

**Mémoire de projet de fin d'études**

**OPTION : Géologie Appliquée aux Ressources Minières**

*Synthèse sur la phosphatogenèse dans  
les bassins phosphatés marocains.  
Bassin des Gantour comme exemple*

**Par :**

Abdelqader OUABOU

**Encadré par :**

- ✓ Pr. **Nadia KHAMLI** : Faculté des Sciences et Techniques –Marrakech
- ✓ Mr. **Youssef DAAFI**: Office Chérifien des Phosphates (YOUSOUFIA)

**Soutenu le 20-02-2015 devant le jury composé de :**

**Pr. Yamina BOURGEOINI** FSTG Marrakech

**Pr. Nadia KHAMLI** FSTG Marrakech

# SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES .....	4
LISTE DES TABLEAUX .....	4
REMERCIEMENT .....	5
INTRODUCTION GENERALE .....	6
<b>Objectifs de stage</b> .....	7
Chapitre 1 : Les phosphates dan le monde .....	8
<b>I. Répartition des phosphates dans le monde</b> .....	8
<b>II. Les gisements phosphatés exploités dans le monde</b> .....	8
<b>II-1- Les gisements sédimentaires</b> .....	8
<b>II.2- Les gisements d'origine ignée</b> .....	8
<b>II.3- Les gisements de type Guanos</b> .....	9
Chapitre2 : LES BASSINS PHOSPHATEES MAROCAINS .....	11
<b>Introduction</b> .....	11
<b>I- Les principaux bassins phosphatés Marocains</b> .....	11
<b>II- Répartition Spatio-temporelle des phosphates au Maroc</b> .....	14
□ <b>Domaine de la Meseta</b> .....	14
<b>1. Présentation du bassin Oulad Abdoun :</b> .....	14
<b>1.1. Situation géographique</b> .....	14
<b>1.2 . Cadre géologique</b> .....	16
<b>2. Présentation du bassin des Gantour</b> .....	16
<b>2.1 Situation géographique et morphologie du bassin</b> .....	16
<b>2.2. Cadre structural</b> .....	18
<b>2.3. Stratigraphie du bassin</b> .....	20
<b>2.3. a. Socle paléozoïque</b> .....	21
<b>2.3. b. Couverture Céno- Mésozoïque</b> .....	21
<b>2.4. Hydrogéologie</b> .....	24
<b>2.5. Paléontologie</b> .....	24
<b>3. Présentation du Bassin de Meskala</b> .....	25
<b>3.1. Situation géographique</b> .....	25
□ <b>Domaine anti-atlasique et saharien</b> .....	26
<b>4. Présentation du bassin Oued Eddahab</b> .....	26
<b>4.1 Situation géographique</b> .....	26

<b>4. 2. Cadre géologique du bassin</b> .....	27
<b>Conclusion</b> .....	28
Chapitre 3 : Modes de genèse des Phosphates .....	29
<b>Introduction</b> .....	29
<b>I. Minéralogie des phosphates sédimentaires</b> .....	29
1. Structure des apatites.....	29
2. Synthèse des apatites .....	30
a) Par voie chimique .....	30
b) Par voie biologique .....	31
<b>Conclusion</b> .....	33
<b>II. Modèles de la phosphatogenèse</b> .....	33
<b>III. Les sources possibles du phosphore</b> .....	35
1. Source continentale .....	36
2. Source eaux marines profondes .....	37
3. Source biologique.....	38
4. Source volcanique.....	39
<b>IV. Mécanismes de formations des minéraux phosphatés à partir des solutions marines</b> .....	39
1. <b>Processus de formation des apatites sédimentaires</b> :.....	40
2. <b>Déclenchement de la formation des apatites sédimentaires</b> .....	42
2.1. <b>Modification adaptée des apports</b> .....	42
2.2. <b>Zone favorable à la formation des phosphates</b> .....	42
3. <b>Formation des particules phosphatées</b> : .....	43
<b>V.1. Vitesse de la sédimentation phosphatée</b> .....	46
<b>V.2. Périodes favorables à la phosphatogenèse</b> .....	47
<b>Conclusion</b> .....	50
Chapitre 3 : SEDIMENTOLOGIE ET DECOUPAGE SEQUENTIEL DE LA TRANCHEE DE RECHERCHE « BOUT EL MEZOUE ».....	53
<b>I. Localisation géographique de la tranchée</b> .....	53
<b>II. Méthode adopte lors du découpage séquentiel</b> .....	54
<b>III. DESCRIPTION ET DECOUPAGE SEQUENTIEL DE LA COUPE DE TRANCHEE</b> .....	56
<b>Conclusion général</b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b>Bibliographie</b> : .....	62

