

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة
Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

**Option Recherche et Prospection des Ressources
Minérales et Energétiques**

THEME

**Etude géologique et géostatistique de l'Uranium (U) dans le
gisement de phosphate de Kef Es Sennoun
(Algérie Orientale)**

Par
BOUDRIES AMEL

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. MEZGHACHE Hamid Univ. Badji Mokhtar - Annaba

DEVANT LE JURY

Présidente : Dr. ARAFA Mennana Univ. Badji Mokhtar - Annaba
Examineurs : Dr. TOUBAL Abdrrahmane Univ. Badji Mokhtar - Annaba
Dr. BOUABSA Lakhdar Univ. Badji Mokhtar - Annaba
**Membre invité : HARKET A. Elhak Directeur du complexe minier de
Djebel Onk - SOMIPHOS**

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	2
1. - GENERALITES SUR L'URANIUM	4
1. - 1. - Caractères physico-chimiques et économiques.....	4
1. - 2. - L'uranium dans les phosphates sédimentaires.....	6

PARTIE -I- **GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE**

1. - GEOLOGIE REGIONALE DE DJEBEL ONK	16
1. - 1. - Stratigraphie.....	16
1. - 2. - Tectonique	21
1. - 3. - Paléogéographie.....	23
1. - 4. - Minéralogie, pétrographie et géochimie des phosphates de Djebel Onk.....	26
2. - GEOLOGIE DU GISEMENT DE KEF ES SENNOUN.....	31
2. - 1. - Travaux de prospection effectués	31
2. - 2. - Stratigraphie.....	31
2. - 3. - Tectonique	33
2. - 4. - Pétrominéralogie des phosphates de Kef Es Sennoun.....	34
2. - 5. - Caractérisation des différents faciès lithologiques.....	38
2. - 6. - Etude pétrographique du minerai de Kef Es Sennoun.....	40

PARTIE -II- **GEOSTATISTIQUE ET ESTIMATION DES QUANTITES EN URANIUM METAL**

1. - ANALYSE DE DONNEES.....	45
1. - 1. - Rappel sur les résultats d'estimation de U dans le gisement de Djemi Djema	45
1. - 2. - Analyse de données chimiques sur U dans le gisement de Kef Es Sennoun.....	48
2. - VARIOGRAPHIE AU GISEMENT DE KEF ES SENNOUN.....	57
2. - 1. - Travaux préparatoires.....	57
2. - 2. - Calcul et ajustement des variogrammes expérimentaux moyens.....	58
3. - KRIGEAGE ORDINAIRES DES TENEURS DE P₂O₅ ET DE U...	67
3. - 1. - Paramètres de krigeage	67
3. - 2. - Comparaison des résultats obtenus sur U estimé par régression linéaire simple et régression linéaire multiple	68

3. – 3. – Cartographie des teneurs des blocs krigés.....	68
3. – 4. – Statistique des teneurs des blocs krigés et estimation des quantités en U métal...	78
CONCLUSIONS GENERALES.....	84
ANNEXE I : RAPPELS SUR LES PHOSPHATES SEDIMENTAIRES.....	86
ANNEXE II : METHODES ANALYTIQUES.....	95
ANNEXE III : RAPPEL SUR LES METHODES STATISTIQUES ET GEOSTATISTIQUE UTILISEES.....	97
BIBLIOGRAPHIE.....	112

RESUME

Les minerais de phosphates contiennent des éléments tel que l'uranium en tant que sous-produit qu'il convient d'éliminer afin de préserver l'environnement d'une part et éventuellement l'utilisation de l'uranium récupéré dans le domaine nucléaire civil d'autre part. L'Algérie possède des réserves considérables en phosphates atteignant deux milliards de tonnes, qui se localisent dans la région de Djebel Onk au Sud Est de l'Algérie. Le gisement de Kef Es Sennoun en fait partie. Il constitue le gîte principal actuellement exploité par l'entreprise SOMIPHOS-FERPHOS.

L'horizon porteur de la minéralisation phosphatée est représenté essentiellement par l'assise thanétienne supérieur avec une épaisseur moyenne de 30m.

Le faisceau phosphaté a été subdivisé par de nombreux auteurs. Les principales subdivisions sont celle de Mezghache (1991) et Prian et Cortiel (1993).

En tenant compte des subdivisions initiales, de la composition chimique, lithologique et des conditions d'exploitation, le faisceau a été subdivisé en quatre niveaux d'une épaisseur moyenne de 10m. Il s'agit du niveau 1 représenté par la couche de la dolomie phosphatée notée minerai II_T, les Niveaux 2 et 3 représentés par la couche productive (PI) et enfin le niveau 4 qui est représenté par l'alternance marnes-phosphates-dolomie du mur notée II_M.

Au niveau du bassin phosphaté de Djebel Onk, la répartition de U dans le gisement de Djemi Djema a été étudiée (Mezghache et al, 2006). Pour le gisement de Kef Es Sennoun, Nous avons prélevé des échantillons par saignée de 1m du front de carrière. Ces derniers furent analysés sur P₂O₅, MgO, CaO, RI, CO₂, Fe₂O₃, SiO₂ et U au laboratoire d'analyse de Ferphos –Bir El Ater- et au laboratoire du Génie des Procédés au Centre de Recherche Nucléaire de Draria –CRND- Alger. L'analyse de données a permis de calculer les différents paramètres statistiques, les corrélations existantes entre les éléments chimiques et enfin la détermination des associations minéralogiques. Il en ressort que U est corrélé positivement à P₂O₅ et négativement à MgO. Ces corrélations ont permis d'élaborer deux modèles linéaires l'un simple et l'autre multiple. Ces derniers ont été utilisés pour l'estimation de U dans les carottes de sondages.

Chaque niveau a été subdivisé en blocs d'exploitation de 100m de longueur, 20m de largeur et 10m de hauteur. Les teneurs en P₂O₅ et U dans chacun de ces blocs ont été estimés par la procédure de krigeage ordinaire. La cartographie des teneurs krigées en U et P₂O₅ a permis de visualiser la répartition des blocs estimés pour chacun des quatre niveaux d'exploitation. Les résultats obtenus (Estimation et cartographie) montrent que les niveaux 2

et 3 sont les niveaux les plus riches en P_2O_5 . Ce ci confirme les résultats obtenu par Dassamiour (2005). Les quantités de U métal pour ces deux niveaux comme P_2O_5 sont les plus importantes.

Cette étude a relevé l'importance de ce secteur au terme des quantités d'uranium. Une exploitation sélective qui doit tenir compte des zones potentielles en Uranium est recommandée.

ملخص

يحتوي الفوسفات على مواد ثانوية مثل اليورانيوم والتي يجب إزالتها لحماية الطبيعة من جهة، و استخراج اليورانيوم المستخلص من جهة أخرى و استعماله في الطاقة النووية المسالمة. تملك الجزائر احتياطات كبيرة من الفوسفات، تصل إلى حدود المليارين طن، تتمركز أساسا في منطقة جبل العنق، جنوب شرق الجزائر.

يعتبر منجم الفوسفات "كاف السنون" للحوض المنجمي "جبل العنق" جنوب شرق الجزائر أهم منجم في طور الاستغلال و يقدر متوسط الارتفاع للطبقة المنتجة للحقبة الجيولوجية "طانسيا علوي" بـ35م . لقد قسمت الطبقة الفوسفاتية من طرف عدة مؤلفين. من أهم التقسيمات نجد تقسيم بريون و كورتيال (1993) و تقسيم مزغاش (1991) . قسم بريون و كورتيال(1993) الطبقة الفوسفاتية من الأسفل إلى الأعلى من دولومي فوسفاتية، الطبقة المنتجة، و تناوب بين مارن، فوسفات، دولومي. إضافة إلى هذه الثلاث طبقات أضاف مزغاش طبقتين ثانويتين.

في منجم الفوسفات "جبل العنق" تمت دراسة توزيع اليورانيوم في منجم جميعمة (مزغاش و هني ،2000). في منجم "كاف السنون" لدينا عينات و أجرينا عليها تحاليل على العناصر الكيميائية التالية : P_2O_5 , MgO , CaO , RI , CO_2 , Fe_2O_3 , SiO_2 et U . و أظهرت النتائج أن اليورانيوم مرتبط إيجابيا مع P_2O_5 و سلبيا مع MgO . هذه النتائج سمحت باستخراج معادلة خطية بسيطة و الأخرى متعددة . هذين المعادلتين استعملنا لتقدير اليورانيوم في عينات الاستكشاف لشركة البحث الجيولوجي و الدراسة الم نجمية (EREM). هذه المذكرة تعالج توزيع اليورانيوم في مختلف أنواع الفوسفات بواسطة الطرق الإحصائية و الطرق الجيوإحصائية. سمحت الدراسة الإحصائية بتحديد مختلف العوامل الإحصائية، حساب عوامل الارتباط بين العناصر الكيميائية، و تحديد المجموعات المعدنية.

لقد قسم منجم الفوسفات لكاف سنون حسب التركيبة الصخرية إلى أربع مستويات، كل مستوى قسم إلى مجسمات بطول 100 م، عرض 20 م و ارتفاع 10م.

سمحت الدراسة الجيوإحصائية بتقدير كمية P_2O_5 و اليورانيوم في كتل الاستغلال بطول 100 م، عرض 20 م و ارتفاع 10م بطريقة " الكريجاج العادي". الدراسة الرقمية للجيولوجيا الإحصائية للمنجم تمت بواسطة دوال فارينوغرام تطبيقية ذات بعدين و هي دوال فارينوغرام أسية ذات قيمة مضافة.

رسم خرائط النسب المقدر لكل من P_2O_5 و اليورانيوم صمغ بالحصول على خريطة كتل الاستغلال لكل مستوى . هذه الخرائط تظهر بأن المستويين 2 و 3 هما المستويين الأكثر غنى من حيث نسب P_2O_5 و كمية اليورانيوم. النتائج المحصل عليها تظهر أهمية هذا المنجم من احتياطات اليورانيوم لهذا نقترح إذن استعمال طريقة استغلال انتقائية تأخذ بعين الاعتبار المستويات الغنية.

INTRODUCTION

SOMIPHOS-FERPHOS a décidé de procéder à la fabrication d'acide phosphorique par la transformation de 6 millions de tonnes de minerais de phosphates avec une teneur moyenne en U supérieur à 40 ppm. Cette transformation génère des rejets solides et liquides. Ces rejets sont accompagnés de métaux lourds et radioactifs tel que l'uranium. Afin de préserver l'environnement et d'éviter toute pollution, il est nécessaire de procéder à sa récupération.

Il est à rappeler aussi que face à l'augmentation de la demande mondiale en électricité d'un coté et les problèmes de réchauffement climatique (les gazes à effet de serre), la hausse du prix de pétrole et le risque de sa pénurie d'un autre, le monde se voit en obligation de se tourner vers d'autres types d'énergies durables tel que l'uranium.

Les sources d'uranium métal sont diverses. On note les sources primaires (gisements d'uranium) et les sources secondaires (uranium comme sous produit) tel que les phosphates. L'uranium de ces derniers peut être récupéré à l'occasion de la fabrication de l'acide phosphorique afin de préserver l'environnement d'une part et préparer l'après pétrole en utilisant U comme source d'énergie d'une autre part.

Le présent travail consiste à estimer les concentrations uranifères et connaître leur répartition dans les différents types de minerai de phosphate afin d'en tenir compte lors de l'exploitation et d'adopter la méthode d'enrichissement la plus approprié. Pour cela il a été nécessaire de procéder à :

- L'étude géologique de la région de Djebel Onk et du gisement de Kef Es Sennoun objet de notre étude.
- L'étude pétrographique afin de préciser la composition minéralogique,
- L'analyse des données chimiques et géostatistique afin d'estimer les quantités en uranium métal.

Les résultats obtenus sont présentés dans le présent mémoire en deux grandes parties

SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le district de Djebel Onk est situé à environ 100Km au Sud de la ville de Tébessa, à l'extrémité orientale de l'atlas saharien sur la frontière algéro-tunisienne. Il se présente sous forme d'un massif calcaireux de 20Km de long qui culmine à 1198m d'altitude au Djebel Tarfaya. Ce bassin minier renferme plusieurs indices et 5 gisements (Fig. 1) :

- Gisement de Djemi-Djema
- Gisement de Djebel Onk Nord.
- Gisement de Bled Hadba.
- Gisement de Oued Betita.
- Gisement de Kef Es Sennoun.

Ce dernier qui est l'objet de notre étude est situé sur le flanc méridional de Dj Onk, à environ 09Km au Sud Ouest de la ville de Bir El Ater.

Le bassin de Djebel Onk se situe dans la zone des climats sub-désertiques caractérisés par deux saisons très nettes ; un hiver froid et rigoureux et un été chaud où les températures peuvent dépasser 45°. Les précipitations sont peu abondantes, n'excédant pas en moyenne 300 mm/an. La végétation est pratiquement inexistante. En hiver les chutes de neige se produisent régulièrement sur les sommets, les gelées sont nombreuses et les pluies sont souvent, brèves mais parfois leur forte intensité occasionne des crues très violentes. Le vent dominant est le Sirocco, vent sec et chaud dont l'effet de dessèchement au printemps peut-être catastrophique sur les cultures. La population est peu dense. Sa situation économique s'est améliorée grâce à l'installation du complexe minier à Bir El Ater ; ce qui a contribué à l'agrandissement et au développement de la ville.

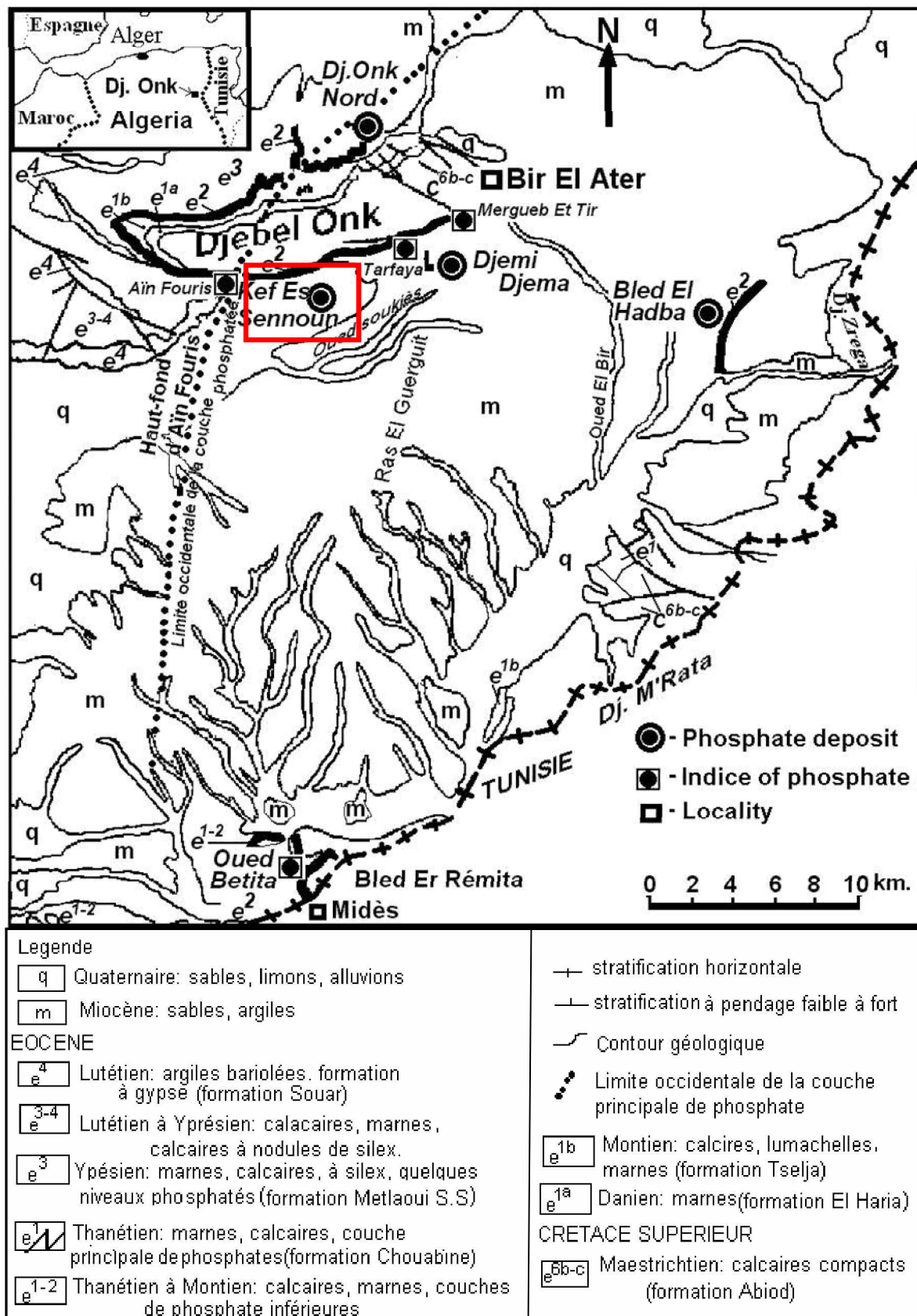


Fig. 1- Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian et Cortiel, 1993)

***GENERALITES
SUR
L'URANIUM***

1. – GENERALITES SUR L'URANIUM

L'uranium est un élément radioactif qui a été découvert en 1789 par Klaproth, quelques années après la découverte de la planète Uranus 1781 (par Herschel).

1. – 1. – CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES ET ECONOMIQUES

1. – 1. – 1. - Caractères physiques

L'uranium est un métal gris et dur, il est relativement répandu dans l'écorce terrestre (50 fois plus que le mercure par exemple). A l'état naturel il se trouve dans des roches combinées à d'autres éléments chimiques. Il a un numéro atomique égale à 92, et un poids atomique naturel égale à 238,07. Il est formé essentiellement de trois radionucléides U234, U 235 et U 238 qui sont présent dans la nature dans une proportion de 0,006%, 0,72% et 99,2%.

1. – 1. - 2. - Caractères chimiques

Dans la classification périodique l'uranium se place dans la septième période, dans le groupe 6. Il se trouve dans la colonne du chrome, molybdène et tungstène. C'est un métal à caractère fortement électropositif, il a une densité de 19,05 à 25°C. L'uranium fond vers 1132°C, boue vers 3818°C et brûle facilement dans l'air entre 150 et 175°C. Il est soluble dans les acides chlorhydriques et nitriques, et insolubles dans les alcalis. L'uranium est présent dans la nature à des états de valence de +3, +4, +5 ou +6, mais plus couramment à l'état hexavalent. Dans la nature, l'uranium hexavalent est souvent lié à l'oxygène sous forme d'ion uranyle, UO_2 . Avec les métaux, l'uranium donne des alliages nombreux, l'existence de ses alliages est d'autant plus probable que les métaux associés sont fortement électronégatifs. Parmi les composés de l'uranium, on peut citer le trioxyde d'uranyle, UO_3 , le chlorure d'uranyle, UO_2Cl_2 , le tétrachlorure d'uranium, UCl_4 et l'oxyde uraneux, UO_2 .

1. – 1. - 3. - Economie

L'uranium est utilisé comme pigment pour le verre, cependant son utilisation la plus courante est comme combustible nucléaire pour produire l'énergie électrique. L'uranium 235 peut servir à la réalisation de bombes atomique (A), ou de bombes thermonucléaires (H). L'uranium appauvri, qui est un déchet de l'enrichissement de l'uranium est utilisé essentiellement pour la fabrication d'ailes et de gouvernails d'avions, de quilles de voilier, de protection contre les effets biologiques des rayonnements ionisants, de collimateurs

d'appareils d'irradiation médicale. Dans le domaine militaire, il est utilisé pour le blindage de certains chars et la fabrication d'obus perforant.

a. - Les pays producteurs

La majeure partie de l'uranium produit dans le monde vient actuellement du Canada, suivi de l'Australie et du Niger.

En 2006. La production de U métal est de l'ordre de 40000t. Les principaux pays producteurs sont le Canada (25% de la production soit 9862t), l'Australie (19% de la production soit 7593t), le Kazakhstan (13% de la production 5279), le Niger (8% de la production soit 3434t), la Russie (8% de la production 3400t U), la Namibie (7% de la production 3077t d'U). Le reste de la production (moins de 20%) se partage entre petits producteurs tel que l'Afrique de Sud, l'Ouzbékistan, l'Ukraine et les Etats Unis.

b. - Principales compagnies productives d'uranium en 2005 (selon World nucléaire association)

Comeco est la plus grande compagnie productrice en 2005, sa production s'approche de 7220t d'U soit à peu près 20% de la production mondiale.

Tableau.1 : les Principales compagnies productives d'uranium en 2005 (selon World nucléaire association)

Principales compagnies productives d'uranium en 2005	% de production
Cogema (Canada, France, Niger, United Stats, Australie)	19%
Cameco (Canada,United Stats, Australie)	20%
ERA (Australie)	10%
Westerm mining corporation (Australie)	10%
Navoi (Uzbekistan)	7%
Rossing (Niamibi)	6%
Priargrinsky (Russie)	6%
Kazatomprom (Russie)	6%
Autres	16% %

c. - Pays consommateurs

Les pays développés et industrialisés consomment énormément d'énergie notamment les grandes puissances militaires et économiques en particulier les Etats Unis, la Russie, le Japon, L'Europe Occidentale (France, Italie, Angleterre....), la Chine est en dernière position , quelques pays en voie de développement comme le Pakistan et l'Inde.

d. - Le prix de U

Les années 1970 virent une nouvelle demande émergée avec le démarrage de l'énergie nucléaire civile, et la construction de centrales nucléaires. Cette demande s'effondra au début des années 1980, d'une part parce que les constructions de centrales étaient achevées, et d'autres part parce que la pression d'opinion antinucléaire suite aux catastrophes de Tchernobyl. Le prix de U avait atteint 43US\$/lb U₃O₈ en 1978, et était de 32.90 US\$/lb U₃O₈ en 1981. Il atteint son minimum de 7 US\$/lb en 2001. Depuis, son prix est remonté à 130 US\$/lb en 2007, atteignant pratiquement les hauteurs historiques de 1977.

1. – 2. - L'URANIUM DANS LES PHOSPHATES SEDIMENTAIRES

Les phosphates bruts renferment, différents éléments chimiques, parmi ceux-ci, l'uranium. D'après (Slansky, 1980), dans la plus part des gisements de phosphate, la teneur en U est souvent inférieure à 100ppm et ne dépasse qu'assez rarement 200ppm. Quelques gisements présentent des teneurs beaucoup plus élevées ex : le gisement de Bakouma en République centre Africaine qui titre jusqu'à à 5600 ppm (Gony, 1971), le gisement de Mussourie en Inde (en moyenne 408 ppm), en Sibérie (100 à 4000 ppm) (Gabshin et al, 1974).

1. – 2. – 1. - Modes de liaison entre l'uranium et les phosphates

Toutes les études s'accordent pour associer directement l'uranium à l'apatite dans les gisements de phosphates sédimentaires. L'altération du minerai peut toute fois donner naissance à d'autres minéraux uranifères (vanadates, autunites...), dans le cas d'une altération latéritique détruisant l'apatite, l'uranium paraît s'associer de préférence aux minéraux phosphatés alumino-calciques plutôt qu'à ceux qui ne sont qu'exclusivement alumineux (Slansky, 1980).

Localement la teneur en U augmente très souvent avec la teneur en P₂O₅, mais la relation ne semble vraiment linéaire que pour les faibles teneurs en U, comme l'on montré Coppens et al (1977) jusqu'à 50ppm U, le rapport U ppm/ P₂O₅ % reste compris entre 2 et 3 ; mais au-delà de 50 ppm, il varie de 3.6 à 12 de manière aléatoire. Ces auteurs pensent qu'une partie de l'uranium pourrait être associée à la matière organique ou à des argiles.

D'après Altschuler et al (1958), l'uranium est associé à l'apatite sédimentaire sous deux formes : d'une part U⁴⁺ remplace partiellement Ca²⁺ dans le réseau de l'apatite grâce

notamment à des rayons ioniques comparables (0.97 et 0.99 Å). La substitution de Ca^{2+} par U^{4+} concerne essentiellement les ions Ca_{II} du réseau où les liaisons sont plus lâches et non pas les ions Ca_{I} moins accessibles. D'autre part, U^{6+} qui ne peut entrer dans le réseau en raison de son rayon ionique qui est trop gros pour permettre une pénétration par les tunnels est adsorbé à la surface des cristaux.

1. – 2. – 2. - Mécanismes de concentration de l'uranium dans les phosphates

Pour l'origine de l'uranium, on peut le plus souvent penser à une origine syngénétique. L'uranium provenant de l'eau de mer (3 mg d'U/L soit au total 4,5 milliards) (In Bouchkioua (1993) serait réduit à sa valence 4 dont le rayon ionique (0.97 Å), est voisin de celui du calcium (0.99 Å) et pourrait alors précipiter avec le phosphate de calcium dans la structure apatitique ou dans l'exogangue. Dans d'autres gisements, il y'a certainement un déplacement de l'uranium postérieurement au dépôts de phosphate, car ce dernier est transporté sous sa forme oxydé par la circulation des fluides et précipitera à une interface d'oxydoréduction, notamment au voisinage de produits organiques réducteurs. Donc pour la concentration de U dans les phosphates on distingue une concentration primaire et une concentration secondaire.

Ø **Concentration primaire** : il paraît bien admis désormais que l'eau de mer est la source initiale de l'uranium dans laquelle il est en solution sous forme d' U^{6+} lié à un complexe carbonaté. L'uranium s'intégrerait alors à l'apatite selon le mécanisme suivant Alschuler et al (1958)

Dans les zones favorables à la sédimentation phosphatée, les sédiments du fond marin sont riches en matière organique qui a pour effet de concentrer plusieurs dizaines de fois l' U^{6+} de l'eau de mer et de le réduire en partie en U^{4+} qui pourra s'intégrer alors à l'apatite en cours de minéralisation ; une partie de U^{6+} restant est adsorbé à la surface des cristallites d'apatite. La quantité d'U s'associant à l'apatite va dépendre de différents facteurs. Ainsi, plus la matière organique est abondante, plus il peut y avoir d'U dans les eaux interstitielles et d' U^{4+} disponible pour entrer dans le réseau de l'apatite. De plus, comme le souligne Sheldon (1959), l'abondance de la matière organique va limiter la dimension des cristallites d'apatite qui seront ainsi plus nombreux, augmentant l'importance de la surface spécifique de l'apatite et les possibilités d'adsorption de l' U^{6+} . On peut donc s'attendre à trouver de meilleures teneurs en U dans les phosphates fins que dans les phosphates plus grossiers. Ce qui est vérifié dans divers gisements. Pour la même raison, les débris osseux, grâce à leur porosité, s'enrichissent bien davantage en U (plusieurs centaines de ppm) que les particules

compactes de mêmes dimensions telles que les coprolithes ou les nodules. La vitesse de sédimentation peut jouer également un rôle, les faibles vitesses augmentant la durée du contact des particules phosphatées avec les eaux interstitielles. Mais d'après Gabshin et al (1974) ces mécanismes de concentration primaires de l'uranium ne semblent pas permettre de dépasser des teneurs de 300 à 500p

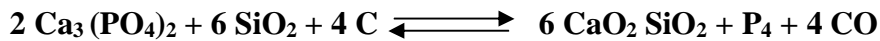
Ø **Concentration secondaire** : lorsque les phosphates sont soumis à l'altération sous l'effet d'une pédogenèse ou de la circulation des eaux, U peut être remis en solution. Les effets de l'altération varient avec son intensité. Si l'altération est intense, comme elle a été en Floride ou au Sénégal, l'apatite est mise en solution à la partie supérieure du profil ; une partie du P s'échappe, le reste se combine avec l'aluminium (Al) des argiles pour donner des phosphates alumino-calciques ou alumineux auxquels U en solution s'associe à nouveau. Les observations faites à Taïba en 1961 ont montré que les phosphates alumino-calciques sont plus riches en uranium que les phosphates de Ca non altérés, un léger enrichissement se produit aussi dans la partie supérieure du phosphate de Ca non transformé. En Floride, la partie inférieure du profil, rendue poreuse par l'altération, admet jusqu'à 2500 ppm, alors que leur teneur habituelle dans cette zone est de 230 ppm Altschuler et al (1958). Une altération plus modérée ne transforme pas minéralogiquement l'apatite. Le phosphate mis en solution recristallisant sous la même forme vers la base du profil et s'enrichissant en uranium. Une partie de la zone enrichie, placée en contact prolongé avec les solutions du sol dans des conditions réductrices, acquiert même des teneurs en uranium dépassant 1000 ppm ; dans ce cas les auteurs pensent qu'un apport extérieur d'U est probable. Un apport extérieur d'uranium paraît d'ailleurs nécessaire à chaque fois que les teneurs en cet élément deviennent élevées. Le dépôt phosphaté sert alors essentiellement de piège à l'uranium en solution dans les eaux souterraines. Dans la mesure où le contact avec le phosphate est suffisamment prolongé, la teneur en uranium des eaux souterraines peut probablement ne pas être très élevée et c'est surtout la qualité du piège qui semble importante. Une dépression structurale ayant drainé longuement des eaux superficielles ou souterraines vers un phosphate riche en matière organique et reposant sur un niveau perméable, paraît ainsi un excellent piège.

1. – 2. – 3. - Récupération de l'uranium à partir de l'acide phosphorique humide

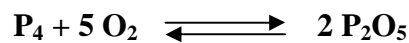
a. - Fabrication de l'acide phosphorique

Deux voies d'accès peuvent être envisagées pour obtenir l'acide phosphorique à partir du phosphate. Ce sont le procédé par voie humide et le procédé par voie thermique.

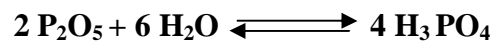
* **Procédé par voie thermique :** l'acide phosphorique est produit à partir du phosphore provenant de la thermoréduction du phosphate tricalcique au four électrique à arc (à une température de 2000° C) en présence du coke (agent réducteur) et de silice (sable). Les réactions qui se produisent conduisent en définitive à un dégagement de CO et de vapeur de phosphore et à la production de scories de silicates de Ca. Les réactions chimiques s'écrivent ainsi :



Après cette étape vient la combustion du phosphore dans l'air pour donner l'anhydride phosphorique selon la réaction :



Enfin en dernière étape l'hydratation de l'anhydride phosphorique selon la réaction :



L'acide obtenu est très pur à haute concentration. Dans ce procédé U se retrouve dans les cendres du four sous forme de silicates d'uranium très réfractaires à la récupération.

* **Procédé par voie humide :** Dans ce procédé l'acide est obtenu par attaque directe du phosphate minéral par un acide fort (acide sulfurique) (Fig. 2). Il est largement utilisé dans le monde car il présente l'avantage de produire un acide ayant un faible prix de revient. Le procédé de fabrication est essentiellement composé de trois sections :

- **Section d'attaque :** la production de l'acide phosphorique est réalisée par l'attaque des phosphates par l'acide sulfurique. Le milieu réactionnel (bouillie) est donc un mélange complexe d'acide phosphorique, sulfurique et fluosilicique (H_2SiF_6) en solution aqueuse et de solides, certains en cours de dissolution (phosphate), d'autres en cours de formation (sulfate de calcium, et fluosilicates de sodium et de potassium principalement). Cette opération complexe est conduite dans un ou plusieurs réacteurs, constitué(s) par des cuves agitées. L'agitation doit assurer le renouvellement du milieu réactionnel autour des grains de phosphate (turbulence importante). Le temps de séjour des produits de la réaction dans le(s) réacteur(s) peut être très variable, essentiellement fonction de la réactivité des phosphates. Rarement inférieur à 2 h.

- **Section de filtration :** La filtration de la bouillie de réaction est effectuée sur des filtres plans sous vide, à grande surface en général. Les tonnages à filtrer sont importants car, pour 1 t de P_2O_5 produite, on génère environ 12 à 15 t de bouillie d'où sont extraites 4,5 à 5 t de gypse et 3 t d'acide formant la production. Le filtre sépare le liquide du solide qui est lavé, évacué et mis en dépôt soit sous forme de produit essoré (25 à 35% d'eau résiduelle), soit en suspension dans l'eau (400 à 500 g/L). Il est aussi, sur de nombreux sites, rejeté dans le milieu naturel, rivière ou mer, où il se résolubilise en majeure partie (sulfate de calcium soluble).

- **Section de concentration :** l'acide phosphorique subit une étape d'évaporation sous vide. L'acide est réchauffé dans un échangeur fonctionnant avec de la vapeur saturée entre 120 et 150°C, il est ainsi porté à sa température d'ébullition, entre 80 et 95°C afin de le concentrer jusqu'à une teneur principale de 54 % en P_2O_5 et ceci dans le but de l'utiliser dans la formulation de certains types d'engrais.

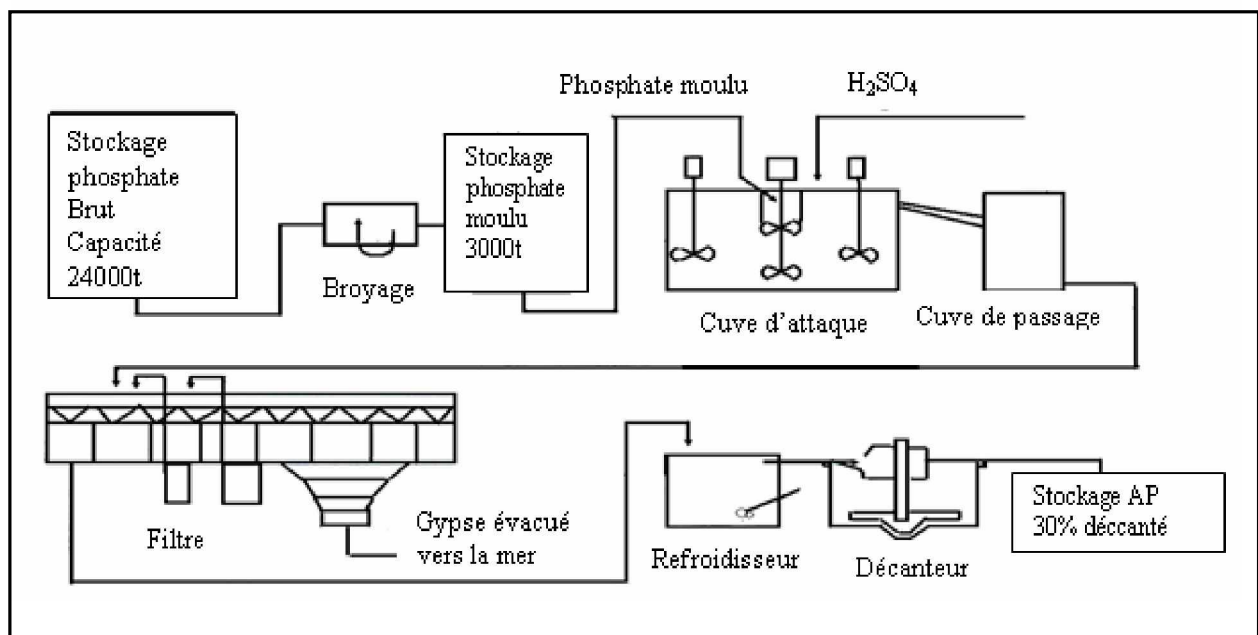


Fig. 2- Procédé de fabrication de l'acide phosphorique par voie humide

b. – Récupération de U de l'acide phosphorique

L'uranium devient un sous produit important de l'industrie des phosphates et la remontée de son cours, a redonné de l'intérêt à son extraction. Ce dernier peut être récupéré à l'occasion de la fabrication d'acide phosphorique (H_3PO_4) humide, car une partie de U,

contenu dans les phosphates, passe en solution dans l'acide phosphorique sous forme de complexes phosphatés $UO_2 \cdot H_2 P_2 PO_4$, et l'autre partie précipite avec les phosphogypses.

Cette récupération est apparue économiquement rentable depuis une vingtaine d'années. Ainsi, en 1980, 12 % de l'uranium utilisé dans le monde provenait du traitement de phosphate. Selon l'AIEA (1989) dans le monde entier, il y a approximativement 400 usines d'acide phosphorique de voie humide à partir des quelles environ 11.000 t U pourraient en principe être récupérés tous les ans. Huit usines ont été construites et actionnées aux Etats-Unis depuis 1976 pour le rétablissement de l'uranium de l'acide phosphorique (la Floride : 6, Louisiane : 2). Des usines ont été également construites au Canada, Espagne, Belgique, Israël, et Taiwan, avec des équipements pour la récupération de U du phosphate. Les frais d'exploitation historiques pour l'extraction de U de l'acide phosphorique varient de 22 à 54 US \$ $U_3 O_8$.

