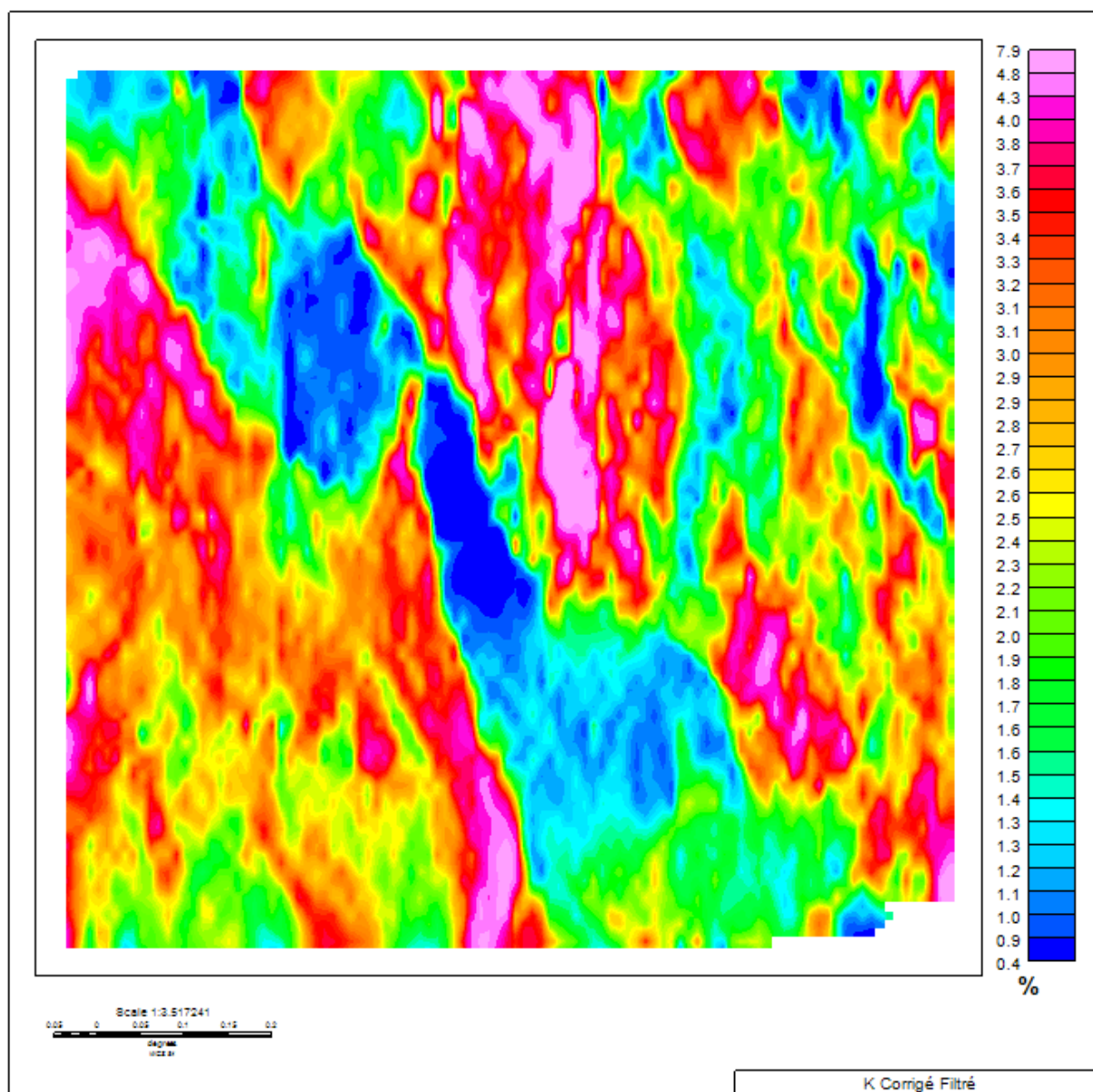


Figure VI.7 : Carte représentant la concentration en K (%)

2.5. Les rapports des radioéléments:

a- eTh/K :

La carte de la **figure VI.8** représente les variations du rapport eTh/K sur les différentes formations et structures géologiques de notre région d'étude.

Ce rapport peut servir aux études des faciès et peut être utilisé pour la cartographie géologique de la région d'étude. Il varie en fonction de la formation géologique.

A partir de la comparaison entre les données géologiques de la région, et les rapports eTh/K, on peut estimer approximativement les rapports moyens dans les principaux faciès comme suit :

- Cambro-ordovicien : 4,0 - 19.2
- Quaternaire : 0 - 2.8

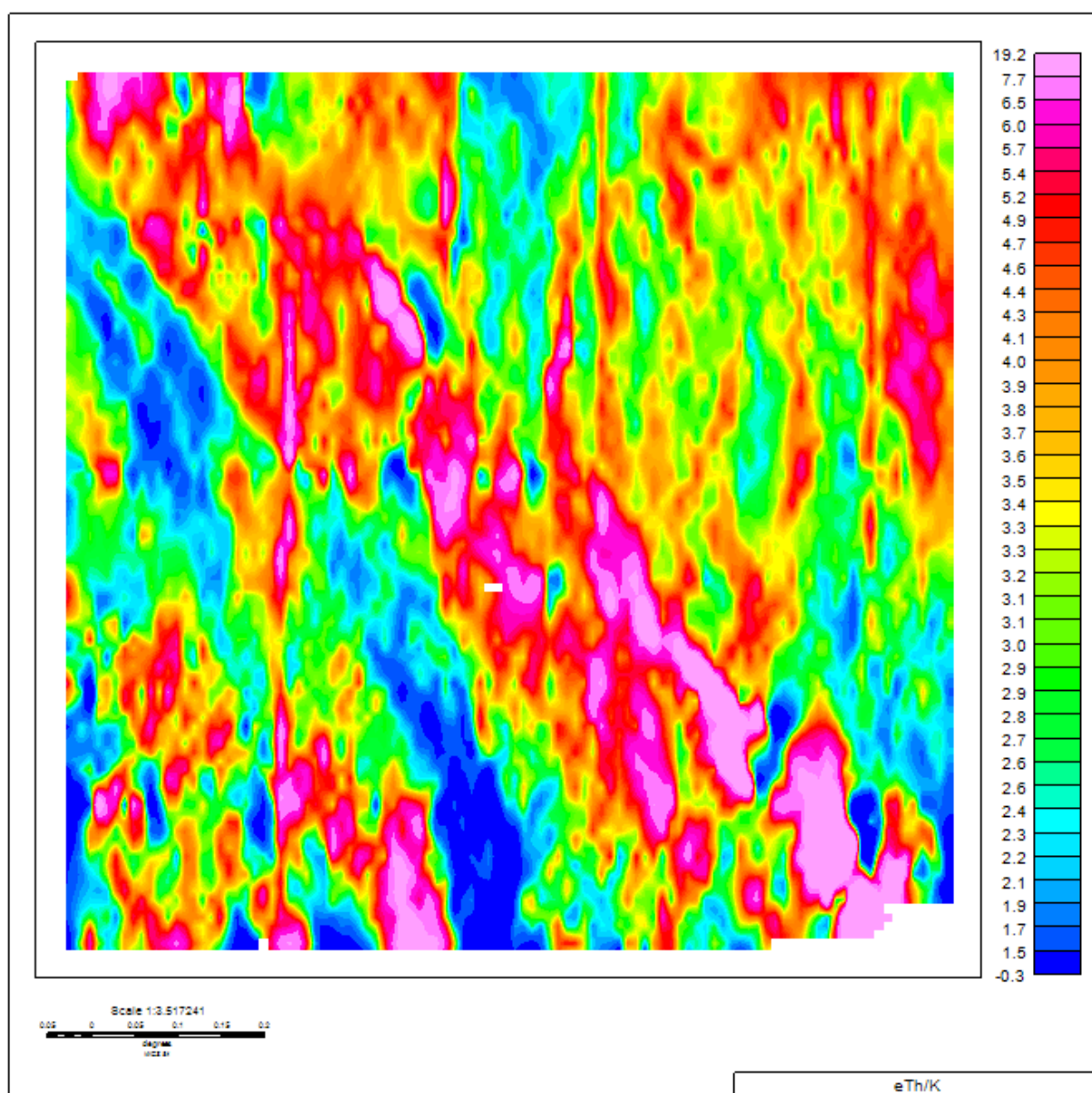


Figure VI.8 : Carte représentant la variation du rapport eTh/K

b- eU/eTh :

La carte de la **figure VI.9** représente les variations du rapport eU/eTh sur les différentes formations et structures géologiques de notre région d'étude.

Plusieurs anomalies radiométriques dans la couverture protérozoïque (bassin sédimentaire) sont caractérisées par un fort rapport (couleur rosâtre) ce qui signifie une tendance uranifère des indices radiométriques.