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: situation des principaux gisements phosphatés dans le Monde. ....	8
Figure 2 : carte de situation des gisements phosphatés marocains.( ocp) .....	13
Figure 3: Situation géographique de bassin Oulad Abdoun : (1. Massif hercynien, 2. Découpage des gisements phosphatés, 3. Extension probable de la minéralisation phosphatée, 4. Routes. (Kchikach et al, 2002). ....	15
Figure 4: Localisation géographique du bassin des Gantour (OCP). ....	17
Figure 5: les différents gisements de bassins des Gantour (in rapport ocp) .....	17
Figure 6: cadre structural de bassin des Gantour-Bahira (Boujou, 1972).....	19
Figure 7 : Paléogéographie du Maroc au cours du Crétacé supérieur (in FEDDAN 1988). ....	23
Figure 8 : situation géographique du bassin Meskala (OCP) .....	25
Figure 9: Situation géographique de Bassin Oued Eddahab. (OCP) .....	27
Figure 10 : Association entre deux axes de symétrie ternaires d'après Slansky, 1980. .....	29
Figure 11: Océan : modèle à deux compartiments. Exemple de cycle simplifié du phosphore (quantité exprimée en dizaines de millions de moles / an (BROECKE ,1974).....	32
Figure 12 : Modèle de (KAZAKOV, 1950) .....	34
Figure 13 :Modèle de (Keyser et Cook, 1972).....	34
Figure 14 : Modèle de (Hite, 1974).....	35
Figure 15 : Forme du phosphore dans le sol (WALKER, 1972), in MOUFLIH, 1980).....	37
Figure 16 : Mécanisme de formation d'un dépôt phosphaté d'après KAZAKOV (1950). ....	38
Figure 17 : position schématique de la zone favorable à la formation des phosphates (inMouflih, 1991) .....	43
Figure 18 : Répartition stratigraphique des dépôts phosphatés in (Slansky, 1982)....	47
Figure 19 : Localisation actuelle des principaux gisements de phosphate (Slansky, 1982). ....	48
Figure 20 : Les différentes sources possibles du phosphore. ....	51
Figure 21 : Situation géographique de gisement de Benguéirir :.....	53
Figure 22 : Principaux facteurs affectant la géométrie des corps sédimentaires (VAIL et al, 1987).....	55

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Résumé la répartition stratigraphique des gisements phosphatés dans le Monde.in SLANSK, 1980).....	10
Tableau 2:Log stratigraphique de bassin des Gantour (Michel COMBE, 1975).....	20
Tableau 3:La composition des eaux chaudes de surface comparée avec celle des eaux profondes, plus froides (concentration en millionième de mole / litre (AIT ELFALEH, 1982). ....	31

## REMERCIEMENT

A titre de gratitude et de reconnaissance, je tiens à apporter mes vifs remerciements et l'expression de mes sentiments les plus distingués à toutes les personnes qui ont veillé à ce que ce stage se déroule dans les meilleures conditions, à tous ceux qui m'ont honoré par leur soutien et leur compréhension.

Je remercie Monsieur **Youssef DAAFI**, ingénieur responsable du service Géologie, pour son excellent encadrement durant tout mon stage. Sa disponibilité, son soutien, son indulgence et sa compréhension mon étaient d'un très grand secours. Je lui dit tout simplement " Merci SSI YOUSSEF ".

J'adresse mes remerciements les plus distingués à tous les enseignants du département de géologie de la faculté des sciences et techniques de Marrakech. Et plus particulièrement mon encadrant : **Professeur Nadia KHAMLI** pour tous ses conseils, ses efforts remarquables, sa coopération et aussi d'avoir participé à mon encadrement.

Je tiens à remercier aussi Monsieur **Nabil Chaaban**, chef du service des plans, et mon parrain du stage qui a tant déployé d'effort pour la réussite de ce stage.