Ø **Extraction liquide – liquide de l'uranium par le D_2EHPA - TOPO**

L'extraction liquide-liquide est une technique de séparation chimique qui a été développée à l'échelle industrielle suite aux besoins de l'énergie atomique. (In Lounis. A, 1983). Elle repose sur le transfert de masse d'une espèce métallique appelée soluté se trouvant en solution aqueuse désignée par solution d'alimentation, vers une phase organique non miscible à la première, appelée phase réceptrice cette dernière est constituée d'un diluant inerte et d'un ou deux extractants dont le rôle est d'entrer réversiblement en réaction avec le métal et de former un complexe mixte organométallique soluble. L'opération inverse est appelée désextraction. Le métal extrait au cours de la première étape est de nouveau recueilli dans une phase aqueuse propre en déstabilisant le complexe organométallique obtenu au cours de l'extraction. Cette technique est utilisée depuis longtemps en chimie analytique dans la séparation – dosage des métaux, du fait de sa bonne sélectivité. Récemment, son application s'est étendue à des séparations fines, type spéciation dans le domaine de l'environnement.

En pratique, l'utilisation d'un procédé liquide- liquide requiert deux opérations successives. D'une part, le mélange intime des deux phases s'accomplit par agitation, d'autre part, la séparation ou désengagement de phases s'opère par décantation. Dans les procédés industriels, la phase aqueuse est appelée raffinat et la phase organique extrait.

Le circuit d'extraction par solvant est généralement représenté schématiquement comme l'indique la figure suivante (Fig. 3). Dans la première étape, le métal est transféré de

la phase aqueuse vers la phase organique. La phase aqueuse séparée est destinée à la récupération d'autres métaux. Dans la deuxième étape, le solvant chargé est lavé partiellement ou totalement avec une solution aqueuse convenable pour être débarrassé de ses produits de décomposition et des éléments poisons coextraits au cours de l'extraction. Dans la troisième étape, le solvant chargé et lavé subit l'opération de désextraction du métal recherché. La phase organique déchargée est de nouveau traitée, si nécessaire pour être apte au recyclage dans l'étape d'extraction. Dans chacune de ces trois étapes les liquides circulent à contre courant, sont intimement mélangés puis décantés dans des mélangeurs – décanteurs comportant un ou plusieurs étages.

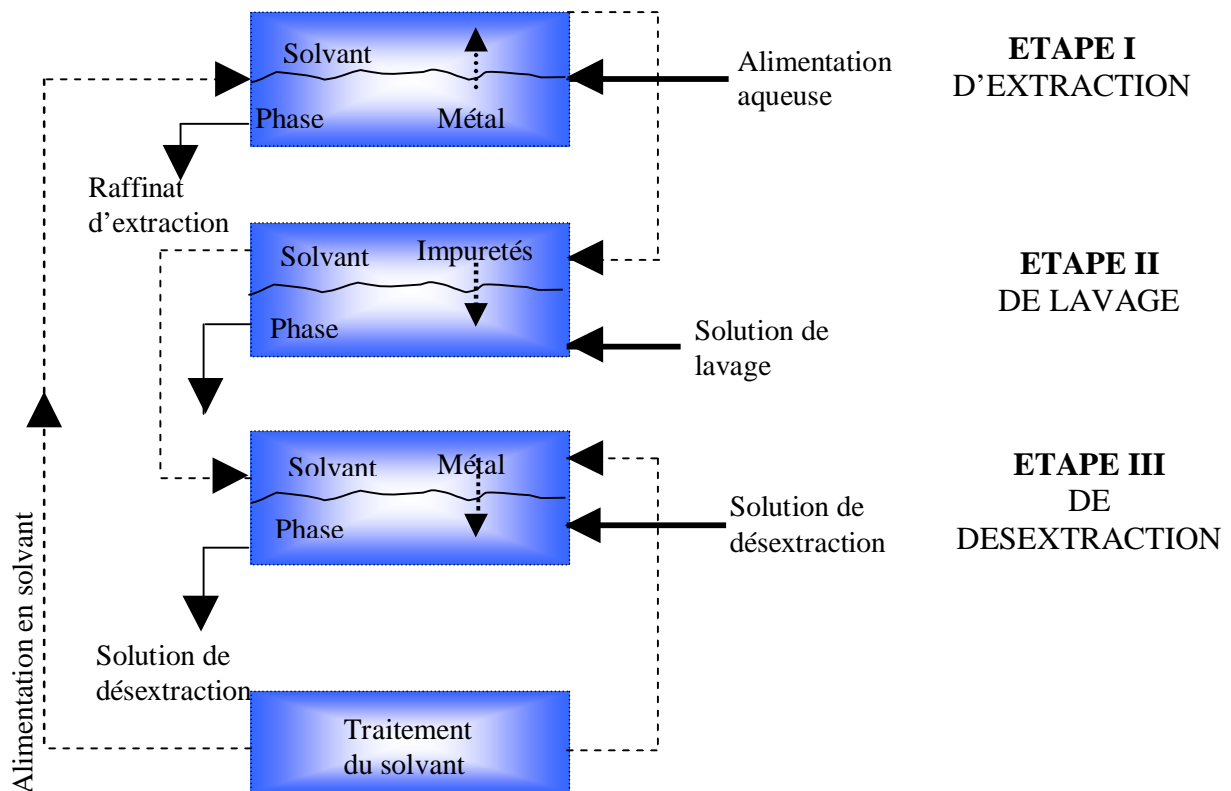


Fig. 3- Procédé général de l'extraction par solvant (in Hesses Rachid, 1995)

Ø Procédés industriels et procédure d'extraction

* Procédés industriels

Actuellement trois extractants sont utilisés pour la récupération de l'uranium à partir de l'acide phosphorique, Ces extractants classent les procédés en deux catégories, ceux

basés sur l'extraction de l'uranium tétravalent et ceux basés sur l'extraction de l'uranium hexavalent

- L'acide octylpyrophosphorique (OPPA) en deux cycles qui extrait l'uranium tétravalent.
- L'acide mono et di. Octylphényl phosphorique (MOPPA et DOPPA) en deux cycles qui extrait également l'uranium tétravalent.
- L'acide di (2. ethyl. Hexyl) phosphorique (D₂EHPA) qui agit en synergie avec le tri-octylphosphine oxyde (TOPO) en deux cycles (extraction de l'uranium hexavalent) et en un cycle (extraction de l'uranium tétravalant). L'utilisation du procédé D₂EHPA-TOPO en deux cycles est souvent écartée pour les raisons suivantes :

* la réextraction par réduction est certes possible mais elle est assez délicate. Elle demande des précautions particulières pour éviter la réoxydation rapide du fer et de l'uranium.

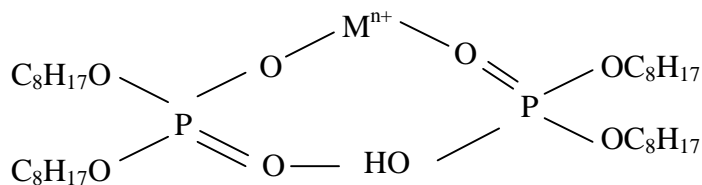
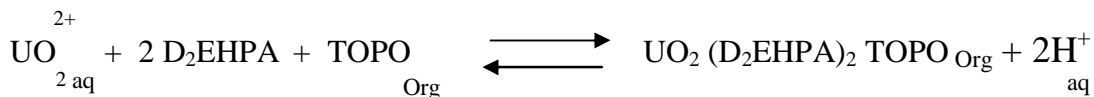
* le procédé demande deux cycles. Cela est acceptable si l'on peut disposer d'une unité centrale de purification pour plusieurs unités primaires, mais devient assez coûteux pour une unité d'acide phosphorique. C'est pour cela qu'il est préférable d'utiliser le procédé D₂EHPA-TOPO en un cycle.

L'acide di (2. ethyl. Hexyl) phosphorique (D₂EHPA) est sans doute, parmi les extractants les plus étudiés depuis plusieurs dizaines d'années, il est le plus connu et le plus utilisé. Sa caractérisation s'avère nécessaire pour la compréhension des mécanismes réactionnels d'extraction.

∅ Propriétés extractives de l'acide D₂EHPA

L'acide di – (éthyl- 2 hexyl) phosphorique est l'un des extractants qui extrait la plupart des métaux. De nombreux procédés à l'échelle industrielle l'utilisent pour extraire l'uranium, les terres rares, le zinc, vanadium, le béryllium et le molybdène et dans la séparation de sa stabilité nickel - cobalt. Son utilisation présente plusieurs avantages à cause de stabilité chimique, sa bonne cinétique d'extraction et sa faible solubilité dans la phase aqueuse.

L'acide D₂EHPA est un produit organophosphoré connu comme étant un échangeur cationique doté d'une propriété acide marquée. Le transfert biphasique utilisant cet extractant est rendu possible grâce à l'échange cationique entre le proton de l'extractant (placé dans la phase organique) porté par le groupement P-OH et qui est très mobile et le cation métallique de la phase aqueuse. La réaction globale d'extraction de l'uranium par le mélange D₂EHPA-TOPO est :



Structure du complexe organométallique

L'atome d'oxygène du groupement phosphoryle joue aussi un rôle important quand l'extraction est effectuée à partir de solutions aqueuses fortement acides, c'est le cas où le D₂EHPA se comporte comme un agent de solvatation et agit au même titre que les produits solvatants neutres : TBP et TOPO.

* Procédure d'extraction

Avant de commencer l'extraction il est nécessaire d'effectuer les opérations suivantes :

- refroidissement : température ambiante
- décantation lente d'une durée de quatre semaines qui assure la précipitation des matières en suspension
- clarification poussée, réalisée par une triple filtration
- ajustement de la valence de l'uranium VI par une oxydation par le peroxyde d'hydrogène.
- précipitation ou réduction de l'ion Fe(II) en une espèce non extractible Fe(II) pour éviter sa coextraction avec l'uranium.

Les produits de départ sont :

- l'acide phosphorique obtenu par voie humide.

- Le solvant : L'acide di – (éthyl- 2 hexyl) phosphorique (D₂EHPA) est utilisé comme extractant. Il agit en synergie avec l'oxyde de trioctyl phosphine (TOPO) utilisé comme adjuvant.
- Le diluant : le kérosène figure parmi les diluants usuels à bon marché dans l'industrie car il offre les avantages suivants :
 - miscibilité parfaite avec D₂EHPA-TOPO
 - stabilité en milieu phosphorique
 - non corrosif
 - disponibilité
 - inertie chimique

Le dispositif expérimental utilisé comprend une cellule en verre à doubles parois d'une capacité de 250 ml, thermostatée à 25°C, munie d'une électrode de verre combinée et d'un thermomètre de contrôle. Un volume de 100ml de phase organique de concentration donnée en extractants (D₂EHPA-TOPO) et le même volume de phase aqueuse chargée d'uranium (acide phosphorique) de concentration donnée, sont intimement agitées. Le temps d'agitation suffisant pour atteindre l'équilibre est de 15mn. A l'équilibre l'agitation est arrêtée et les phases sont séparées par gravité. Le processus d'échange s'effectue dans le domaine de pH=1-4.

PARTIE I

**GEOLOGIE
REGIONALE ET
LOCALE**

1. GEOLOGIE REGIONALE DE DJEBEL ONK

Les phosphates algériens sont liés aux dépôts marins du Tertiaire (Paléocène et Eocène). Les gisements les plus importants sont en relation avec ceux connus en Tunisie; Il s'agit des gisements situés au Nord de Tébessa (Dj. Kouif, Dj. Dir) et des gisements qui se situent sur la bordure de l'anticlinal de Djebel Onk, région de Bir El Ater. Ce Djebel se présente comme une suite d'anticlinaux et synclinaux fortement asymétriques faillées dans leurs flancs, d'axe N80°E. La couche phosphatée, d'environ 30 m d'épaisseur, est localisée au niveau du Thanétien supérieur.

La série sédimentaire affleurante dans la région de Djebel Onk, comprend une succession stratigraphique allant du Crétacé supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutézien); cette série marine d'environ 500m d'épaisseur est recouverte en discordance par une épaisse série sablo-argileuse continentale d'âge Miocène; puis par du Quaternaire (alluvions et éboulis) (Fig.4)

1. – 1. - STRATIGRAPHIE

Les affleurements s'observent de bas en haut de la façon suivante:

1. – 1. – 1. - Crétacé

Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal du Djebel Onk tectoniquement très accidentés. Seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent.

- **Maestrichtien (Crétacé supérieur)**

Les sédiments de cet âge sont représentés par des calcaires blancs massifs avec des intercalations marneuses au cœur de l'anticlinal de Djebel Onk. Le sommet est marqué par une surface ferruginisée et taraudée.

1. – 1. – 2. - Paléocène

Il est représenté par des sédiments marins assez épais (350m)

- **Danien**

Le Danien est lithologiquement subdivisé en deux sous étages : Inférieur et supérieur.

a. - Danien inférieur

Il est représenté par des argiles marneuses et schisteuses, de couleur grise foncée au brun vert, intercalé par des marnes dures et irrégulières. L'ensemble est traversé par des filons de gypse. L'épaisseur du Danien inférieur est de 30 à 40 m.

b. - Danien supérieur

Il est formé par des calcaires durs blancs, très fins souvent à cassures conchoïdales, intercalées de marnes tendres, argileuses et schisteuses dont l'épaisseur varie d'une dizaine de centimètre à un mètre.

- **Montien**

Il est représenté par des calcaires détritiques à lumachelles avec des intercalations de marnes et de dolomie, la faible quantité de silex, qu'on y rencontre, le différencie de l'Yprésien lithologiquement semblable. Il renferme de nombreux niveaux à huîtres de différentes couleurs. L'épaisseur moyenne est de 100m.

- **Thanétien**

C'est l'horizon porteur de la minéralisation phosphatée principale. Il se subdivise en deux sous étages.

a. - Thanétien inférieur

Représenté par des marnes grises foncés à noires schisteuses. Dans la partie inférieure on note la présence des conglomérats et de minces lits phosphatés ainsi que deux niveaux de marnes à faunes caractéristiques (Thesitogracitis). Au sommet apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2m, surmontées par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40m.

b. - Thanétien supérieur

Il débute par un niveau dolomitique à gastéropode, sous-jacent à une couche phosphatée de 30m d'épaisseur en moyenne à Djebel Onk et Bled El Hadba et qui diminue jusqu'à disparition vers le Nord. L'Ouest et le Sud de ce gisement se termine généralement par un niveau lumachéllique, c'est essentiellement cette couche qui est exploitée à Kef Es Sennoun.

1. – 1. – 3. - Eocène

- **Yprésien**

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien, il a une épaisseur de 32m, on note :

a. - Yprésien inférieur

Il est représenté à la base, par les conglomérats marquant la limite avec le Thanétien et sous – jacent une couche à alternance de calcaire, marne, dolomie et de la couche phosphatée. On note la présence de couches minces de silex dans les calcaires. L'épaisseur moyenne de l'Yprésien inférieur est de 30m au maximum.

b. - Yprésien supérieur

Il est constitué par l'alternance de calcaires, calcaires dolomitiques et marnes. Sa puissance est de 2 à 3m.

- **Lutétien**

Les formations de cet étage recourent en concordance les séries Yprésiennes ; elles sont répandues dans la région de Dj-Onk et Dj-Darmoun (270m d'épaisseur). On distingue de bas en haut :

a. - Lutétien inférieur

Il est caractérisé par une diminution remarquable des calcaires qui sont remplacés par les marnes blanches crayeuses ; on note l'existence de géodes de quartz et de nodules de silex, avec une faune caractéristique ; Hemither Sitéa Moracano ; sa puissance varie de 40 à 50m.

b. - Lutétien supérieur

Ce faciès est évaporitique; il est constitué de gypse et d'argile verdâtre, argile phosphatée verte et bancs de calcaire. A la base, on distingue l'argile verte phosphatée et bancs de calcaire d'une épaisseur de 10m et au sommet, des argiles vertes avec banc de gypse intercalé. Son épaisseur est de 65 m. La faune caractéristique est Ostréa Multicostata et Cardia Placunoides.

1. – 1. – 4. - Miocène

Il est représenté par un complexe de roches terrigènes, de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes ; on distingue trois formations lithologiques :

a. - Miocène inférieur

Il est représenté essentiellement par des conglomérats, des sables avec des lits minces d'argile siliceuse ; leur teinte est clair, grise blanchâtre ; sa puissance est de 200m.

b. - Miocène moyen

Il est essentiellement argileux de couleur marron, parfois schisteux, avec des intercalations de sables à grains fins et moyens. Sa puissance atteint 250m.

c. - Miocène supérieur

C'est une série sablo-argilo-conglomératique; sa puissance atteint 350m.

1. – 1. – 5. - Quaternaire

Les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région ; elles sont essentiellement représentées par des éboulis de pente, de dépôts sableux ; dépôts éoliens, des graviers et des dépôts alluviaux et fluviaux


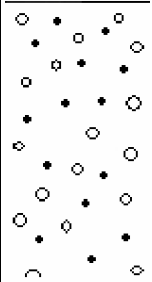
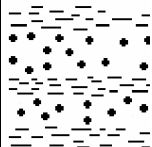


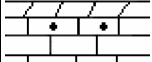



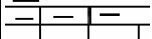
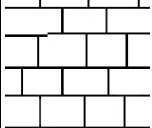

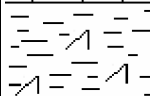
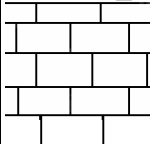
QUATERNAIRE			Eboulis et formations alluvionnaires sableuses
MIOCENE	SUP (350m)		Sables, grès à grains grossiers
	MOY (250m)		Argiles, schistes argileux de couleur marron, bronze avec intercalation de sables blancs
	INF (100m)		Sables fins blanches avec des couches de grès et argiles
LUTETIEN	SUP (100m)		Gypses avec interlits de marnes (évaporites)
	INF (40m)		Calcaires et dolomies avec géodes de quartz
YPRESIEN (70m)	SUP		Calcaires et dolomies avec silex
	INF		Calcaires avec lentilles de silex et calcaire phosphaté
THANETIEN (80m)	SUP		Phosphates pseudoolithiques, coprolithiques, gris et noirs
	INF		Marnes sombres schistifiées
MONTIEN (100m)			Minéralisation en Baryto-Célécitine Calcaires avec bancs à Ostrea
DANIEN	SUP (80m)		Alternance de calcaires et de marnes claires
	INF (35m)		Argiles noires avec fibre de gypse
MAESTRICHIEN SUPERIEUR (200 m)			Calcaires, calcaires noduleux de couleur blanche

Fig. 4 - Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk – Algérie orientale –
(Cielensky et Benchernine, 1987)

1. – 2. - TECTONIQUE

La région de Djebel Onk appartient avec l'Atlas tunisien, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien. La série du Crétacé supérieur à Eocène du bassin de Djebel Onk- Gafsa– Méthlaoui est structurée en une suite d'anticlinaux et synclinaux dissymétriques, généralement faillés dans leurs flancs d'axe le plus souvent SW-NE et décrochés par des accidents transverses N 120° à N 140° E (Fig. 5). La principale structure dans la région de Bir El Ater, est l'anticlinal de Djebel Onk, à cœur de Crétacé supérieur, allongé sur une vingtaine de Km et large 3 km. Cet anticlinal fortement asymétrique, décrit par Visse (1951) comme une flexure anticlinale Post- Pliocène, présente un flanc Nord à pendage faible, inférieur à 10° supportant le glissement de Djebel Onk Nord et un flanc sud à pendage fort, parfois vertical et même renversé. Le faisceau de failles inverses N 70° E, affectant ce flanc sud détermine un comportement tectonique en dressant.

La chronologie des phases de déformations responsables de la structuration actuelle est la suivante :

a. - Tectonique synsédimentaire (Paléocène-Eocène)

Phase compressive NW-SE, contemporaine à la sédimentation Paléogène, s'exprimant par des ondulations, des failles synsédimentaires. Cette tectonique précoce induit des lacunes de sédimentations dans la série Paléocène-Eocène et a conduit à l'édification du dispositif paléogéographique en hauts-fonds et sillons, qui va contrôler le dépôt de phosphates .Ces déformations précoces peuvent être liées à la montée diapirique (Trias), notamment au Paléocène -Eocène.

b. - Tectonique post – Eocène moyen, tardi – Miocène

Elle est contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, phase majeure du plissement des Aurès et des déformations distensives transverses (faille N120° à 140°E), induisant un début de structuration de la série Crétacé supérieur–Eocène en petit horsts et grabens, allongés suivant des directions N70°E. Ces plissements sont en majorité antérieurs aux dépôts des sables Miocènes.

c. - Tectonique tradi – Miocène post – Burdigalienne à Paléocène – Pléistocène

C'est la phase majeure de plissement de l'Atlas tunisien. Les plissements de la série crétacée supérieur -paléocène-éocène et miocène en grandes structures antiforme et synformes

rejouent en horst et grabens dans les structures antérieures; ils forment vers le Sud et sur le flanc inverse des mégaplis de Djebel Onk et Djemi Djema. Cette tectogénèse est responsable de la structure actuelle de la région du Djebel Onk.

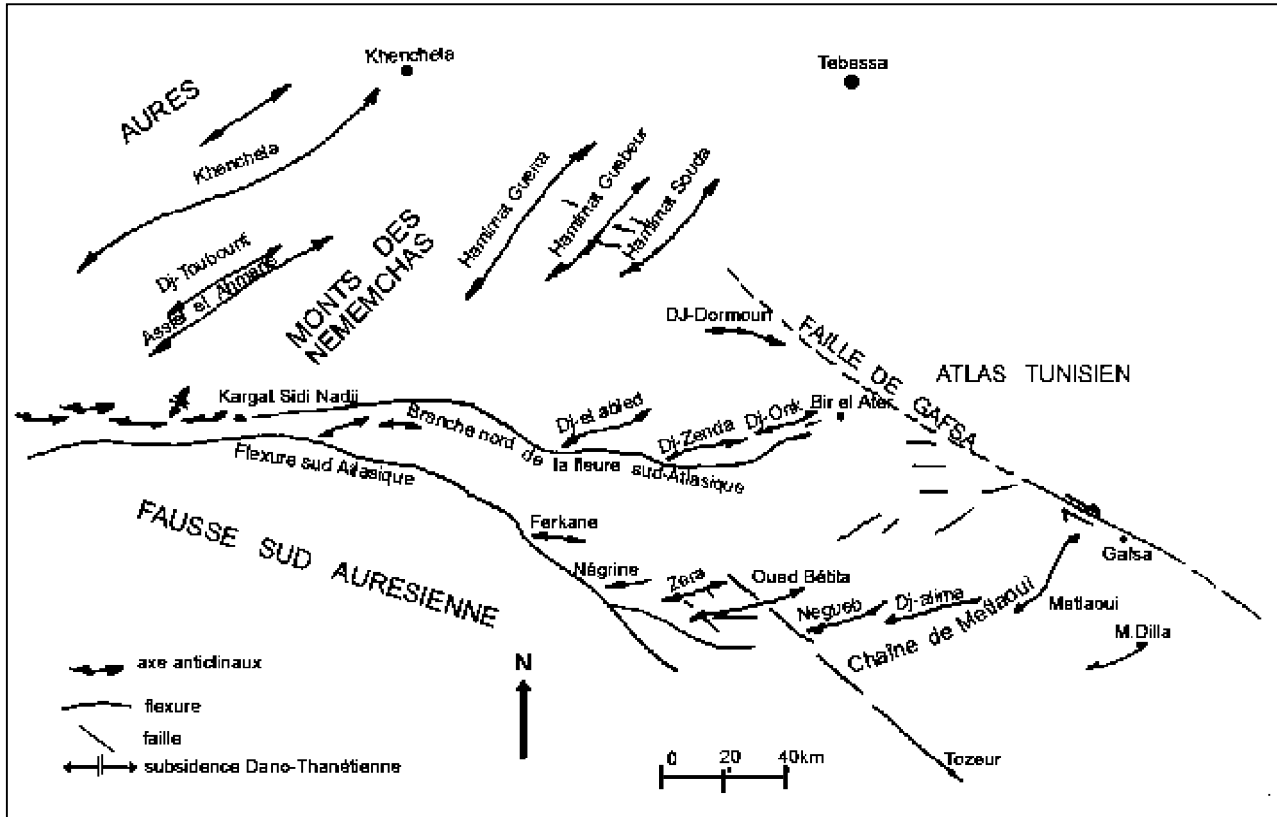


Fig. 5 - Carte structurale de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métloui-Onk (Aissaoui, 1984)

1. - 3. - PALEOGEOGRAPHIE

Au paléocène supérieur et Eocène inférieur, la région de Djebel Onk appartenait à la partie occidentale du bassin phosphaté de Gafsa-Métlaoui-Onk (dénomination d'après Sassi, 1980). Ce bassin ou sillon, occupé par une mer épicontinentale peu profonde était entre l'île ou le dôme de Kasserine au Nord, le môle de la Djeffara au Sud, et de haut-fond d'Air Fouris à l'Ouest (Fig. 6).

La région a connu au cours de son histoire géologique, plusieurs étapes de développement, bien marquées dans les sédiments. Cette évolution fut comme suite :

1. – 3. – 1. - Période de sédimentation marine

Cette période de sédimentation qui débute à la fin du développement du bassin géosynclinal couvrant l'Afrique du Nord et allant du Maestrichtien à l'Eocène supérieur.

Le Maestrichtien se caractérise par une subsidence lente et une sédimentation calme. A la limite entre le Maestrichtien et le Danién, on note un changement de faciès, précurseur de mouvement orogéniques mettant fin au cycle de sédimentation géosynclinal. La profondeur du bassin diminue alors d'une manière brusque, ce qui se reflète dans les roches par une sédimentation argilo-carbonaté qui dure pendant tout le Danién.

Comme le Maestrichtien le Montien est une période de lente subsidence et de sédimentation assez calme. La mer est alors peu profonde, en masse s'y déposent les bancs d'huîtres, caractéristiques pour les eaux peu profondes.

Au Thanétien inférieur, la profondeur du bassin a de nouveau diminué. On a alors un apport important de substance argileuse et des sédiments argilo-marneux qui indique une fermeture progressive du domaine de sédimentation et une tendance régressive de régime marin. Par contre le Thanétien supérieur se caractérise par un apport considérable de sédimentation phosphatée qui témoigne d'une réouverture du domaine sédimentaire et du retour des influences transgressives. A la fin de sédimentation phosphatée principale, une phase régressive se produit à nouveau, elle est matérialisée par des remaniements de phosphates, puis localement par un horizon conglomératique à galets de dolomie formé en milieu marin indice d'émersion.

La présence de dolomie est l'indice d'une saturation de l'eau de mer proche des conditions qui permettent le dépôt des faciès à évaporites. Elle souligne le caractère régressif de ces faciès phosphatés (Ranchin, 1963). Cette phase régressive est suivie, régionalement, par la transgression yprésienne (calcaire à silex) qui déborde largement les limites des formations précédentes. Au Lutétien, on note une lente diminution de la profondeur du bassin, ce qui a conduit à la formation de hauts-fonds et de lagunes et aux dépôts d'évaporites. Les variations d'épaisseur, ainsi que l'homogénéité ou l'hétérogénéité de la couche phosphatée elle-même traduisent cette paléogéographie diversifiée ainsi la couche de phosphate, calée entre les marnes noires du mur et les dolomies du toit, est la plus épaisse au niveau du gisement de Djemi Djema (30m) et de Kef Es Sennoun (environ 50 m) qui caractérise le sillon subsident.

1. – 3. – 2. - Période de sédimentation continentale

A partir du Lutétien supérieur, les terrains s'émergent. L'Oligocène n'a pas laissé de traces du fait de l'érosion anté-miocène. Alors que le Miocène-Paléocène fut une période d'intense sédimentation continentale marquée par les sables, les argiles et les conglomérats. Tandis que le Quaternaire se caractérise par des produits d'érosion qui se déposent sur les flancs et les vallées. Ce sont les colluvions, les alluvions et les éboulis de pente. Des traces d'une glaciation au Pléistocène de courte durée très nette sont bien conservées au Djebel Onk

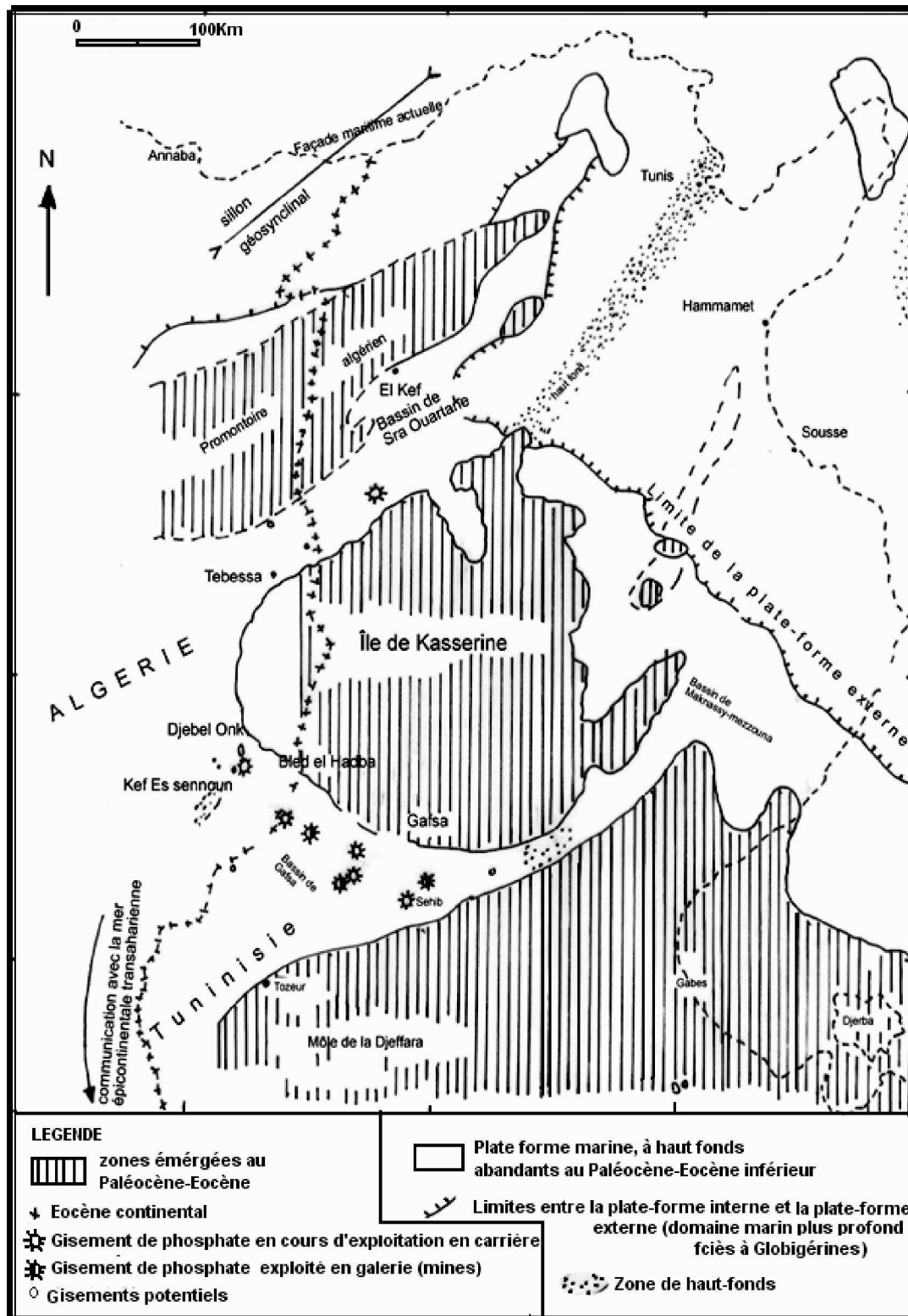


Fig. 6 - Situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin phosphate de Gafsa – Mélaoui – Dj Onk (Prian et Cortiel, 1993)

1. – 4. - MINÉRALOGIE, PETROGRAPHIE ET GEOCHIMIE DES PHOSPHATES DE DJEBEL ONK

1. – 4. – 1. – Minéralogie et pétrographie

Parmi les études pétrographiques et minéralogiques réalisées sur les minerais de Djebel Onk, on peut citer, les études de Ranchin (1963) et les études de CERFOS (1973), Chabou-Mostefai (1987) et Larouci (1988).

Les minerais de Djebel Onk sont des phosphates en grains, sableux (pseudoolithes et pellets), souvent à support organique (diatomées et radiolaires, principalement), dont la granulométrie appartient le plus souvent à la classe des arénites (grains inférieur à 2mm) formant les "biophospharénites", plus rarement à celle des rudites (grains supérieur à 2mm) formant les "biophospharénorudites". Les faciès sont homogènes, à grains fins (200 à 300 μm) ou bien hétérogènes avec des grains fins et grossiers (jusqu'à 2 à 3 mm) ; ils sont lithifiés et cimentés par un ciment argileux, calcitique ou dolomitique, les autres éléments figurés sont rares (grains de quartz et de glauconie essentiellement). Les diatomées et les radiolaires ont une importance primordiale dans l'élaboration des pseudoolithes phosphatées (Champetier et Joussement, 1979)

Le minerai de phosphate est constitué d'une matière phosphatée qui contient une endogangue et une exogangue (Duchatelle, 1975).

- La matière phosphatée : en plus de l'endogangue qui représente 5.3% (de la matière phosphatée), celle-ci est constituée d'une fluorapatite carbonatée et d'un sulfo-carbonate fluoré alcalino-terreux parfois hydraté $[(\text{S,C,O}_4)_6 (\text{K, Na, Ca, Mg})\text{F}_2 \text{nH}_2\text{O}]$

- L'endogangue : est formée d'opale, quartz, illite, eau, matière organique et d'éléments accessoires. Elle contient Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO et SiO_2 en très faible quantité (0.3 % du minerai en moyenne pour chaque élément).

- L'exogangue : elle est formée de trois types de constituants :

- carbonatés : il y a une prédominance de dolomie
- sulfaté : on trouve des traces d'epsomite $[\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$
- silicatés représentés par la silice libre tel que le quartz, l'opale ou la silice amorphe ; le feldspath ; l'heulandite, la glauconie et l'illite.

Les faciès phosphatés ont une couleur généralement beige à brune, mais peuvent être gris foncé à noir à la base de la couche principale. Ces teintes sombres, et l'existence de composés organiques, attestent que la couche n'a pas subi d'altération météorique importante et qu'elle a été protégée des phénomènes d'oxydation. Ces phosphates noirs renferment des imprégnations hydrocarbures. Sur le plan minéralogique, Larouci (1988) indique que l'apatite des phosphate de Djebel Onk est une francolite fortement substituée, avec remplacement des ions $P_2O_4^{-3}$ par des ions CO_3^{-2} de l'ordre de 26%. Sur le plan teneur, le minerai tout-venant titre de 23 à 28% P_2O_5 , avec une moyenne autour de 25% P_2O_5 . Les teneurs en MgO sont variables de 1.8 à 4% et plus, en raison de la présence d'une exogangue dolomitique bien développé.

Le phénomène minéralisateur s'exprime de différente manière :

- § par épigénie de particules organiques (diatomées, radiolaires, coprolithes, micropellets et des particules algaires) ;
- § par phosphatisation de particules non organiques (pellet, lithoclastes, grains de quartz et de glauconie)
- § par phosphatisation locale de la gangue carbonatée ;
- § par précipitation directe d'apatite dans le réseau intercrystallin.