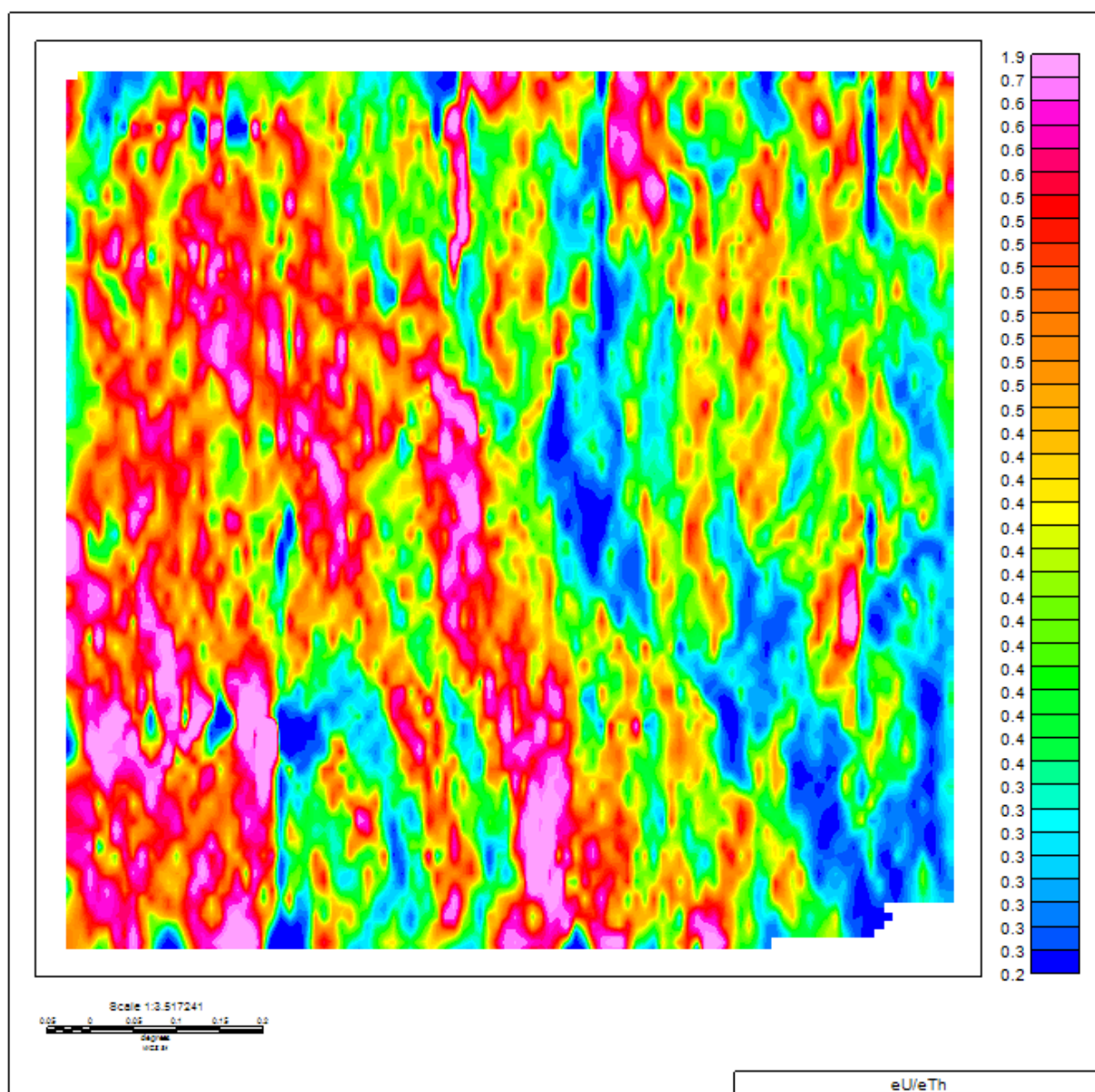


Figure VI.9 : Carte représentant la variation du rapport eU/eTh

c- eU/K :

La carte de la **figure VI.10** représente les variations du rapport eU/K sur les différentes formations et structures géologiques de notre région d'étude.

La quasi-totalité de notre zone d'étude est caractérisée par un rapport eU/K supérieur à 1 sauf que dans le cas du « Quaternaire ». Ou la signature du rapport eU/K est inférieur à 1.

Ce rapport atteint des valeurs plus au moins élevées dans le cambro-ordovicien et le dévonien inférieur.

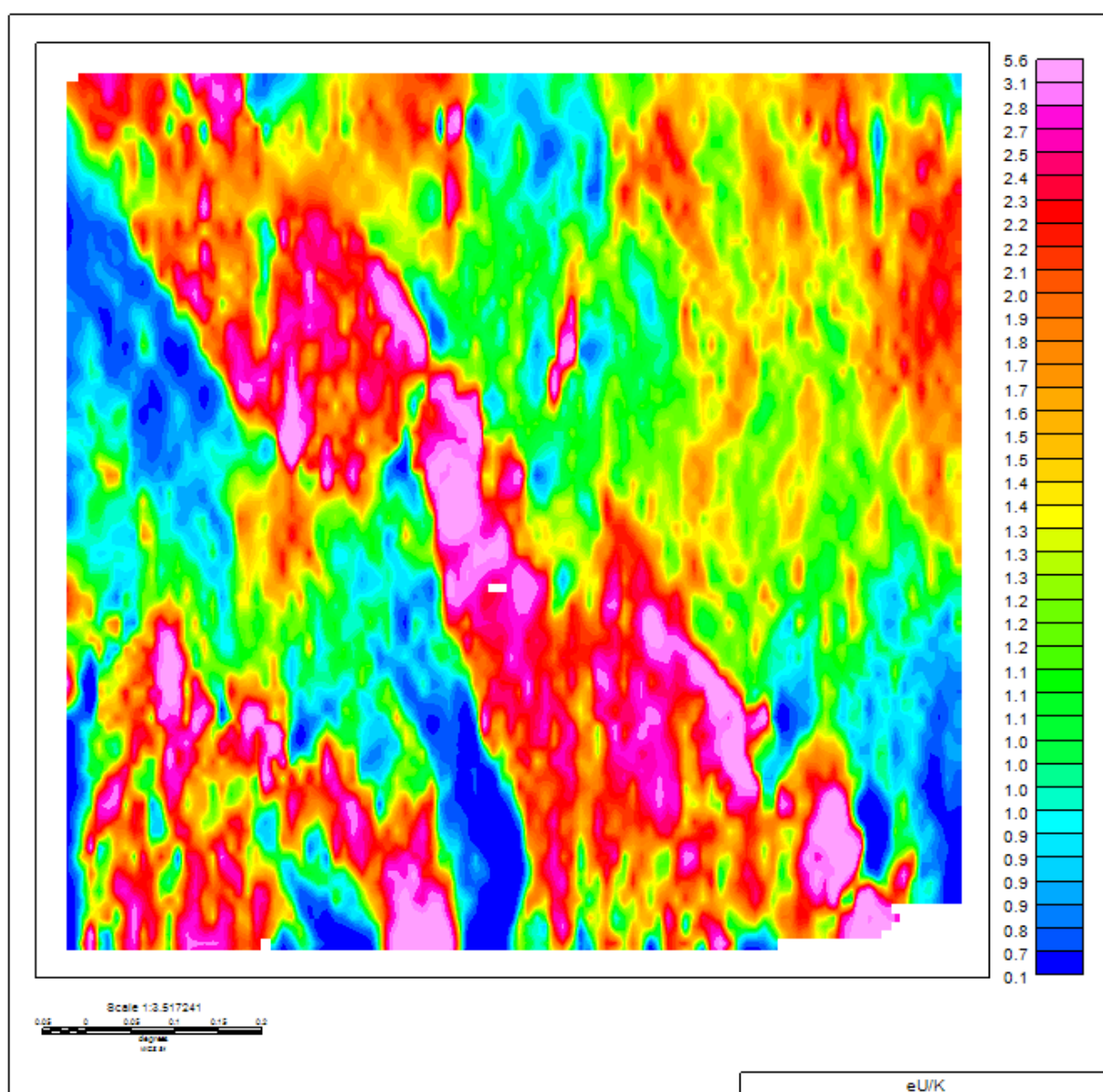


Figure VI.10 : Carte représentant la variation du rapport eU/K

2.6. Distribution des éléments radioactifs dans les roches :

Le potassium (K), l'uranium (U) et le thorium (Th) sont les trois éléments radioactifs les plus abondants dans la nature. Le K est l'un des principaux éléments constitutifs des roches et est le principal élément d'altération dans la plupart des gisements de minerai. L'uranium et le thorium sont présents en quantités à l'état de trace; ce sont des éléments mobiles et immobiles respectivement.

Le **tableau VI.1** montre la distribution des éléments radioactifs dans les différentes lithologies. Les contrastes mesurés pour les éléments radioactifs permettent d'établir la relation existante avec la géologie de surface.

La teneur moyenne des roches de la croûte continentale est de 6 à 10 ppm de Th, +2 ppm de U et 3% de K (tel que K₂O). Ces valeurs donnent les rapports approximatifs Th/K = 3×10^{-3} et U/Th = 0,33.

Tableau VI.1 : Distribution de U, Th et K dans les roches

Lithologie	U (ppm)	Th (ppm)	⁴⁰ K%
Intrusives felsiques alcalines / Syénites, pegmatites, granites	56	113	4.2
Effusives felsiques alcalines / Rhyolites, trachytes	30	134	6.5
Intrusives felsiques / Granites, granodiorites	4.5	26	3.4
Effusives felsiques / Dacites, pegmatites, aplites	4.1	12	3.1
Intrusives intermédiaires / Diorites	3.2	12.2	2.1
Effusives intermédiaires / Andésites	1.1	2.4	1.1
Intrusives basiques / Gabbros, dolérites	0.8	2.3	0.8
Effusives basiques / Basaltes	0.8	2.2	0.7
Basiques alcalines / Basaltes alcalines, gabbros alcalins	2.4	8.3	1.8
Ultrabasiques	0.3	1.4	0.3
Sédiments chimiques	3.6	15	0.6
Carbonates	2.0	1.3	0.3
Sédiment détritiques	4.8	12.4	1.5
Argiles	4	12	3

Les roches proviennent du manteau supérieur sont relativement épuisés. La séparation de l'uranium et du thorium survient durant la différenciation de la croûte archéenne. De nos jours presque tous les gisements d'uranium sont tirés de là, cependant tous sont passés par plusieurs états de remobilisation et de re-déposition.