Ainsi que Messieurs; **Hamdi, Hicham, khella, Achafani, Fadli, Rachid**, sans oublier Monsieur **Ezyani**, et les autres agents du service qu'ont ici l'expression de mes salutations les plus distinguées et les plus respectueuses.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à tous le personnel du service Géologie, et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réussir ce rapport.

# INTRODUCTION GENERALE

Les phosphates sédimentaires sont la plus importante manifestation du phosphore minérale puisqu'ils assurent plus de 80% de la production mondiale de minerai de phosphate. Ces roches sont recherchées en raison de leur double intérêt économique et scientifique.

Sur le plan économique, la production agricole moderne repose en grande partie sur l'utilisation d'engrais dont l'approvisionnement dépend pour l'essentiel des phosphates. Ces derniers ont également donné lieu à d'autres applications telles que les détergents, l'industrie alimentaire, l'extraction de l'uranium, etc.... Cependant, si le phosphore est connu comme un élément nutritif des plantes et des animaux, son augmentation excessive dans l'environnement peut être néfaste. En effet, l'enrichissement des lacs en phosphore provoque une importante production de phytoplancton à la surface des eaux et, par conséquent, un appauvrissement de l'oxygène au fond, qui peut conduire à une disparition de différentes espèces de poissons, exigeants en oxygène.

Sur le plan scientifique, l'étude des phosphates peut fournir des renseignements multiples sur le milieu marin dans lequel ces roches se sont formées : température, diagenèse précoce, paléogéographie, conditions paléo-redox, teneurs en élément, teneurs en éléments traces, ...etc.

## Objectifs de stage

Les bassins phosphatés marocains recouvrent une partie importante du territoire national, ils ont la particularité de renfermer des réserves importantes par rapport aux autres bassins phosphatés dans le monde.

Les bassins phosphatés en général et celui des Gantour en particulier représentent des caractères sédimentologiques et stratigraphiques qui diffèrent d'une zone à l'autre.

Le présent travail a un double objectif:

- ✓ Le premier objectif est d'ordre fondamental. Il consiste à faire une synthèse bibliographique sur les différentes théories qui tentent d'expliquer les origines des apports phosphatés et d'expliquer les mécanismes de la phosphatogenèse qui ont abouti à l'accumulation d'importants gisements de phosphate.

Pour ceci, un ensemble de documents et d'études géologiques faites par plusieurs chercheurs a été consulté. Les interprétations et les modèles génétiques avancés pour expliquer la formation des apatites et des dépôts phosphatés ont été analysés.

Ce fut également une occasion pour se familiariser avec les différentes activités du «Service Géologie» de L'OCP (Site Youssoufia).

- ✓ Le deuxième objectif est d'établir un découpage séquentiel convenable de la série phosphatée marocaine au niveau de la tranchée de recherche "Bout El Mezoud" dans le bassin des Gantour (Site minier de Benguérir). Plusieurs sorties de terrains ont été effectuées lors desquelles nous avons procédé aux opérations suivantes :

- Identification et description des différents faciès constituant la tranchée ;
- Prélèvement des échantillons de différents faciès pour le compte du Service Géologie ;
- Elaboration d'un profil lithostratigraphique de la tranchée (AUTO CAD et Covadis) ;
- Identification des figures sédimentaires existantes.

L'ensemble de ces étapes nous a permis d'établir un découpage séquentiel de la tranchée.

## CHAPITRE 1 : LES PHOSPHATES DAN LE MONDE

### I.Répartition des phosphates dans le monde

La figure1 ci-dessous; montre la situation des principaux gisements phosphatés dans le monde dont les plus importants se trouvent en Amérique du Nord (Etats-Unis), en Afrique du Nord (Maroc et Tunisie), en Chine et sur certaines îles d'Océanie (Nauru, Banaba et Makatea) et dans certains pays comme (Togo et Jordanie...).Ainsi le Maroc, les Etats-Unis et la Chine sont considérés comme les pays les plus producteurs dans le monde avec une part de marché supérieur à 62 %.



Figure 1:situation des principaux gisements phosphatés dans le Monde.