1. – 4. – 2. - Géochimie

Sur le plan géochimique d'après le rapport de Cielensky et Benchernine (1987), outre les composés essentiels, tel que le P_2O_5 , CaO, MgO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , CO_2 et F, on rencontre dans les phosphates toute une gamme d'éléments en traces qui se concentre dans l'apatite, dans les minéraux argileux, dans la substance organique, dans les débris osseux, et dans les minéraux secondaires, oxydes et hydroxydes de fer a savoir :

- U, Sr, Y, et les lanthanides (La, Ce, Eu, Yb, Lu, principalement dans l'apatite)
- Na, Ba, V, Ni, Co, Cr, Zn, Cu, Sc, et Zr (principalement dans les minéraux argileux)
- Terres rares (principalement dans les débris osseux)
- Co, Mn pouvant être sous forme d'oxydes et hydroxydes accompagnant les composés du fer
- Th avec des concentrations de 1 à 5 ppm

Dans les phosphates de Bir El Ater, la teneur en uranium est en général faible ; elle varie dans les limites 38.7 – 49.0 ppm avec une moyenne de 44.5 ppm (Siemensky et Bencherhine, 1987). Dans les phosphates tunisiens cette teneur est plus élevée de l'ordre de 60 ppm et dans ceux marocains elle est encore plus importante 190-250 ppm. Le strontium a une teneur d'environ 900 ppm, ce qui est proche de celle des phosphates marocains en moyenne 974 ppm. L'Yttrium est en faible quantité, en moyenne 226 ppm. Les Lanthanides présentent des teneurs moyennes de 440.8 ppm.

1. - 4. – 3. - La radioactivité dans le bassin de Djebel Onk

Les travaux de Kassatkine et al, 1980, ont montré qu'il existe une relation directe entre la radioactivité et la teneur en P_2O_5 , Plus de 550 échantillons ont été étudiés dans les tranchées et 100 échantillons dans les sondages. Les données obtenues par la prospection radiométrique permettent d'affirmer que plus la teneur en P_2O_5 est grande plus la radioactivité est élevée (Fig. 7 et 8). Le modèle linéaire simple entre la radioactivité et les teneurs en P_2O_5 est donné par les équations suivantes :

$$\text{Dans les sondages : Radioactivité} = 64.8 P_2O_5 + 10$$

$$\text{Dans les tranchées : Radioactivité} = 63.43 P_2O_5 + 6.5$$

Ces données peuvent être utilisées pour une définition préliminaire de la qualité des phosphates à tous les stades des travaux de prospection et d'évaluation, à condition d'être vérifiées par la suite par les analyses chimiques.

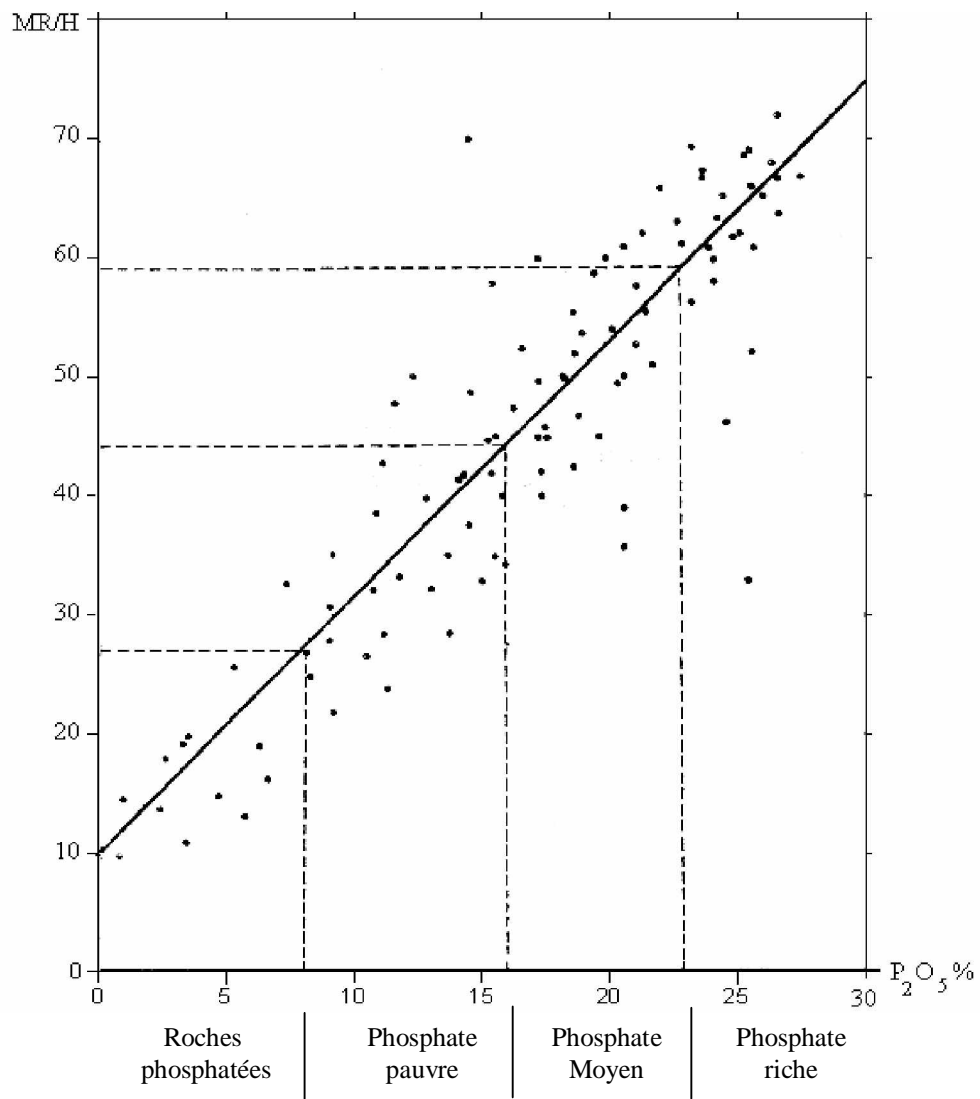


Fig. 7 - Couches fonctionnelle de la radioactivité des phosphates suivant les teneurs en P₂O₅ (dans les sondages) (Kassatkine et al, 1980)

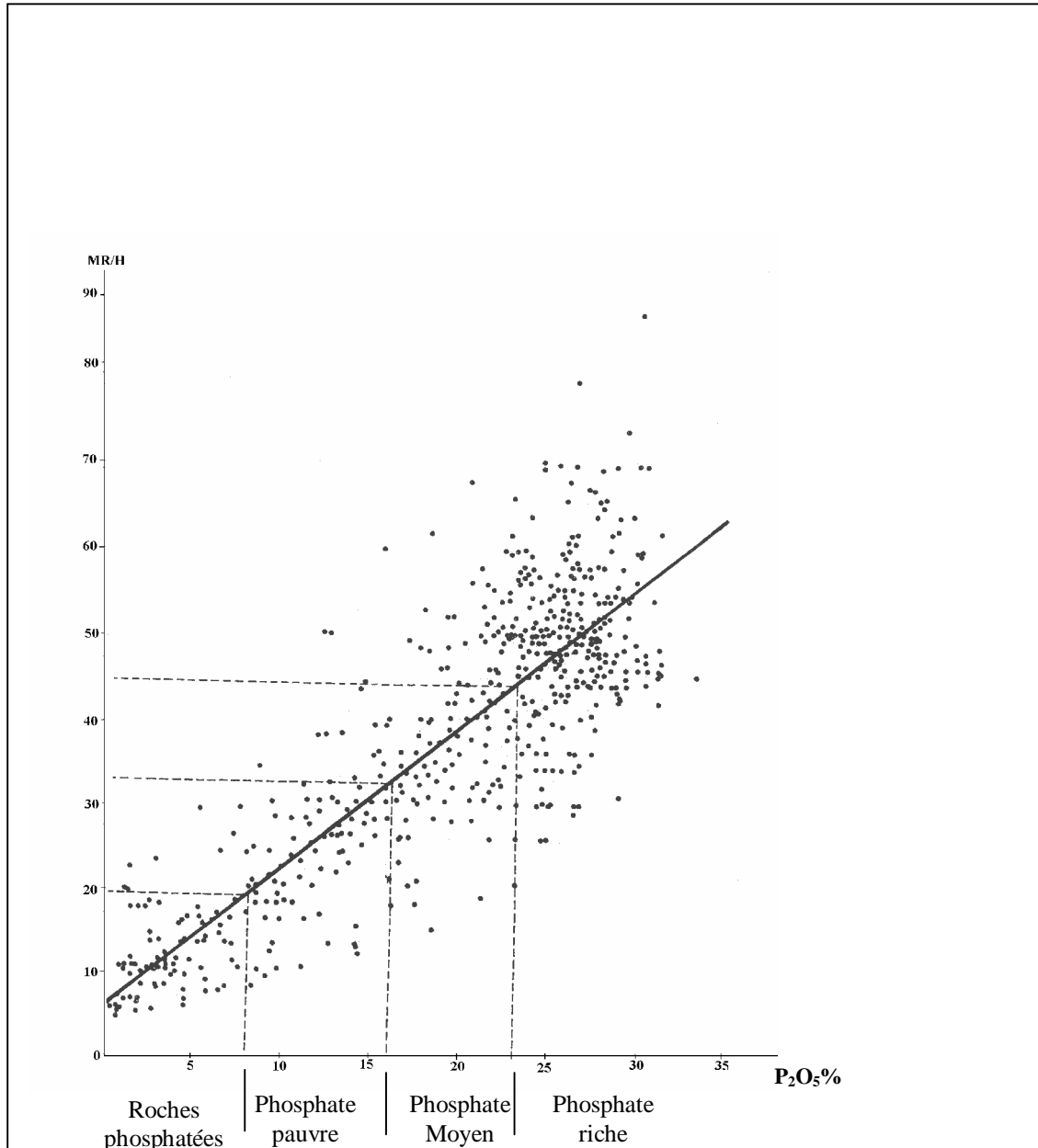


Fig. 8 - Couches fonctionnelle de la radioactivité des phosphates suivant les teneurs en P₂O₅ (dans les tranchées) (Kassatkine et al, 1980)

2. GEOLOGIE DU GISEMENT DE KEF ES SENNOUN

Les coordonnées de ce gisement sont les suivantes : $x = 951.500$ et $y = 168.0$ à 170.0 . Sa superficie, circonscrite par les sondages de reconnaissance, est de 2.1Km^2 , soit 2.7Km de longueur sur 0.8Km de largeur.

2. – 1. – TRAVAUX DE PROSPECTION EFFECTUES

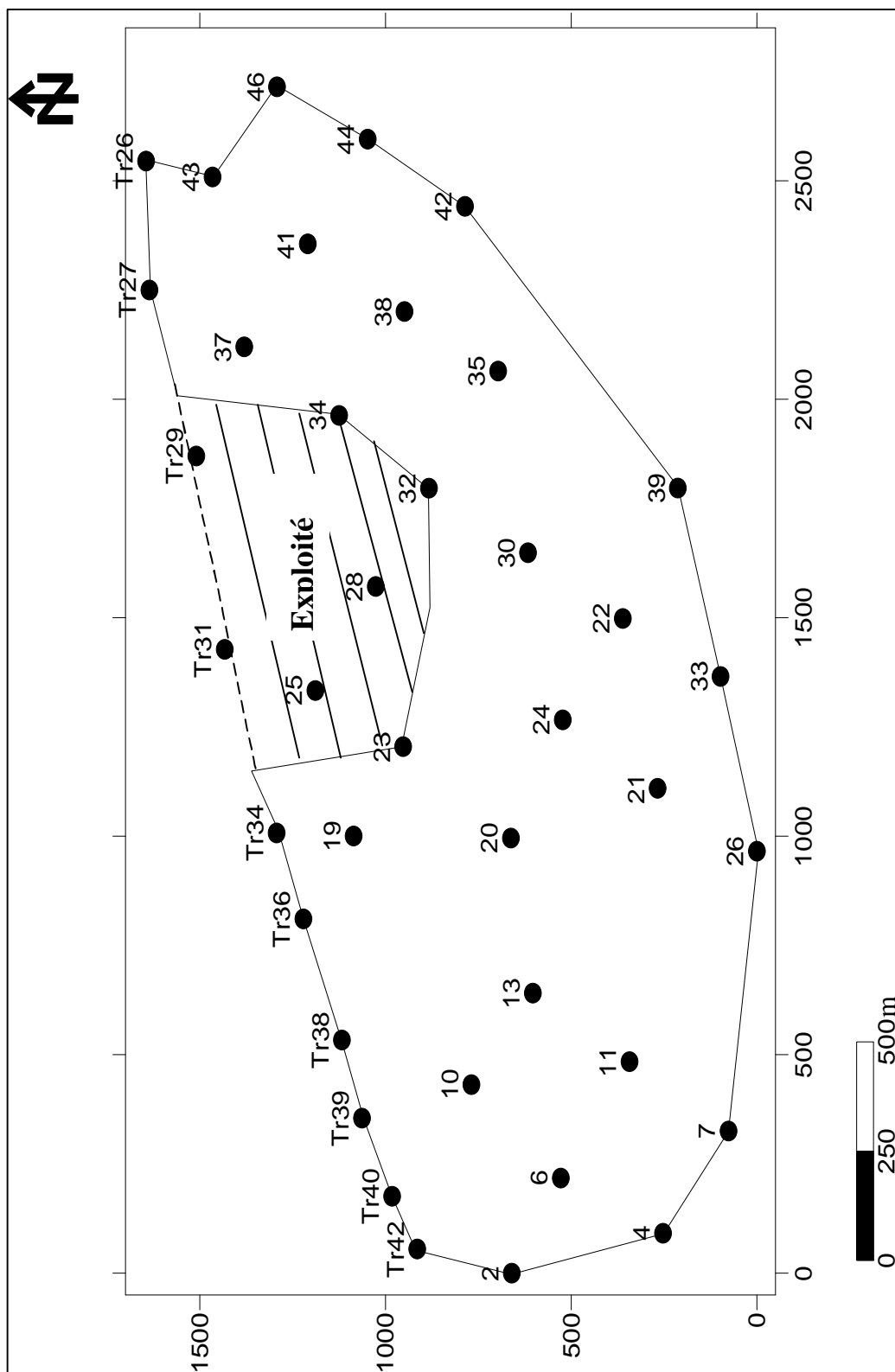
Le gisement de Kef Es Sennoun a été reconnu en détail par l'EREM, au cours de l'année 1986, grâce à 32 sondages carottés, notés S-2 à S-46, implantés suivant des profils de prospection de direction Nord Ouest-Sud Est à la maille de $250 \times 300\text{m}$ (Fig. 9). Le sondage le plus profond est le S-7 (250m), situé au sud ouest du gisement. Le plus court est le S-25 (76.1m) implanté à proximité de la bande d'affleurement des dressants de Kef Es Sennoun. Tous les sondages ont traversé la couche phosphatée jusqu'au mur, à l'exception du sondage S-14 qui n'a recoupé que 13.5 m à cause d'un accident technique survenu au moment du forage. En outre l'EREM a réalisé, dans la zone des dressants 22 trachées notées Tr22 à Tr44 avec une profondeur de 1.0 à 2.0 m, une largeur de 1.0m et une longueur en fonction de l'épaisseur de l'affleurement de la couche de phosphate.

A l'issue des travaux de l'EREM, il a été établi que la géologie du gisement de Kef Es Sennoun est relativement simple, les couches de phosphates plongeant monoclinalement vers le Sud (Fig. 10), ils ont une puissance importante 30m et parfois plus, par contre la zone d'affleurement présente une structure géologique compliquée. Les réserves géologiques totales de Kef Es Sennoun ont été estimées à 317 millions tonnes de minerai à 26.53% P_2O_5 et 2.61% MgO ; dont 168 millions tonnes de réserves prouvées (Cielensky et Benchernine, 1987), 50 Mt de réserves probables (zone de rupture de pente, au Sud de la table) et 99 Mt possibles dans les parties les plus profondes du gisement.

2. – 2. - STRATIGRAPHIE

Toute la succession lithologique de Djebel Onk est rencontrée à Kef Es Sennoun mais s'indifférencie, cependant, par une épaisseur verticale plus importante du faisceau phosphaté (jusqu'à 53 m dans le sondage 7).

Le Thanétien qui est l'horizon porteur de la minéralisation est bien développée à Kef Es Sennoun, il est subdivisé en deux étages: le Thanétien inférieur et le Thanétien supérieur



LEGENDE

- Tr 40 ● Tranchée
- S1 ● Sondage

Fig. 9- Situation des sondages et tranchées du gisement de Kef Es Sennoun – Djebel Onk – Algérie orientale-

- Le Thanétien inférieur est représenté par une série de schistes marneux de couleur grise foncée à intercalations irrégulières de calcaire. un niveau conglomératique à Gastéropodes et de minces passées phosphatées sont rencontrés dans la partie inférieure. Dans la partie sommitale, les phosphates sont surmontés par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes.
- Le Thanétien supérieur est représenté par la couche productive, il a fait l'objet d'une étude poussée. Les résultats de cette étude sont présentés dans la partie minéralisation.

2. – 3. – TECTONIQUE

Le gisement de Kef Es Sennoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure anti-forme de Djebel Onk, dont la structuration majeure est due à la tectonique post-Miocène (Fig. 10) Il est caractérisé par une structure simple, qui se présente sous forme d'une table monoclinale à pendage régulier, sous un angle de 5 à 10° vers le Sud (Fig 11). Au sud de la table, on aperçoit une zone de rupture de pente où le pendage des couches atteint 20°. Une série de trois failles majeures de direction NNO-SSE, traversent le gisement mais n'engendrent pas de déformations majeures sur la géométrie de la couche phosphatée. Par contre, dans la zone des dressants de Kef Es Sennoun, allongée N 75° E, la tectonique souple et cassante a entraîné un changement brusque du pendage de la couche phosphatée affleurante où l'angle de pendage est sub-vertical ou fortement incliné vers le sud-est ou le nord-ouest. Ces dressants, représentés par les formations du Paléocène (Danien-Montien et Thanétien) et de l'Eocène inférieur (Yprésien) correspondant à la zone de flexure faille du flanc inverse de l'anticlinal de Djebel Onk. Au Nord-Est des dressants la série est renversée et la couche de phosphate plonge suivant un angle de 30° à 60° vers le nord-ouest. Par contre dans la partie centrale des dressants, la couche de phosphate est en série normale et plonge vers le sud.

2. - 4. - PETROMINERALOGIES DES PHOSPHATES DE KEF ES SENNOUN

Le faisceau phosphaté a été subdivisé par de nombreux auteurs en fonction de composition chimique, lithologique et des conditions d'exploitation en plusieurs couches. Les principales subdivisions sont :

2. - 4. - 1. - Subdivision du (Prian et Cortiel, 1993)

Prian et Cortiel ont subdivisé le faisceau phosphaté en trois couches constitué, de haut en bas, par la dolomie phosphatée notée minerai II_T, la couche productive notée I et les alternances marnes-phosphates-dolomie du mur notée II_M.

- **La dolomie phosphatée sommitale (minerai II_T)**

Elle est présentée au-dessus de la couche principale, son épaisseur varie entre 0 et 11m, en moyenne elle est de 3m. La dolomie phosphatée est une roche très dure, bien cimentée de couleur grise-noire à granulométrie hétérogène, fine à grossière (moins de 1mm à plusieurs cm). Les faciès peuvent être assez riches en grains de phosphate ou au contraire très pauvres. Les éléments phosphatés comprennent des grains sub-sphériques, de gros débris osseux, des dents, ainsi que de gros coprolithes ; ces derniers sont parfois silicifiés. La dolomie phosphatée est séparée de la couche principale par un niveau lumachellique phosphaté à huîtres de 50cm d'épaisseur et séparée des calcaires dolomitiques marneux à silex, du toit par un mince horizon (50cm) de marne verdâtre dolomitique, finement laminé constituant un repère lithologique.

Chimiquement, l'assise de dolomie phosphatée se caractérise par des faibles teneurs en P₂O₅ et des fortes teneurs en MgO. Les teneurs en P₂O₅ varient entre 10 et 21%, pour une moyenne de 17.19%. Les teneurs en MgO varient entre 6 et 11%, pour une moyenne de 7.90%. Les teneurs en SiO₂ varient de 1 à 6%, pour une moyenne de 2.73 et qui sont dues à la présence de coprolithes entièrement silicifiés.

- **la couche principale de phosphates (minerai I)**

La couche de phospharénites productive est la principale couche qui constitue le faisceau phosphaté. Son épaisseur varie entre 22m dans la partie Nord-Est du gisement, et de 46m au Sud-Ouest du gisement. Lithologiquement cette assise est constituée par une couche unique de phosphate sombre gris-noire. La partie inférieure est généralement, plus fine que la partie supérieure et peut, en outre, renfermer des lamines bitumineuses. Vers le nord-est du

gisement apparaît une couche de phosphate clair, oxydé sus-jacente à la couche de phosphate noir. Les phosphates de la couche productive du gisement de Kef Es Sennoun titrent de 24 à 27% en P_2O_5 et de 2 à 3% en MgO .

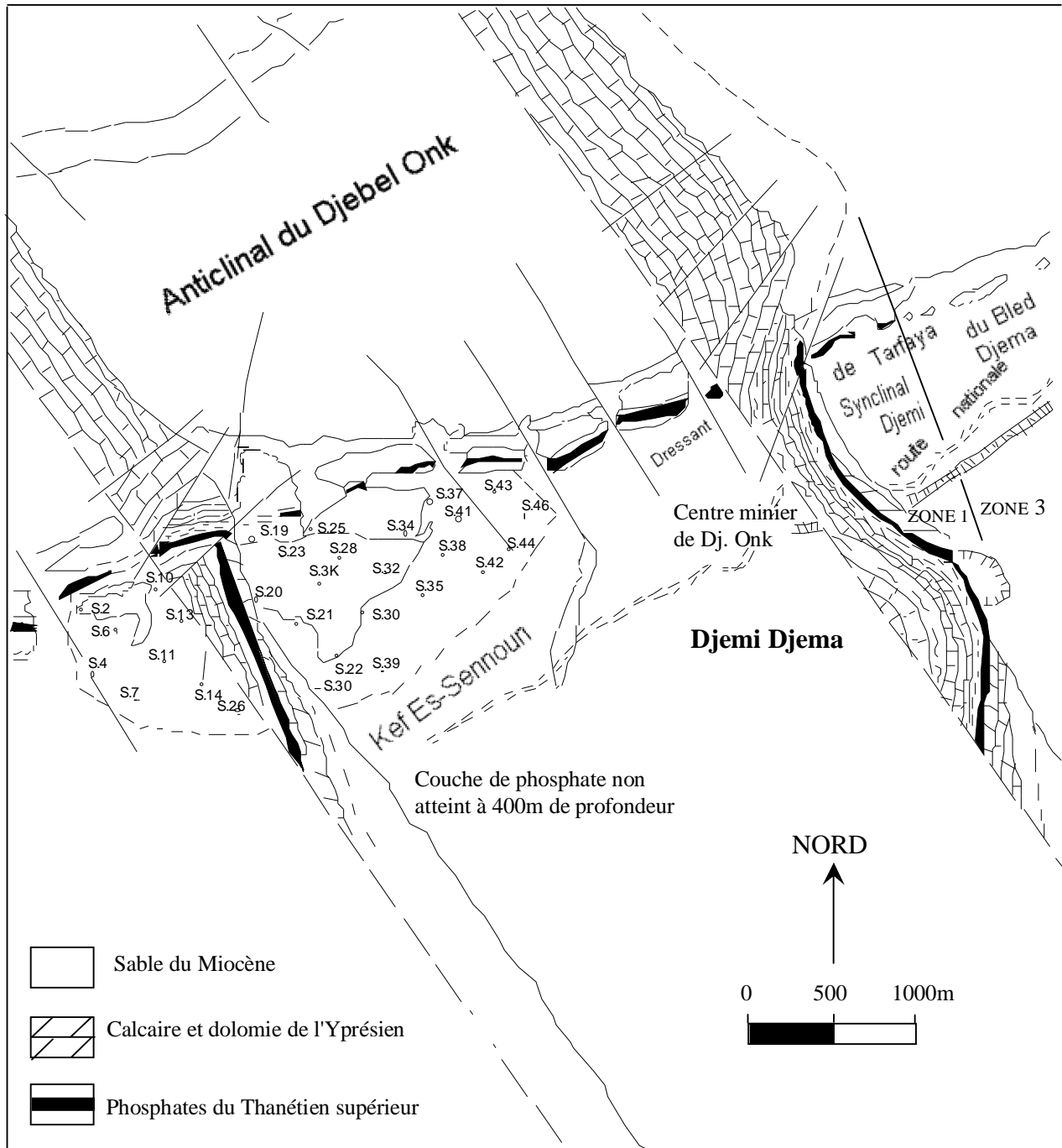


Fig. 10 - Structure de la couche de phosphate dans la zone de Kef Es Sennoun et localisation des sondages carottés (Prian et Cortiel, 1993)

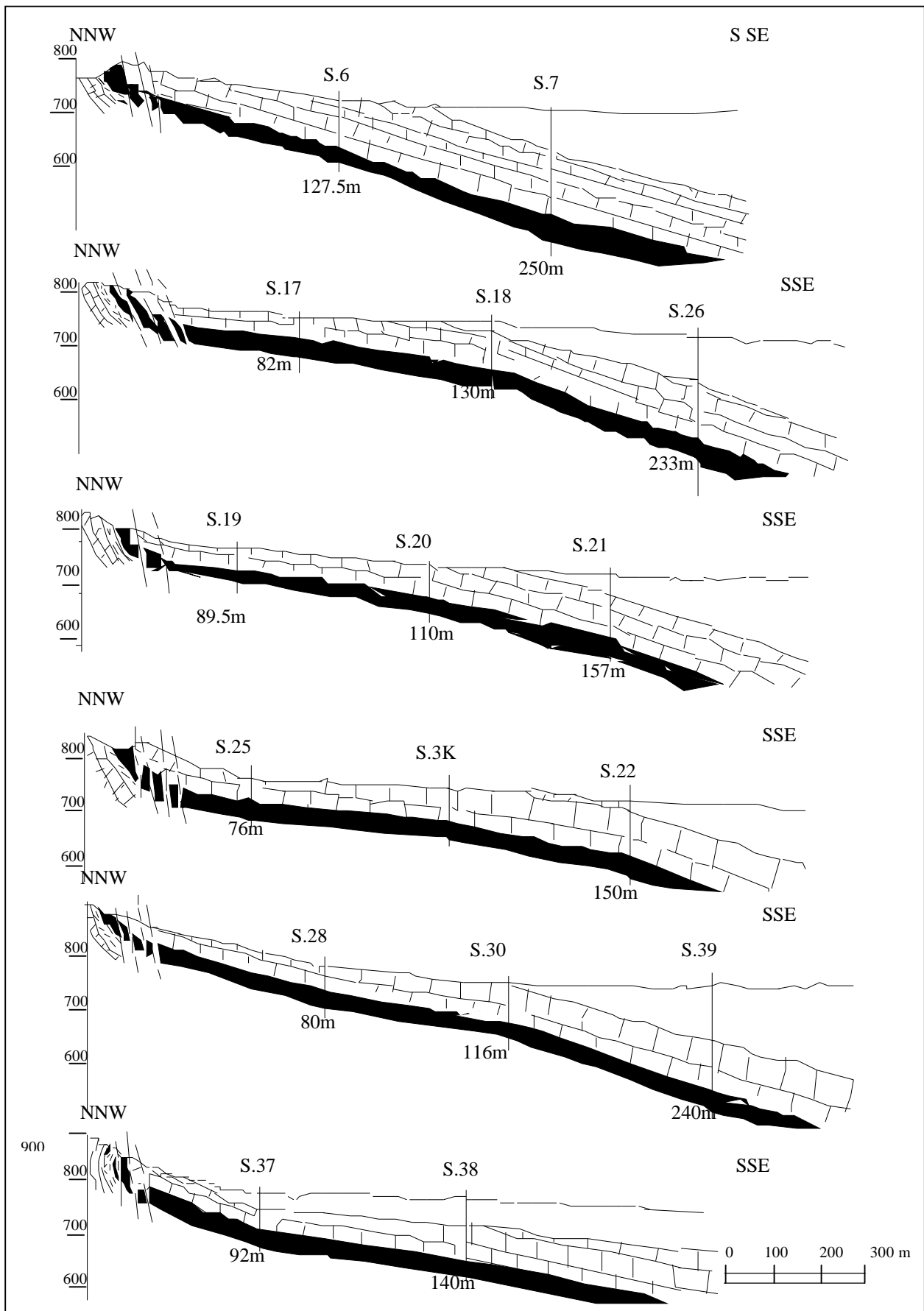


Fig. 11- Coupe géologique du gisement de Kef Es Sennoun (Prian et Cortiel, 1993)

- **Le mur de gisement (minerai II_M)**

Cette couche est localisée au mur de la couche productive I, son épaisseur varie de 0 à 4.3m pour une moyenne générale de 1.25m. Elle est constituée par les marnes feuilletées, sombres, du Thanétien. Deux minces niveaux de phosphates d'épaisseur infra métrique qui s'intercale dans la partie supérieure des marnes. Le passage à la couche productive sous-jacente peut être marqué par un banc de dolomie grise (40cm). Chimiquement cette couche présente des faibles teneurs en P₂O₅ (13 à 15%) et de fortes teneurs en MgO (8 à 10%).

2. – 4. – 2. Subdivision Mezghache (1991)

En plus de ces trois couches, Mezghache s'est basé sur le traitement statistique multivariable des données de carottes des 32 sondages réalisés par l'EREM (1987) et a détaillé d'avantage 5 sous couches noté Cl3, Cl4, Cl5, Cl6, Cl8, présentant chacune des propriétés physiques et chimiques différentes (Fig. 12).

- **Les minerais type Cl3 et Cl4**

Ces minerais correspondent à des minerais pauvres en P₂O₅ (17.34 et 19.22%) et très dolomitiques, ils caractérisent les minerais de la dolomie phosphatée sommitale (II_T) et des alternances basales (II_M).

- **Le minerai Cl5**

Ce minerai correspond à un minerai à plus forte teneur en P₂O₅ (27.81%) et plus faible teneur en MgO (1.88%). C'est un minerai noir, coprolithique, à gangue essentiellement argileuse, siliceuse, et riche en matière organique.

- **Le minerai Cl6**

Ce minerai correspond à un minerai toujours à haute teneur en P₂O₅ (26.84%) et plus forte teneur en MgO (2.30%). C'est un minerai pseudoolithique noir à marron, à ciment mixte, dolomitique et argileux renfermant des grains de glauconie.

- **Le minerai Cl8**

Ce minerai correspond à un minerai toujours à bonne teneur en P₂O₅ (24.24%), mais plus dolomitique (4.04% MgO). C'est un minerai coprolithique et pseudoolithique, de couleur marron et noir, à ciment dolomitique. Ces trois types de minerais (Cl5, Cl6, Cl8) forment la couche principale de phospharénite.

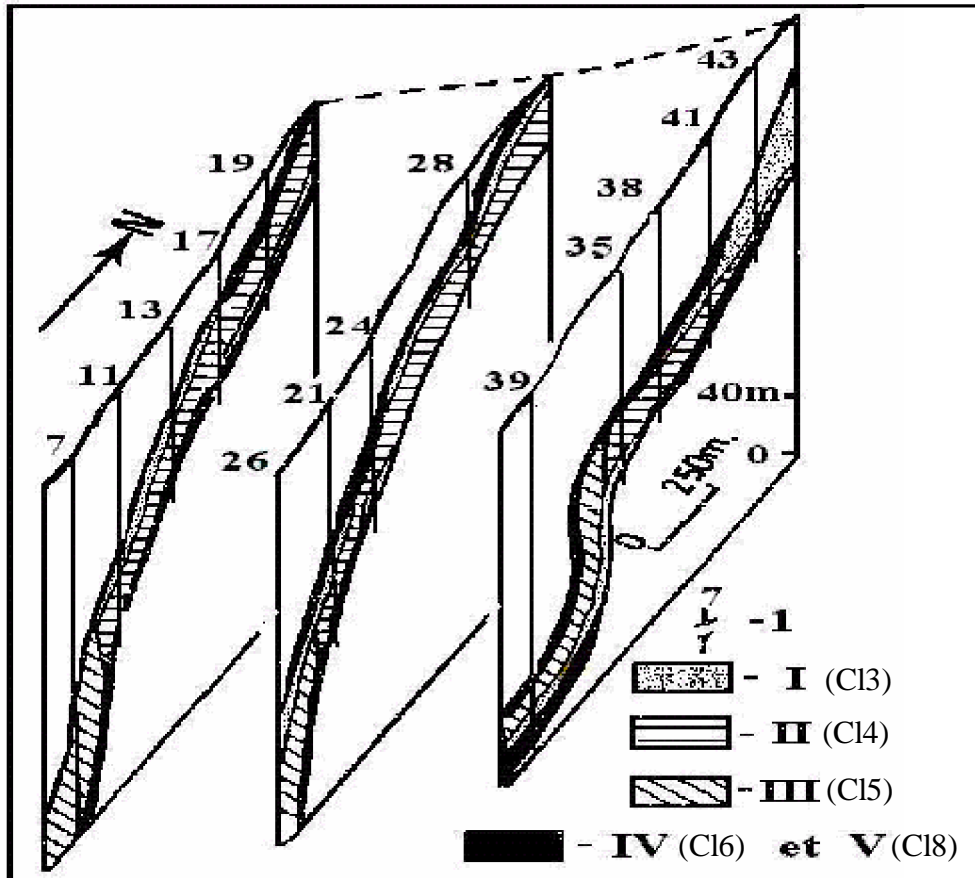


Fig. 12 - Bloc diagramme des types de minerai de phosphate (Mezghache et al, 2002)

2. – 5. - CARACTERISATION DES DIFFERENTS FACIES LITHOLOGIQUES

Afin d'étudier en détail la géologie et la pétrographie du gisement de Kef Es Sennoun, nous avons été amenés à procéder à la documentation et l'échantillonnage du front de carrière, et l'établissement d'une coupe lithologique du front de carrière, cette dernière (Fig. 13) montre clairement les trois couches principales du phosphate, on distingue de bas en haut :

- Couche des phosphates noirs à la base, constituée de plusieurs niveaux, elle est d'une épaisseur dépassant 3.3m
- Couche de phosphate sombre gris totalisant 23 m et qui peut être subdivisée en 2 niveaux d'exploitation de 10 m et plus en moyen.
- Couche de phosphate dolomitique qui a une épaisseur de 4,6 m
- Mince lit de marne dolomitique compact de couleur blanc rosâtre de 1 cm d'épaisseur marquant bien le début de la couche de phosphate dolomitique (C);

- Un niveau marno-calcaire gris schistifié de 0,7 m d'épaisseur (B);
- Lits marneux avec des rognons et lentilles de silex de 0,3 m d'épaisseur (A);
- Les calcaires dolomitiques de couleur blanchâtre

2. - 6. - ETUDE PETROGRAPHIQUE DU MINERAI DE KEF ES SENNOUN

Une étude pétrographique a été faite sur des lames minces confectionnées à partir d'échantillons prélevés par saignée au niveau des différents faciès phosphatés du gisement de Kef Es Sennoun.

L'observation microscopique a montré que les phosphates de Kef Es Sennoun ont une structure pseudoolithique, à grains variés, avec prédominance de grains fins. Ils sont de couleur brune jaune, de forme isométrique, sphérique, ovale, rarement irrégulière. Ils sont constitués essentiellement de :

- L'apatite : elle se présente sous forme de couches concentriques autour d'un débris d'organisme ou d'un grains de quartz ou de dolomie, donnant aux grains de phosphate une structure oolithique

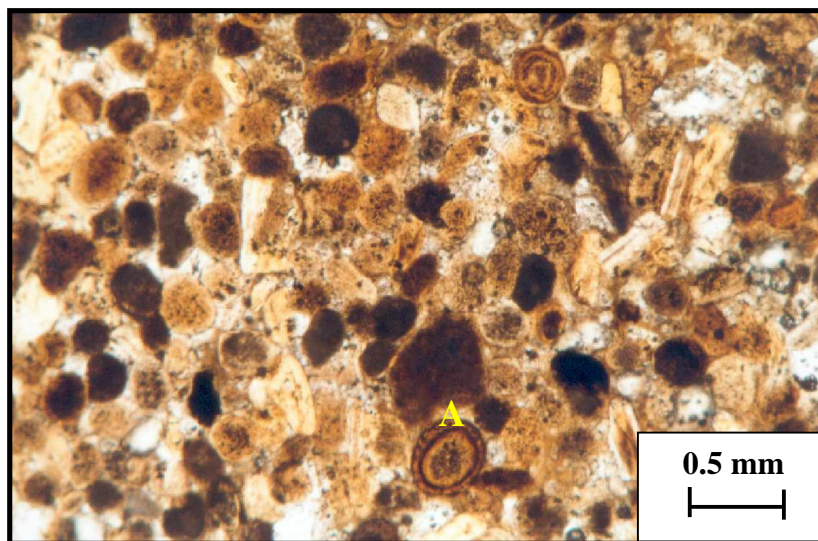


Fig. 14 - Apatite en couches concentriques

A : apatite en couches concentriques

- La glauconie : est sous forme de grains sphérique, de couleur vert brunâtre.