Les granites intrusifs. Contiennent moins d'uranium que les anciens boucliers de granite. Ainsi, le premier facteur important (mais non exclusif) d'une région potentielle d'uranium serait sa proximité d'un bouclier de roches anciennes. Le second facteur important, est le processus (ou les processus) par lequel l'uranium arrive à se concentrer dans un lieu préféré en une quantité de 250 fois, ou plus, celle de son niveau géochimique de fond.

La liaison entre la géologie de surface et la spectrométrie gamma se fait en comparant les rapports des radioéléments théoriques des différentes lithologies (**Tableau VI.2**) avec les rapports calculés à partir des données mesurées.

Tableau VI.2 : Variation des rapports radiométriques en fonction de la lithologie

Lithologie	Th/K	U/Th	U/K
Intrusives felsiques / <i>Granites, granodiorites</i>	7,64	0,17	1,32
Carbonates (Calcaire)	4,33	1,5	6,66
Sédiment détritiques (Grés, Conglomérats, sable ...)	8,26	0,38	3,2
Argiles	4	0,33	1,33

Dans notre cas : Les sédiments du Cambro-ordoviciens sont caractérisés par des rapports radiométriques qui varient entre : [5.41 – 10.66] pour eTh/K ; [0.36 – 1.94] pour eU/eTh ; [1.74 – 5.59] pour eU/K . Ce qui signifie une nature détritique des sédiments (Conglomérats, Grés et argiles).

Les sédiments du Silurien sont de nature carbonaté (Calcaires) avec des rapports qui varient entre : [3.4 – 7.66] pour eTh/K ; [0.7 – 1.94] pour eU/eTh ; [2.42 – 5.59].

2.7. Carte ternaire :

La concentration des radioéléments K ; U et Th varie selon le type de roche. Lorsque la signature «normale» d'un radioélément est interrompue par un corps minéralisé, les anomalies radioélémentaires correspondantes fournissent des indices directs utilisés en prospection. (*Rasolomanana et al, 2010*)

La **figure VI.11** représente la combinaison des concentrations relatives des trois radioéléments, à savoir le potassium, l'uranium et le thorium.

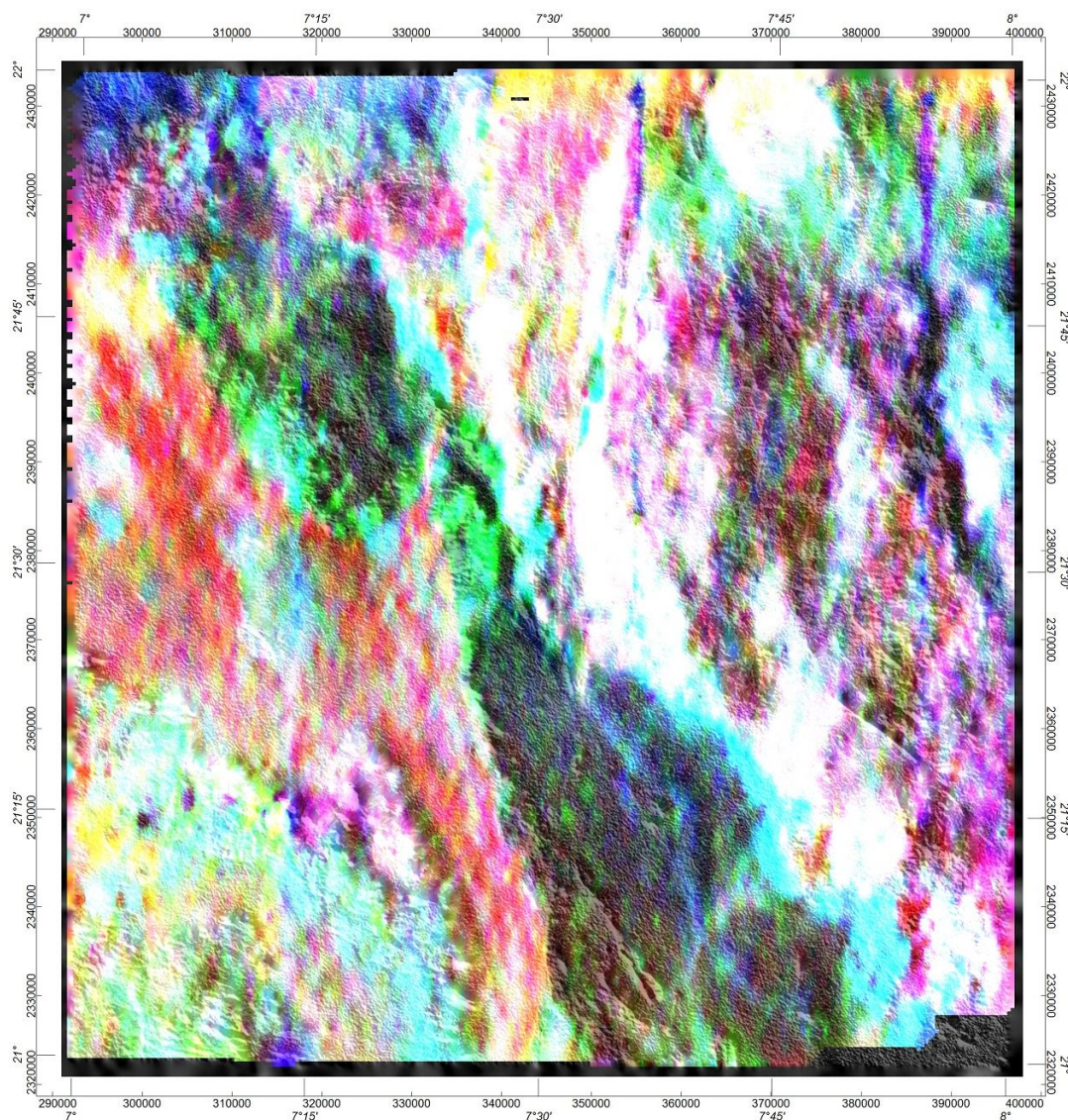


Figure VI.11 : Image ternaire spectrométrique U, Th et K

Cette carte permet d'établir les liens entre les contrastes mesurés pour les radioéléments et la cartographie de la géologie du substratum rocheux ou des formations en surface et les altérations associées aux gisements de minerai. Toutes

les roches et tous les matériaux qui en proviennent sont radioactifs et contiennent des quantités détectables d'éléments radioactifs.

a- Regroupage de la carte en unités radiométriques :

Une couleur spécifique est attribuée à chaque élément radioactif tel que ; l'Uranium en vert, le Thorium en bleu et le Potassium en rouge. En tenant compte les différentes concentrations en radioéléments et en combinant ces trois couleurs ensemble, Nous avons obtenu 27 couleurs différentes. Chaque couleur caractérise une unité radiométrique, ces unités représentent les différentes concentrations en radioéléments.

Tableau VI.3 : Couleurs et concentrations des unités radiométriques

Code RGB			Couleur	Concentrations		
0	0	0		K _L	U _L	Th _L
255	0	0		K _H	U _L	Th _L
0	255	0		K _L	U _H	Th _L
0	0	255		K _L	U _L	Th _H
255	255	0		K _H	U _H	Th _L
255	0	255		K _H	U _L	Th _H
0	255	255		K _L	U _H	Th _H
255	255	255		K _H	U _H	Th _H
127	255	0		K _M	U _H	Th _L
255	127	0		K _H	U _M	Th _L
0	127	255		K _L	U _M	Th _H
0	255	127		K _L	U _H	Th _M
255	0	127		K _H	U _L	Th _M
127	0	255		K _M	U _L	Th _H
127	127	127		K _M	U _M	Th _M
127	0	0		K _M	U _L	Th _L
0	127	0		K _L	U _M	Th _L
0	0	127		K _L	U _L	Th _M
127	127	0		K _M	U _M	Th _L
127	0	127		K _M	U _L	Th _M
0	127	127		K _L	U _M	Th _M
255	127	127		K _H	U _M	Th _M

127	255	127		K _M	U _H	Th _M
127	127	255		K _M	U _M	Th _H
255	255	127		K _H	U _H	Th _M
255	127	255		K _H	U _M	Th _H
127	255	255		K _M	U _H	Th _H

b- Tracé des unités :

On distingue 15 unités radiométriques sur notre région d'étude « figure VI.12 »