## II. Les gisements phosphatés exploitésdans le monde

### II-1- Les gisements sédimentaires

Les gisements sédimentaires sont les plus abondants en quantité et ont en général des teneurs sur place qui dépassent les 28%  $P_2O_5$ .

Exemple : les bassins phosphatés Marocains

### II.2- Les gisements d'origine ignée

Ces gisements sont associés à des complexes intrusifs alcalins(les syénitesnéphéliniques, les carbonates, les ijolites et les pyroxénites).

Exemple : Les gisements de Khibiny (Russie) sont liés à un complexe annulaire à syénite néphéliniques avec 1600 millions de tonnes de minerai dont la teneur est de



18 %  $P_2O_5$ . Citons également les gisements de Palabora (Afrique du Sud) de teneur moyenne en  $P_2O_5$  est plus faible et les réserves d'apatites sont associées à des carbonatites et des pyroxénites (apatite + serpentine + magnétite).

### II.3- Les gisements de type Guanos

Les gisements de type guanos sont formés à partir des déjections des oiseaux de mer qui contiennent environ 4 %  $P_2O_5$ . En général la qualité de ces phosphates est fort intéressante vis à vis de leur quantité.

Exemples: Les gisements de l'île Nauru dans l'océan pacifique qui contiennent plusieurs millions de tonnes de minerai de 39 %  $P_2O_5$ , et les gisements de l'île Christmas dans l'océan indien qui contiennent 200 millions de tonnes de minerai d'une teneur de 23 à 27 %  $P_2O_5$ .

Les dépôts phosphatés sont largement répartis dans l'échelle stratigraphique des temps géologiques. Leur répartition stratigraphique et spatiale ainsi que leur abondance sont résumés dans le *Tableau 1*, ci dessous :

ETAGE	GISEMENT
Précambrien- Infracambrien 620Ma-2200Ma	RUM JUNGLE (Australie)
	UpperPeninsula (USA)
	Rajasthan (Inde)
	Gisements sybériens et Chinois
	Bambui (Brésil)
	Afrique Ouest (Ouest du fleuve Niger), Partie orientale du Sénégal
Cambrien	Gisement Queensland (Georgia, Bassin Ausralie)
	Karatau (Sybérie)
	Yunna en (Chine)
	Lao-kao au Viêt-Nam
Ordovicien	Gisement de Tenesse.
	Gisement obdus (Estonie)
Permien	Plaine Montagnes Rocheuses (Etat- Unis )
	Mussorie (Inde)
Jurassique- Crétacé inférieur	Plaine Moscou- Volga
	Mexique.
Crétacé sup. Eocène.	Bassins côtiers occidentaux et septentrionaux d'Afrique
	Moyen Orient (Egypt.)
	Aktyubinsk (Sud oural, U.R.S.S)
Miocène Pliocène	Gisement de Floride et de la Caroline (Etat-Unis)
	Gisement de type Guanos des Iles Christamas
	Nauru, Makatea (Océan pacifique).

**Tableau 1:Résume la répartition stratigraphique des gisements phosphatés dans le Monde.in SLANSK, 1980).**

## CHAPITRE 2 : LES BASSINS PHOSPHATÉS MAROCAINS

### Introduction

Les phosphates qui se sont révélés d'une exceptionnelle richesse, tant par la teneur de leur minerai en  $P_2O_5$  que l'énormité de leurs réserves forment la série sédimentaire la plus précieuse existant au Maroc.

Les études faites à ce propos ; ont pu déterminer les ressources phosphatières que recèle le sous sol marocain et qui représentent les trois quarts des réserves mondiales. Ce qui lui permet d'occuper une place de plus en plus prépondérante parmi les gros producteurs de ce minerai dans le monde.

Le Maroc dispose de 4 grands bassins phosphatés qui s'étalent sur une grande partie de son territoire.

### I- Les principaux bassins phosphatés Marocains

Le dépôt des phosphates au Maroc s'est opéré durant la période géologique s'étendant sur près de 30 Millions d'années, du Maastrichtien (Crétacé terminal) au Lutétien (Eocène moyen)(Boujou, 1972). Il s'y est déposée une série phosphatée décrivant une séquence positive, comprise entre des détritiques fins (sables et argiles) à la base et des formations carbonatées au sommet. Ces phosphates sont formés de grains de taille généralement comprise entre 40 et 215  $\mu m$ . Les faciès de la série phosphatée marocaine sont caractérisés par une grande diversité, tant sur le plan spatial que temporel.