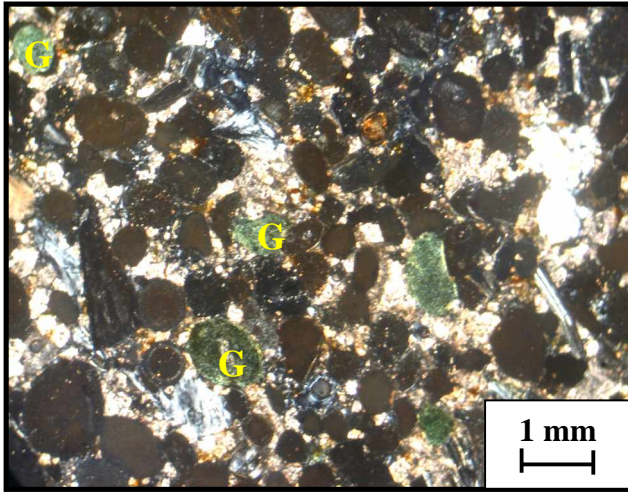


Fig. 15– Lame mince montrant la glauconie



Fig. 16- Photo montrant la glauconie sous la loupe binoculaire

- Le quartz : en général microcristallin, se présente souvent en cristaux allongés ou anguleux et se rencontre le plus souvent dans le ciment carbonaté.

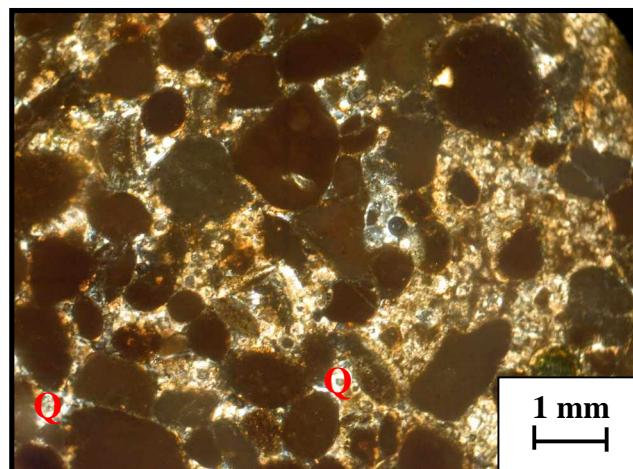


Fig. 17 - Lame mince montrant le quartz (Q)

Les grains de phosphate, de quartz et de glauconie sont généralement agglutinés par une masse calcaire à cristaux de calcite et de dolomite (micrite et sparite) de tailles diverses. Dans le ciment, on note souvent une proportion importante de débris organiques, des fragments de coquilles et des dents de poissons.

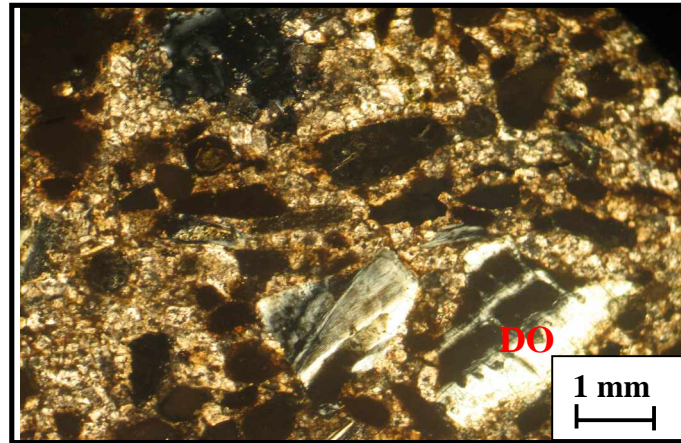


Fig. 18– Lame mince montrant des débris osseux (DO)

Microscopiquement on distingue selon la taille des grains trois type de phosphate :

- les phosphates pseudoolithiques,
- les phosphates coprolithiques et enfin
- les phosphates à grains fins.

1- phosphates pseudoolithiques : nous appelons pseudoolithes les grains dont les dimensions sont en majorité proches de 150μ , ils résultent dans la plus part des cas de la phosphatisation d'un radiolaire, le phosphate peut être également développé autour d'un noyau qui subsiste et dont il épouse en général les contours, le noyau peut être un débris osseux, cristal de dolomite ou de quartz. Les pseudoolithes ont généralement une forme ovoïde, globulaire plus rarement en bâtonnets. Les débris osseux sont très nombreux, ce sont des débris allongés de petite taille. Les pseudoolithes contiennent également de la glauconie ayant des dimensions allant de 350 à 400μ alors que le quartz se présente souvent sous forme de grains de taille inférieure à 100μ . Dans ce type de minerai le ciment est constitué essentiellement par l'argile, celle-ci contient des hydroxydes de fer.

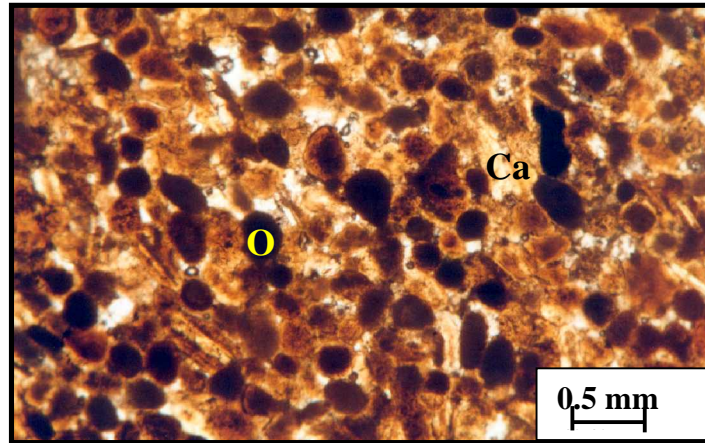


Fig. 19– Lame mince montrant un Phosphate pseudoolithique
O: Oolithe Ca: calcite

2- phosphate coprolithique : ils ont généralement des dimensions supérieures à 600 μ . Les coprolithes ont une longueur qui n'excède pas 0.5cm ; ce sont des bâtonnets trapus qui présentent souvent des étranglements transversaux. Les coprolithes ne contiennent pratiquement jamais des débris osseux, ce qui incite à penser qu'ils sont des excréments d'organismes. Les phosphates coprolithiques renferment outre que les coprolithes :

- des grains de remaniement de différente nature (débris osseux, glauconie pseudoolithe, pseudoolithes ...)
- La glauconie : elle se présente soit en grains isolés soit dans la partie centrale ou périphérique de quelques coprolithes glauconitisés. Dans ce type de minerai le ciment est constitué essentiellement par la dolomie qui se présente presque toujours sous forme de rhomboèdres.



Fig. 20- Photo montrant des coprolithes sous la loupe binoculaire

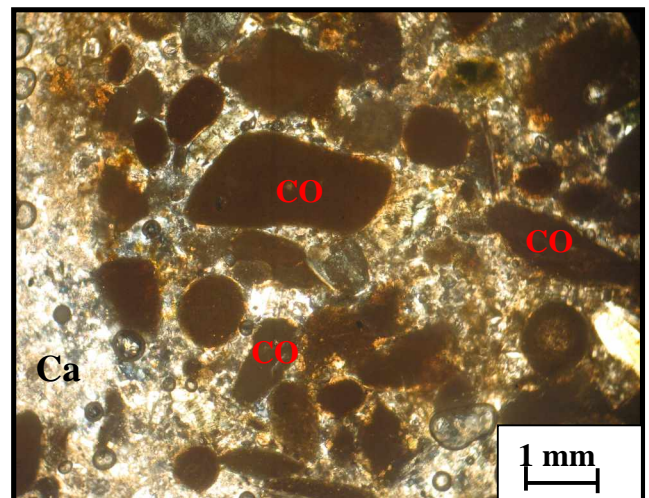


Fig. 21- Lame mince montrant un phosphate coprolithique
CO : Coprolithe Ca: calcite

3- phosphate à grains fins : Dans ce type de minerai le ciment dolomitique est peu important. Les grains de phosphate ont des dimensions voisines de 400 μ , on rencontre des fragments de coprolithes, quelques pseudoolithes, quelques grains de quartz par contre les débris osseux sont très abondants.

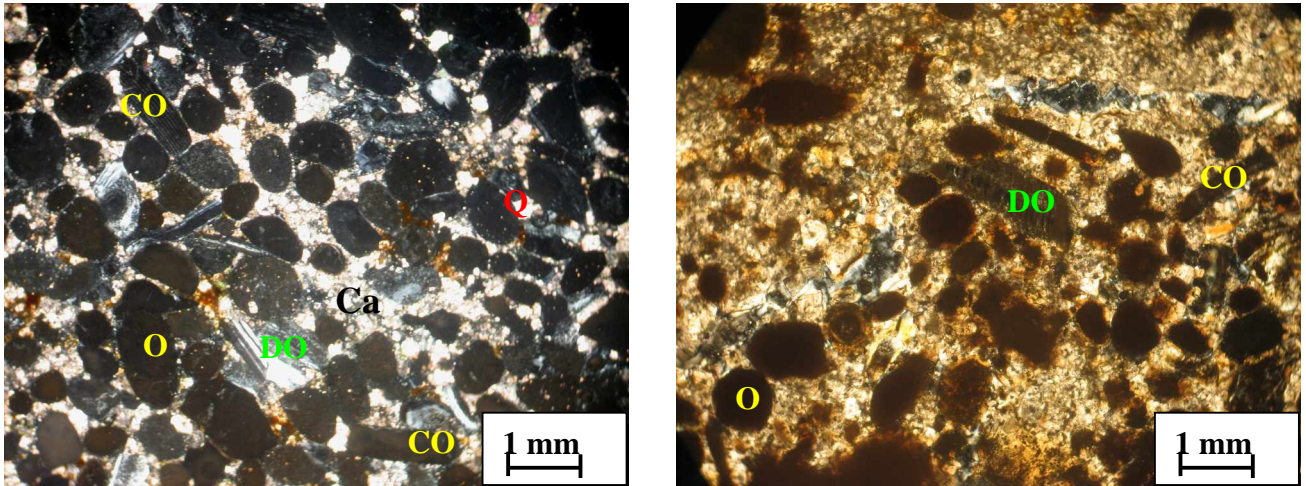


Fig. 22 - Lame mince montrant un phosphate à grains fins
O: Oolithe DO : Débris osseux CO : Coprolithe Q : Quartz

PARTIE II

***GEOSTATISTIQUE
ET ESTIMATION
DES QUANTITES
EN URANIUM
METAL***

2. – ANALYSE DE DONNEES

Ø Données prises en compte

Le gisement de Kef Es Sennoun a été exploré en détail par l'EREM au cours de l'année 1986. Grâce aux 32 sondages carottés. Notés S-2 à S-46 réalisés à la maille de 250 x 300 m.

Les données utilisées pour l'analyse de données et pour l'étude géostatistique comportent:

- 1- les résultats d'analyse chimique sur les carottes des 29 sondages de l'EREM. dont le nombre total des échantillons prélevés sur les tronçons de carottes est de 966 (effectué sur le gisement de Kef Es Sennoun)
- 2- les résultats d'analyse chimique sur les carottes des 24 sondages de l'EREM. dont le nombre total des échantillons prélevés sur les tronçons de carottes est de 259 (effectué sur le gisement de Djemi Djema).
- 3- les données d'analyse chimiques de (Dassamiour, 2005). faites au laboratoire de FERPHOS à Djebel Onk
- 4- Nos propres résultats d'analyse chimiques faites au Centre De Recherche Nucléaire De Draria (RND).

1. – 1. - RAPPEL SUR LES RESULTATS D'ESTIMATION DE U DANS LE GISEMENT DE DJEMI DJEMA

L'uranium a été découvert dans les phosphates algériens en 1934 (Cielensky et Benchernine, 1988). Le dosage de ce dernier dans les phosphates de Bir El Ater en 1985-1987 par l'EREM a permis de mettre en évidence la présence de cet élément avec une teneur moyenne de 44 ppm Mezghache et al (2006). Ce qui donne une quantité supérieure à 25000 t qui peut être récupéré après transformation. C'est pour cette raison que Mezghache et Heni (2000) se sont intéressé de près à la question et une étude plus poussée a été entreprise sur le gisement de Djemi Djema.

Le gisement de Djemi Djema a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches géologiques dont ceux de Visse (1951) et Cielensky et Benchernine (1987). Au total 24 sondages ont été réalisés dans ce gisement par l'Office de la Recherche Géologique et Minière -ORGM-. Des échantillons, de 1m de longueur en moyenne ont été prélevés de la carotte minéralisée. Les analyses chimiques sur les oxydes P_2O_5 , CO_2 , CaO , MgO , Fe_2O_3 ,

SiO₂, sur le résidu insoluble RI et sur U ont été effectuées dans les laboratoires de l'ORGM à Skikda et Bechar. Au total 259 données chimiques d'échantillons de carottes analysés pour l'ensemble des éléments et oxydes suscités ont été traitées. Les paramètres de base de ces données ont été calculés (Mezghache et al. 2006)

Tableau 2 : Statistique élémentaires des teneurs dans les tronçons de carotte du gisement de Djemi Djema (Mezghache et al, 2006).

Paramètres	P2O5 (%)	CO2 (%)	RI (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe2O3 (%)	SiO2 (%)	U (ppm)
Moyenne	23.42	12.29	3.20	44.18	4.69	0.61	1.81	44.18
Minimum	7.28	2.84	0.62	11.97	0.39	0.23	0.03	16.80
Maximum	29.90	36.3	8.70	52.22	14.20	9.74	8.9	92.15
Ecart type	3.94	5.17	1.80	3.65	2.72	0.32	1.46	10.73

Tableau. 3: Matrice de corrélation des éléments analysés calculés sur l'ensemble des échantillons des tronçons de carottes du gisement de Djemi Djema (Mezghache et al, 2006)

	P ₂ O ₅	CO ₂	RI	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	U
P ₂ O ₅	1.00							
CO ₂	-0.91	1.00						
RI	-0.28	0.09	1.00					
CaO	0.61	-0.54	-0.40	1.00				
MgO	-0.83	0.80	0.11	-0.64	1.00			
Fe ₂ O ₃	-0.07	0.09	0.07	-0.02	-0.04	1.00		
SiO ₂	-0.32	0.14	0.98	-0.41	0.16	0.08	1.00	
U	0.43	-0.36	0.05	0.30	-0.41	0.11	-0.02	1.00

Les résultats obtenus par l'analyse en composante principale sur l'ensemble des données chimiques ont montrés que le coefficient de corrélation simple de U avec P₂O₅ est de +0.43.

Le cercle de corrélation dans le plan des axes F1 et F2 montre trois principales associations :

- La 1^{ère} association. formée par P₂O₅, CaO et U. elle représente la matière phosphatée.
- La 2^{ème} association. formée par MgO et CO₂. elle représente la gangue carbonatée dolomitique.
- La 3^{ème} association. formée par SiO₂ et RI. elle représente la gangue argilo-siliceuse.

On remarque que

- Fe_2O_3 se place au centre du cercle de corrélation ; il n'y a aucune corrélation avec CaO et P_2O_5 ni avec CO_2 et MgO .

- U se place assez proche de la première association mais avec une tendance vers la troisième. Il est établi que U est rencontré dans l'apatite de la matière phosphatée par substitution de Ca^{2+} par U^{4+} comme il peut précipiter directement en raison du caractère réducteur du milieu phosphaté (Tlig et al, 1987) in (Mezghache et Heni, 2000)

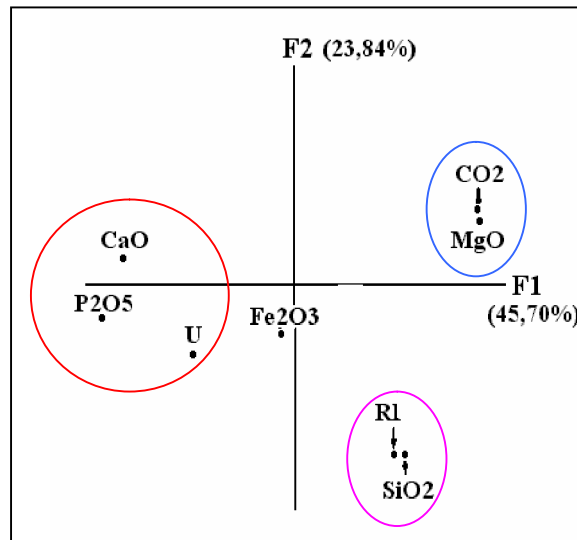


Fig. 23 - Cercle de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM du secteur de Djemi Djema (Mezghache et al, 2006)

L'estimation de U dans les échantillons non analysés par la méthode de régression multiple est donnée par le model suivant :

$$\mathbf{U = 0.779.P2O5 + 0.108.CaO - 0.613.MgO + 24.041} \dots\dots\dots(1)$$

• Les variogrammes expérimentaux de U et P_2O_5 et le variogramme croisé U- P_2O_5 ont été ajustés à des modèles gaussiens (portée $a = 1225$ m). L'estimation locale de U dans les blocs (100mx100m) par cokrigeage a permis de mettre en évidence que :

- Dans le plan horizontal. la teneur moyenne de U contenu dans les blocs de 100mx100 m varie de 41ppm à 46ppm.
- Dans la zone de Djemi Djema Est. La teneur moyenne en U augmente du Sud (41 ppm) au Nord (46 ppm);

1. - 2. – ANALYSE DE DONNEES CHIMIQUES SUR U DANS LE GISEMENT DE KEF ES SENNOUN

1. - 2. – 1. - Analyse de données de l'EREM (1986-1987)

L'analyse des données a été faite et les résultats ont été confrontés aux hypothèses géologiques

a. - Statistique monovariée

Pour le gisement de Kef Es Sennoun l'analyse de donnée a été faite sur les analyses chimiques des carottes de 29 sondages réalisés par L' ORGM (Office National de Recherche Minière) lors de sa campagne de prospection en 1985-1987. Les sondages ont été implantés à maille régulière de 250x300 m. Au total 966 échantillons de carotte de 1m de longueur ont été analysés sur P₂O₅. MgO. CaO. Fe₂O₃. SiO₂. RI et CO₂.

Les paramètres statistiques de distribution de tous les éléments chimiques analysés ont été calculés. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci dessous

Tableau 4 : Paramètres statistiques des éléments chimiques exprimés en oxydes à partir données des sondages du gisement de Kef Es Sennoun

Elts	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	RI	CO ₂
Nbr	964	915	915	915	780	918	917
Nbr ab	70	51	51	51	186	48	50
Min (%)	18.10	0.01	3.2	0.3	0.02	0.26	0.59
Max(%)	30.52	42.36	50.06	7.98	25.14	42.36	31.08
\bar{X}	25.34	3.25	45.22	0.63	2.14	3.04	9.87
S	4.24	2.76	3.64	0.546	2.22	2.66	4.81

- Elts : éléments chimiques (oxydes)
- Nbr : nombre d'échantillons dans chaque sondage
- Nbr ab : nombre d'observations absentes
- Min (%) : valeur minimale
- Max (%) : valeur maximale
- \bar{X} (%) : moyenne arithmétique
- S (%) : écart type

b. - Statistique bivariée

Le traitement statistique bivarié consiste à étudier deux variables aléatoires simultanément et de déterminer la relation qui existe entre elles en calculant le coefficient de corrélation.

Le calcul de la matrice de corrélation (tableau. 5) effectué sur l'ensemble des données des sondages a permis de démontrer que le P_2O_5 est corrélé positivement à CaO et négativement à CO_2 , RI, MgO et SiO_2 et nulle pour Fe_2O_3

Tableau. 5: Matrice de corrélation des éléments chimiques calculés sur l'ensemble des échantillons de sondages de l'EREM du gisement de Kef Es Sennoun

	P_2O_5 %	CO_2 %	RI %	CaO %	MgO %	Fe_2O_3 %	SiO_2 %
P_2O_5 %	1.00						
CO_2 %	-0.87*	1.00					
RI %	-0.57*	0.36*	1.00				
CaO %	0.86*	-0.77*	-0.71*	1.00			
MgO %	-0.89*	0.87*	0.42*	-0.82*	1.00		
Fe_2O_3 %	-0.04	0.03	0.13*	-0.17*	-0.09*	1.00	
SiO_2 %	-0.58*	0.37*	0.97*	-0.72*	0.44*	0.13*	1.00

0.37* : corrélations significatives

c. - Statistique multivariée*** Analyse en Composantes Principales Normées**

Les facteurs de charge ont été calculés (tableau. 6) et les cercles de corrélation ont été tracés (Fig. 25) pour l'ensemble des éléments analysés.

Tableau. 6 : Résultats de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale-

Facteurs de charge	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	$L_1 = 4.44$	$L_2 = 1.29$	$L_3 = 0.93$	$L_4 = 0.14$
Variance (%)	63	18	13	2
P_2O_5	-0.94	-0.22	-0.08	-0.08
CO_2	0.83	0.42	0.22	0.24
RI	0.77	-0.55	-0.31	0.06
CaO	-0.96	0.03	-0.08	0.19
MgO	0.87	0.42	-0.03	-0.19
Fe_2O_3	0.1	-0.55	0.83	-0.01
SiO_2	0.78	-0.54	-0.3	0.03

- **Interprétation des résultats de l'ACP**

La représentation graphique des corrélations entre les variables (éléments chimiques) d'une part et entre les facteurs de charge d'autre part, a permis de visualiser leurs degrés d'associations et la signification de leurs corrélations avec les facteurs.

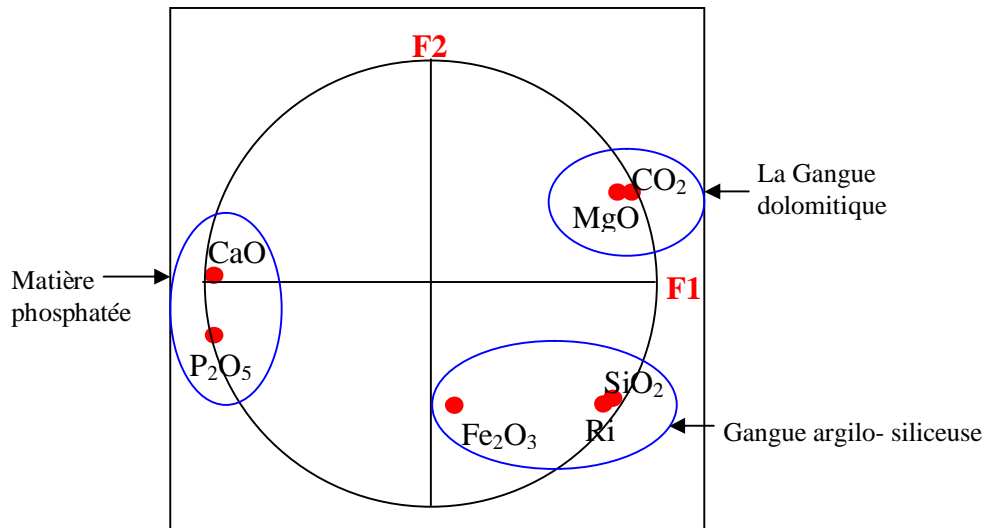


Fig. 24 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM du secteur de Kef Es Sennoun

Les cercles de corrélation dans le plan des axes F1 et F2 montre essentiellement trois associations :

- La première association est constituée de P_2O_5 , CaO : elle est caractérisée par une corrélation négative avec le facteur F2 et pratiquement nulle avec le facteur F1. Elle représente la matière phosphatée;
- La deuxième association est celle du MgO et CO_2 : elle est caractérisée par une corrélation positive avec le facteur F1 et le facteur F2. Elle représente la gangue dolomitique;
- La troisième association est constituée du SiO_2 , Fe_2O_3 et RI (résidu insoluble): est caractérisée par une corrélation positive avec le facteur F1 et par une corrélation négative avec le facteur F2. Elle représente la gangue argilo siliceuse.

1. - 2. - 2. - Analyse de données des saignées du front de carrière

Afin de pouvoir effectuer une analyse de données sur le gisement de Kef Es Sennoun, nous avons été amenés à établir certains travaux.

- **Travaux de terrains**

Durant les de terrain qui ont duré pendant un mois, l'étude géologique faite. Des échantillons ont été prélevés par saignée suivant une direction perpendiculaire aux couches phosphatées. Cependant étant donné que la hauteur du gradin de la couche phosphatée est grande (plus de 30m), ce qui a rendu l'accès à certaines couches impossibles dans le plan vertical. La pente de la tranche d'accès a été utilisée pour la documentation (Fig. 25).

Des échantillons par saigné de 1m et d'environ 1 à 2km ont été prélevés du front de carrière. Le nombre total prélevé est de 31. Les travaux de documentation de la carrière ont permis d'établir une coupe verticale.

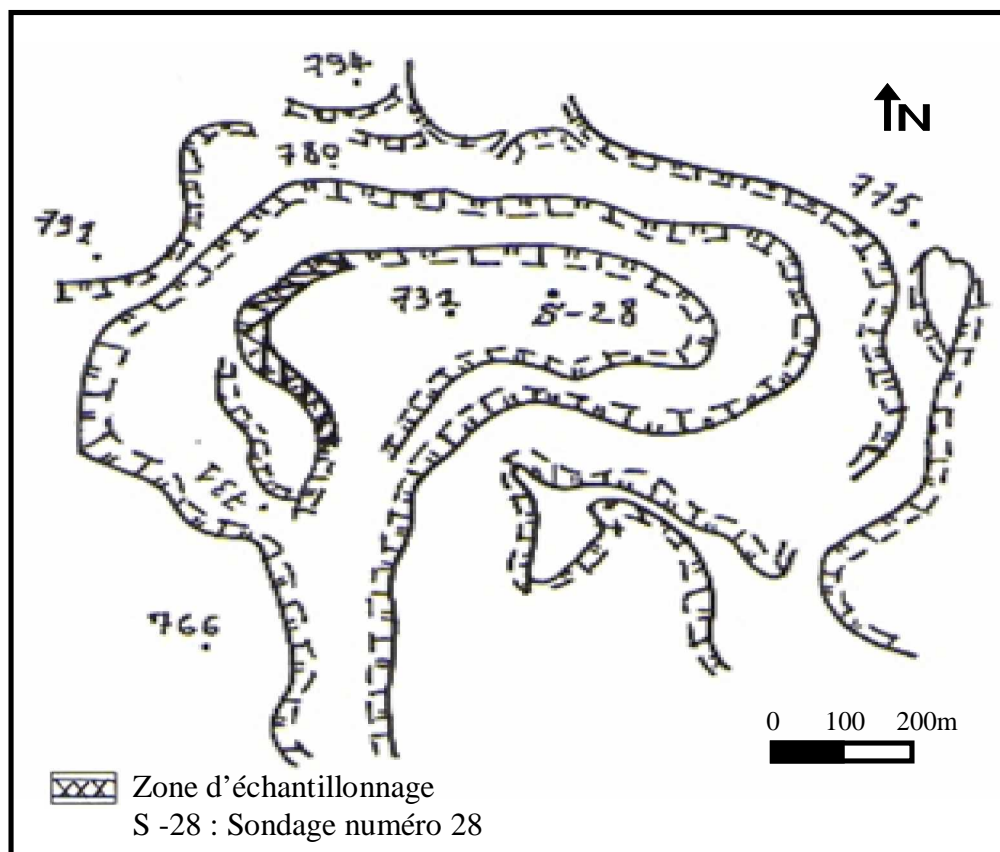


Fig. 25 – Situation de la zone d'échantillonnage dans la carrière du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk – Algérie orientale –

- **Travaux de laboratoire**

Durant le stage au laboratoire des génies des procédés Au niveau du Centre de Recherche Nucléaire de Draria (CRND) qui a duré deux mois, les analyses ont été faites. Au total 28 échantillons ont été analysés sur U par torche à plasma, Il est à noter que pour cette méthode analytique les échantillons doivent être mis en solution. C'est pour cette raison que chaque échantillon a subi un quartage, un séchage au four afin de dégager l'humidité, un broyage dans un broyeur en agate pendant quelques minutes (15mn) afin de libérer les grains de leur matrice et en fin une mise en solution.

La mise en solution a été établie par le procédé suivant : Peser 1gramme d'échantillon de phosphate broyé dans un bêcher de 250 ml, verser quelques ml de H₂O distillée et ajouter 7.5 ml de l'acide chlorhydrique et 2.5 ml de l'acide nitrique (l'eau régale), laisser chauffer dans un bain de sable jusqu'à mise à sec. Laisser refroidir ajouter 5ml d'acide chlorhydrique et 10ml de l'eau distillée, chauffer à douce ébullition pendant 10ml laisser refroidir à température ambiante, transvaser le contenu du bêcher en le rinçant à l'eau distillée dans une fiole jaugée de 100 ml. Homogénéiser bien la fiole, ajuster au trait de jauge, homogénéiser encore, filtrer, rejeter les premiers millilitres du filtrat et recueillir dans un flacon sec.

a. - Statistique monovariante

Pour l'analyse de données des saignées du front de carrière, les résultats d'analyse de U faite au CRND ainsi que les analyses chimiques sur P₂O₅, CO₂ et MgO faites par le laboratoire de Ferphos-Bir El Ater à la demande de (Dassamiour, 2005) ont été utilisés. Les paramètres statistiques obtenus sur les 28 échantillons des saignées prélevées lors de notre documentation de la carrière ont été calculés (tableau.7).

Tableau. 7: Paramètres statistiques des éléments chimiques des données de saignées du front de carrière du gisement de Kef Es Sennoun

Elts.	N	Min	Max	\bar{X}	S ²
P ₂ O ₅ %	28	13	30	26.31	22.5
CO ₂ %	28	5.6	28.7	10.49	34.58
MgO %	28	0.7	9.85	2.38	4.67
U ppm	28	19	65	38	51.64

b. - Statistique bivariée

Le calcul de la matrice de corrélation (Tableau. 8) de l'ensemble des éléments dosés, a permis de distinguer les éléments chimiques les plus corrélés entre eux.

Tableau. 8: Matrice de corrélation des éléments analysés calculée sur l'ensemble des échantillons de saignées du front de carrière du gisement de Kef Es Sennoun

	P ₂ O ₅	CO ₂	MgO	U
P ₂ O ₅	1.00			
CO ₂	- 0.98*	1.00		
MgO	- 0.74*	0.82*	1.00	
U	0.45*	- 0.43*	- 0.14	1.00

L'U est corrélés positivement avec P₂O₅ il est donc localisé essentiellement dans la matière phosphatée.

c. - Statistique multivariée

- **Analyse en Composantes Principales Normées**

Les facteurs de charge ont été calculés et les cercles de corrélation ont été tracés pour l'ensemble des échantillons des saignées (tableau. 9).

Tableau. 9: Résultats de l'ACP des éléments analysés sur l'ensemble des échantillons de saignées du front de carrière du gisement de Kef Es Sennoun

Facteurs de charge	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	L ₁ = 3.44	L ₂ = 1	L ₃ = 0.37	L ₄ = 0.18
Variance (%)	69	20	7	4
P ₂ O ₅	0.93	- 0.17	0.27	0.16
CO ₂	- 0.96	0.20	- 0.13	- 0.1
MgO	- 0.81	0.48	0.17	0.3
U	0.59	0.75	0.21	- 0.2

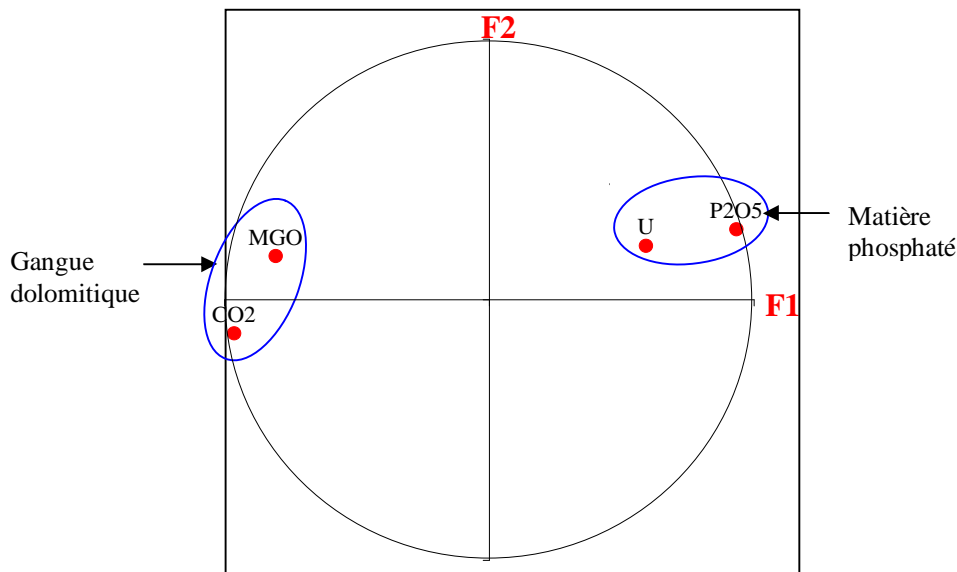


Fig. 26 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des données de saignées du front de carrière de Kef Es Sennoun

Le cercle de corrélation (Fig. 26) dans le plan des axes F1 et F3 montre essentiellement deux associations :

- La première association est constituée de P_2O_5 , U : Elle représente la matière phosphatée
- La deuxième association est constituée de CO_2 et MgO: Elle représente la gangue dolomitique.

1. – 2. – 3. - Analyse de données de U estimé dans les carottes de sondages de l'EREM

Dans le gisement de Kef Es Sennoun, L'uranium a été estimé dans les carottes de sondage par deux modèles linéaires différents :

- **Estimation de U par régression linéaire simple**

La fonction de régression linéaire simple entre la teneur en U et la teneur en P_2O_5 dans un tout venant (échantillon brut) est donnée par l'équation suivante :

$$U = 1.01 P_2O_5 + 20.41$$

Cette équation a permis de déterminer la relation qui existe entre la radioactivité (Mr) et les teneurs en U.

$$Mr = 64.79 P_2O_5 + 10$$

$$U = 1.01 \left(\frac{Mr - 10}{64.79} \right) + 20.41 \quad \text{ou } Mr : \text{ la radioactivité}$$

- **Estimation de U par régression linéaire multiple**

La fonction de régression linéaire multiple (Annexe 2) entre la teneur en U et la teneur en P₂O₅, et MgO dans un tout venant est donnée par l'équation suivante :

$$U = 1.16 P_2O_5 + 1.43 MgO + 3.98$$

Les deux modèles linéaires (simple et multiple) ont permis l'estimation de U dans les échantillons de carottes des sondages de l'EREM, et de construire un fichier de données. Ce dernier a été utilisé pour déterminer la relation qui existe entre U estimé par les deux modèles et les autres éléments chimiques calculés sur l'ensemble des échantillons de sondages de l'EREM du gisement de Kef Es Sennoun.

§ Statistique monovariante de U

Tableau. 10 : Paramètres statistiques de U estimé par régression linéaire simple et multiple dans les carottes de sondages de l'EREM dans le gisement de Kef Es Sennoun

Els.	Min	Max	\bar{X}	S ²
U ₁ ppm	21.61	51.24	46.01	18.38
U ₂ ppm	19.81	48.64	37.95	5.59

U₁ : Uranium estimé par modèle linéaire simple

U₂ : Uranium estimé par modèle linéaire multiple

§ Statistique bivariée de U

Les résultats de calcul de la matrice de corrélation sont représentés dans le tableau ci-dessous

Tableau. 11: Matrice de corrélation de U estimé par modèle linéaire simple et multiple avec les éléments chimiques calculés sur l'ensemble des échantillons de sondages de l'EREM du gisement de Kef Es Sennoun

	P ₂ O ₅ %	CO ₂ %	RI %	CaO %	MgO %	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	U ppm
P ₂ O ₅	1.00							
CO ₂	-0.86*	1.00						
RI	-0.47*	0.25	1.00					
CaO	0.90*	-0.78*	-0.64*	1.00				
MgO	-0.93*	0.90*	0.31	-0.83*	1.00			
Fe ₂ O ₃	0.19	-0.34*	-0.23	0.14	-0.41*	1.00		
SiO ₂	-0.48*	0.22	0.96*	-0.66*	0.31	-0.11	1.00	
U ₁	1.00*	-0.86*	-0.47*	0.90*	-0.93*	0.19	-0.48*	1.00
U ₂	0,72*	-0,51*	-0,52*	0,54*	-0,33*	-0,16*	-0,52*	1,00

U₁ : Uranium estimé par modèle linéaire simple U₂ : Uranium estimé par modèle linéaire multiple

§ Statistique multivariée de U

Le cercle de corrélation dans le plan des axes F1 et F2 montre trois principales associations :

- La 1^{ère} association. formée par P₂O₅, CaO et U. elle représente la matière phosphatée.
- La 2^{ème} association. formée par MgO et CO₂. elle représente la gangue carbonatée dolomitique.
- La 3^{ème} association. formée par SiO₂ et RI. elle représente la gangue argilo-siliceuse.