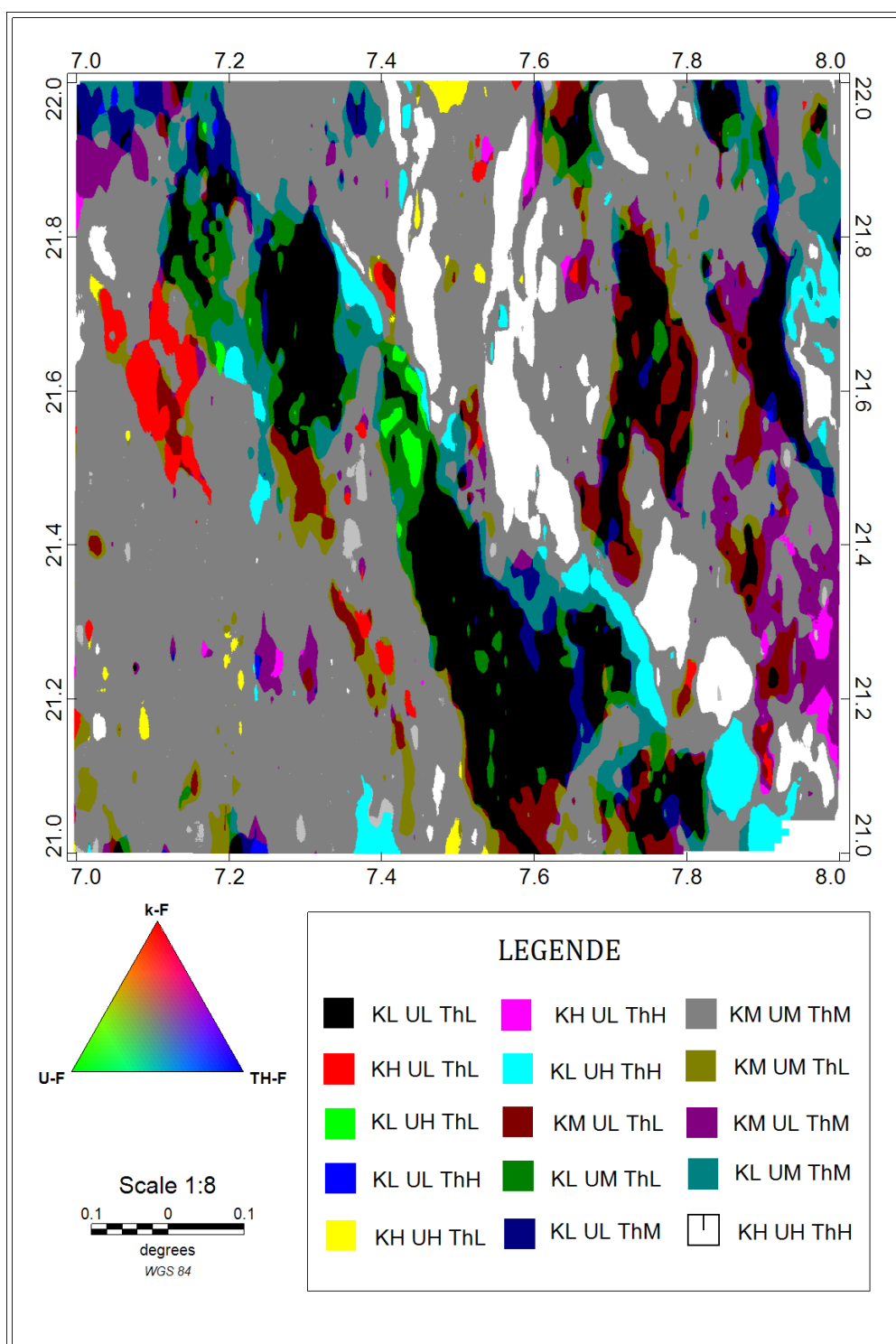


Figure VI.12 : tracé des unités radiométriques dans la carte ternaire

3. Interprétation quantitative :

3.1. Analyse statistique des données :

Cette analyse a été faite sur un ensemble de 155282 points de mesures. Elle se résume au calcul des valeurs minimales, maximales, la moyenne et l'écart-type (σ) pour les variables : eU, eU/eTh et eU/eTh%.

Le paramètre le plus utilisée pour préciser la caractéristique de dispersion de la série de mesure est l'écart-type, racine carrée de la variance qui résume l'éloignement de l'ensemble des mesures par rapport à leur tendance centrale. La variance est par définition, la moyenne des carrés des écarts à la moyenne « **voir la formule (3)** »

$$var(x) = s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \quad (3)$$

a- Détermination du seuil :

Les valeurs mesurées supérieures à la somme de la moyenne arithmétique avec l'écart type multiplié par deux « voir la formule (4) » sont considérées anormales. **J. Asfahani et Al. 2009**

$$A = Moy + 2\sigma \quad (4)$$

Tel que :

- A : Le seuil
- Moy : Moyenne arithmétique.
- σ : Ecart type.

3.2. Application :

3.2.1. Uranium corrigé :

Tableau VI.4 : statistiques du canal Uranium corrigé

Canal	UCORR
Ligne	Toutes
Nombre des mesures :	154768
Nombre des valeurs aberrantes	514

Valeur minimale	0.18
Valeur maximale	19.23
Valeur moyenne	3.41
Ecart type :	1.06
Le seuil A	$A = 3.41 + 2(1.06) = 5.53$

- Identification des anomalies :

Chaque valeur supérieure à **5.53 ppm** est considérée comme une anomalie.

Il existe donc 40 anomalies dans le canal d'Uranium corrigé réparties dans la **figure VI.13**

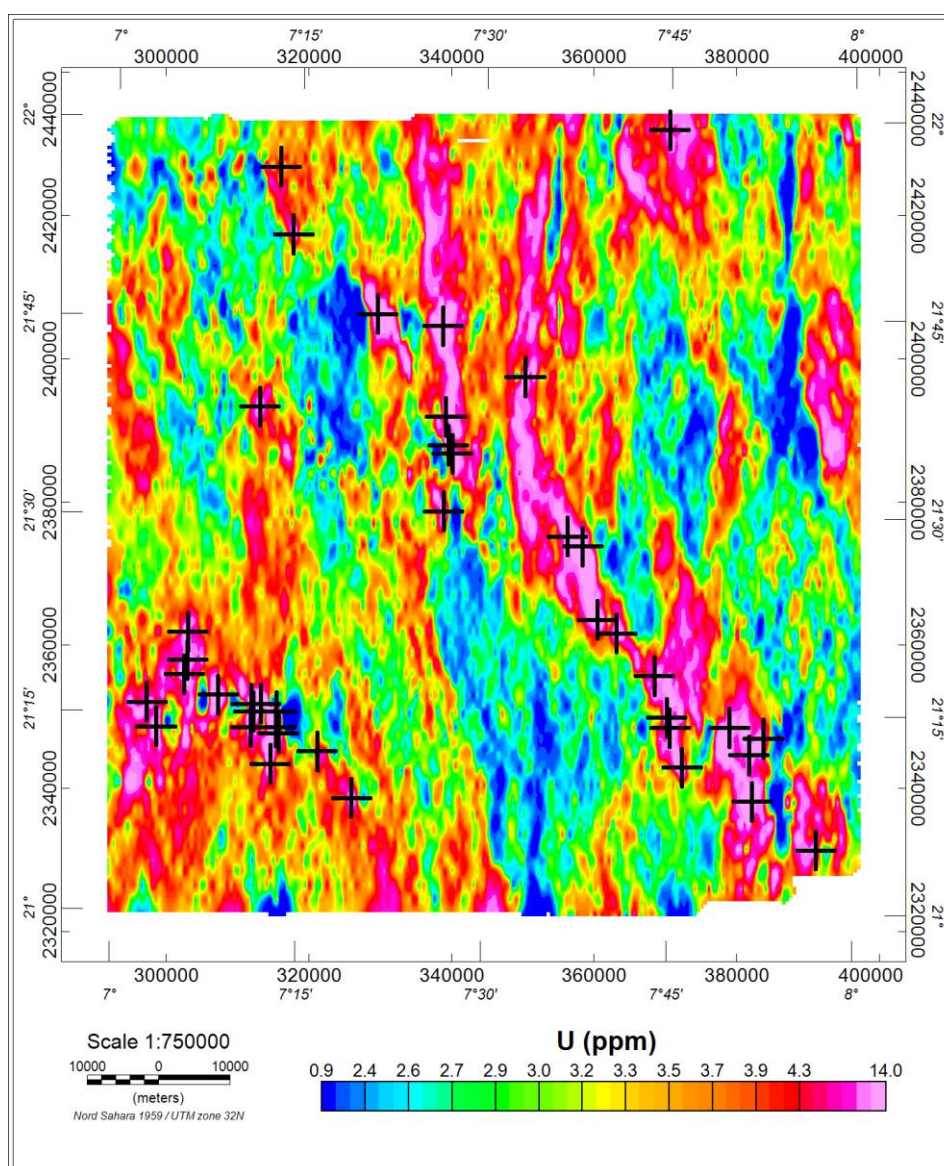


Figure VI.13 : Distribution des anomalies d'uranium

- Commentaire :

Il est évident que pour indiquer une minéralisation d'uranium économiquement exploitable, il n'est pas forcément nécessaire que la réponse du canal uranium soit 100 fois plus élevée que la valeur du fond régional.

La teneur en U du sol altérée représente souvent une faible proportion de la teneur des roches sous-jacentes.

La série de désintégration de l'uranium se trouve souvent en déséquilibre, c'est-à-dire la concentration de l'élément dérivé (^{214}Bi) ne reflète pas nécessairement la teneur de l'élément père à cause de la perte d'une partie d'éléments de radium et radon par processus d'altération.

L'uranium, contrairement au thorium et au potassium est beaucoup plus soluble, ce qui suscite l'étendu de la zone d'intérêt (auréole géochimique à teneur plus faible autour de minéralisation à teneur élevée).

3.2.2. Rapport eU/eTh :

Tableau VI.5 : statistiques du canal eU/eTh.

Canal	UTHRATIO
Ligne	Toutes
Nombre des mesures :	154767
Nombre des valeurs aberrantes	515
Valeur minimale	0.12
Valeur maximale	2.31
Valeur moyenne	0.43
Ecart type :	0.13
Seuil	$A = 0.43 + 2(0.13) = 0.69$

- Identification des anomalies :

Chaque valeur supérieure à **0.69** est considérée comme une anomalie.

Il existe donc 11 anomalies représentées dans la **figure VI.14**.