Les ressources phosphatées marocaines se répartissent en quatre principaux bassins sédimentaires. Du Nord au Sud(fig.2); il s'agit des bassins de :

- Ouled Abdoun (région de Khouribga).
- Gantour (régions de Youssoufia et Benguerir).
- Meskala (régions d'Essaouira, Chichaoua et Imin Tanout).
- Oued Eddahab (régions de Laâyoune et Boucraâ).

En plus de ces quatre principaux bassins; il existe d'autres gisements mais de moindre importance vu leurs réserves et la qualité du minerai qu'ils contiennent. Pour le moment, Ces gisements ne revêtent qu'un intérêt géologique.

Ils sont localisés en divers zones du pays :

- Gisement de Kasba-Tadla et de Beni Mellal
- Gisement d'Asni et d'Amezmizsud de Marrakech
- Gisement de Kalaa-Ouarzazate
- GantourEssghir
- Timahdit,Elbiad (sidi Benour)

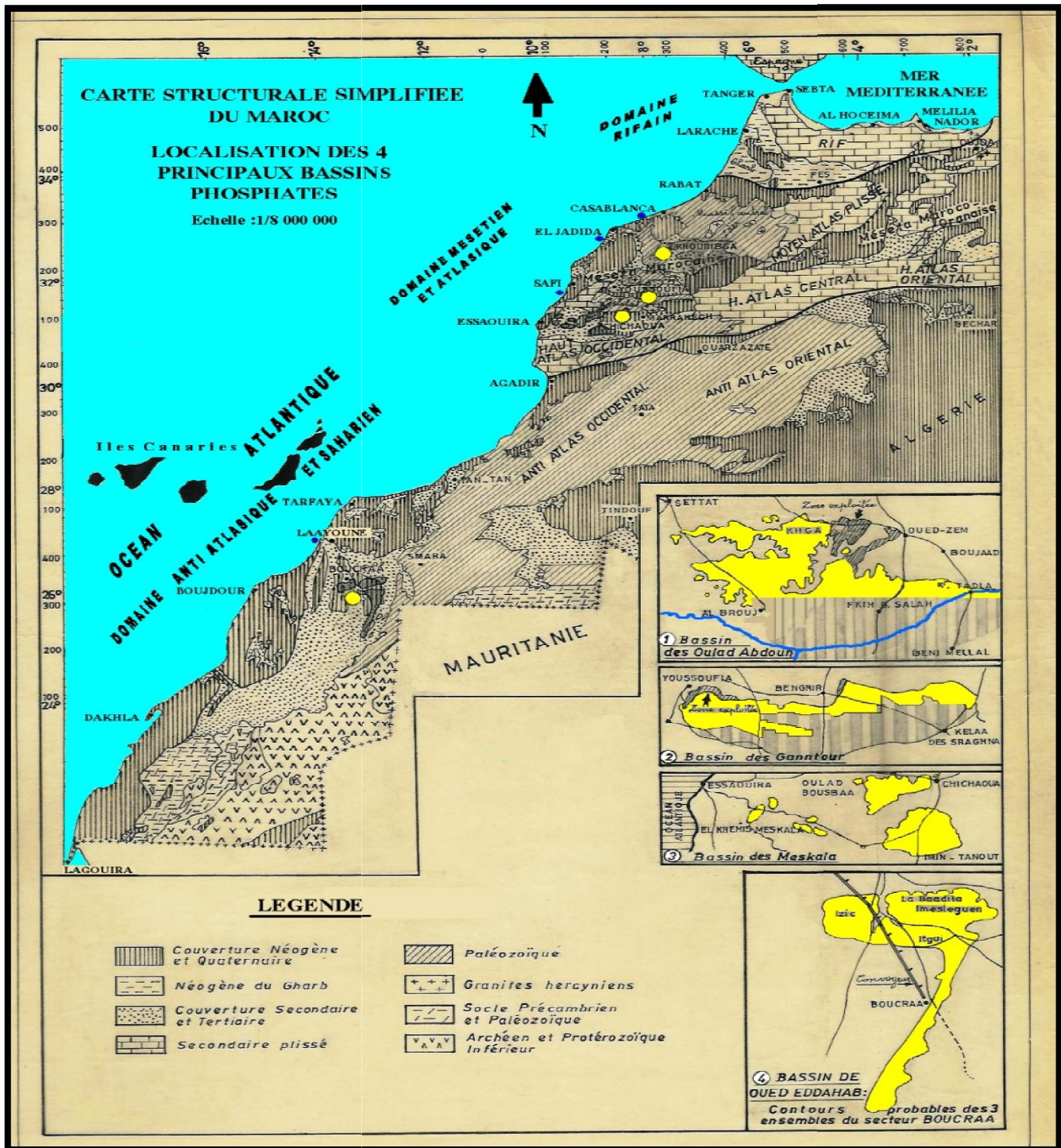


Figure 2 : carte de situation des gisements phosphatés marocains.( ocp)