Tableau. 12: Résultats de l'ACP de U estimé dans les sondages de l'EREM du gisement de Kef Es Sennoun

acteurs de charge	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	L ₁ = 4.87	L ₂ = 1.32	L ₃ = 0.94	L ₄ = 0.63
Variance (%)	61	16	12	8
P ₂ O ₅	-0,95	-0,23	0,10	0,13
CO ₂	0,82	0,44	-0,23	0,01
RI	0,77	-0,50	0,34	0,11
CaO	-0,94	-0,02	0,05	-0,20
MgO	0,83	0,47	-0,02	0,25
Fe ₂ O ₃	0,11	-0,56	-0,79	0,21
SiO ₂	0,78	-0,50	0,34	0,11
U ₁	-0,96	-0,16	0,16	-0,13
U ₂	-0,70	0,20	0,14	0,67

U_1 : Uranium estimé par modèle linéaire simple

U_2 : Uranium estimé par modèle linéaire multiple

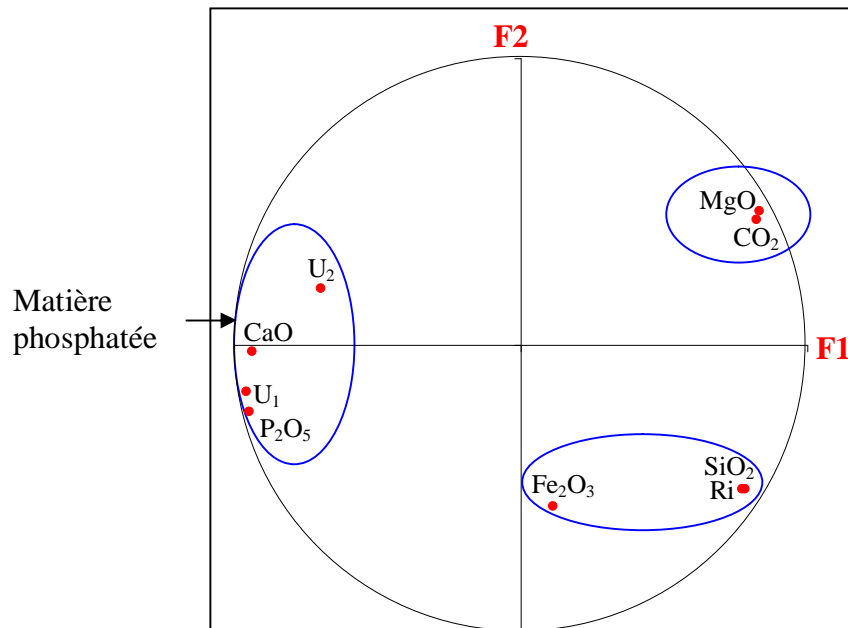


Fig. 27 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM et U estimé par le modèle linéaire simple et multiple dans le secteur de Kef Es Sennoun

2. – VARIOGRAPHIE AU GISEMENT DE KEF ES SENNOUN

2. – 1. - TRAVAUX PREPARATOIRES

La couche phosphatée du gisement de Kef Es Sennoun est une couche inclinée avec un pendage moyen d'environ 15° - 20° vers le sud. Les sondages réalisés par l'EREM sont implantés avec un angle vertical. L'épaisseur de la couche phosphatée varie entre 30 m et 53 m. L'épaisseur du recouvrement stérile varie de 40 m dans le Nord du gisement (S-17) à 198 m dans le Sud (S-39).

Afin de calculer les variogrammes dans le plan de la couche phosphatée, un transfert d'axe tel qu'il a été établi par Dassamiour (2005) a été adopté. Les coordonnées des carottes ont été recalculées dans le plan (X' , Y' , Z') (Fig. 28).

Suivant l'axe des altitudes (Z). L'altitude 820 m est prise comme l'altitude maximale à partir de laquelle commencent les échantillons des sondages. L'épaisseur de la couverture - z a été éliminée de chaque sondage.

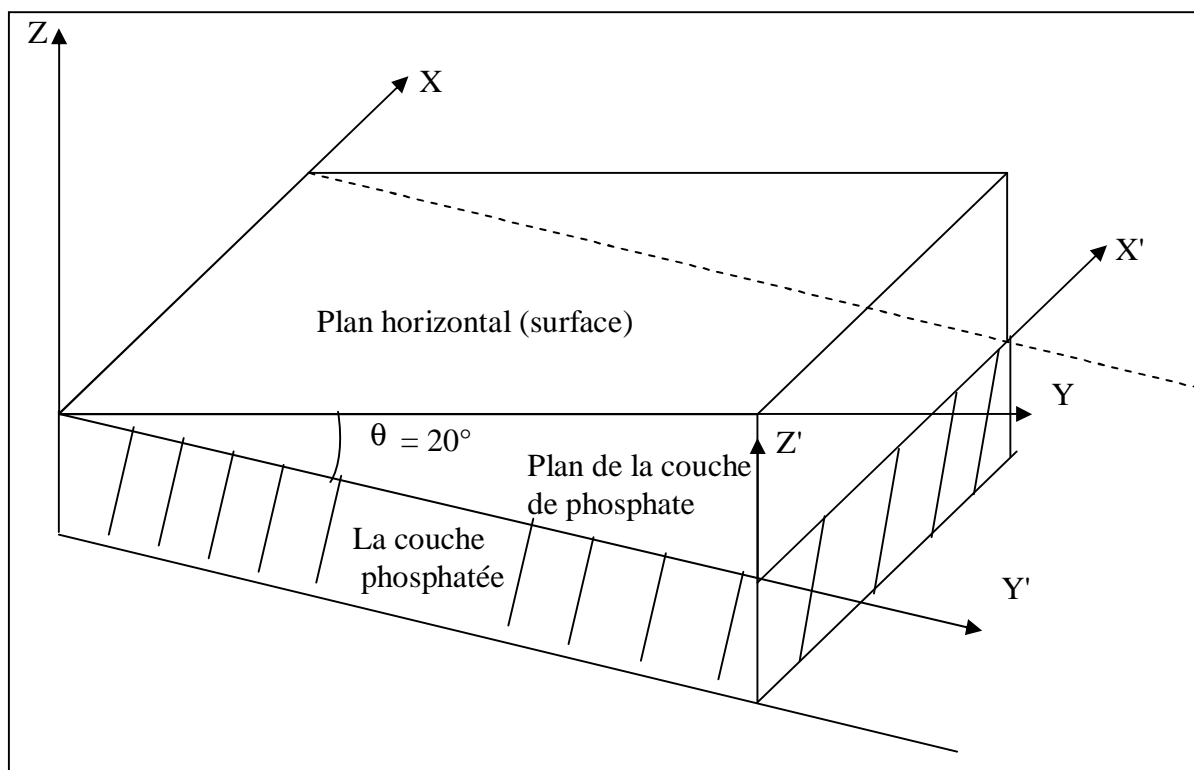


Fig. 28- Coupe verticale de la couche phosphatée selon le plan (X. Y. Z) montrant le nouveau système des coordonnées (X'. Y'. Z'). (In Dassamiour, 2005)

Les paramètres des nouvelles coordonnées sont donnés dans le tableau. 13.

Tableau. 13 : Coordonnées relatives du gisement de Kef Es Sennoun dans le plan (X'. Y'. Z')

X' min (m)	X'max (m)	Y'min (m)	Y'max (m)	Z'min (m)	Z'max (m)
0	2715.06	0	1506.39	772.07	820

2. – 2. – CALCUL ET AJUSTEMENT DES VARIOGRAMMES EXPERIMENTAUX MOYENS

Avant de procéder au calcul des variogrammes expérimentaux 3D des teneurs de P_2O_5 et U. Il faut préparer un fichier qui calcule les couples des teneurs distants de h (tableau. 14).

Tableau. 14 : Données utilisées pour la construction des variogrammes expérimentaux 3D des teneurs de P_2O_5 et U

	Axe X	Axe Y	Axe Z
Début	0	0	772
Fin	2750	1600	812
Pas maximal	1200	500	1

Du fait que les échantillons des sondages sont répartis dans l'espace en 3D. Le programme cherche les échantillons qui se trouvent à une distance "h" suivant une direction de 0° et avec une tolérance de ± 90° et suivant un angle vertical de -20° de pendage.

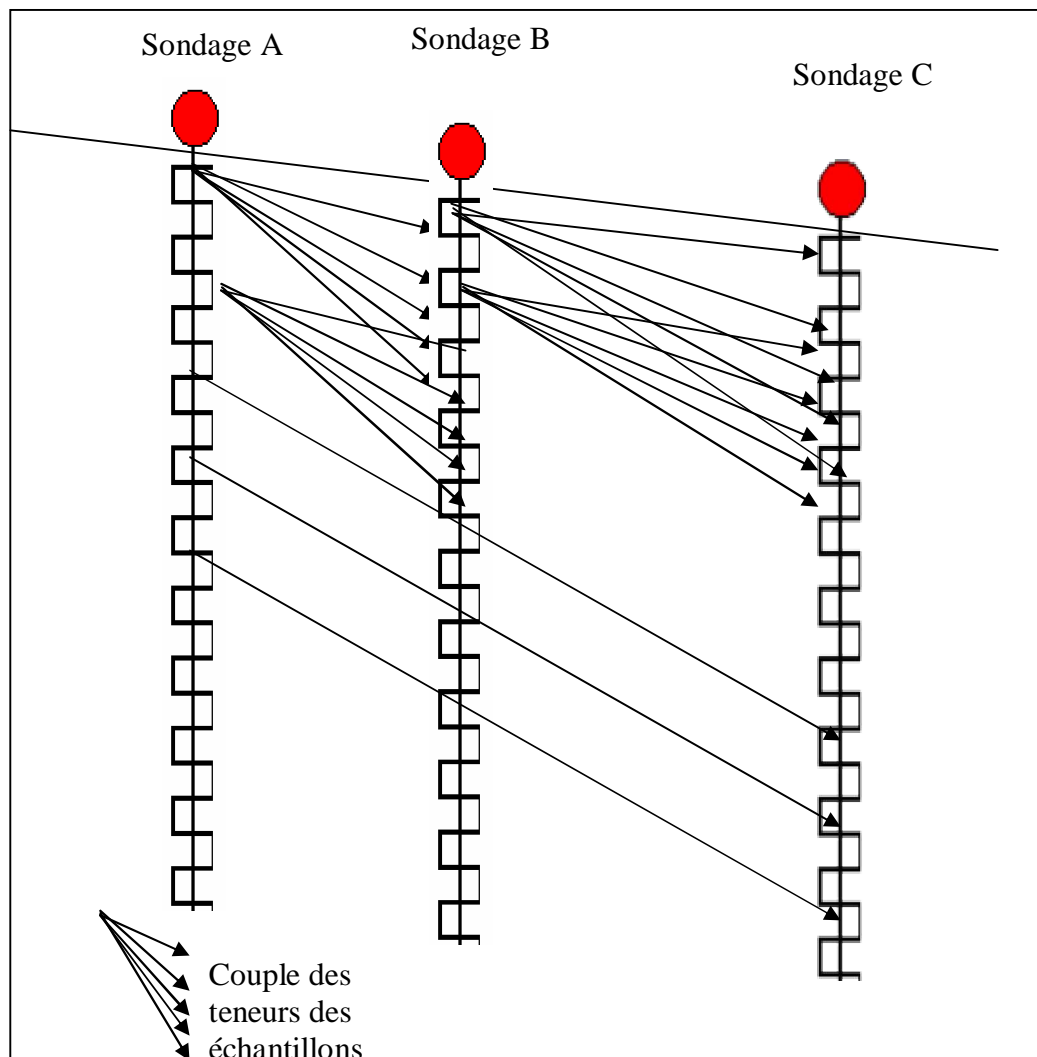


Fig. 29 - Procédure de Calcul des couples des teneurs des échantillons des sondages pour la construction du variogramme expérimental 3D (dans le plan de la couche phosphatée)

- **Variogrammes en 3D des teneurs en P_2O_5**

- **Variogramme vertical**

Le variogramme vertical moyen (Fig. 30) des teneurs de P_2O_5 et ses paramètres (tableau. 15) a été construit à partir des données des sondages et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée (a) égale à 12 m. d'un effet de pépité (C_0) égale à 1.8 (%)² et de palier (C) égale à 3.9 (%)².

$$\gamma(h) = 1,8 + 3,9 \exp(-12h)$$

Tableau. 15 : Paramètres du variogramme expérimental vertical moyen des teneurs de P_2O_5

Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$

Angle vertical : $90^\circ \pm 20^\circ$

N° de pas	Distance (m)	Couples	γ (h)
1	1	865	2.852
2	2	836	4.019
3	3	807	4.635
4	4	778	4.482
5	5	749	4.463
6	6	720	4.753
7	7	691	4.883
8	8	662	5.283
9	9	633	5.299
10	10	604	5.609
11	11	575	5.377
12	12	546	5.479

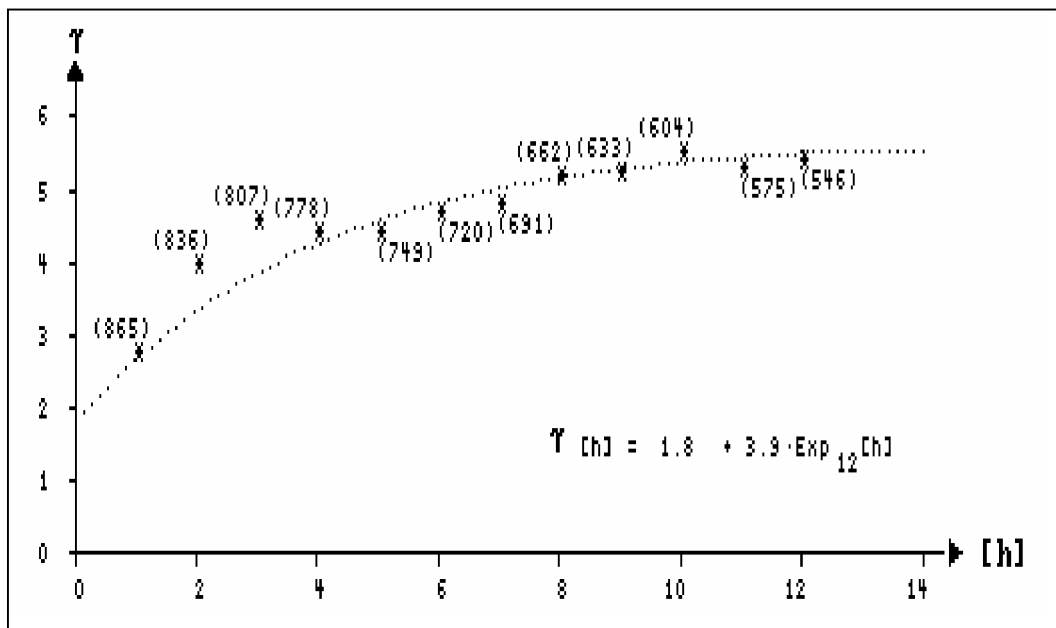


Fig. 30 - Variogramme expérimental vertical moyen des teneurs de P_2O_5 dans le gisement de Kef Es Sennoun

○ Variogramme horizontal

Le variogramme expérimental moyen horizontal (Fig. 31) des teneurs de P_2O_5 et ses paramètres (tableau. 16) a été construit à partir des données des sondages et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée (a) égale à 750 m. d'un effet de pépite (C_0) égale à 1.4 (%)², et de palier (C) égale à (3%)².

$$\gamma(h) = 1,4 + 3 \exp_{750}(h)$$

Tableau. 16 : Paramètres du variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de P_2O_5

Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$

Angle vertical : $0^\circ \pm 20^\circ$

N° de pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$
1	242.26	49	3.377
2	277.07	1000	3.666
3	567.84	1000	4.011
4	825.51	1000	4.189

- 714 échantillons retenus par le programme sur 964 échantillons
- 9689 couples calculés par le programme

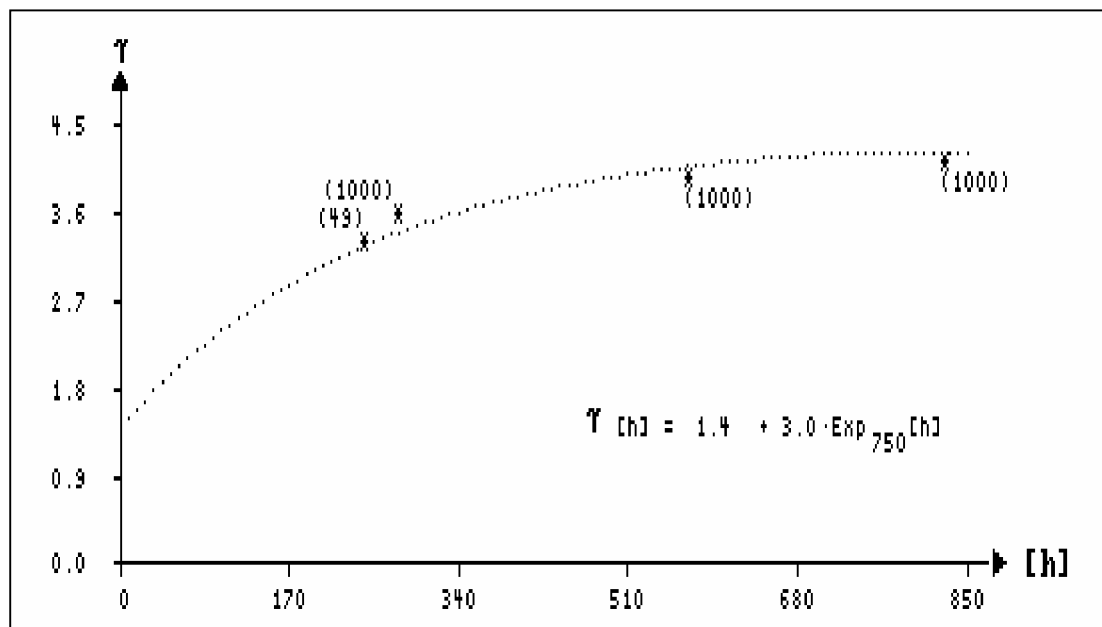


Fig. 31- Variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de P_2O_5 dans le gisement de Kef Es Sennoun

- Variogrammes en 3D des teneurs en U estimé par régression linéaire simple

○ **Variogramme vertical**

Le variogramme vertical moyen (Fig. 32) des teneurs en U estimé par régression linéaire simple et ses paramètres (tableau. 17) a été construit à partir des données de U estimé dans les sondages de l'EREM et ajusté par un modèle de régionalisation exponentielle de portée (a) égale à 12 m. d'un effet de pépité (C_0) égale à 3 (ppm)² et de palier (C) égale à 13 (ppm)².

$$\gamma(h) = 3 + 13 \exp_{12}(h)$$

Tableau. 17 : Paramètre du variogramme expérimental vertical moyen des teneurs de U estimé par régression linéaire simple

Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$

Angle vertical : $90^\circ \pm 20^\circ$

N° de pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$ (ppm) ²
1	1	931	5.81
2	2	906	9.04
3	3	877	10.72
4	4	848	10.89
5	5	819	11.80
6	6	790	12.67
7	7	761	13.25
8	8	732	14.21
9	9	703	14.83
10	10	674	15.86
11	11	645	15.92
12	12	616	15.88

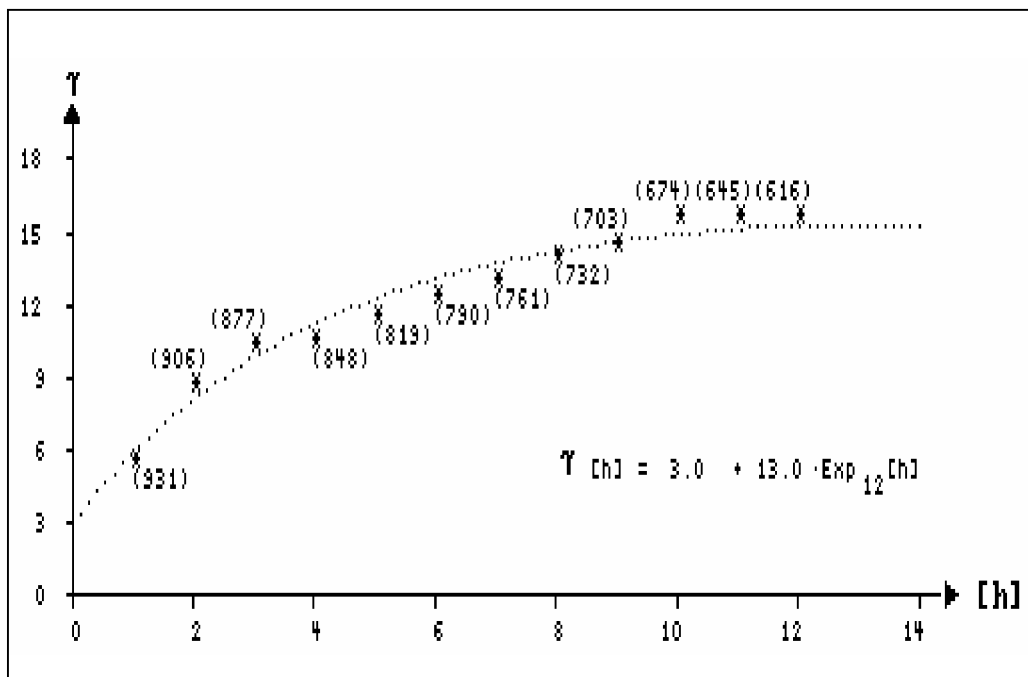


Fig. 32 - Variogramme expérimental moyen vertical des teneurs de U estimé par régression linéaire simple dans le gisement de Kef Es Sennoun

○ Variogramme horizontal

Le variogramme expérimental moyen horizontal (Fig. 33) des teneurs de U estimé par régression linéaire simple et ses paramètres (tableau. 18) a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée (a) égale à 700 m. d'un effet de pépite (C_0) égale à 1.2 (ppm)^2 et de palier (C) égale à 4.8 (ppm)^2 .

$$\gamma(h) = 1,2 + 4,8 \exp_{700}(h)$$

Tableau. 18 : Paramètre du variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de U estimé par régression linéaire simple

Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$

Angle vertical : $0^\circ \pm 20^\circ$

N° de pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h) \text{ (ppm)}^2$
1	274.64	1000	4.551
2	324.54	1000	4.980
3	616.99	1000	5.728
4	949.55	1000	5.758

- 734 échantillons retenus par le programme sur 964 échantillons
- 9905 couples calculés par le programme

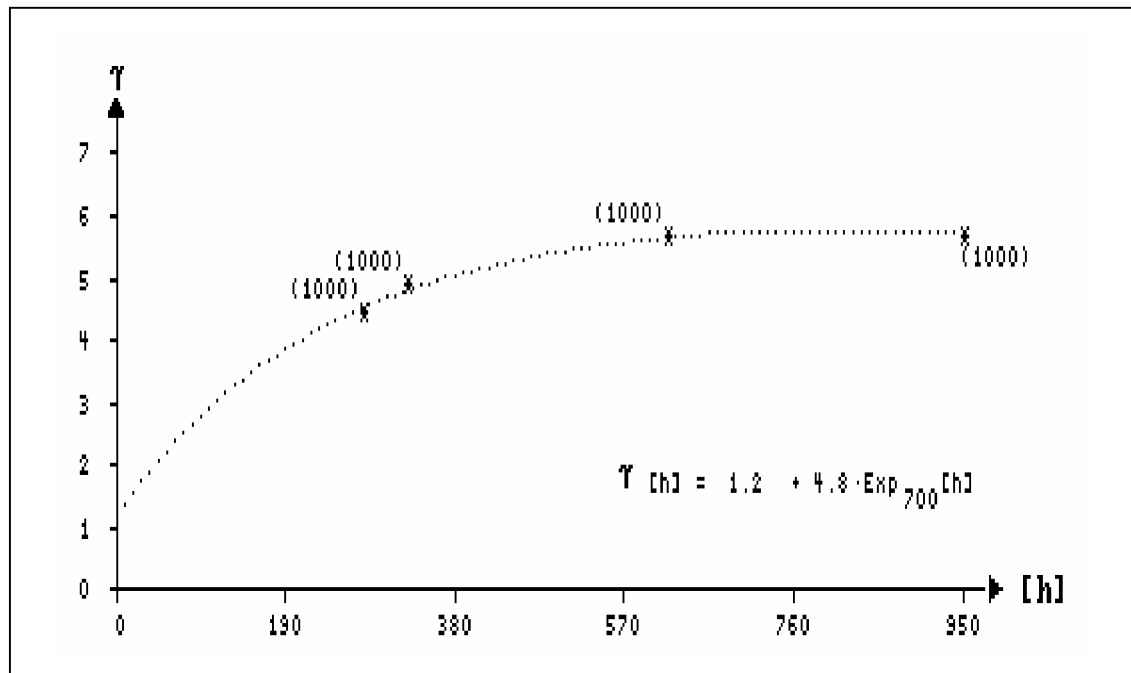


Fig. 33- Variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de U estimé par régression linéaire simple dans le gisement de Kef Es Sennoun

- **Variogrammes 3D des teneurs en U estimé par régression linéaire multiple**

- **Variogramme verticale**

Le variogramme vertical moyen (Fig. 34) des teneurs en U estimé par régression linéaire multiple et ses paramètres (tableau. 19) a été construit à partir des données de U_2 estimé dans les sondages de l'EREM et ajusté par un modèle de régionalisation exponentielle de portée (a) égale à 12 m. d'un effet de pépite (C_0) égale à 1.2 (ppm)^2 et de palier (C) égale à 4 (ppm)^2 .

$$\gamma(h) = 1.2 + 4 \exp_{12}(h)$$

Tableau. 19 : Paramètre du variogramme expérimental vertical moyen des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple

Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$

Angle vertical : $90^\circ \pm 20^\circ$

N° de pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h)$ (ppm) ²
1	1	885	2.255
2	2	859	3.215
3	3	831	3.645
4	4	803	3.598
5	5	775	3.669
6	6	747	3.962
7	7	719	4.118
8	8	691	4.301
9	9	663	4.652
10	10	635	5.059
11	11	607	4.943
12	12	579	4.874

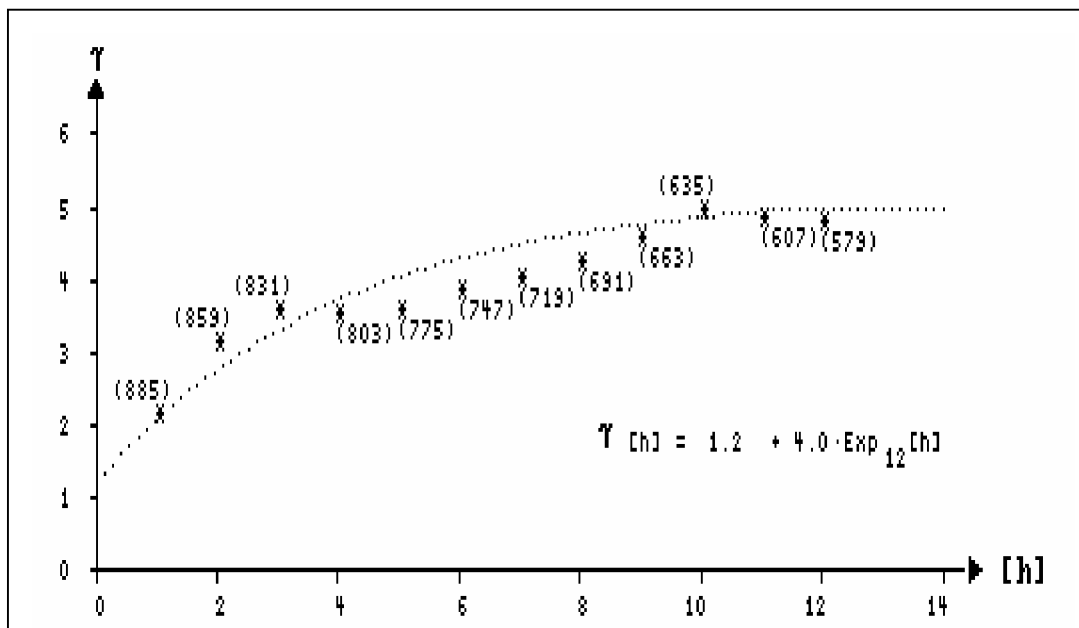


Fig. 34- Variogramme expérimental moyen vertical des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple dans le gisement de Kef Es Sennoun

○ Variogramme horizontal

Le variogramme expérimental moyen horizontal (Fig. 35) des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple et ses paramètres (tableau. 20) a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée (a) égale à 700 m. d'un effet de pépité (C_0) égale à 0.8 (ppm)^2 et de palier (C) égale à 2.4 (ppm)^2 .

$$\gamma(h) = 0.8 + 2.4 \exp_{700}(h)$$

Tableau. 20 : Paramètre du variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple

Direction : $0^\circ \pm 90^\circ$

Angle vertical : $0^\circ \pm 20^\circ$

N° de pas	Distance (m)	Couples	$\gamma(h) \text{ (ppm)}^2$
1	272.98	868	2.535
2	325.24	1000	2.726
3	617.09	1000	3.110
4	950.4	1000	3.158

- 694 échantillons retenus par le programme sur 964 échantillons
- 9199 couples calculés par le programme

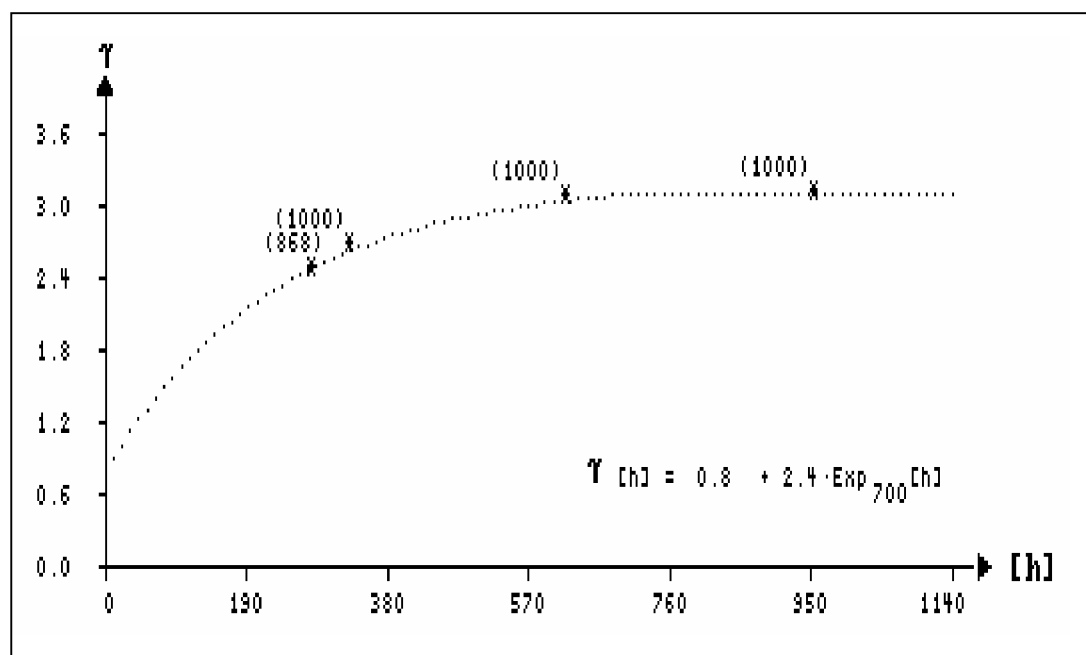


Fig. 35- Variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple dans le gisement de Kef Es Sennoun

3. – KRIGEAGE ORDINAIRE DES TENEURS DE P_2O_5 et U

Le krigeage ordinaire est une procédure d'interpolation qui fournit à partir des données disponibles, une estimation optimale linéaire et non biaisée. Le krigeage a plusieurs avantages parmi ceux-ci :

- Lors de l'estimation, le krigeage intègre la structure spatiale des données sous forme d'un modèle de variogramme
- C'est un interpolateur exact.
- Il fournit une information sur l'erreur d'estimation, permettant donc d'évaluer la précision de l'estimation.

3. – 1. - PARAMETRES DE KRIGEAGE

Le krigeage ordinaire à trois dimensions a été établi avec des paramètres précis (tableau. 21), dans le but d'estimer les teneurs en P_2O_5 et U dans les blocs d'exploitation ($100 \times 20 \times 10 \text{ m}^3$) à partir de l'ensemble des données des sondages.

Tableau. 21 - Paramètres de krigeage.

	Axe X	Axe Y	Axe Z
Var	X	Y	Z
Origine	50	10	785
Taille des blocs	100	20	10
Nombre de blocs	29	80	4
Rayon de recherche	$R_1= 750\text{m}$	$R_2= 750 \text{ m}$	$R_3= 100 \text{ m}$

Pour notre plan de krigeage et en fonction de la composition lithologique, chimique et conditions d'exploitation le gisement de Kef Es Sennoun a été divisé en 4 niveaux :

- Niveau 1 : de 815 m de profondeur. dont les dimensions des blocs d'exploitation sont 100 m de longueur. 20 m de largeur et 10 m d'épaisseur. qui correspond à la sous-couche II_T .
- Niveau 2 : de 805m de profondeur. dont les dimensions des blocs d'exploitation sont $(100 \times 20 \times 10) \text{ m}^3$ et qui correspond à la première partie de la couche principale de phosphate;

- Niveau 3 : de 795m de profondeur. dont les dimensions des blocs d'exploitation sont (100 x 20 x 10) m³ et qui correspond à la deuxième partie de la couche phosphatée principale;
- Niveau 4 : de 780 m de profondeur. dont les dimensions des blocs d'exploitation sont (100 x 20 x 10) m³ et qui correspond à la sous-couche II_M.

Les résultats de krigeage sont donnés sous forme de tableau. (Tableau 23)

Tableau. 22 : Statistiques des teneurs krigés en P₂O₅ et U pour les quatre niveaux

Elément	\bar{X}	S ²	σ_k^2	N.B
P ₂ O ₅ (%)	24.809	4.169	3.761	9069
U ₁ (ppm)	45.443	4.183	8.369	9072
U ₂ (ppm)	37.711	1.166	3.280	9072

U₁ : Uranium estimé par régression linéaire simple

U₂ : Uranium estimé par régression linéaire

3. – 2. - COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS SUR U ESTIME PAR REGRESSION LINEAIRE SIMPLE ET REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE

Les résultats obtenus sur U estimé par les deux modèles linéaires sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau. 23 : Récapitulatif des résultats obtenus sur estimé par régression linéaire simple et régression linéaire multiple dans le gisement de Kef Es Sennoun

	Variogramme vertical		Variogramme horizontal		(σ_k^2)	Quantités U
	C ₀	C	C ₀	C		
U ₁	3	13	1.2	4.8	8.369	18693.97
U ₂	1.2	4	0.8	2.4	3.280	15733,79

On note que pour les deux variogrammes (vertical et horizontal), U estimé par régression linéaire multiple présente un effet de pépite (C₀) et un palier (C) inférieurs à ceux de U estimé par régression linéaire simple. On note également que U estimé par régression linéaire multiple présente une variance de krigeage (σ_k^2) inférieur à celle de U estimé par régression linéaire simple. Ce qui nous mène à dire que le modèle linéaire multiple est meilleur que le modèle linéaire simple.