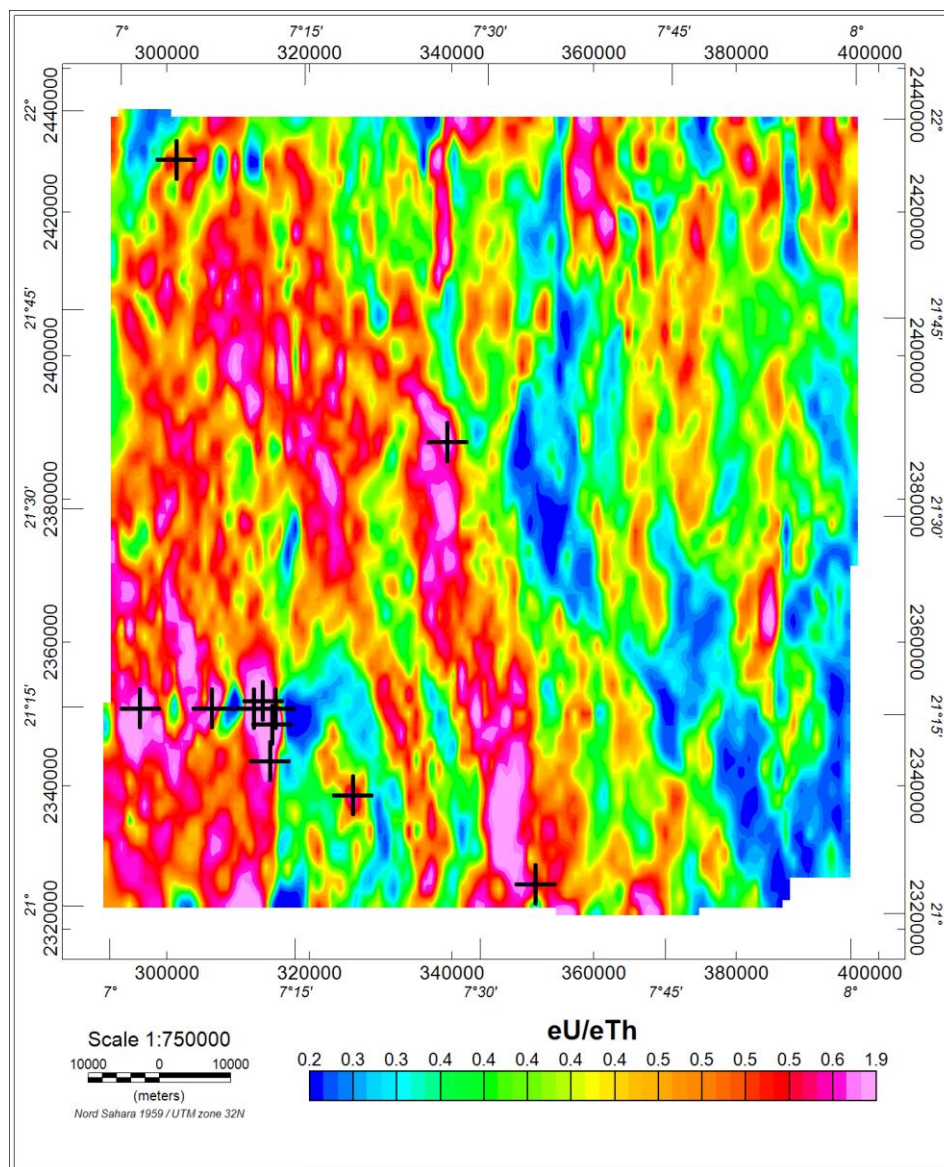


Figure VI.14 : Distribution des anomalies du rapport eU/eTh

- Commentaires :

Le rapport U/Th demeure corrélativement constant pour de vastes étendues et sur une variété de types de roches.

La variation des concentrations relatives U/Th résulte généralement d'un processus spécifique (processus de minéralisation) ayant causé l'accumulation de l'un sans l'accumulation de l'autre. Ce type de cas justifie un intérêt particulier, particulièrement si en plus d'une variation considérable du rapport U/Th la zone est caractérisée par un taux de compte total relativement élevée.

Une augmentation de 0.1 à 0.2 du U/Th peut indiquer une situation anormale

En comparant les anomalies de l'Uranium et du rapport U/Th, on remarque que certaines anomalies figurent dans les deux canaux par contre beaucoup d'autres n'apparaissent pas dans les deux canaux. (Voir la **figure VI.15**)

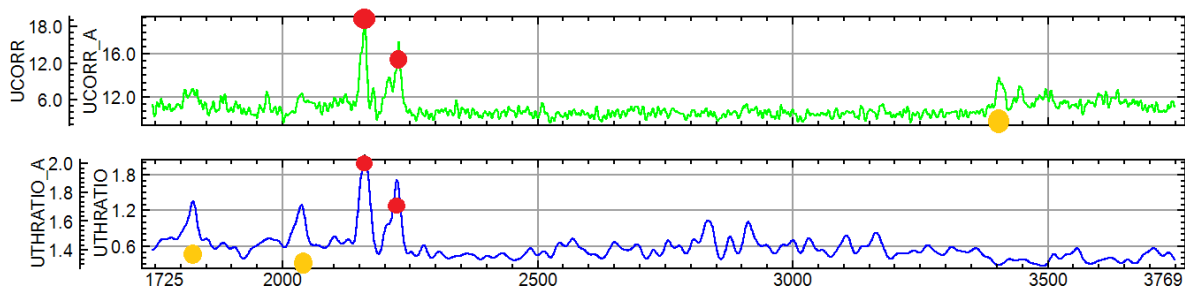


Figure VI.15 : profile radiométrique de la ligne L11239

- Distributions des anomalies :

La comparaison entre les deux cartes de répartition d'anomalies d'uranium et du rapport U/Th nous a permis de repérer les anomalies qui fournissent simultanément des valeurs élevées en uranium et en rapport U/Th. La **figure VI.16** illustre ce cas.

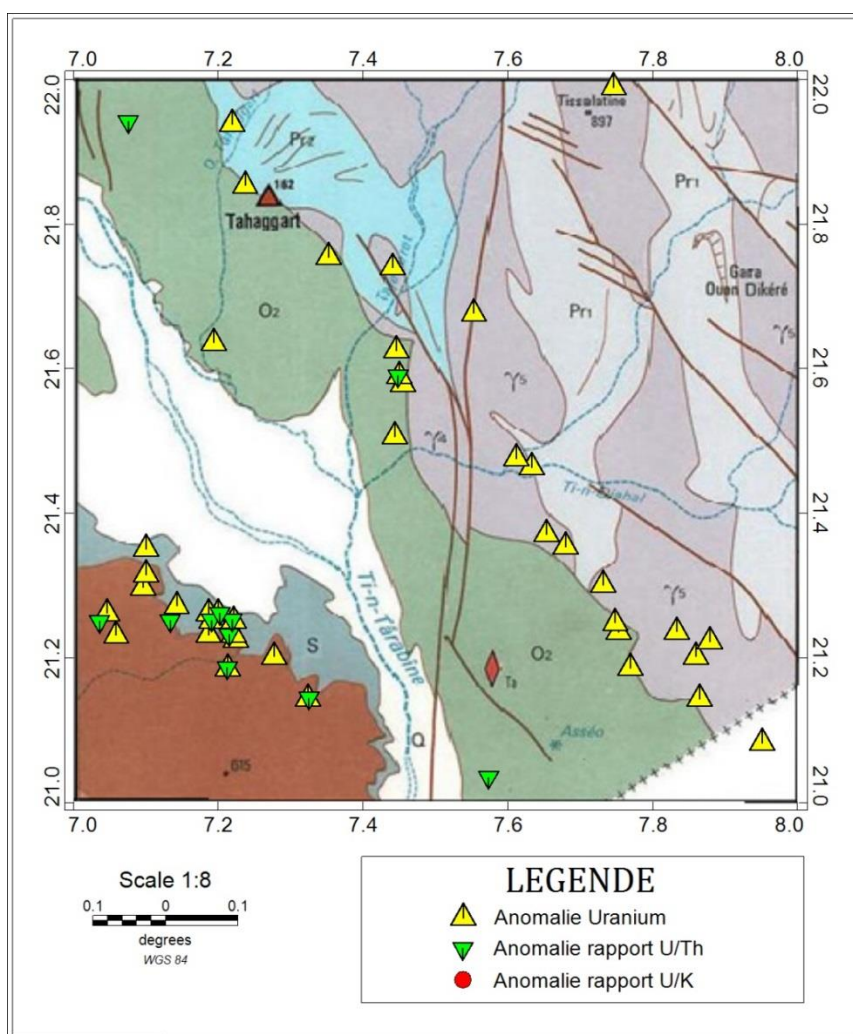


Figure VI.16 : Répartition des anomalies d'uranium et du rapport U/Th

On remarque que la majorité des anomalies d'uranium n'ont pas de signatures anormales en rapport U/Th à l'exception de la zone sud-ouest de notre région d'étude correspondante aux formations situées à cheval entre le Dévonien inférieur et le Silurien (**Figure VI.16**).

Afin de mettre en évidence d'autres points potentiels supplémentaires en plus du gisement connu de Tahaggart. Nous avons diminué le seuil du rapport U/Th en le fixant à 0.56, c'est-à-dire la moyenne plus un écart type (5). **La figure VI.17** illustre la répartition des points anomalies décelés. $A = Moy + 1\sigma$ (5).