## II- Répartition Spatio-temporelle des phosphates au Maroc

Les premiers dépôts phosphatés au Maroc sont découverts aux environs d'Imintanout dans le gisement de Meskala par (Brives, 1905; Gentil, 1908) ce dernier a attribué ces dépôts au Crétacé. Lemoine (1905) a admis la possibilité de l'existence de l'Eocène dans les Meskala et vers Chichaoua. La découverte de bassin des Gantouret des OuladAbdoun et leur importance économique qui s'est révélée plus importante que celle du bassin de Meskala ont fait tomber ce dernier dans l'oubli. Si bien que, depuis 1921, date de la création de l'office Chérifien des phosphates (OCP), le gisement de Meskala a fait l'objet de peu d'études par rapport à celles réalisées au niveau des deux premières.

Les principes bassins phosphatés du Maroc appartiennent à des domaines structuraux : celui de la Meseta occidentale et celui de l'Anti-Atlas du Sahara (Choubert et Marçais, 1952).

### ❖ Domaine de la Meseta

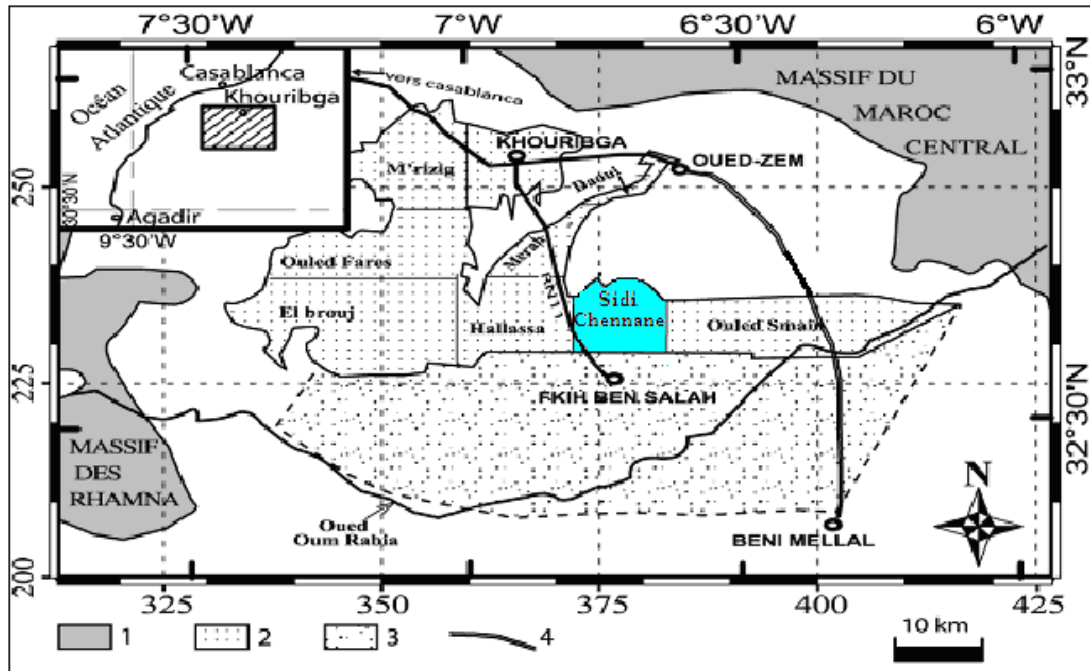
Les dépôts les plus importants tant par leur extension que par les teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se rencontrent dans ce domaine. Trois bassins sont connus du Nord au Sud.