3. – 3. - CARTOGRAPHIE DES TENEURS KRIGES DE P₂O₅ Et U

La méthode de cartographie utilisée est la cartographie par classe. Afin de bien visualiser la répartition des blocs ainsi que les zones les plus riches, les cartes des teneurs des blocs ou plans d'exploitation des quatre niveaux du gisement pour les teneurs de P₂O₅ et U krigés estimé par régression multiple (puisque'il présente le meilleur modèle) ont été établies.

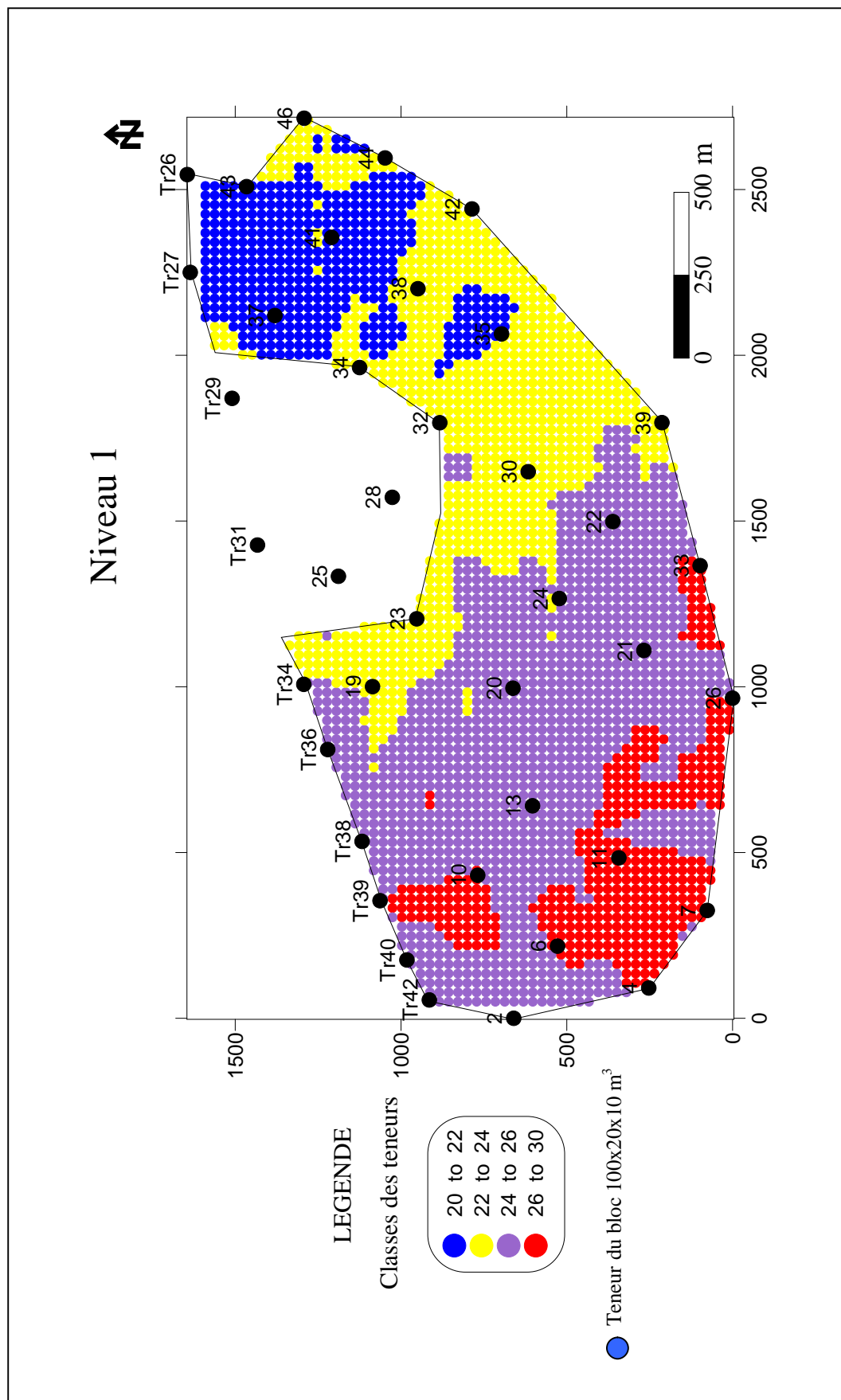


Fig. 36- Carte des teneurs moyennes de P₂O₅ estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 1 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

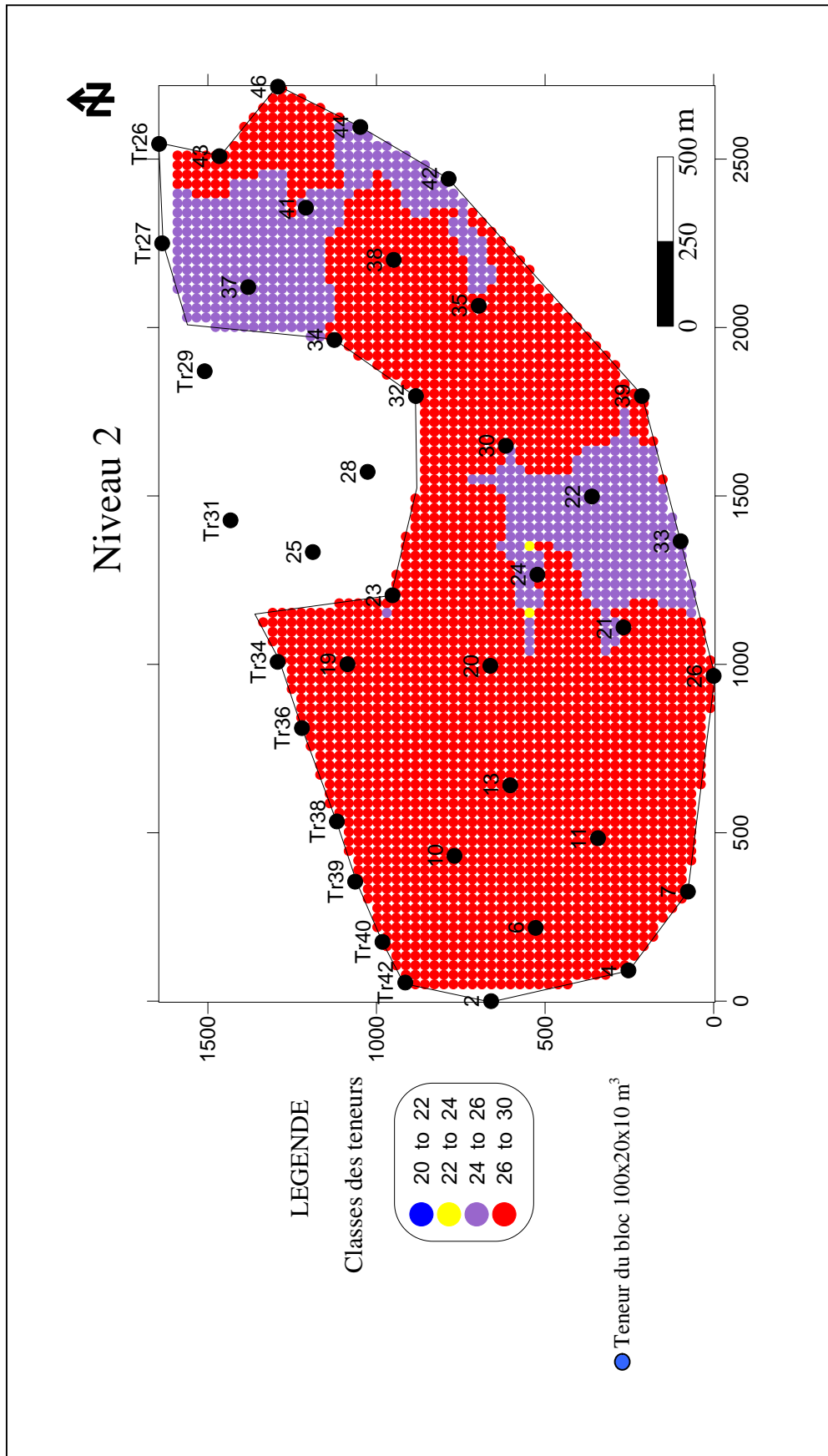


Fig. 37- Carte des teneurs moyennes de P₂O₅ estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 2 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

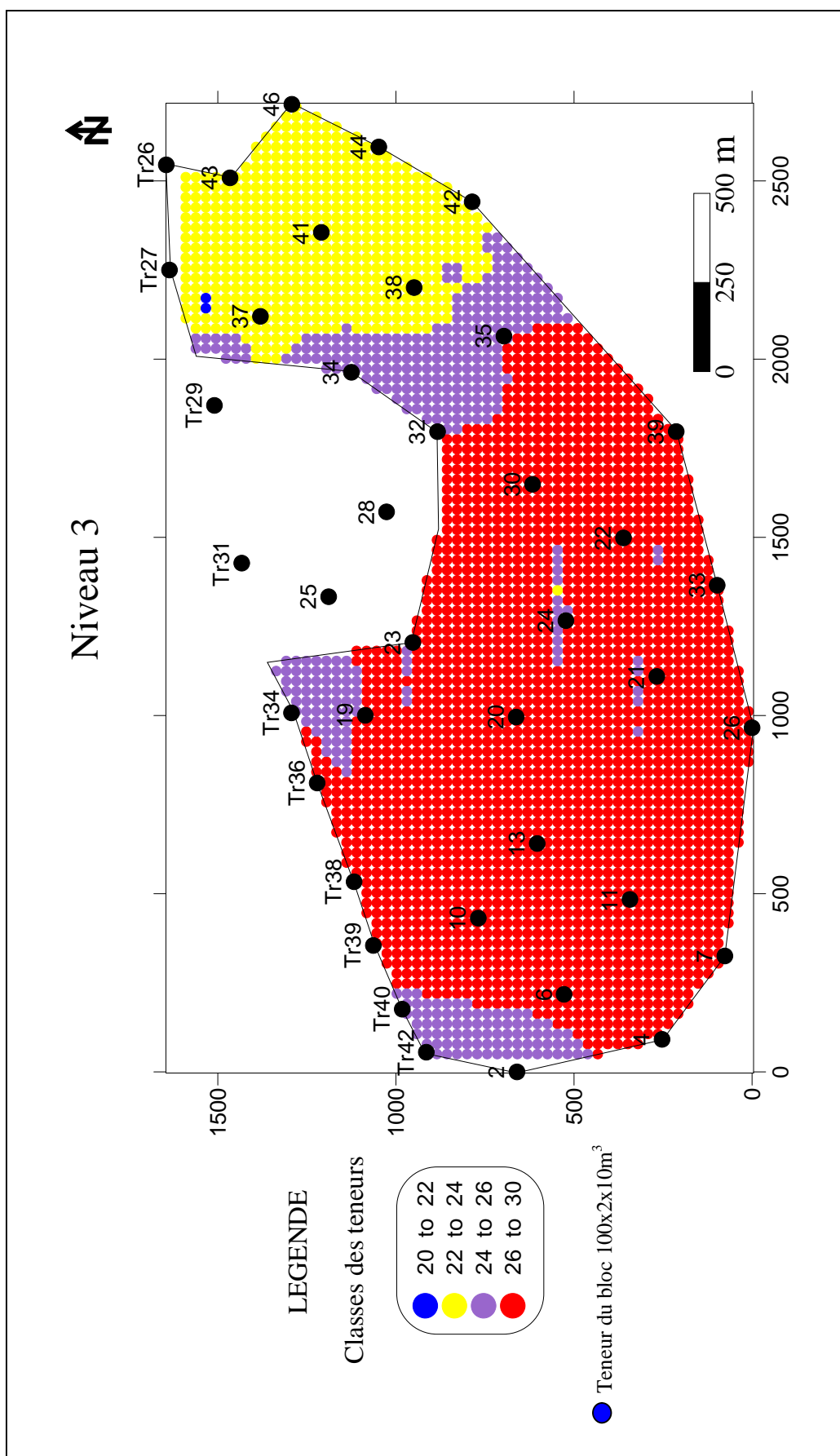


Fig. 38 - Carte des teneurs moyennes de P₂O₅ estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 3 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

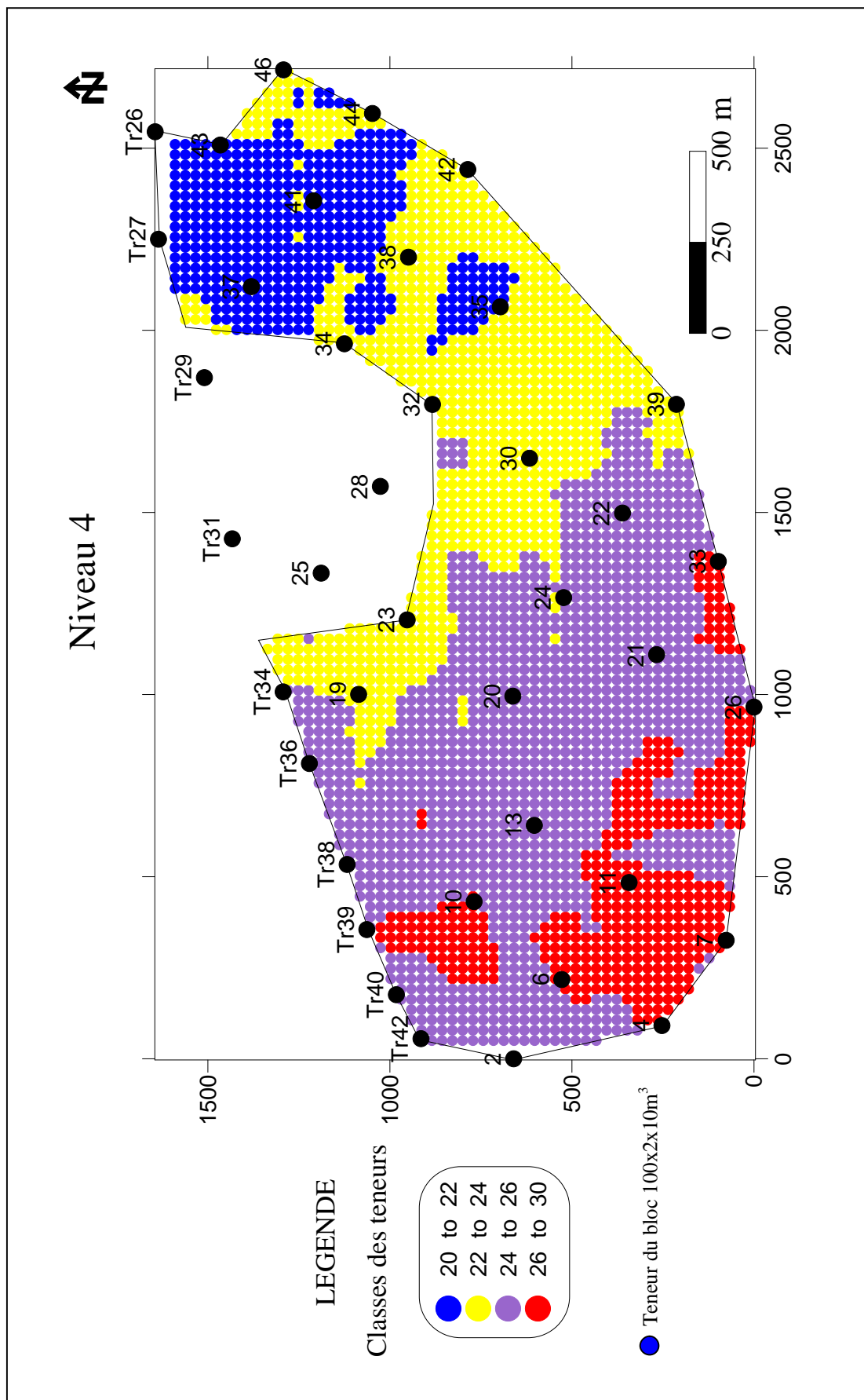


Fig.39 - Carte des teneurs moyennes de P₂O₅ estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 4 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

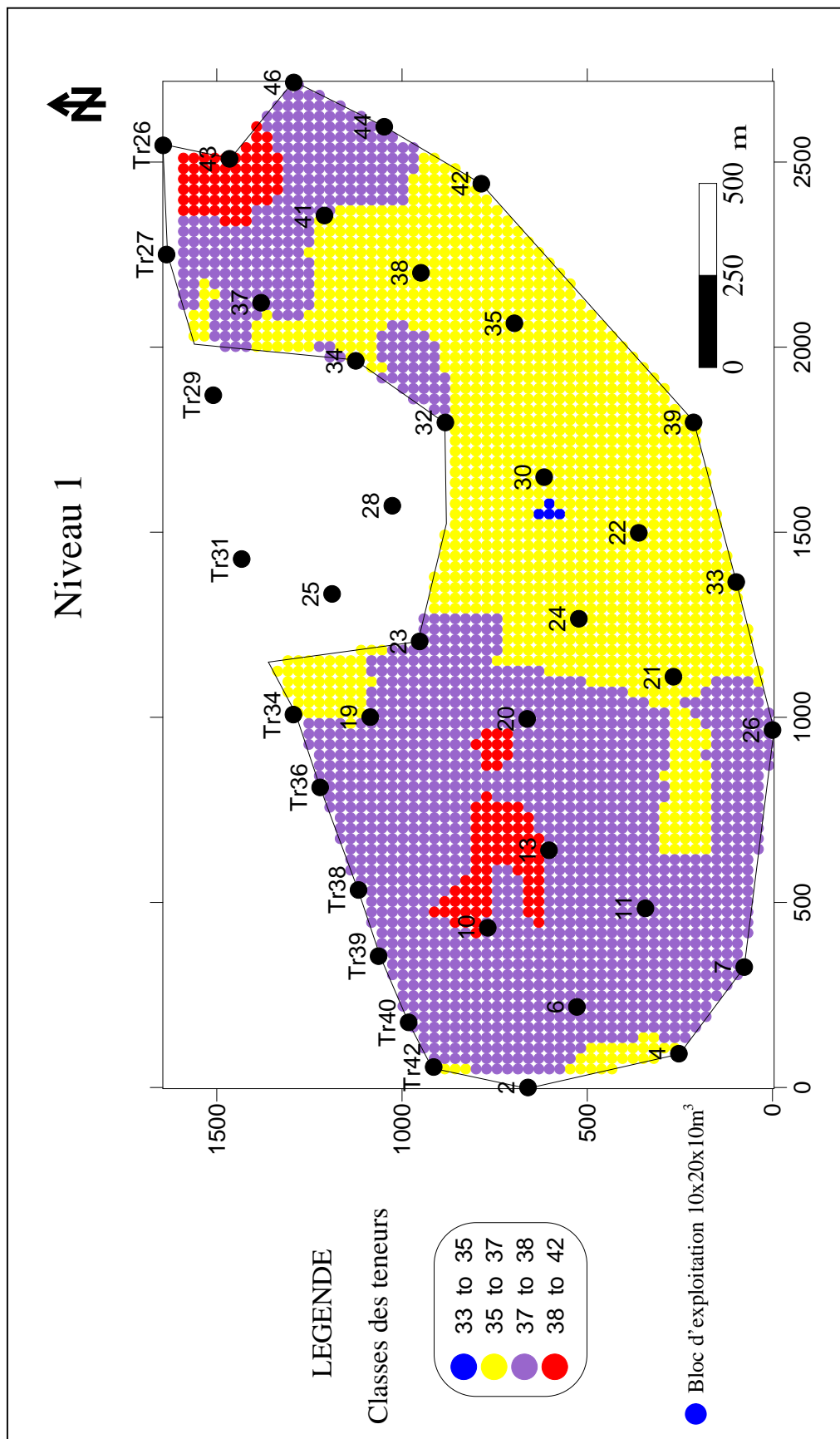


Fig. 40 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 1 du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

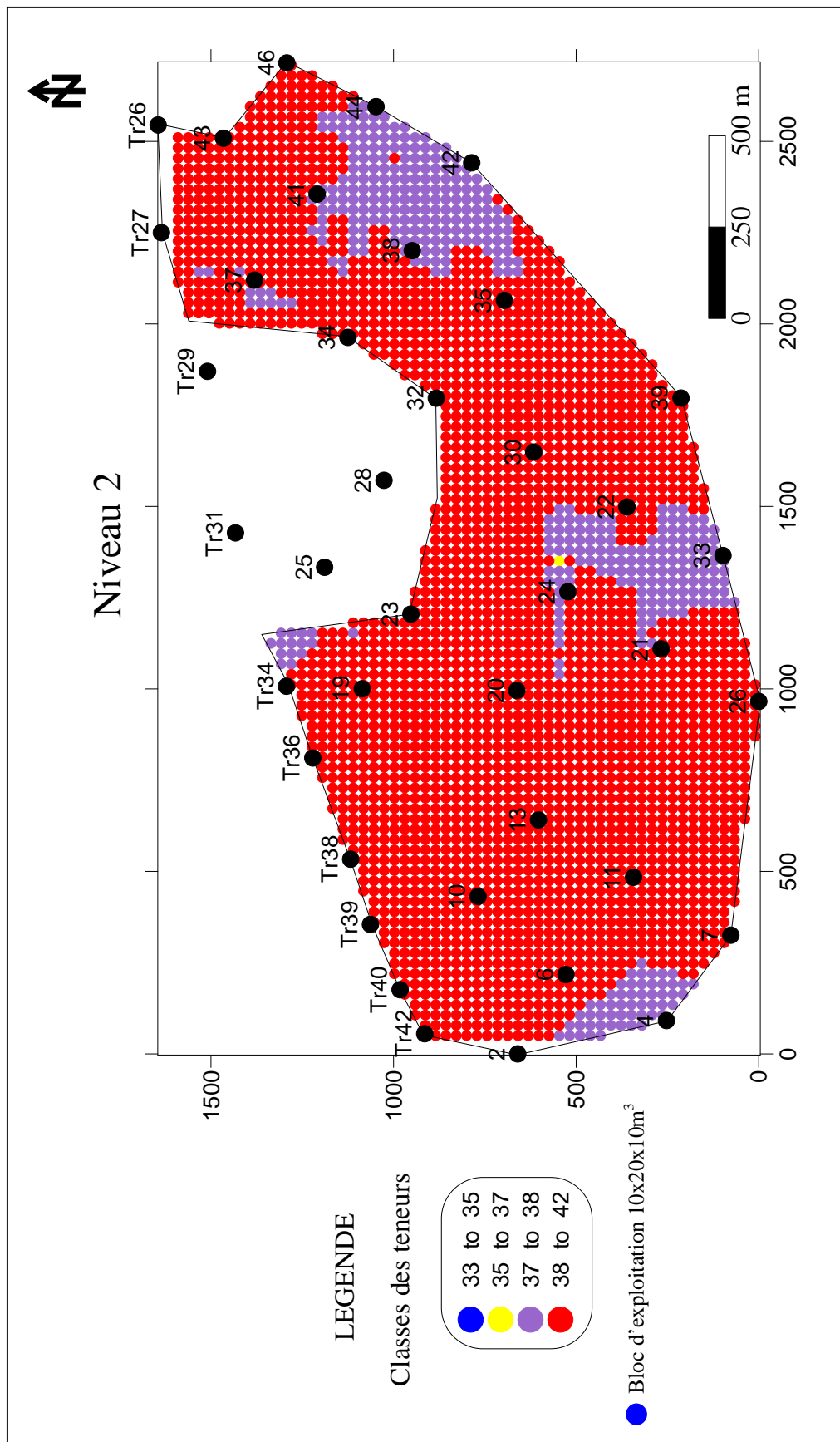


Fig. 41 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 2 du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

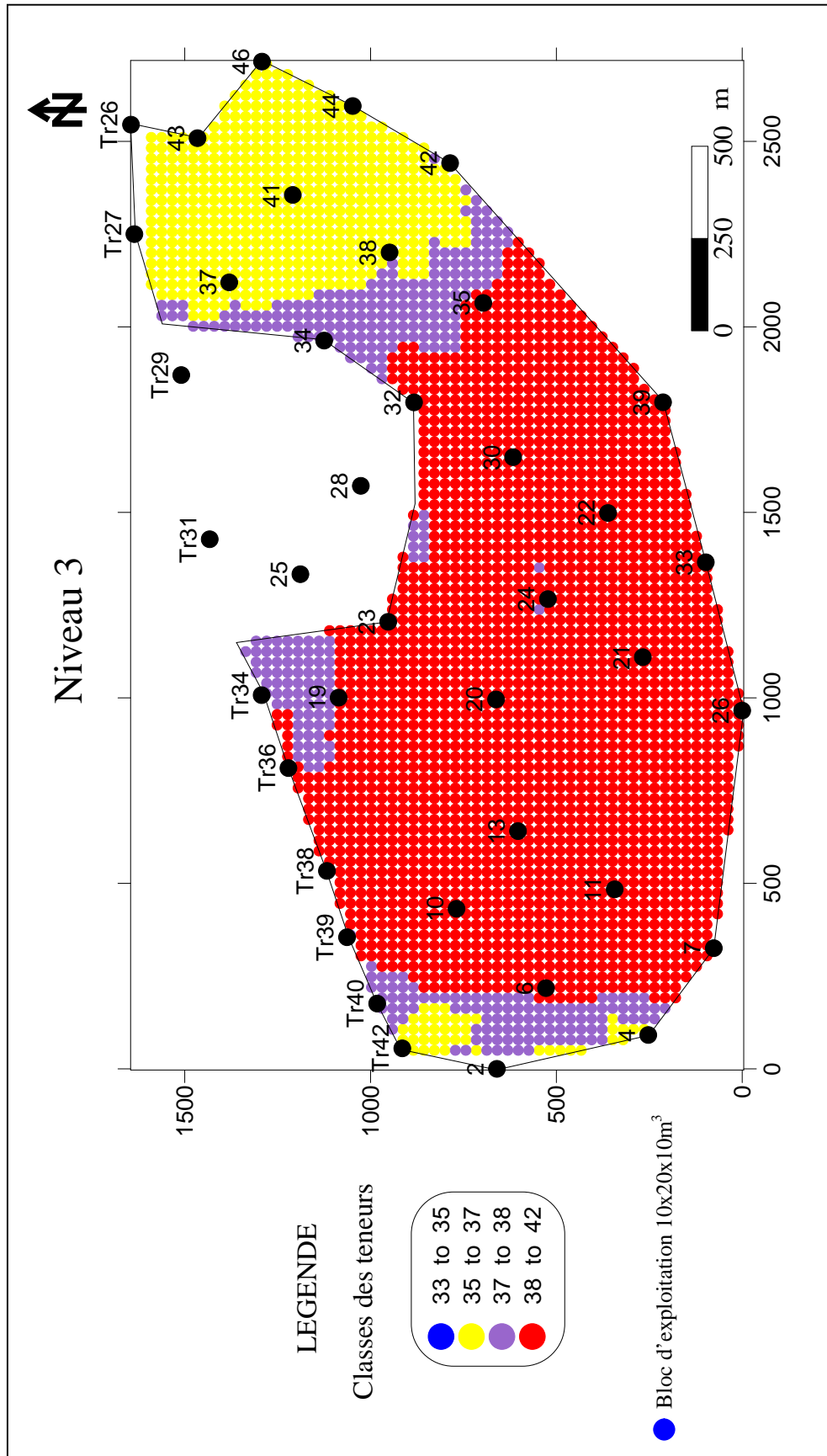


Fig.42 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 3 du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

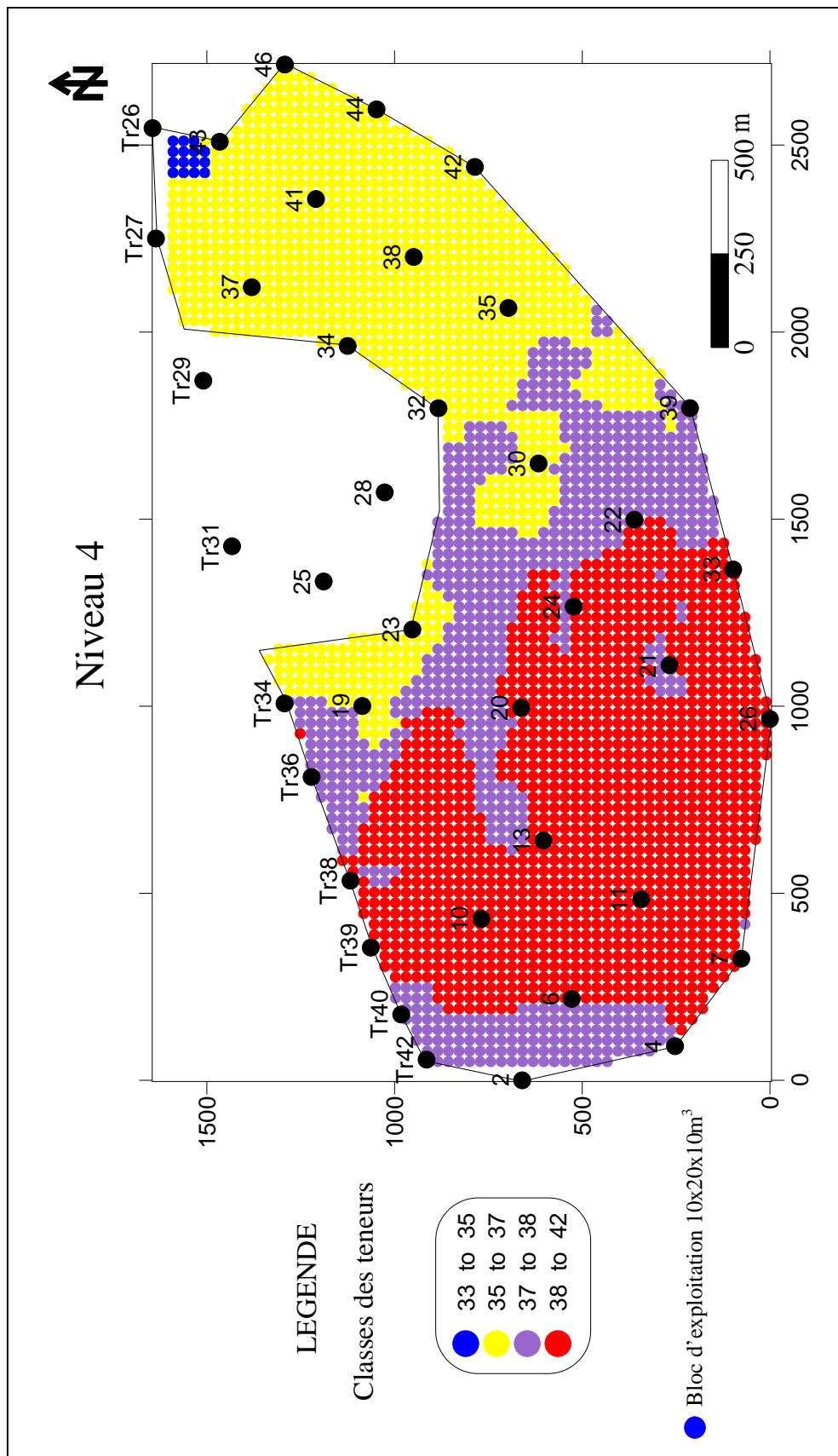


Fig. 43 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 4 du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -

3. - 4. - STATISTIQUE DES TENEURS DES BLOCS KRIGES ET ESTIMATION DES QUANTITEES URANIFERES

3. - 4. - 1. - Statistique des teneurs de Chaque niveau

Une étude statistique de chaque niveau a été établie afin de déterminer les paramètres statistiques.

Tableau. 24 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de P₂O₅ pour les quatre niveaux

P ₂ O ₅ (%)					
	Min	Max	\bar{X}	S ²	N.B
Niv.1	17.57	26.77	22.78	2.03	2265
Niv.2	22.04	28.33	26.71	0.64	2268
Niv.3	21.32	28.18	25.74	2.16	2269
Niv.4	19.58	27.85	24	2.57	2267

Tableau. 25 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de U estimé par régression linéaire simple pour les quatre niveaux

U ₁ (ppm)					
	Min	Max	\bar{X}	S ²	N.B
Niv.1	39.5	47.17	43.58	1.67	2268
Niv.2	43.23	49.17	47.35	0.76	2269
Niv.3	39.29	48.79	46.27	3.07	2270
Niv.4	39.54	48.62	44.58	2.7	2265

U₁ : Uranium estimé par régression linéaire simple

Tableau. 26 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de U estimé par régression linéaire multiple pour les quatre niveaux

U ₂ (ppm)					
	Min	Max	\bar{X}	S ²	N.B
Niv.1	34.91	39.25	37	0.53	2267
Niv.2	36.36	41.81	38.54	0.33	2268
Niv.3	32.82	42.33	38.02	1.47	2270
Niv.4	33.63	39.63	37.29	0.87	2265

U₂ : Uranium estimé par régression linéaire multiple

Min : teneur minimale dans un niveau

Max : teneur maximale dans un niveau

\bar{X} (%) : teneur moyenne d'un niveau

S: Ecart type

N.B: nombre de blocs dans un niveau

Le traitement statistique des données de chaque niveau a permis de distinguer pour les teneurs de P_2O_5 et U les résultats suivants :

- **Pour le niveau N°1 (tableau. 28):**

* Pour les teneurs de P_2O_5 , il est à noter que 71.3% des blocs ont des teneurs inférieurs à 24%. Et 28.7% des blocs ont des teneurs allant de 24 à 26%, tandis que la classe [26. 30[est absente dans ce niveau.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire simple, 47.3 % des blocs ont des teneurs allant de]44. 46ppm [, alors que 52.3% des blocs ont des teneurs inférieur à 44ppm [. La calasse] 46. 48ppm [est très peu abondante elle est représentée par 0.4% des blocs.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire multiple, 51.7 % des blocs ont des teneurs allant de]37. 38ppm [, la classe [35. 37[est représenter par 43.2% des blocs alors que la classe [38. 42[ne représente que 5% des blocs.

Tableau. 27 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de P_2O_5 et U du niveau N° 1

Niveau 1			
Classes P_2O_5	f_i	f_i relative	\bar{X}
[20. 22[	827	27.4	21.21
[22. 24[	1324	43.9	23.11
[24. 26[	876	28.7	24.63
[26. 30[	1	-	26.31
Classes U_1	f_i	f_i relative	\bar{X}
[40. 42[	378	12.5	41.47
[42. 44[	1203	39.8	43.04
[44. 46[	1427	47.3	44.69
[46. 48[	11	0.4	46.25
Classes U_2	f_i	f_i relative	\bar{X}
[33. 35[	4	0.1	34.95
[35. 37[	1303	43.2	36.39
[37. 38[	1560	51.7	37.47
[38. 42[	152	5	38.42

- Pour le niveau N° 2 (Tableau 29) :

* Pour les teneurs de P_2O_5 la classe la plus importante est la classe des teneurs allant de]26. 30% [qui représente 79.6% du nombre des blocs;

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire simple, on note que la classe [46. 48ppm [représente 91.4 % des blocs.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire multiple, 86% des blocs ont des teneur allant de [38. 42ppm [

Tableau. 28 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de P_2O_5 et U du niveau N° 2

Niveau 2			
Classes P_2O_5	f_i	f_i relative	\bar{X}
[20. 22[-	-	-
[22. 24[	2	0.1	22.95
[24. 26[	615	20.4	25.62
[26. 30[	2402	79.6	27
Classes U_1	f_i	f_i relative	\bar{X}
[40. 42[-	-	-
[42. 44[-	-	-
[44. 46[	259	8.6	45.52
[46. 48[	2759	91.4	47.46
Classes U_2	f_i	f_i relative	\bar{X}
[33. 35[-	-	-
[35. 37[	1	0.1	36.56
[37. 38[	422	13.9	37.75
[38. 42[	2596	86	38.74

- Pour le niveau N°3 (tableau. 30) :

* Pour les teneurs de P_2O_5 , on note que 82.5% des blocs ont des teneuses supérieures à 24%.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire simple, on note que la classe [46. 48ppm[est la plus importante, elle est représenter par 74.4% des blocs, alors que 9.5% des blocs ont des teneurs allant de]44. 46ppm [et 15.6% des blocs ont des teneurs allant de]42. 44ppm [.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire multiple, la classe la plus importante est la classe [38. 42ppm [elle représente 69.5% des blocs. La classe [37. 38ppm [représente 12.2% et la classe [35. 37[représente 18.3%.