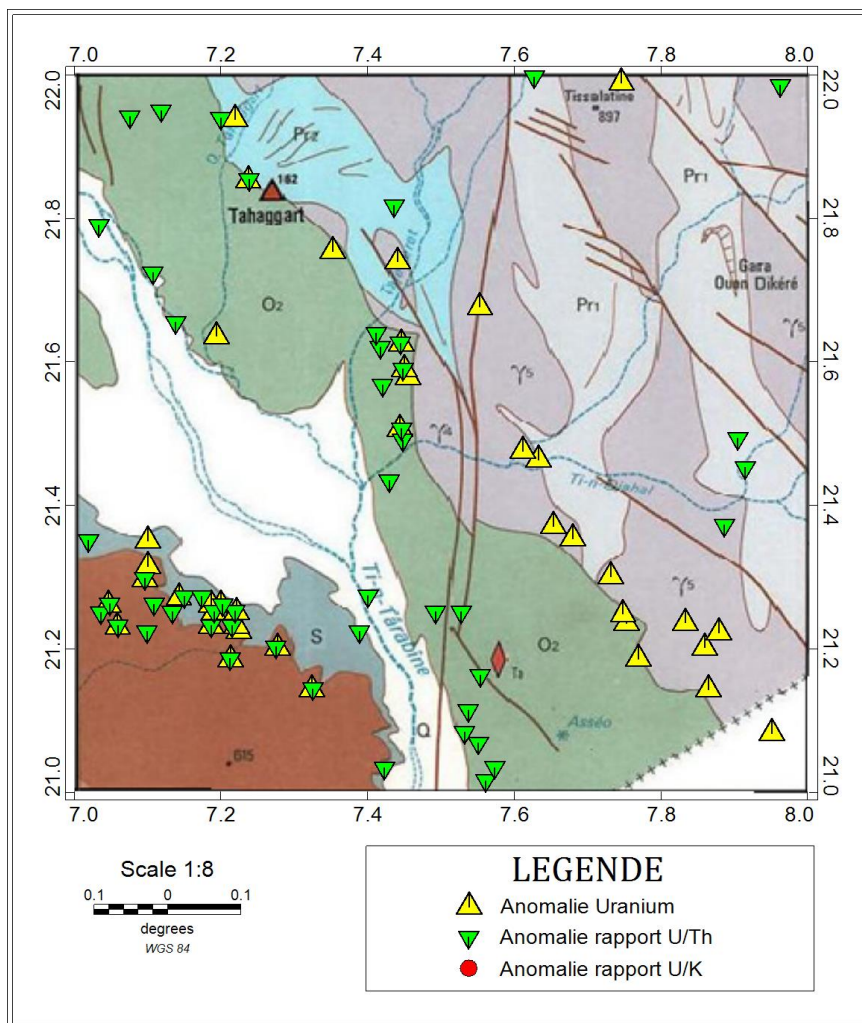


Figure VI.17 : Comparaison entre la répartition des anomalies d'Uranium et du rapport U/Th après la diminution du seuil.

3.2.3. Rapport eU/K :

Tableau VI.3 : statistiques du canal eU/K :

Canal	UKRATIO
-------	---------

Nombre des mesures :	146627
Nombre des valeurs aberrantes	8655
Valeur minimale	0.36
Valeur maximale	5.95
Valeur moyenne	1.5
Ecart type :	0.68
Seuil A	$A = 1.5 + 2(0.68) = 2.86$

- Identification des anomalies : Chaque valeur supérieure à 2.86 est considérée comme anomalie. Il existe donc 38 anomalies réparties sur toute la région d'étude comme l'illustre la **figure VI.17**.

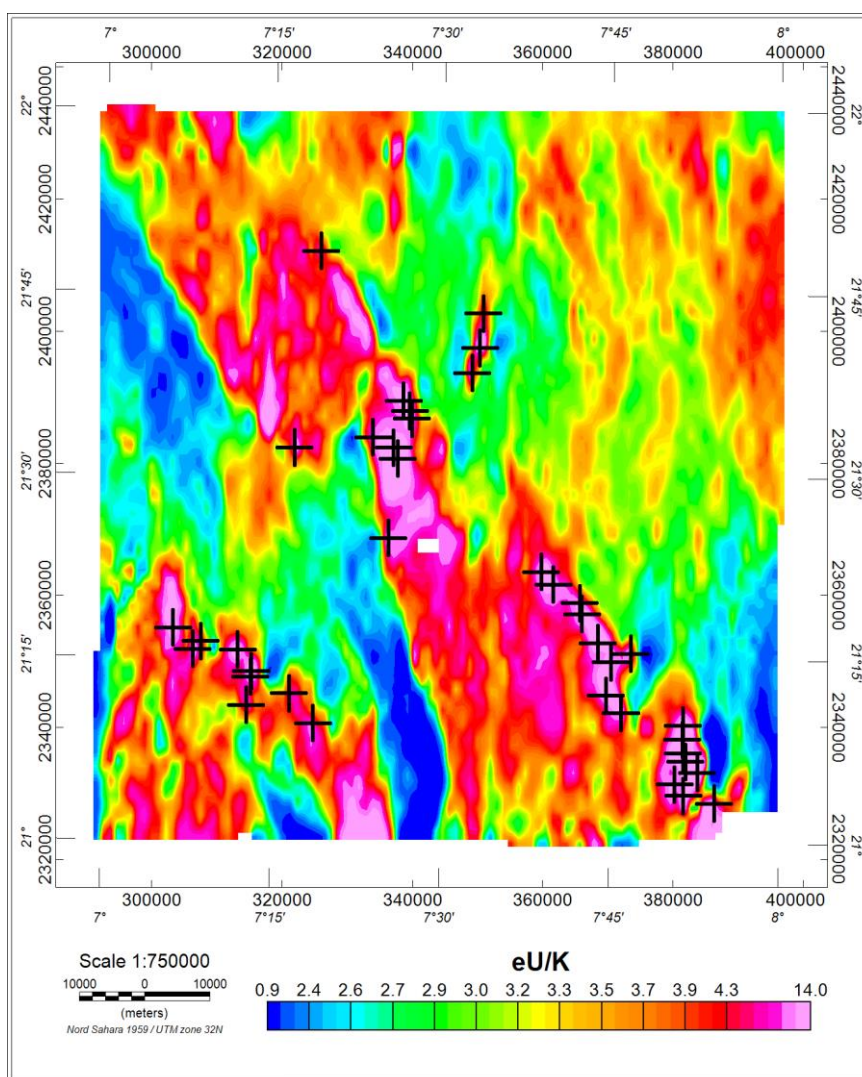


Figure VI.17 : Distribution des anomalies du rapport U/K

- Distributions des anomalies :

Il existe une certaine ressemblance entre la répartition des anomalies d'uranium et celle des anomalies du rapport eU/K. La **figure VI.18** représente la comparaison entre les deux cartes de distribution.

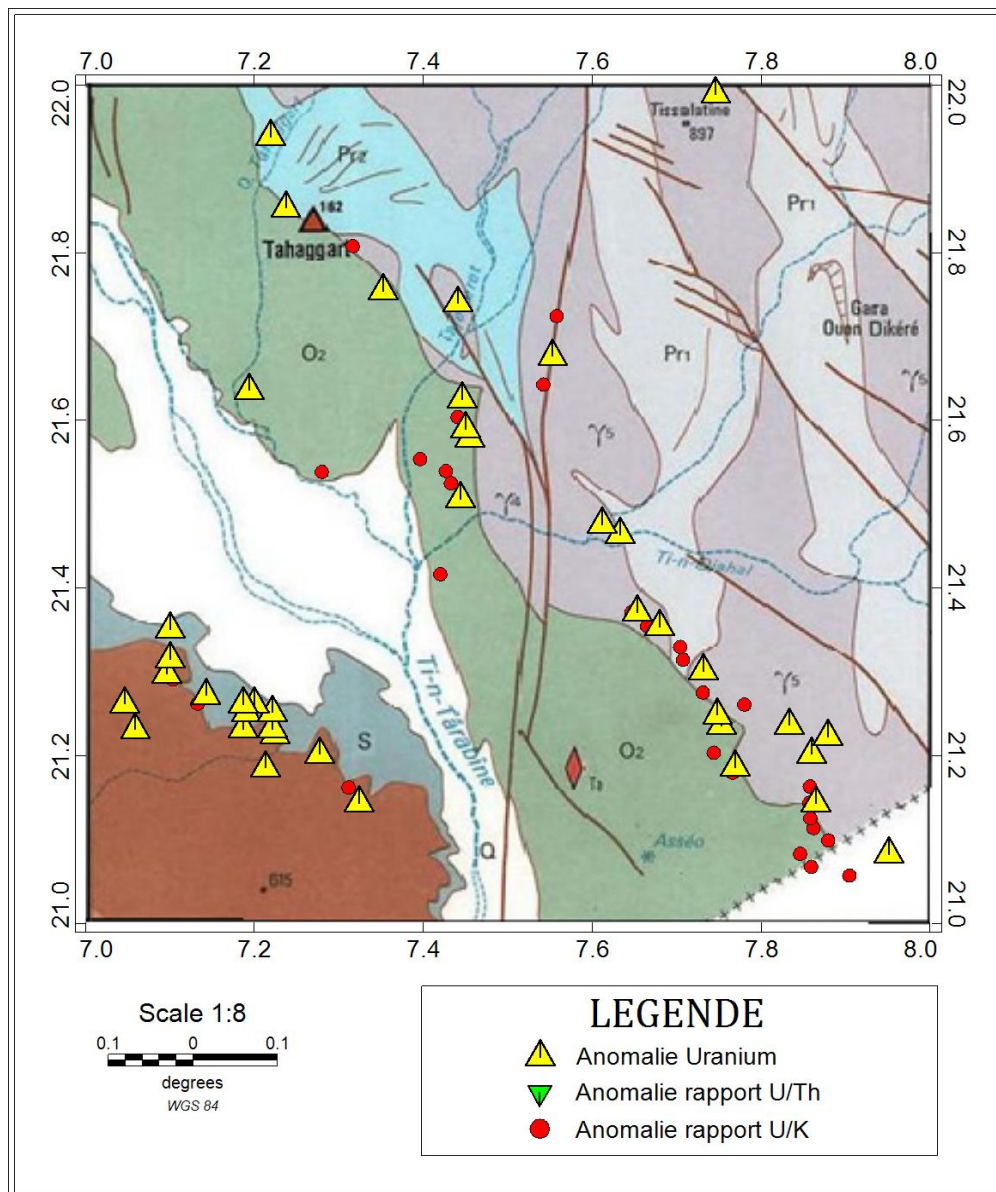


Figure VI.18 : Comparaison entre la répartition des anomalies d'uranium et du rapport U/K

3.3. Délimitation des zones d'anomalies :

La superposition des trois résultats d'analyse (**figure VI.19**), U, U/Th et U/K nous a permis de dégager les zones potentielles à contenir de probables accumulations du minerai d'uranium.

Les fortes valeurs d'uranium par rapport aux valeurs de potassium et de thorium se manifestant au-dessus de zones géographiquement restreintes peuvent indiquer des conditions favorables à une minéralisation uranifère

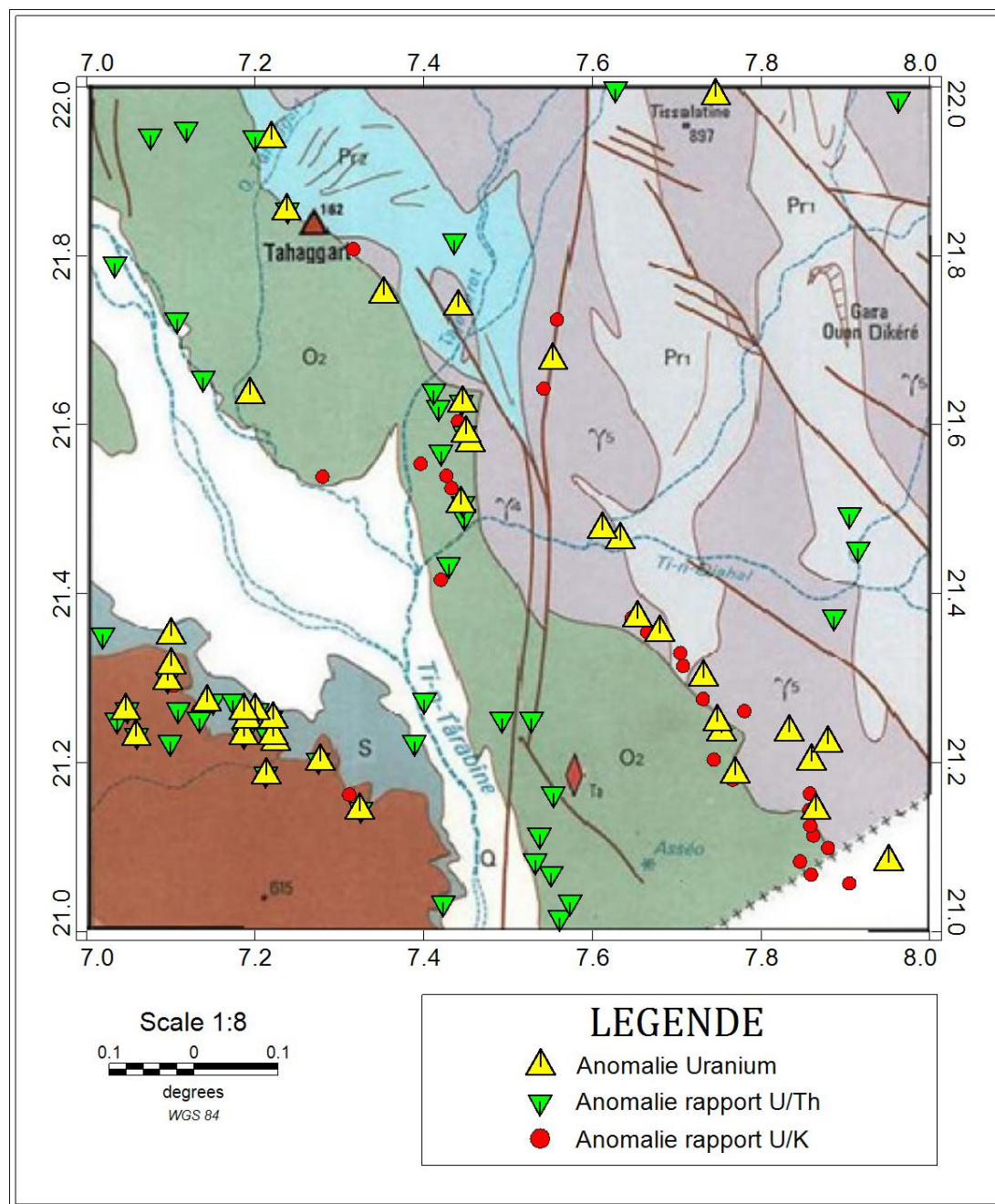


Figure VI.19 : Carte d'anomalies radiométriques U, U/Th et U/K.- région d'Asséo

L'analyse visuelle de la répartition des anomalies indique la présence de trois zones perspectives qui ont d'intéressantes signatures radiométriques. Ces zones sont délimitées dans *la figure VI.20*.

Les zones potentielles sont :

- **Zone 1** : c'est la plus petite, située au Nord-Ouest, le long du contact entre le Socle cristallin et le -bassin de Tin Seririne représenté par les grès du cambro-ordovicien et les facies amphibolites du protérozoïque moyen.
- **Zone 2** : Située au milieu de la région d'étude entre les granites intrusifs du socle précambrien et les grès du Cambro-ordovicien. Elle a une direction Nord-Sud
- **Zone 3** : c'est la plus importante en surface. Elle est, située au Sud-Ouest de la région le long de la limite entre les argiles du Silurien et les grès du Dévonien inférieur. Elle s'étend approximativement dans la direction Est-ouest à ESE-WNW

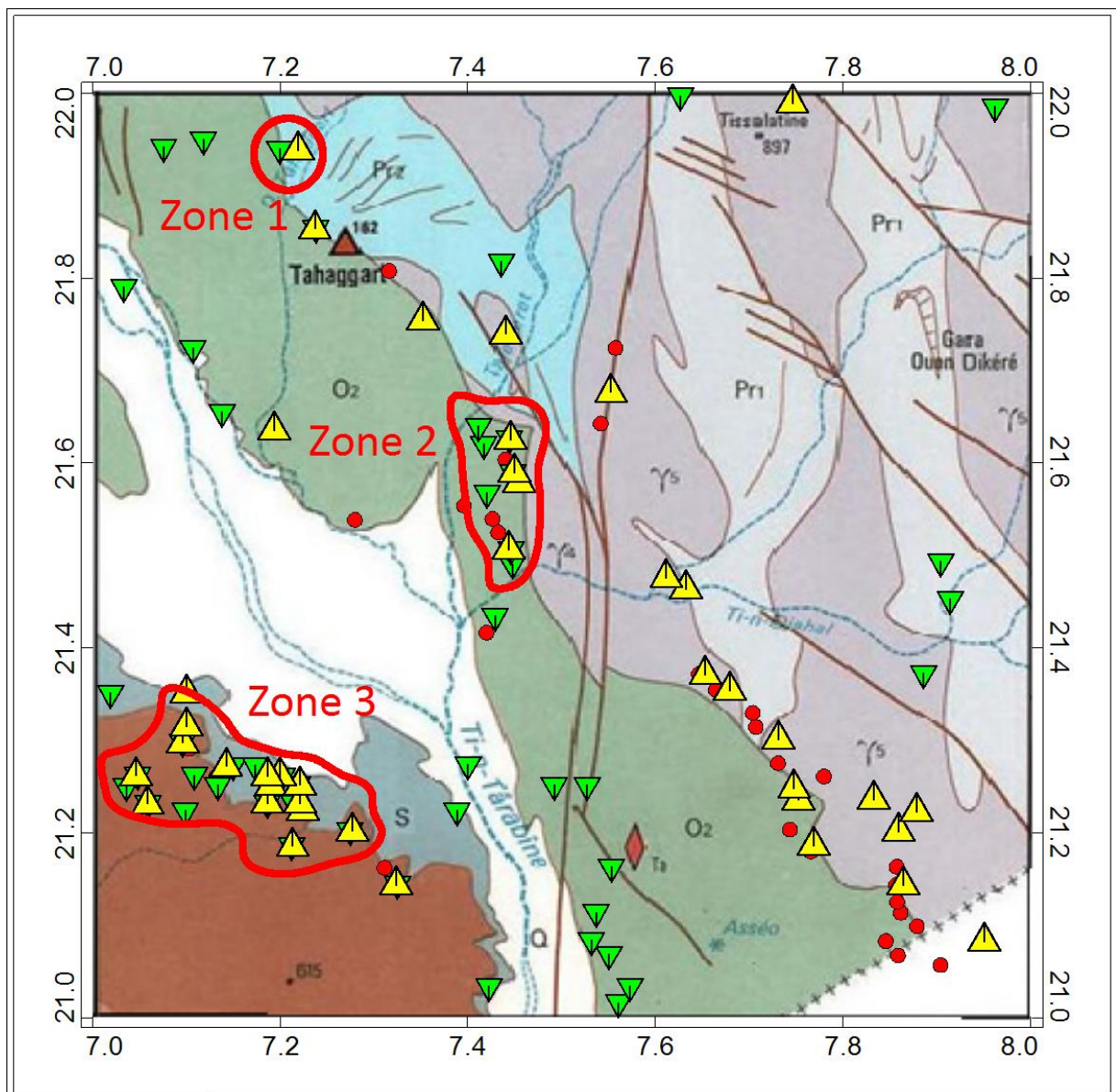


Figure VI.20 : Carte géologique de la région d'Asséo montrant les zones potentielles

Conclusion Générale

COCLUSION GENERALE

A l'issu de ce travail, ayant pour but, la mise en évidence des anomalies et indices uranifères dans la région d'Asséo nous avons pu dégager les paramètres radiométriques de chaque domaine géologique, en utilisant un levé spectrométrique aéroporté acquis dans les années 1970.