Tableau. 29 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de P_2O_5 et U du niveau N° 3

Niveau 3			
Classes P_2O_5	f_i	f_i relative	\bar{X}
[20. 22[	2	0.1	21.71
[22. 24[	528	17.5	23.16
[24. 26[	404	13.4	25.19
[26. 30[	2085	69.1	26.85
Classes U_1	f_i	f_i relative	\bar{X}
[40. 42[	15	0.5	41.28
[42. 44[	472	15.6	43.04
[44. 46[	287	9.5	45.21
[46. 48[	2245	74.4	47.29
Classes U_2	f_i	f_i relative	\bar{X}
[33. 35[-	-	-
[35. 37[	552	18.3	36.36
[37. 38[	369	12.2	37.53
[38. 42[	2098	69.5	38.92

- Pour le niveau N° 4 (tableau. 31) :

* Pour les teneurs de P_2O_5 , on note que 57.7% des blocs ont des teneurs supérieures à 24%, alors que 42.3% des blocs ont des teneurs inférieures à 24%.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire simple, 24.3% des blocs ont des teneurs allant de]46. 48ppm [alors que 38.4% des blocs ont des teneurs allant de]44. 46ppm [. 37.3% des blocs ont des teneurs allant de [40. 44ppm [.

* Pour les teneurs en U estimé par régression linéaire multiple, la classe [38. 42ppm [représente 41.4% des blocs, la classe [37. 38ppm [représente 24.2%, et enfin la classe [35. 37[représente 33.9%.

Tableau. 30 : Paramètres statistiques des teneurs krigés de P₂O₅ et U du niveau N° 4

Niveau 4			
Classes P ₂ O ₅	f _i	f _i relative	\bar{X}
[20. 22[	434	14.4	21.53
[22. 24[	842	27.9	23.05
[24. 26[	1342	44.5	25.02
[26. 30[	401	13.2	26.48
Classes U ₁	f _i	f _i relative	\bar{X}
[40. 42[	330	10.9	41.64
[42. 44[	797	26.4	43.11
[44. 46[	1159	38.4	45.02
[46. 48[	733	24.3	46.65
Classes U ₂	f _i	f _i relative	\bar{X}
[33. 35[	15	0.5	34.64
[35. 37[	1023	33.9	36.4
[37. 38[	730	24.2	37.39
[38. 42[	1251	41.4	38.49

U₁ : Uranium estimé par régression linéaire simple

U₂ : Uranium estimé par régression linéaire multiple

Par comparaison entre les quatre classes, on constate que les niveaux N°1 et 2 sont les niveaux les plus riches du point de vue teneur P₂O₅, car ils représentent les pourcentages les plus élevés pour la classe des teneurs [26. 30% [.

3. – 4. – 2. - Estimation des quantités en U métal

La quantité de U dans les minerais de phosphate est calculée par la formule suivante

$$Q = v * d * T$$

-V : est le volume du bloc (100*20*10) m³

-d : poids volumique du phosphate (2.3 T/m³)

-T : la teneur en U en g/T.

Tableau. 31 : calcul des quantités de U dans le gisement de Kef Es Sennoun

Niv	NB	Réserve (T) U ₁	Réserve (T) U ₂
1	2267	4546.22	3858.27
2	2268	4941.92	4020.38
3	2270	4831.11	3970.3
4	2265	4644.712	3884.84
Total	9072	18.7 milles tonnes	15.7 milles tonnes

U₁ : Uranium estimé par régression linéaire simple

U₂ : Uranium estimé par régression linéaire multiple

Les résultats obtenus sur l'estimation de U par les deux models linéaires (simple et multiple) confirment que les niveaux les plus riches en P₂O₅ sont les niveaux qui contiennent plus de U.

CONCLUSIONS GENERALES

Le gisement phosphaté de Kef Es Sennoun fait partie du bassin phosphaté de Djebel Onk. Ce dernier est situé au Sud-Est de l'Algérie. Il constitue le gîte principal actuellement exploité par l'entreprise SOMIPHOS.

Les travaux de recherches effectués sur ce gisement, dans le cadre de la préparation de ce mémoire, ont permis les conclusions suivantes :

- Le gisement de Kef Es Sennoun est caractérisé par une structure simple. Il se présente sous forme d'une table monoclinale à pendage régulier, sous un angle de 5 à 10° vers le Sud. L'horizon porteur de la minéralisation phosphatée est représenté essentiellement par l'assise thanétienne supérieur avec une épaisseur allant de 30 à 53 m dans certaines zones. En tenant compte des subdivisions initiales, de la composition chimique, lithologique et des conditions d'exploitation, le faisceau a été subdivisé en quatre niveaux d'une épaisseur moyenne de 10m. Il s'agit du niveau 1 représenté par la couche de la dolomie phosphatée notée minerai II_T, les Niveaux 2 et 3 représentés par la couche productive (PI) et enfin le niveau 4 qui est représenté par l'alternance marnes-phosphates-dolomie du mur notée II_M.
- Des échantillons du front de carrière, ont été prélevés par saigné de 1m et analysés sur P₂O₅, MgO, CaO, CO₂, Fe₂O₃, SiO₂ et U au laboratoire d'analyse de Ferphos –Bir El Ater- et au laboratoire de génie des procédés au Centre de Recherche Nucléaire de Draria - CRND – Alger.
- L'Analyse en Composantes Principales a permis de déterminer trois associations chimiques. La première association représente l'apatite et la matière phosphatée, la deuxième association représente le ciment dolomitique et la troisième représente le ciment argileux. U est corrélé positivement à P₂O₅ et négativement à MgO. U est donc localisé essentiellement dans la matière phosphatée.
- Deux modèles linéaires l'un simple et l'autre multiple ont été élaboré pour l'estimation de U. La fonction de régression linéaire simple qui relie entre la teneur en U et P₂O₅ dans un tout-venant (échantillon brut) est donnée par l'équation suivante :

$$U = 1.01 P_2O_5 + 20.41.$$

La fonction de régression linéaire multiple qui relie entre la teneur en U avec celles de P₂O₅ et MgO dans un tout-venant est donnée par l'équation suivante :

$$U = 1.16 P_2O_5 + 1.43 MgO + 3.98$$

Ces équations ont permis l'estimation des teneurs de U dans les carottes des sondages de l'EREM.

- Le meilleur modèle d'estimation est le modèle linéaire multiple car il donne un effet de pépite, un palier et une variance de krigeage minimal.
- Les variogrammes expérimentaux à 3D sur P_2O_5 et U ont été calculés et ajustés à l'aide des schémas exponentiels avec un effet de pépite.
- Le krigeage ordinaire des teneurs des blocs de $(100 \times 20 \times 10 \text{ m}^3)$ des quatre niveaux a permis d'estimer les teneurs et les variances de krigeage en P_2O_5 et U dans chacun des blocs.
- La cartographie des teneurs krigées en U et P_2O_5 a permis de visualiser la répartition de ces blocs pour chacun des quatre niveaux d'exploitation.
- Les quantités de U dans le gisement de Kef Es Sennoun ont été estimées à **15.7 milles tonnes** de U métal. Les résultats obtenus (estimation et cartographie) montrent que les niveaux 2 et 3 sont les niveaux les plus riches en P_2O_5 . et ce sont les deux niveaux qui contiennent le plus de U.

ANNEXES

ANNEXE I : RAPPELS SUR LES PHOSPHATES SEDIMENTAIRES

1. - PETROMINERALOGIE DES PHOSPHATES SEDIMENTAIRES

Le phosphore (P) est très important pour tous être vivant, c'est le second minéral le plus abondant dans le corps humain, après Ca. Le Phosphore est en général, associé à l'oxygène pour former le radical des phosphates (PO_4). Le minerai de phosphate se trouve dans l'écorce terrestre sous différents types de gisements, suivant l'origine et le mode de formation on distingue:

- Les gisements sédimentaires.
- Les gisements d'origines ignées.
- Les guanos.

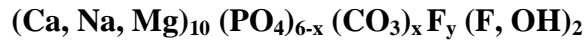
L'agriculture reste le principal débouché de ces minerais, mais d'autres usages industriels se développent (détergents, métallurgie, industries pharmaceutique, pétrolier, alimentaire...). Plus de 80% des phosphates exploités proviennent de gisements sédimentaires.

Les phosphates naturels comprennent plus de 200 espèces minéralogiques Fisher et Jerom (1973), mais les plus répandues appartiennent à la famille de l'apatite Slansky (1980). Elles sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau .1 : Les espèces minéralogiques les plus répandues appartenants à la famille des apatites (Slansky, 1980)

Nom du minéral	Formule	Spécificité
Fluorapatite	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	C'est l'apatite la plus fréquente des roches ignées. dans laquelle F peut être remplacé partiellement par OH ou par Cl
chlorapatite	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$	F est remplacé partiellement par Cl
Dahllite	$(\text{Ca})_{10}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3\text{F})_x(\text{F},\text{OH})_2$	remplacement de F par OH et $\text{F} < 1\%$
carbonate fluorapatite ou francolite ($\text{F} \approx 4\%$)	$(\text{Ca})_{10}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3\text{F})_x\text{F}_2$	C'est l'apatite la plus fréquente des roches sédimentaires. La substitution la plus marquée dans les apatites sédimentaires est celle de PO_4^{3-} par CO_3^{2-} , l'introduction d'ions F^- supplémentaires contribuant à préserver la neutralité électrique du cristal

L'importance possible des substitutions par Na, Mg et OH conduit Lehr et al. (1967) à proposer, pour les apatites sédimentaires, la formule structurale générale suivante :



a. - Structure des apatites sédimentaires

La structure du cristal de fluorapatite (Fig. 44) a été établie par Naray-Szabo (1930) et Mehmel (1931). Elle fut reprise depuis par différents auteurs. D'après Young (1975) (in Slansky, 1980) la fluorapatite, qui cristallise dans le système hexagonal, a une structure qui peut être décrite de la façon suivante :

- Parallèlement au plan de référence 001, le réseau présente deux plans de symétrie aux cotes 1/4 et 3/4. Perpendiculairement à ce plan de référence, des colonnes parallèles à l'axe c du cristal présentent une alternance d'ions Ca et d'atomes O. Les axes de ces colonnes, sur lesquels se placent les ions Ca, sont des axes de symétrie ternaire du cristal. Les ions Ca sont situés sensiblement aux cotes 0 et 1/2, chaque ion Ca est entouré de 9 atomes O : 3 d'entre eux sont situés sur le plan de symétrie situé immédiatement au-dessus, 3 autres sur le plan de symétrie placé immédiatement au-dessous et les 3 derniers, plus éloignés, sensiblement dans le plan de l'ion Ca (Fig. 45).
- Les colonnes précédentes sont reliées entre elles par des ions P situés sur les plans de symétrie M1/4 et M3/4. Chaque P forme avec 4 atomes O des tétraèdres PO₄. 2 de ces 4 atomes sont situés sur le même plan de symétrie que l'ion P, et les deux autres sont situés de part et d'autre de ce plan, en position symétrique (Fig. 46).
- Les colonnes Ca-O et les tétraèdres PO₄, qui les associent forment un réseau en «nid d'abeilles», comme le montre sa projection sur le plan 001 (Fig. 47). Ce réseau présente un ensemble de tunnels évidés perpendiculaires à ce plan. L'axe de chaque tunnel est un axe de Symétrie sénaire hélicoïdal dont les éléments du réseau les plus proches sont les atomes O situés sensiblement dans le même plan que les ions Ca des colonnes.
- Mais les tunnels ne sont pas vides. Ils présentent au niveau de chaque plan de symétrie M1/4 et M3/4 un ion F situé sur l'axe de chacun des tunnels et placé au centre d'un triangle équilatéral aux sommets duquel se placent des ions Ca supplémentaires (Fig. 48). Nous remarquons ainsi qu'il apparaît dans le réseau de l'apatite deux catégories d'ion Ca, les Ions

Ca_I des axes ternaires et les ions Ca_{II} placé à proximité des axes sénaires hélicoïdaux des «tunnels», les ions Ca_I et Ca_{II} appartiennent à des plans distincts (O et 1/2 d'une part, 1/4 et 3/4 d'autre part).

- Chaque maille de la fluorapatite comprend 4 ions Ca_I , 6 ions Ca_{II} , 6 ions P, 2 ions F et 24 atomes O.

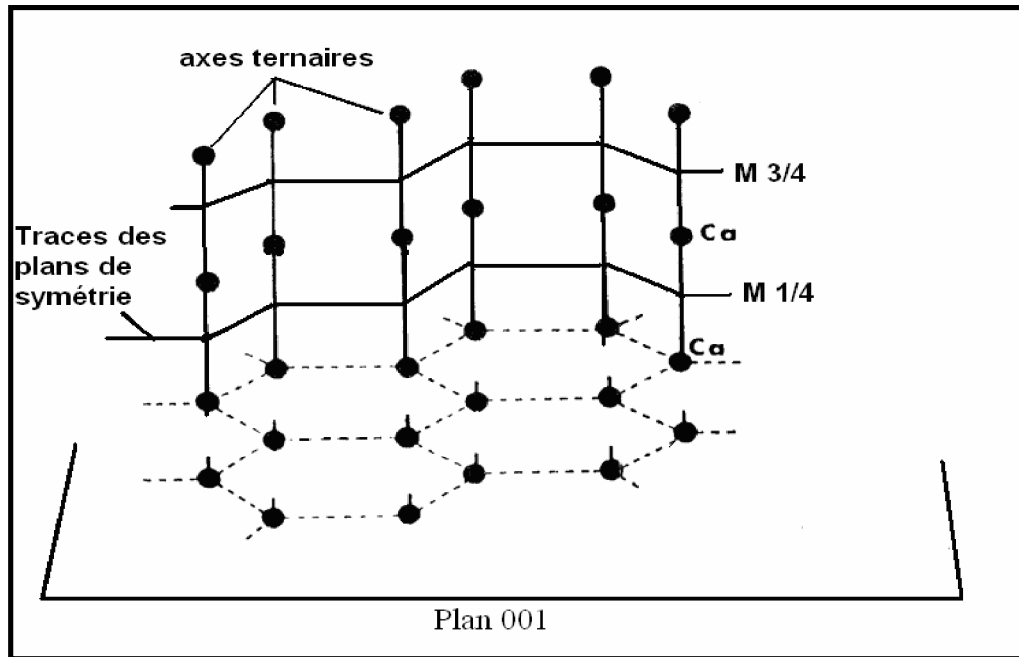


Fig. 44 - Les axes ternaires sont perpendiculaires au plan 001 et se placent aux sommets d'hexagones jointifs. Les ions Ca_I répartis sur ces axes sont situés sensiblement à égale distance des plans de symétrie $M1/4$ et $M3/4$

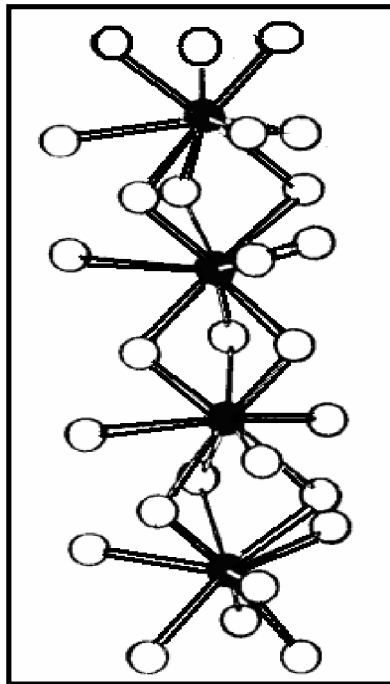


Fig. 45- A chaque ion Ca des axes ternaires sont associés 9 atomes O répartis également entre le plan de symétrie situé au-dessus de l'ion Ca_I , le plan de symétrie situé immédiatement au-dessous, et le plan de l'ion C

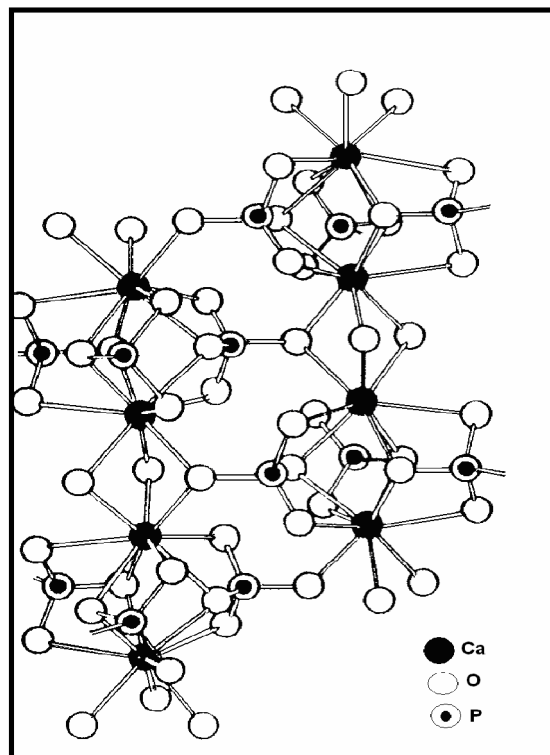


Fig. 46- Les colonnes Ca_I -O sont reliées entre elles par des ions P qui forment des tétraèdres PO_4 avec 3 O d'une colonne et 1 O de la colonne suivante.

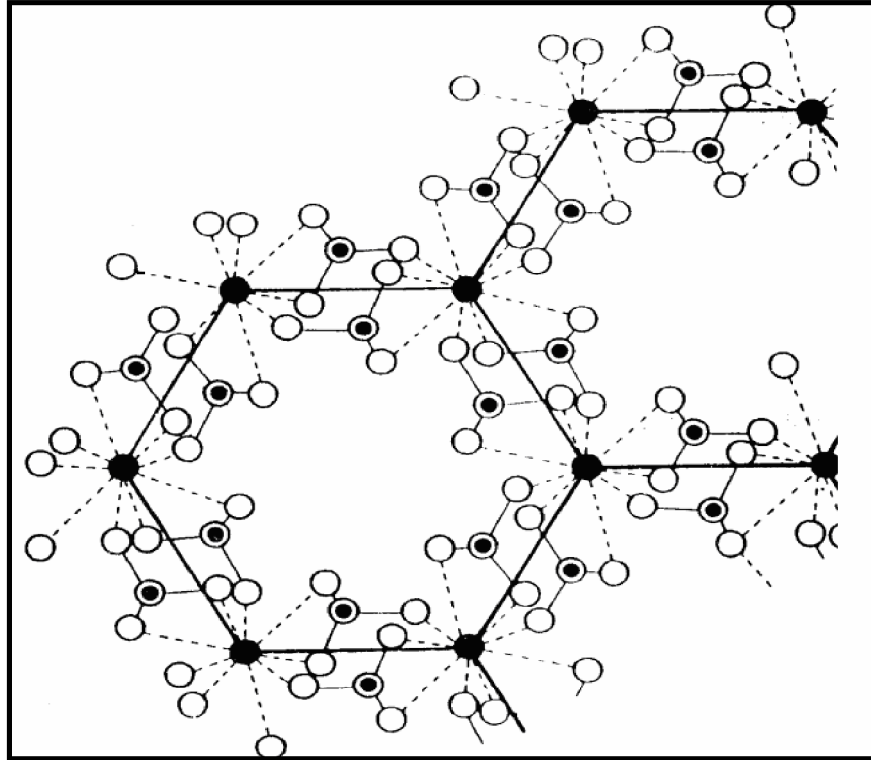


Fig. 47- Projection sur le plan 001 des colonnes $\text{Ca}_I\text{-O}$ et des tétraèdres PO_4 qui les associent

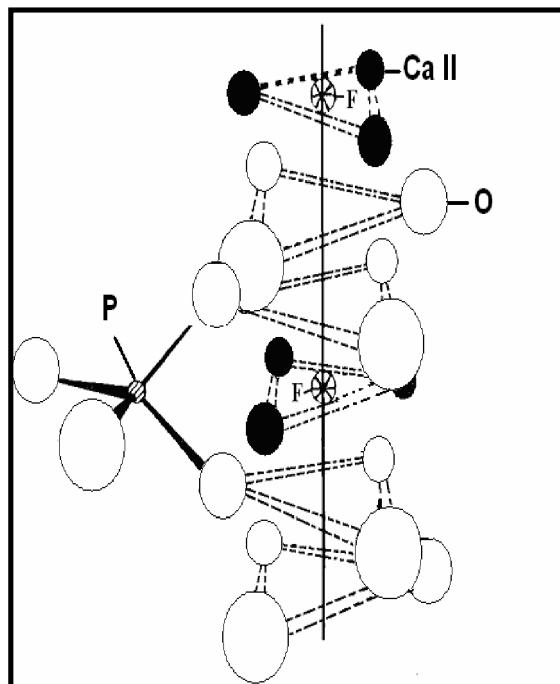


Fig. 48 - Répartition des atomes entourant l'axe sénaire hélicoïdal F et Ca_{II} situés dans les plans de symétrie $M_{1/4}$ et $M_{3/4}$

✓ Influence de la structure sur les substitutions

La structure des apatites sédimentaires et les substitutions qu'elles sont susceptibles d'admettre présentent des influences réciproques.

En premier lieu, les substitutions obéissent aux règles habituelles de la diadochie : rayons Ionique voisins, préservation de la neutralité électrique, etc....Par exemple Ca^{2+} (0,99 Å de rayon Ionique) est remplacé plus aisément par Mg^{2+} (0,66 Å), Mn^{2+} (0,80 Å) Na^+ (0,97 Å) que les Ions plus gros tels que Sr^{2+} (1,12 Å), Ba^{2+} (1,32 Å) ou K^+ (1,33 Å) le rayon Ionique de U^{4+} (0,97 Å) lui permet également de remplacer Ca^{2+} . Pour F^- OH^- et Cl^- , leurs rayons Ioniques évalués respectivement à 1,36, 1,40 et 1,81 Å, sont en accord avec leurs possibilités de permutation. Les substitutions sont influencées par l'existence des «tunnels», centrés sur les axes sénaires hélicoïdaux, au sein desquels les liaisons sont moins fortes. Ces tunnels qui ont un diamètre moyen de 3 à 3,5 Å Montel (1975). Ils facilitent les remplacements des ions qu'ils contiennent où qui sont situés immédiatement à leur périphérie. Il est possible d'avoir un enrichissement secondaire d'une apatite en uranium par substitution de Ca^{2+} par U^{4+} concerne essentiellement les ions Ca_{II} du réseau et non pas les ions Ca_{I} moins accessibles (Fig. 49). D'après Altschuter et al (1958), seul U^{4+} peut permettre une telle substitution car la forme oxydée U^{6+} se présente sous forme d'Ions uranyle $(\text{UO}_2)^{2+}$ dont le rayon Ionique (3,4 X 1,4 Å) est trop gros pour permettre une pénétration par les «tunnels».

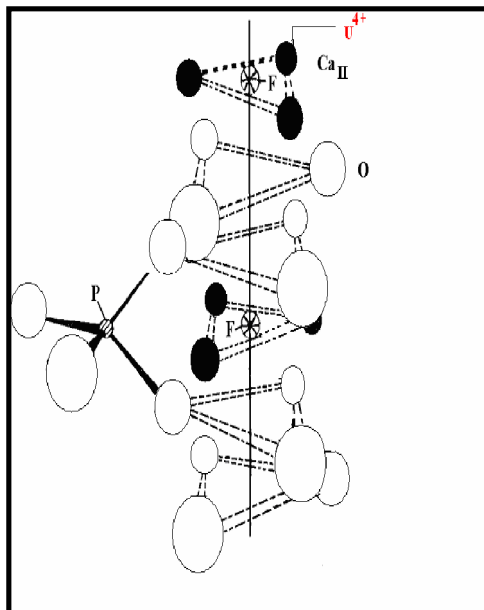


Fig. 49- Substitution de Ca_{II} par U^{4+}

b. - Nomenclature et classification

Les phosphates sédimentaires peuvent être formés de grains de différentes tailles, des nodules, des coprolithes, des débris d'os, des dents ou de fossiles divers plus ou moins complètement épigénisés en phosphate, etc..... Cette variété de caractéristiques pétrographiques conduit à utiliser pour les décrire une nomenclature spécifique.

En 1974, l'Américain Geological Institute A.G.I a classé les phosphates en "phosphorite" et "phosphatite" avec les significations suivantes :

- **Phosphorite** : roche sédimentaire des cavités karstiques composée en majorité de minéraux phosphatés pouvant être indifféremment des phosphates de Ca, d'Al, de Fe.
- **Phosphatite** : roche sédimentaire composée en majorité de minéraux de la série de l'apatite.

Compte tenu de la variété des teneurs en P_2O_5 dans les roches, une teneur de 18% P_2O_5 a été choisi arbitrairement comme limite entre les roches considérées comme minerai de phosphate ou roche stérile. Donc si la teneur en P_2O_5 est supérieur à 18% on utilise les termes **Phosphorite** ou **Phosphatite**, si elle est inférieur à 18% on utilise le terme de fraction non phosphatée.

c. - Genèse des phosphates sédimentaires

Les gisements de phosphates sont connus dans les sédiments de toutes les périodes géologiques (Nicolini, 1990), depuis le Précambrien jusqu'au Cénozoïque. Les phosphates des sédiments cénozoïques, constituent 75% des réserves mondiales connues. Alors que, les phosphate paléozoïque ne donnent que 14.5% et ceux mésozoïques encor moins de 8%. Les plus importants gisements cénozoïques de phosphates se trouve en Afrique du Nord et aux USA.

Le problème de la phosphatogénèse est discuté depuis longtemps. Il y a diverses théories, les unes adoptent une origine organique, les autres une origine non organique. D'après la théorie d'origine non organique, les phosphates sont le résultat de la précipitation des composés phosphatés directement de l'eau de mer. D'après la théorie d'origine organique, la participation des organismes est indispensable pour la formation des phosphates

Les idées sur l'origine des phosphates ont fait un grand progrès avec la théorie de l'auteur russe Kazakov, émise en 1937 (Belinko, 1969) (Fig. 50). Cette théorie est basée sur les résultats de la campagne océanographique du Météore. Ces travaux ont montré que la teneur

en P_2O_5 de l'eau mer augmente avec la profondeur. Le minimum se trouve dans la zone de photosynthèse, où le phosphore est consommé et le maximum vers 500m et d'après cette théorie on distingue les étapes suivantes de formation des phosphates :

- Les eaux froides des fonds océaniques, enrichies des ions de phosphore remontent dans la zone des eaux chaudes, peu profondes du shelf grâce aux courants froid ascendants (upwelling).
- Dans la zone du shelf, les ions de phosphore sont absorbés par les organismes. Le phosphore entre dans la composition du plasma.
- Après la mort des organismes, les composés du phosphore, libérés passent dans les solutions.
- Dans les eaux saturées, chaudes, peu profondes du shelf, il y a augmentation du pH et diminution de la pression partielle en CO_2 , cette diminution amène une précipitation du $CaCO_3$, puis des phosphates. La sédimentation chimique des phosphates ne peut donc se produire dans les régions profondes, là où la pression du CO_2 est trop élevée, ni dans la zone de photosynthèse, où le phosphore est consommé. C'est entre 50 et 500m environ que précipitera le phosphate.

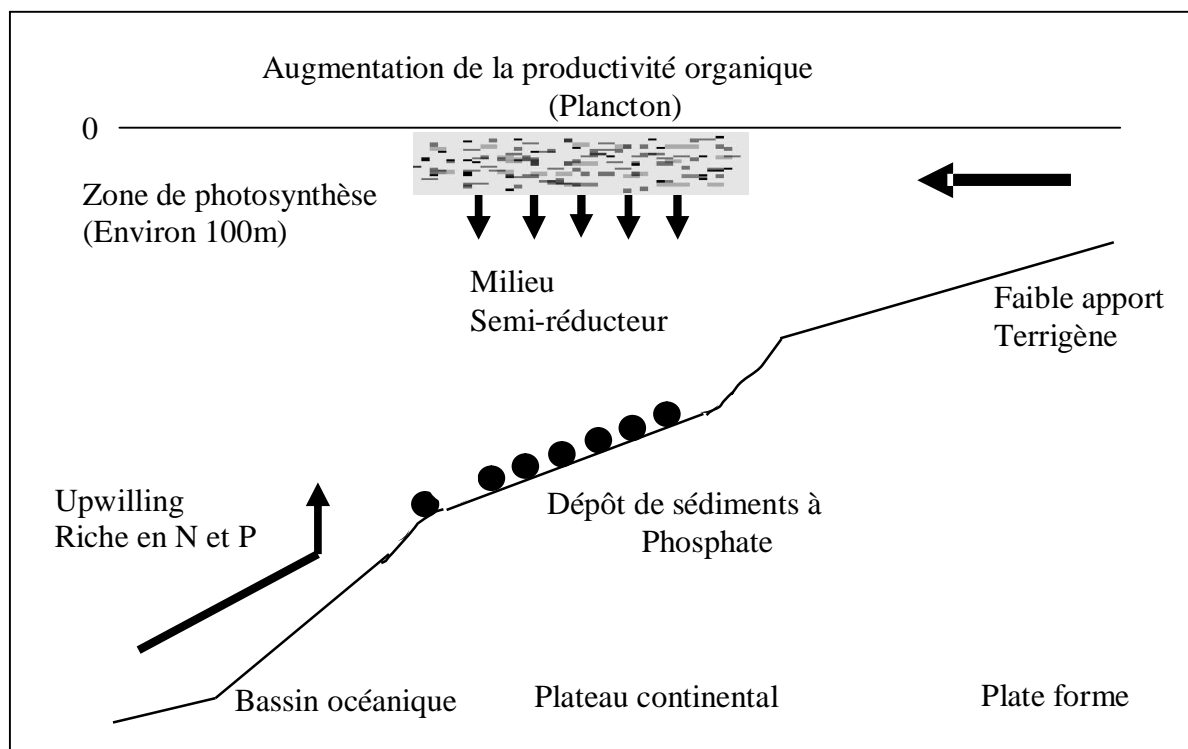


Fig. 50- Schéma de phosphatogénèse selon Kazakov (1940)

2. – ECONOMIE DES PHOSPHATES

Les phosphates sont classés 11^{ème} sur les 53 autres substances naturelles commercialisées dans le monde, ce qui représente une valeur de 3-4 milliards de dollars par an. L'industrie des phosphates est l'une des plus grandes et des plus importantes parties de l'industrie de l'extraction au monde. Elle est considérée comme l'un des principaux supports pour le développement de certains pays tel que le Maroc. L'utilisation des phosphates est initialement associée au développement de l'agriculture qui est grande consommatrice d'engrais phosphaté environ 85% de la production mondiale des phosphates est destinée à la production d'engrais, acide phosphorique et aliments de bétail. En dehors du rôle fondamental du phosphore dans la production agricole, les 15% des phosphates d'usage non agricole sont utilisés dans la métallurgie (alliage), l'industrie chimique (pesticides, détergents), pétrolière (lubrifiant), alimentaire et pharmaceutique.

Les concentrés marchands produits dans le monde sont essentiellement des phosphates de calcium, c'est-à-dire des phosphatites (Slansky, 1980). La teneur des minerais ou des concentrés est évaluée en P_2O_5 % ou en équivalent en phosphate tricalcique $Ca_3(PO_4)_2$ (TCP) et que l'on appelle aussi TPL (Triphosphate of lime) ou BPL (Bone phosphate of lime).

La conversion P_2O_5 - TPL-P est donnée ci-dessous :

$$P_2O_5 \times 2.1852 = TPL$$

$$TPL \times 0.4576 = P_2O_5$$

$$P_2O_5 \times 0.4364 = P$$

$$P \times 2.2914 = P_2O_5$$

IL n'y a guère de phosphate vendu au-dessous de 65% TPL. Les concentrés standards commercialisés font en moyenne 70-72% TPL (type concentré de Khouribga au Maroc). Il y a quelques concentrés de phosphates sédimentaires très riches : Sénégal (Taïba) et Togo ; 78-79% TPL. Les concentrés de phosphates magmatiques, qui s'enrichissent bien, atteignent un titre élevé qui dépasse 80% TPL.

ANNEXE II : METHODES ANALYTIQUES UTILISEES

La spectrophotométrie d'émission atomique par plasma induit par haute fréquence (ICP)

La spectrophotométrie d'émission atomique par plasma induit par haute fréquence est une méthode d'analyse chimique permettant de doser la quasi totalité des éléments simultanément (l'analyse prend quelques minutes, hors préparation). Elle Utilise une mesure quantitative de l'émission optique provenant des atomes stimulés, pour déterminer la concentration de la substance à analyser. Cette méthode se distingue par la nature de la source d'excitation utilisée qui est un plasma induit par haute fréquence se déroulant suivant un procédé d'émission dit ICP (Inductive Coupled Plasma). Les limites de détection de cette méthode sont en général très faibles, de sorte que la plus part des éléments peuvent être dosés à de très basses teneurs, ils sont de l'ordre de quelques mg/l.

1- Principe

La méthode consiste à injecté l'échantillon dans un plasma d'argon (région de stimulation) caractérisé par une température très élevée (5000 à 10000°C), les atomes de la matière à analyser sont dissous, vaporisés et atomisé du fait de la flamme extrêmement chaude. Cette source d'atomisation (plasma d'argon) à haute température fournit suffisamment d'énergie pour propulser les électrons des atomes excités (ionisés) à de hauts niveaux d'énergie, lorsqu'ils retournent à l'état fondamental, ils émettent des rayonnement photoniques qui passent par le monochromateur qui isole la longueur d'ondes particulière propre à l'analyse souhaitée.. La lumière émise par l'élément recherché est alors détectée et mesurée et détectée avec par un tube photomultiplicateur, et son intensité est alors comparée à celle émise par le même élément contenu dans un échantillon de concentration connue (étalon), analysé dans les mêmes conditions. L'intensité de l'émission est proportionnelle à la concentration de l'analyte dans l'échantillon.

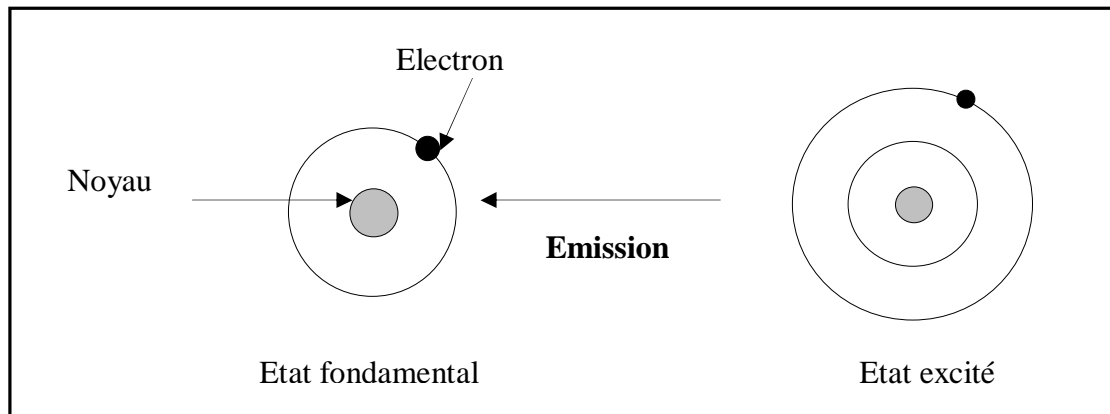


Fig. 51 - Schéma montrant le principe de l'émission atomique

Ø Appareillage

Le dispositif utilisé est constitué par :

- Un générateur haute fréquence
- Une unité de couplage
- Une torche : qui est dispositif à l'intérieur duquel s'effectue la réaction plasma.
- Monochromateur
- Un photomultiplicateur (détecteur)
- Un système d'affichage et d'amplification.

ANNEXE III : RAPPELS SUR LES METHODES STATISTIQUES ET GEOSTATISTIQUES UTILISEES

1. - RAPPELS STATISTIQUES

Toute étude géostatistique et estimation des réserves doit être précédée par une analyse statistique des variables étudiées (teneurs des éléments chimiques entre autres) et de confronter les résultats obtenus avec les hypothèses géologiques.

Deux types d'approches statistiques ont été utilisés pour le traitement des données : traitement monovarié, et multivarié.

1. - 1. – ANALYSE MONOVARIE

Ce traitement permet de déterminer les paramètres statistiques de la distribution des variables étudiées (paramètres de position centrale et de dispersion) des éléments chimiques et de résumer graphiquement les caractéristiques essentielles de la distribution de chaque variable.

- **Représentation graphique**

L'histogramme d'une variable donnée visualise la répartition des effectifs dans un certain intervalle de variation prise par cette variable. L'allure générale de l'histogramme et/ou de la courbe des fréquences cumulées permet d'apprécier l'homogénéité ou l'hétérogénéité des données; ainsi que la loi de distribution des variables.