La zone d'étude est un vaste domaine, appartenant à deux cycles hétérogènes, cycle précambrien et cycle paléozoïque. La minéralisation uranifère peut être localisée aussi bien dans les terrains d'altération que dans les parties marginales des premiers niveaux de base de la couverture sédimentaire paléozoïque (contact socle cristallin-bassin sédimentaire). Du point de vue tectono-lithologique, le socle cristallin précambrien contient plusieurs compartiments et est traversé par une faille majeure, l'accident 7°30'.

Caractérisée par ses avantages opérationnels et techniques, la prospection aérogéophysique constitue un outil très efficace pour la recherche des anomalies ayant un intérêt minier. En effet, l'analyse des données du levé aérien réalisé au-dessus de notre région d'étude nous a permis de localiser les zones d'anomalies radiométriques ayant un potentiel uranifère ainsi que la délimitation des différents domaines structuraux dans la région d'étude.

L'application des différents types de corrections aux données brutes, nous a permis de supprimer les bruits qui affectent les mesures et de calculer les concentrations équivalentes en radioéléments. Dans la chaîne du traitement des données spectrométrique, l'application des différents filtres numériques « linéaire, passe-bas et directionnel » nous a permis de mettre en évidence les différentes structures et formations lithologiques ainsi que l'établissement des cartes interprétatives, directement exploitable pour les géologues.

L'interprétation qualitative des données traitées a montré que les concentrations relatives en radioéléments sont fortement associées à la nature lithologique des formations géologiques de notre région d'étude. En effet, les faibles concentrations sont liées au bassin de Tin Siririne alors que les valeurs élevées sont attaché essentiellement aux granites du socle précambrien.

Du point de vue quantitative, l'application de la méthode statistique d'interprétation, nous a permis de localiser, avec plus de précision, les anomalies spectrométriques ainsi que les limites des cibles uranifères et de délimiter les zones potentielles majeures.

Ces zones nécessitent une étude plus détaillée qui comprend une nouvelle campagne aérogéophysique à petite échelle, des mesures au sol, un échantillonnage géochimique et géologique afin de vérifier leurs potentialités et estimer leurs teneurs en uranium.

Liste des figures :

N° Figure		Page
CHAPITRE I		
I.1	Le Pechblende	13
I.2	Une proposition d'origine des corps de Minerai d'Uranium	16
CHAPITRE II		
II.1	Carte des principaux domaines structuraux du Hoggar.	22
II.2	Situation géographique de la région d'étude	25
II.3	Carte geologique de la région d'Asséo	26
II.4	Carte topographique de la région d'Asséo	31
CHAPITRE III		
III.1	Interaction des rayons avec la matière	37
III.2	Les différents domaines du spectre électromagnétique	40
III.3	Diagramme en énergie du noyau de nickel 60. Emission de deux photos gamma à la suite de la désintégration beta moins.	41
III.4	Pouvoir de pénétration des rayonnements	41
III.5	Trajectoire imaginaire de la particule β dans la matière	42
III.6	Effet photoélectrique	43
III.7	Diffusion Compton – Collision d'un photon avec un électron au repos	44
III.8	Processus de la création de paire	44
III.9	Courbe de décroissance radioactive	46
III.10	Exemple du schéma de désintégration du cobalt 60Co	47
III.11	Succession de désintégration d'un isotope instable « père »	47
III.12	Spectre d'énergie de la radioactivité naturelle (SCINTREX , 1980)	49
III.13	Spectromètre a rayon gamma GS 256	50
CHAPITRE IV		
IV.1	orientation et espacement entre les lignes de vol	53
IV.2	Carte géologique de la région étudiée avec la superposition des lignes d'acquisition de mesure de la spectrométrie.	54

CHAPITRE V

V.1	localisation de la ligne L11582 sur le GRID	57
V.2	Profile L11582 avant le filtrage passe-bas	59
V.3	Profile L11582 après le filtrage passe-bas	60
V.4	Contributions relatives des rayons gamma dans les trois fenêtres.	65
V.5	Profile L11582 corrigé	67
V.6	les rapports U/Th, U/K, et Th/K sur le profile 11582 :0	69

CHAPITRE VI

VI.1	Cartes spectrométriques corrigées non filtrées	71
VI.2	Cartes des rapports radiométriques eU /eTh, eU/K et eTh /K	72
VI.3	Filtre directionnel en 2D et 3D	73
VI.4	Carte représentant le comptage total (TC) de la région d'Asséo	74
VI.5	Carte représentant la concentration en radioélément eTh (ppm)	75
VI.6	Carte représentant la concentration en radioélément eU (ppm)	76
VI.7	Carte représentant la concentration en K (%)	77
VI.8	Carte représentant la variation du rapport eTh/K	78
VI.9	Carte représentant la variation du rapport eU/eTh	79
VI.10	Carte représentant la variation du rapport eU/K	80
VI.11	Image ternaire spectrométrique U, Th et K	83
VI.12	tracé des unités radiométriques dans la carte ternaire	85
VI.13	Distribution des anomalies d'uranium	87
VI.14	Distribution des anomalies du rapport eU/eTh	89
VI.15	profile radiométrique de la ligne L11239	90
VI.16	Répartition des anomalies d'uranium et du rapport U/Th	90
VI.17	Comparaison entre la répartition des anomalies d'Uranium et du rapport U/Th après la diminution du seuil.	91
VI.18	Distribution des anomalies du rapport U/K	92
VI.19	Comparaison entre la répartition des anomalies d'uranium et du rapport U/K	93
VI.20	Carte d'anomalies radiométriques U, U/Th et U/K.- région d'Asséo	94
VI.21	Carte géologique de la région d'Asséo montrant les zones potentielles	95

Bibliographie :

- [01] Abdelkader SEMIANI, Ahmed ABED et Mohamed BELLAL, - L'URANIUM EN ALGERIE : Ressources et perspective, Office national de recherche Géologique et Minière, 20p, p. 12-15.
- [02] Bertrand, J.M.L. and M. Lasserre, (1976) Pan-African and pre-Pan-African history of the Hoggar (Algerian Sahara) in the light of new geochronological data from the Aleksod area, Precambrian Res., n°3, p. 343- 362,.
- [03] Bournas N., (2001), Interprétation des données Aérogéophysique Acquises au-dessus du hoggar Oriental, Thèse doctorat d'état , USTHB 250p pp50 - 51
- [04] Cuney M, (2009), the extreme diversity of uranium deposits, Mineralium Deposita, 44p, p. 3–9.
- [05] Mme p.(Marie) Curie, (1910), Traite de radioactivité, école polytechnique de paris, Tome I.
- [06] Goldak Air borne surveys (2009), Rapport technique sur un levé aéroporté magnétique a gradient horizontal et spectrométrie.
- [07] Helmy S. O. Abouelnaga , Hassan El-Shayeb, Tarek Mahmoud, Ibraheem Gaafar et Atef Abu Donia, (2014), Ground geophysical survey for studying the potentiality of uranium mineralization in rhyolite zone - Um Safi area, Central Eastern Desert, Egypt - Saudi Society for Geosciences., 25p, p. 4-10.
- [08] J. Asfahani, R.Al-Hent et M.Aissa, (2009), Uranium statistical and geological evaluation of airborne spectrometric data in the Al-Awabed region and its surroundings (Area-3), Northern Palmyrides, Syria, Geology department - Atomic Energy commission, 10p, p2-3.

- [09] J.Garnier-Laplace (14-05-2001) - Fiche radionucléide uranium naturel, Direction de l'environnement et de l'intervention - Service d'étude du comportement des radionucléides dans les écosystèmes, 16p.
- [10] J. Korenaga (2011), (Earth's heat budget : Clairvoyant geneutrinis), nature Geoscience, vol. 4, n 9, p 581-582
- [11] Kitkham and Rescoe (1993) – Geochemistry of hydrothermal Ore deposits
- [09] M.LELUBRE, (1952) - Conditions structurales et formes de relief dans le Sahara. Ed: Inst. Rech. Saha., Alger, Tome VIII. pp.189 -190.
- [12] Minty, B.R.S., (1997). The fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics n°17(2): p 39-50.
- [13] OULD HAMOU A., LARBI BOUAMRANE S., KEBACHE A. et KACEMI A. (2012)- Provinces uranifères du Hoggar cristallin et ses Bordures sédimentaires Hoggar, Algérie, Publ. 2eme Colloque International Géol. Sahara, pp. 82-88.
- [14] RAPPORT PRELIMINAIRE 1970-1979, SONAREM.
- [15] Rasolomanana E., Andriamirado L.C., Randrianja R., Ratefiarimino A., Madamines,(2010). Analyse et interprétation des données aéromagnétiques et spectrométriques de la région d'Andriamena vol. 1, 13p, p.10-12.
- [16] Sintrex , (1980) - Geophysical and géochimical instrumentation and service.
- [17] Segun M.K.(1971) : La géophysique et les propriété physique des roches .Quebec.
- [18] Serra O.(1979) : Diagraphie différeé, Base interprétation, Tome1 : Acquisition des données diagraphiques .
- [19] AGRS Surving (1991) Airborne gamma ray spectromer surving par l'Agence international de l'énergie Atomique Vienne,