1. - 2. – ANALYSE BIVARIE

Le traitement statistique bivarié consiste à étudier deux variables aléatoires simultanément et de déterminer la relation qui existe entre eux, à l'aide entre autre du calcul des coefficients de corrélation simples. Elles sont calculées pour chaque couple de variables, où celles-ci montrent clairement les relations mutuelles qui existent entre les variables.

Le coefficient de corrélation est calculé par la formule suivante :

$$\rho = \text{cov}(x, y) / \sigma_x \sigma_y$$

Et estimée par:

$$r = (\overline{XY} - \bar{X}\bar{Y}) / (S_x S_y)$$

Avec \bar{X} et \bar{Y} : teneurs moyenne des variables X et Y

S_x et S_y : écarts types des variables X et Y.

Les coefficients de corrélation simples sont regroupés dans un tableau récapitulatif appelé "**matrice de corrélation**". Notons que le coefficient de corrélation varie entre -1 et +1.

La modélisation linéaire bivariée par la méthode des moindres carrés (régression) permet de déterminer, si la dépendance existait, d'estimer la valeur d'un élément à partir de celle de l'autre.

La régression linéaire bivariée peut être simple ou orthogonale. Pour notre étude on a appliqué la méthode de régression linéaire simple.

A partir d'une série de données bivariées et en présence d'une dépendance entre ces variables, il serait alors possible d'ajuster le nuage statistique (Fig. 52) par une droite d'équation:

$$Y = a X + b$$

Avec Y: variable expliquée ou interne

X: variable explicative ou exogène.

a: coefficient de l'équation.

b: terme constant de l'équation

$$a = \text{cov}(xy) / \sigma_x^2$$

Et le terme constant "b" est égale:

$$b = \bar{Y} - a \bar{X}$$

Dans ce cas, l'erreur qui serait faite, serait uniquement sur la variable expliquée (Y).

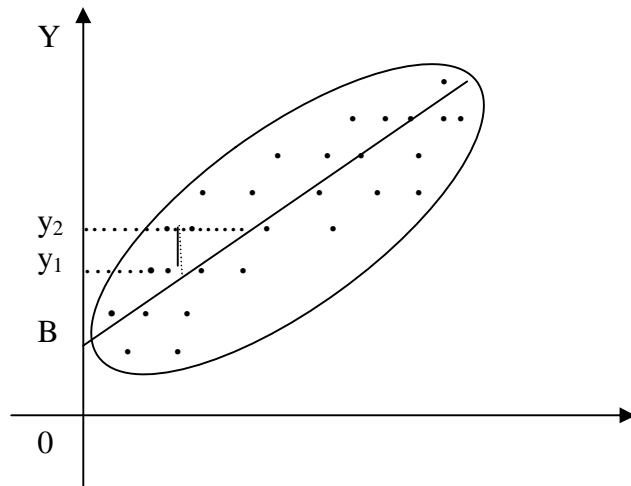


Fig. – 52 Ajustement d'un nuage statistique par une droite (régression linéaire simple)
 Pour l'équation de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés, il est démontré que le coefficient "a" est calculé par la formule :

1. – 3. - ANALYSE MULTIVARIE

L'analyse des données désigne l'ensemble des méthodes qui permettent de collecter, d'organiser, d'analyser, de présenter que l'ont appelons les données. L'analyse approfondie des données, fait découvrir des méthodes d'analyse des données multidimensionnelles. Ces méthodes utilisent des techniques géométriques permettant de mettre en évidence des groupes d'individus homogènes, des liens entre individus et variables, des ressemblances ou des différences entre variables, etc.

L'analyse en composantes principales (ACP) permet d'analyser plusieurs variables quantitatives observées sur n individus. Elle permet entre autres de regrouper des individus semblables, d'isoler des individus marginaux et d'étudier les relations entre les différentes variables.

Ø Analyse en Composantes Principales (ACP)

Afin de déterminer les différentes associations des éléments chimiques, on est amené à rechercher les liens qui existent entre eux. Ainsi, il s'agit de traiter les données de plusieurs variables simultanément. Parmi les méthodes utilisées, il y a l'Analyse en Composantes Principales qui se propose de fournir la synthèse de l'ensemble des valeurs numériques des analyses chimiques sous forme de tableaux et de graphes (Morineau, 1988).

Les résultats des analyses chimiques sont représentés dans un tableau R de type variable – individu, avec q colonnes représentant les éléments analysés (variables) et n lignes représentant les individus (analyse chimique d'un échantillon) Chamussy et al (1994).

L'Analyse en Composantes Principales "A.C.P" se propose de :

- Réduire l'ensemble des q variables de n échantillons, non pas par la sélection des échantillons et des variables, mais par la construction d'un ensemble de nouvelles variables appelées "facteurs".
- Ajuster le nuage de points ainsi obtenu, c'est-à-dire de le projeter au mieux sur un axe, un plan ou un hyperplan (espace vectoriel à n dimensions rapporté à une origine fixe).

a - Réduction de l'ensemble du nuage de points

o Le centre de gravité du nuage statistique

Le centre de gravité de nuage formé par les q variables des n échantillons est en général un échantillon fictif dont les teneurs auraient pour valeurs les moyennes des différentes variables.

$$g = \{\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j, \dots\}$$

$$\text{avec : } \bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \dots, \bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \dots, \text{etc}$$

Les liaisons de variables prises deux à deux peuvent être regroupées dans un tableau V qu'on appellera tableau des variances et des covariances ou matrice de corrélation.

o Calcul de la matrice V

L'ensemble des q variables des n échantillons (individus) géochimiques peut être donné sous la forme d'un tableau de n ligne et de q colonne

$$[X_{ij}] = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1q} \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{iq} \\ x_{n1} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nq} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} i = 1 \text{ à } n \\ J = 1 \text{ à } q \end{matrix}$$

gravité du nuage (Fig. 53). La distance entre les deux échantillons e_1 et e_2 par rapport au centre de gravité du nuage est donnée par le carré suivant:

$$D^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 - 2(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) \cos \theta$$

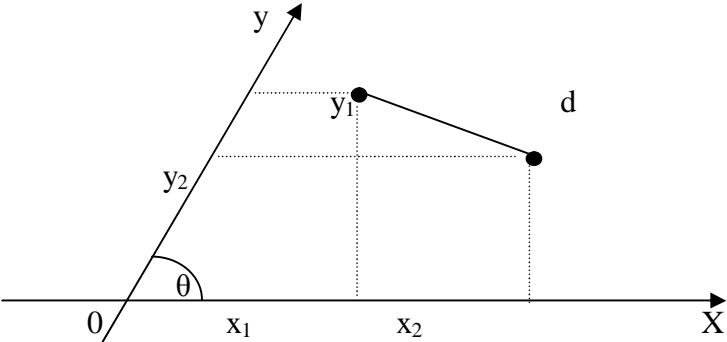
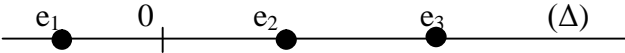


Fig. 53 - Ajustement d'un nuage statistique dans l'espace des échantillons (ACP)

On appelle inertie du nuage la moyenne des carrés des $n(n-1)/2$ distances entre les n points du nuage.

o **Plan et axe principal du nuage**

Le plan principal du nuage est le plan qui rend maximum l'inertie des points p projetés sur lui. L'axe principal est la droite (Δ) qui passe par le centre de gravité du nuage de telle sorte que les c_i représentant les mesures algébriques des projections des p échantillons sur (Δ) rendent maximale l'inertie.



o **Les axes factoriels**

L'espace des échantillons est un espace vectoriel dont l'axe principal et les autres axes sont obtenus par diagonalisation de la matrice V . Plusieurs méthodes peuvent être appliquées pour la diagonalisation de la matrice V ; elles aboutissent toutes à la matrice A des valeurs propres.

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \lambda_2 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \lambda_q \end{pmatrix}$$

Les vecteurs propres V_1, V_2, \dots, V_q associés aux valeurs propres écrits dans un ordre croissant constituent les axes de l'espace des échantillons.

○ **Les coordonnées des échantillons dans l'espace vectoriel R^q**

Les coordonnées sont obtenues par :

$$M_{sc} = Y * V_t$$

Avec M_{sc} : Matrice des f acteurs scores (coordonnées).

Y : Matrice des variables centrées et réduites.

V_t : Matrice des vecteurs propres.

○ **Représentation graphique des échantillons**

Les coordonnées des échantillons dans un plan sont données par les composantes M_i . La cartographie des échantillons se fait alors par la sélection de deux facteurs scores (axes) et ce selon la configuration envisagée.

c - Ajustement de nuage pour l'espace des variables

Un ensemble de q variables associées à un échantillon est un vecteur x_j d'un espace vectoriel R de dimension n (R^n).

Dans l'espace R^q , on mesure la distance entre les échantillons. Dans l'espace R^n , on définit une corrélation entre variables par le cosinus des angles θ_i formés par les vecteurs pris deux à deux (Nacer, 1998).

○ **Le cercle de corrélation**

On démontre que le coefficient simple de corrélation des variables avec les axes factorielles F_i est égal à la $i^{\text{ème}}$ composante du $j^{\text{ème}}$ vecteur multiplié par $\sqrt{\lambda_i}$. C'est-à-dire :

$$r_{ij} = \sqrt{a_{ij}} \cdot V_{t_{ij}} \quad i = 1 \text{ à } q \text{ et } j = 1 \text{ à } n$$

Avec A : matrice des valeurs propres, a_{ij} un élément de A .

On en déduit que la somme des carrés de coefficients de corrélations d'ordre i est égale :

$$\sum_{j=1}^q r_{ij}^2 = \lambda_i$$

Si on représente chaque variable par un point dont les coordonnées sont les coefficients de corrélations d'ordre r_{ij} , les variables s'inscrivent alors dans un cercle de rayon 1 appelé « **cercle de corrélation** ». Ce cercle aura pour abscisses et ordonnées les coordonnées relatives à deux axes choisis au préalable.

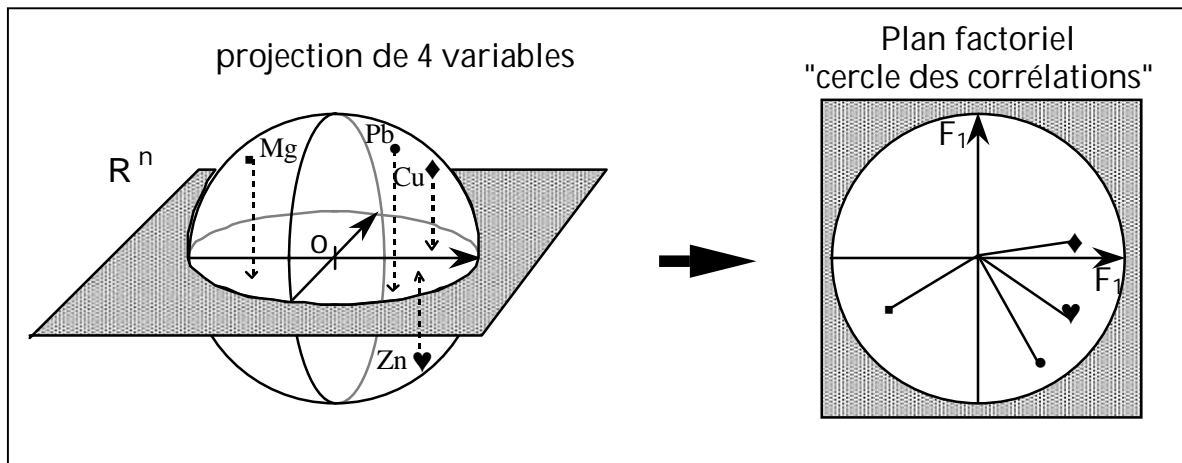


Fig. 55 - Représentation de cercle de corrélation

Ø Régression linéaire multiple

Dans cette section, nous généralisons et étendons les résultats précédents au cas plus intéressant où l'on cherche à expliquer une variable Y par un ensemble de variables X . De façon à simplifier la notation, on utilisera la notation matricielle.

Soit une variable Y que l'on veut relier à p variables X par le modèle linéaire suivant:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

On cherche à estimer les $p+1$ coefficients $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ de façon à minimiser le carré de l'erreur "e" commise.

Plaçons nos "n" observations en colonne dans un vecteur et les n observations des X dans une matrice. L'équation précédente s'écrit alors:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1p} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_p \end{bmatrix}$$

Ou plus simplement : $Y = Xb + e$

La somme des carrés des erreurs s'écrit:

$$SCE = \sum e (Y-Xb)' (Y-Xb)$$

On voit que SCE est une fonction des "b". On les choisira de façon à minimiser SCE. Le minimum de SCE est atteint lorsque toutes les dérivées partielles de SCE par rapport aux différents bi s'annulent:

$$SCE = Y' Y - Y' X b - b' X' Y + b' X' X b$$

$$\frac{\delta SCE}{\delta b} = 0 = (X'X) b - X' Y$$

D'où on tire finalement:

$$b = (X'X)^{-1} X'Y$$

Ce système de p+1 équations à p+1 inconnues est appelé "**équations normales**" de la régression.

2. – GEOSTATISTIQUES

C'est dans les années 50, avec des noms comme H.S. Sichel, D.G. Krige, H.J. DeWijs, qu'ont commencé à voir le jour, pour besoins des évolutions minières, les méthodes appelées plus tard géostatistique développées et conceptualisées en grande partie par G. Matheron. Depuis, cet ensemble de méthodes n'a cessé de s'enrichir, au contact de nouveaux problèmes d'évaluation et de nouveaux domaines d'application : pétrole, hydrogéologie, sciences du sol, agriculture, forêts, pêches, topographie, météorologie, environnement, génie-civil, sciences des matériaux....

2. – 1. - NOTION DE LA GEOSTATISTIQUE

La géostatistique est définie comme étant la théorie des variables régionalisées (VR) et des fonctions aléatoires réparties dans l'espace.

Elle étudie les phénomènes naturels répartis dans l'espace (Phénomènes régionalisés) et/ou dans le temps (Minéralisation, pollution, propriété

-Variable régionalisée : Le terme qui définit le type d'observation est la variable. Le terme variable régionalisée a été choisi par Matheron (1971) pour souligner les deux aspects apparemment contradictoires de ce type de variable : un aspect aléatoire, qui explique les irrégularités locales; et un aspect structuré, qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle.

- Géostatistique Intrinsèque : C'est l'application de la théorie des fonctions aléatoires ; qui sont eux même des réalisations particulières de la variable aléatoire Matheron G. (1973), l'ensemble de ces variables aléatoires formerait la fonction aléatoire (F.A.).

- Géostatistique transitive: La VR est considérée comme valeur unique ce qui permet d'étudier les phénomènes de la corrélation spatiale et la structure de la V.R.

- Géostatistique stationnaire : Si les moyennes des variables aléatoires aux points x_i sont égales, alors on dit que la fonction aléatoire $Z(X)$ est stationnaire : L'espérance mathématique (moyenne) est constante et égale à m sinon c'est **la Géostatistique non stationnaire.**

2. – 1. - 2. – Les outils et modèles de la géostatistique

La nature n'est pas entièrement "imprévisible". Deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées.

En géostatistique, on cherche à quantifier cette continuité préalablement à tout calcul effectué sur le gisement Journel (1978)

Le phénomène naturel étudié peut être stationnaire ou non. Il y a stationnarité lorsque tous les moments de variable sont invariants par translation dans l'espace de définition. En générale on se contente de deux premiers moments la moyenne, la covariance ou le

variogramme ; ces derniers sont les outils de base de la géostatistique et qui sont utilisés pour différents calculs, estimation autre procédures.

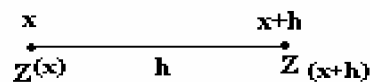
- Au moment d'ordre 1 : l'espérance mathématique ne dépend pas de $x \in E[Z(x)] = m$;

- Au moment d'ordre 2 : $E[z(x) - z(x+h)]^2$ où $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont deux points de l'espace de définition :

- $C(h)$ est appelé fonction de covariance ou covariogramme ; $E[z(x) - z(x+h)] - m^2$
- $\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(z(x) - z(x+h))^2]$, $\gamma(h)$ est appelé semi variogramme.

Ø Le variogramme théorique

Considérons deux valeurs numériques, $Z(x)$ et $Z(x+h)$, implantées en deux points distants du vecteur h ,



Le variogramme $\gamma(h)$ ne dépend pas de la localisation x , seulement de h soit en module, soit en module et en direction (hypothèse intrinsèque)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[z(x) - z(x+h)] = \frac{1}{2} E[(z(x) - z(x+h))^2]$$

Où x est le vecteur de coordonnées (1, 2 ou 3 coordonnées selon le cas), h est le vecteur distance.

Le variogramme est un outil servant à décrire la continuité spatiale d'un phénomène (si l'on examine dans différentes directions). Il est fonction du vecteur h ; Dans la plupart des cas, il croît jusqu'à une certaine limite appelée palier.

Ø Le variogramme expérimental

Le variogramme expérimental est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2;$$

Il sert à l'estimation du variogramme théorique à partir des données puis l'Ajusté a des modèles, qui sont :

- **Schéma à palier**, présente:

∅ Un comportement linéaire à l'origine:

- Sphérique : $\gamma(h) = c \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$

- Exponentiel : $\gamma(h) = c \left[1 - \exp - \frac{h}{a} \right]$

∅ Un comportement parabolique à l'origine:

- Gaussien : $\gamma(h) = c \left[1 - \exp - \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right]$

- **Schéma à effet de trou**: $\gamma(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h} \setminus \setminus \forall h > 0$

- **Schéma sans palier**:

$$\gamma(h) = 0 \quad \text{si } h = 0$$

- Effet de pépite :

$$\gamma(h) = C_0 \quad \text{si } h > 0$$

- Puissance (cas particulier : linéaire) : $\gamma(h) = ch^\lambda \quad 0 < \lambda < 2 \quad \lambda = 1 \text{ linéaire}$

- Propriétés du variogramme

En générale le Variogramme peut être représenté graphiquement et montre les caractéristiques suivantes.

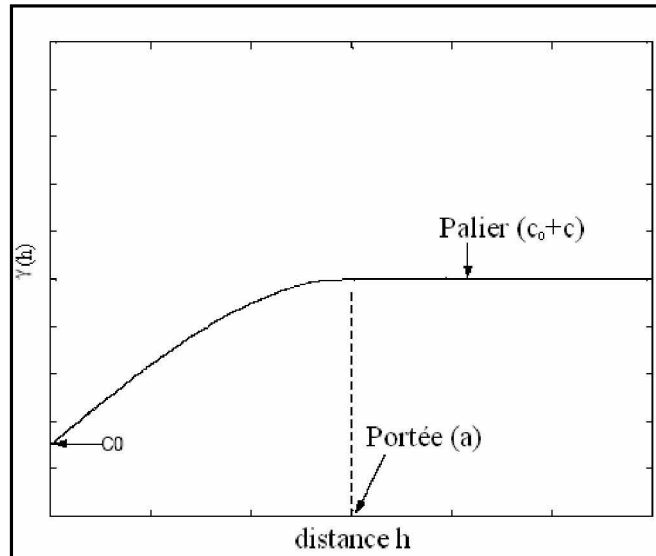


Fig. 55 - Les caractéristiques du graphe $\gamma(x, h)$ en fonction de h . Marcotte (1997)

- **palier** $\sigma^2 = C_0 + C$: Variance de la V.A ($\text{Var}(Z(x))$) puis s'aplatit.
- **Portée a** : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.
- **Effet de pépite C_0** : Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique. $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \gamma(\varepsilon) = C_0$

- **Anisotropies** : Le variogramme est calculé pour tout couple de points, et il révèle dans certains cas que la continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions. Dans ce cas il existe une anisotropie.

A) - anisotropie géométrique : lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers identiques et des portées différentes.

B) - anisotropie zonale : lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers et les portées sont différents.

2. - 1. - 3. - Procédures de Krigeage

Le problème de krigeage consiste à trouver le meilleur estimateur linéaire possible d'une caractéristique inconnue à partir de l'information disponible Journel et Huijbregts

(1978). L'information disponible consiste généralement en une information expérimentale, et une structurale.

En géostatistique linéaire stationnaire, il existe plusieurs types de krigeage : univarié : Krigeage ordinaire, krigeage simple, krigeage universel .

Ø Krigeage ordinaire

La fonction aléatoire $Z(x)$ est stationnaire d'espérance $E\{z(x)\} = m$, constante mais inconnue.

a) Contrainte de linéarité

L'estimateur est de la forme : $z_v^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$

b) Contrainte de non-biais

Pour annuler l'erreur $E[Z_v - Z_v^*]$; Il suffit d'imposer la condition $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$.

Il vient alors: $m - \sum_{i=1}^N \lambda_i m_i = 0$.

c) Contrainte d'autorisation

Il faut s'assurer que l'espérance et la variance de l'erreur de prévision $\{ E[Z_v - Z_v^*]^2 \}$ existent. Cette contrainte n'intervient que dans le cas où la fonction aléatoire $Z(x)$ est supposée stationnaire intrinsèque.

d) Contrainte d'optimalité

Consiste à trouver les poids λ_i et la constante μ qui minimisent la variance de l'erreur d'estimation.

- le système du krigage ordinaire :

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, v_j) + \mu = \bar{\gamma}(v_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{array} \right\} \forall i = 1..N \dots et .. j = 1..N$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu - \bar{\gamma}(V, V)$$

BIBLIOGRAPHIE

- **Aissaoui, D. (1984)** - Les structures liées à l'accident sud-atlasique entre Biskra et le Djebel Manndra, Algérie. Evolution géométrique et cinématique. Thèse 3^{ème} cycle, Strasbourg, 138p.
- **Altschuler, Z.S., Cuttitta, F., Berman, S. (1958)** – Rare Earths in phosphorites. Geochemistry and economic potential. U.S. Geological Survey Prof. Paper 575-B, p.B1-B9
- **Baturin, G. N., Kochenov, A. K. (1974)** – Uranium content of oceanic phosphorites. Lithology and mineral resources, 9, n°1, p. 99-103
- **Belinko, G. (1969)** - Condition océanographique de la genèse des phosphates sédimentaires. CERPHOS. Note de l'Académie des Sciences Russe, 8p.
- **Bouchkioua S. (1993)** : Etude de la répartition de l'uranium dans le gisement de phosphate du Djemi Djema à l'aide de méthode multivariante. Mém. Ingénieur, Univ. Annaba, 96p.
- **CERPHOS, (1973)** - Minerai brut de Djebel Onk. Etude pétrographique. Note interne CERPHOS.
- **Chabou Mostefai, S. (1987)** - Etude de la série stratigraphique tertiaire du Djebel Onk (Algérie). Leur situation dans le cadre des phosphates algériens. DEA, Fac. Sci. Alger, 136p.
- **Chamussy, H., Charre, J., Dumolard, P., Durand, M. G., Le Berre, M. (1994)** - Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Edition Masson, 245p.
- **Cielensky., Benchernine (1987)** - Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates dans la région de Bir El Ater. Rapport interne, EREM, 80p.
- **Coppens, R., Bashir, S., Richard, P. (1977)** – Radioactivity of Al Hasa phosphate – Preliminary study. Mineral. Deposita (Berl.) n ° 12, p.189-196.
- **Dassamiour, M. (2005)** - Evaluation de la quantité du produit marchand à l'aide de méthodes géostatistiques dans les blocs d'exploitation du gisement de phosphate de Kef Es-Sennoun (Algérie Orientale) –mémoire de magistère- 110p.
- **Duchatelle, G. (1975)** - Minerai de phosphate de Djebel Onk, carrière de Djemi Djema. Etude minéralogique. Rapp. interne CERPHOS, 55p.
- **Fisher, A.G., Jérôme, D. (1973)** - Geochemistry of minerals containing phosphorus, in Environmental Phosphorus Handbook, 141p – John Wiley and Sons. New-York, London, Sydney, Toronto.

- **Gabshin, V.M., Bobrov, V.A., Zorkina, L.S. (1974)** – Quantitative relations between uranium and phosphore in phosphorites and phosphatic sedimentary rocks. lithol. miner. Res.9 n°6, p.740-746.
- **Gony, J. N. (1971)** – Etude cristallochimique su phosphate uranifère de Bakouma (République centre africaine) commissariat à l'énergie atomique, C.E.N. Saclay, rapport CEA-R-400^E.
- **Hassas, R. (1995)** – Etude d'extraction liquide-liquide de l'uranium par le D2 EHPA effet solvatant (Synergie) TBP-TOPO p59
- **Journal, A. G. (1978)** - Cours de géostatistique, 3^{ème} année. Tome II, institut national polytechnique de Lorraine, France, 122p.
- **Journal, A. G., Huijbregts (1978)** - Mining geostatistics. Academic Press, London, U. K, 600p.
- **Kassatkine, Y., Yahyaoui, A. and Chatilov, S. (1980)** - Rapport sur les travaux de prospection et d'évaluation sur les phosphates exécutés en 1976-1978 dans le district minier de Djebel Onk .Rap. int. SONAREM, Algérie, 2Vol.,140p.
- **Kazakov, A.V. (1940)** - The phosphate facies : origin of the phosphorites and the geologic factors of formation of the deposits. Proc. Sci. Inst. Fertilizers and insectofungicides, 145p.
- **Krige, D. G. (1951)** - A statistical approach to somme mine valuation and allied problems on the Witwatersrand. J. Chem. Metal. Min. Soc. South Africa, 52p.
- **Larouci, M. (1988)** - Etude de la caractérisation et de la valorisation du minerai de phosphate de Djebel Onk – Algérie- thèse de doctorat ingénieur. Université orléans. 1 vol texte, 194p.
- **Lehr, J.R., Mc Clellan, G.H., Smith, J.P., Frazier A.W. (1967)** - Characterization of apatites. in commercial phosphate rocks. In Colloque international sur les phosphates minéraux solides. Toulouse, 16-20 février 1967, pp 29-44.
- **Lounis, A. (1983)** – Extraction de l'uranium à partir de l'acide phosphorique algérien essai de laboratoire et essais pilotes 70p
- **Marcotte, D. (1997)** : Géostatistique minière. Ecole polytechnique, Lorraine, France, 230p.
- **Matheron G. (1971)** - La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers des CMM5. Paris ENSMP, 212p.
- **Matheron G. (1973)** - The Intrinsic random functions and their application. In Advances in Applied Probability. Dec. 1973, n°3, pp439-468.

- **Mehmel, M. (1931)** – Differences in the crystal structure and chemical formula of apatites. *Z phys.* P223-241.
- **Mezghache, H. (1991)** - Détermination, localisation et estimation globale des différents types de minerai de phosphate dans le gisement de Kef Es Sennoun – Djebel Onk – Algérie. Rapport E. N. Ferphos, 42p.
- **Mezghache, H., Toubal, A. Bouima T., Bouarroudj, M.T. (2002)** - Localisation des différents types de minerai à l'aide de méthodes statistiques multivariées dans le gisement de phosphate de Kef Es Sennoun – Djebel Onk – Algérie. 5th international conference on the geology of the Arab world. Cairo University, Egypte.
- **Mezghache, H., Hani, A. (2000)** - Typologie chimique des phosphates du gisement de Djemi Djima – bassin de Djebel Onk (Algérie orientale). *Géologie Méditerranéenne*. Tome XXVII n° 1/2, 2000, pp 95-106.
- **Mezghache, H., Belghait, T., Mebarki, L., Boudries, A. (2006)** - L'uranium dans les minerais de phosphates algériens : Evaluation dans le gisement de Djemi Djima (Dj. Onk-Algérie orientale)
- **Montel, G. (1975)** – Conceptions actuelles sur la structure et la constitution des apatites synthétiques comparables aux apatites biologiques. *Colloques internationaux C.NRS. n°230. physico-chimie et cristallographie des apatites d'intérêt biologique*, p.13-18
- **Morineau, A. (1988)** - Analyse en Composantes Principales. Edition CISIA. Ceresta, France, 198p.
- **Nacer, J. (1998)** : Interprétation géostatistique des données de campagnes de prospection géochimique dans un environnement périadiaprique. *Mém. Magister, Univ. Annaba*, 123p.
- **Naray-Szabo, S.T. (1930)** - Structure of apatite $(Ca F) Ca_4 (PO_4)_3$. *Z. Krist.*, n°75, p. 387-398.
- **Nicolini, P. (1990)** - Gîtologie et exploitation minière. Edition Tec&doc, Lavoisier.
- **Prian, G. P., Cortiel, Ph. (1993)** - Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique, B.R.G.M. France, 288p.
- **Ranchin, G. (1963, a)** - Les phosphates de chaux sédimentaire de la région du Djebel Onk (Algérie). S.E.R.M. Paris, 85p.
- **Ranchin G. (1963, b)** - Les phosphates de chaux sédimentaire de la région du Djebel Onk. Etude géologique et minière de Djemi Djima (Algérie). S.E.R.M. Paris, 2 vol.
- **Sassi, S. (1980)** - Contexte paléogéographique des dépôts phosphatés en Tunisie – in *Géologie comparée des gisements de phosphate et de pétrole. Mém. BRGM*, n°116.

- **Sheldon, R.P. (1959)** – Geochemistry of uranium in phosphorites and black shales of the phosphoria formation. Geological survey Bulletin 1084-D, Washington.
- **Slansky, M. (1980)** - Géologie des phosphates sédimentaires. Mém. B.R.G.M. n°114, France, 92p.
- **Tlig, S., Sassi, A., Belayouni, H., Michel, D. (1987)** – Distribution de l'uranium, du thorium, du zirconium, du hafnium et des terres rares (TR) dans les grains de phosphates sédimentaires ; *Chemical Geology*, 62, 209-221
- **Visse, L. (1951)** - Genèse des gîtes phosphatés du Sud-Est Algéro– tunisien. XIX Congrès géol. Intern. Alger, série 1, n°27, 60p.
- **Young, R.A. (1975)** – Some aspects of crystal structural modeling of biological apatites, in physico-chimie et cristallographie des apatites d'intérêt biologique. C.N.R.S. Paris p. 21-40

Liste des figures

Figure	Page
Fig. 1 - Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (Prian et Cortiel, 1993)	3
Fig. 2 - Procédé de fabrication de l'acide phosphorique par voie humide	10
Fig. 3 - Procédé général de l'extraction par solvant	12
Fig. 4 - Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk – Algérie orientale – (D'après Cielensky et Benchernine, 1987)	20
Fig. 5 - Carte structurale de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métloui-Onk (Aissaoui, 1984)	22
Fig.6 - Situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région du Djebel Onk à l'intérieur du bassin phosphate de Gafsa – Mélaoui – Dj Onk (Prian et Cortiel, 1993)	25
Fig. 7 - Couches fonctionnelle de la radioactivité des phosphates suivant les teneurs en P_2O_5 (dans les sondages) (Kassatkine et al, 1980)	29
Fig. 8 - Couches fonctionnelle de la radioactivité des phosphates suivant les teneurs en P_2O_5 (dans les tranchées) (Kassatkine et al, 1980)	30
Fig. 9 - Situation des sondages et tranchées du gisement de Kef Es Sennoun – Djebel Onk – Algérie orientale- (Cielensky et Benchernine, 1987)	32
Fig. 10 - Structure de la couche de phosphate dans la zone de Kef Es Sennoun et localisation des sondages carottés (Prian et Cortiel, 1993)	35
Fig. 11 - Coupe géologique du gisement de Kef Es Sennoun (Prian et Cortiel, 1993)	36
Fig. 12 - Bloc diagramme des types de minerai de phosphate (Mezghache et al, 2002)	38
Fig. 13 - Coupe lithologique du front de carrière du gisement de Kef Es Sennoun	39
Fig. 14 - Apatite en couche concentrique	40
Fig. 15 - Lame mince montrant la glauconie	41
Fig. 16 - Photo montrant la glauconie sous la loupe binoculaire	41
Fig. 17 - Lame mince montrant le quartz (Q)	41
Fig. 18 - Lame mince montrant des débris osseux (DO)	42
Fig.19 - Lame mince montrant un Phosphate pseudoolithique	43
Fig.20 - Photo montrant des coprolithes sous la loupe binoculaire	43
Fig. 21 - Lame mince montrant un phosphate coprolithique	43
Fig. 22 - Lame mince montrant un phosphate à grains fins	44
Fig. 23 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM du secteur de Djemi Djema	47
Fig. 24 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM du secteur de Kef Es Sennoun	50
Fig. 25 - Situation de la zone d'échantillonnage dans la carrière du gisement de Kef Es Sennoun - Djebel Onk – Algérie orientale -	51
Fig. 26 – Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des données de saignées du front de carrière de Kef Es Sennoun	54
Fig. 27 - Cercles de corrélation de l'ACP sur l'ensemble des teneurs des échantillons de sondages de l'EREM et U estimé par le model linéaire simple et multiple dans le secteur de Kef Es Sennoun	57
Fig. 28 - Coupe verticale de la couche phosphatée selon le plan (X. Y. Z) montrait le nouveau système des coordonnées (X'. Y'. Z'). (In Dassamiour. 2005)	58
Fig. 29- Procédure de Calcul des couples des teneurs des échantillons des sondages	59

pour la construction du variogramme expérimental 3D (dans le plan de la couche phosphatée)	
Fig. 30- Variogramme expérimental moyen vertical des teneurs de P_2O_5 dans le gisement de Kef Es Sennoun	60
Fig. 31 - Variogramme expérimental horizontal des teneurs de P_2O_5 dans le gisement de Kef Es-Sennoun	61
Fig. 32 - Variogramme expérimental moyen vertical des teneurs de U estimé par régression linéaire simple dans le gisement de Kef Es Sennoun	63
Fig. 33- Variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de U estimé par régression linéaire simple dans le gisement de Kef Es-Sennoun	64
Fig. 34 - Variogramme expérimental moyen vertical des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple dans le gisement de Kef Es Sennoun	65
Fig. 35- Variogramme expérimental moyen horizontal des teneurs de U estimé par régression linéaire multiple dans le gisement de Kef Es Sennoun	66
Fig. 36 - Carte des teneurs moyennes de P_2O_5 estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 1 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -	70
Fig. 37 - Carte des teneurs moyennes de P_2O_5 estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 2 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -	71
Fig. 38 - Carte des teneurs moyennes de P_2O_5 estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 3 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -	72
Fig. 39- Carte des teneurs moyennes de P_2O_5 estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 4 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -	73
Fig. 40 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 1 du gisement de - Kef Es- Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale-	74
Fig. 41 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 2 du gisement de - Kef Es- Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -	75
Fig. 42 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 3 du gisement de - Kef Es- Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale -	76
Fig. 43 - Carte des teneurs moyennes de U estimées par krigeage ordinaire dans les blocs d'exploitation du niveau n° 4 du gisement de - Kef Es Sennoun - Djebel Onk - - Algérie Orientale -	77
Fig. 44 - Les axes ternaires sont perpendiculaires au plan 001 et se placent aux sommets d'hexagones jointifs. Les ions Ca_I répartis sur ces axes sont situés sensiblement à égale distance des plans de symétrie M1/4 et M3/4	Annexe
Fig. 45 - A chaque ion Ca des axes ternaires sont associés 9 atomes O répartis également entre le plan de symétrie situé au-dessus de l'ion Ca_I , le plan de symétrie situé immédiatement au-dessous, et le plan de l'ion C	
Fig. 46 - Les colonnes Ca_I -O sont reliées entre elles par des ions P qui forment des tétraèdres PO_4 avec 3 O d'une colonne et 1O de la colonne suivante.	
Fig.47- Projection sur le plan 001 des colonnes Ca_I -O et des tétraèdres PO_4 qui les associent	
Fig.48 - Répartition des atomes entourant l'axe sénaire hélicoïdal F et Ca_{II} situés dans	

les plans de symétrie M1/4 et M3/4	
Fig. 49 - Substitution de Ca_{II} par U^{4+}	
Fig. 50 - Schéma de phosphatogénèse selon Kazakov (1940)	
Fig. 51 - Schéma montrant le principe de l'émission atomique	
Fig. 52 - Ajustement d'un nuage statistique par une droite (régression linéaire simple) Pour l'équation de régression linéaire simple par la méthode des moindres carrés, il est démonstré que le coefficient "a" est calculé par la formule :	
Fig. 53 - Ajustement d'un nuage statistique dans l'espace des échantillons (ACP)	
Fig. 54 - Représentation de cercle de corrélation	
Fig. 55 – Caractérisation du variogramme	