#### 1. Présentation du bassin OuladAbdoun :

Il est le plus anciennement connu et le plus anciennement exploité des dépôts phosphatés marocains. Il est également le plus important, aussi bien par son extension que par la qualité et la quantité des minerais qu'il renferme.

##### 1.1. Situation géographique

Le bassin des Oulad Abdoun(fig.3)s'étend sur plus de 10000km<sup>2</sup>, il se situe au Nord du pays et s'inscrit grossièrement dans un rectangle limité par les méridiens 6°30' et parallèles 32°30' 33°.



**Figure 3: Situation géographique de bassin OuladAbdoun : (1. Massif hercynien, 2. Découpage des gisements phosphatés, 3. Extension probable de la minéralisation phosphatée, 4. Routes. (Kchikach et al, 2002).**

Situé au environ de la ville de Khouribga, il est limité au Nord par le massif du Maroc central, au Sud par l'Oued Oum Er Rabia, à l'Est par la plaine de Kasba Tadla et à l'Ouest par le massif paléozoïque des Rehamna. Il correspond au bassin le plus vaste (10000 km<sup>2</sup>) et le plus riche en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Il est actuellement le plus exploité.

Le bassin occupe la majeure partie du «plateaux des phosphates », prolongeant vers le Sud-Est le plateau de haute Chaouia. Il s'étend des environs de Khouribga au Nord jusqu'aux environs de Fkih ben Salah au Sud. Les limites du bassin ont été reconnues au sud de l'Oum Er-Rbia, en profondeur, par des forages effectués par l'OCP. Vers le Sud-est, il s'étend au-delà de Kasba-Tadla jusqu'aux environs de Zaouïa-Echeikh. La série phosphatée se prolonge sous forme des occurrences jalonnant la bordure nord de l'Atlas de Beni Mellal. Ces niveaux sont affectés par des manifestations tectoniques importantes avec l'apparition de chevauchements et des dédoublements de la série. L'occurrence la plus méridionale se rencontre dans la région du Haut Aherzif. Les divers niveaux de la série phosphatée y sont très bien individualisés, ce qui permet d'affirmer qu'il ne s'agit pas de la limite méridionale du domaine de la sédimentation phosphatée.

## 1.2 .Cadre géologique

- ✓ De point de vue géologique ; la série du bassin des OuladAbdoun s'étale de l'Infra –Cénomaniens au Lutétien supérieur où la série y constitue le terme final de la couverture sédimentaire.
- ✓ Le socle paléozoïque est fortement plissé et faillé, il affleure dans le massif central au Nord et les Rehamna au Sud Ouest.
- ✓ La couverture du substratum débute à l'Infra-Cénomaniens, formé de marnes et de grès rouges, ce dernier est surmonté par le Cénomaniens sous forme d'Alternance de marnes et de marno-calcaire. En dessus, vient le Turonien, formant une importante dalle calcaire, puis le « Sénonien » (40 à 70m), formé par un ensemble de marne et marno-calcaires jaunes, avec une ou plusieurs intercalaires calcaires.
- ✓ Au sommet, le Maestrichtien et le Lutétien caractérisent le début et la fin de la mise en place de la série phosphatée. Du Maestrichtien à l'Yprésien, la série est formée par un complexe de marnes phosphatées et de phosphate d'aspect sableux avec de rares intercalaires calcaires. Tandis qu'au Lutétien, elle est notamment formée par une Dalle calcaire.

## 2. Présentation du bassin des Gantour

### 2.1. Situation géographique et morphologie du bassin

Le bassin des Gantour (fig.4) se situe dans la Meseta Occidentale. Il se présente sous forme d'un plateau allongé Est-Ouest de longueur 120km et de largeur de 20 à 30km (Boujou, 1972), et situé entre les méridiens 7°10' et 8°35' et les parallèles 32°10' et 32°20'.

Le bassin est limité : (fig.4)

- Au Nord par le massif paléozoïque des Rehamna.
- Au Sud par le massif paléozoïque des Jbilet.
- A l'Est par l'Oued Tassaout.
- A l'Ouest par les collines jurassiques de Mouissate



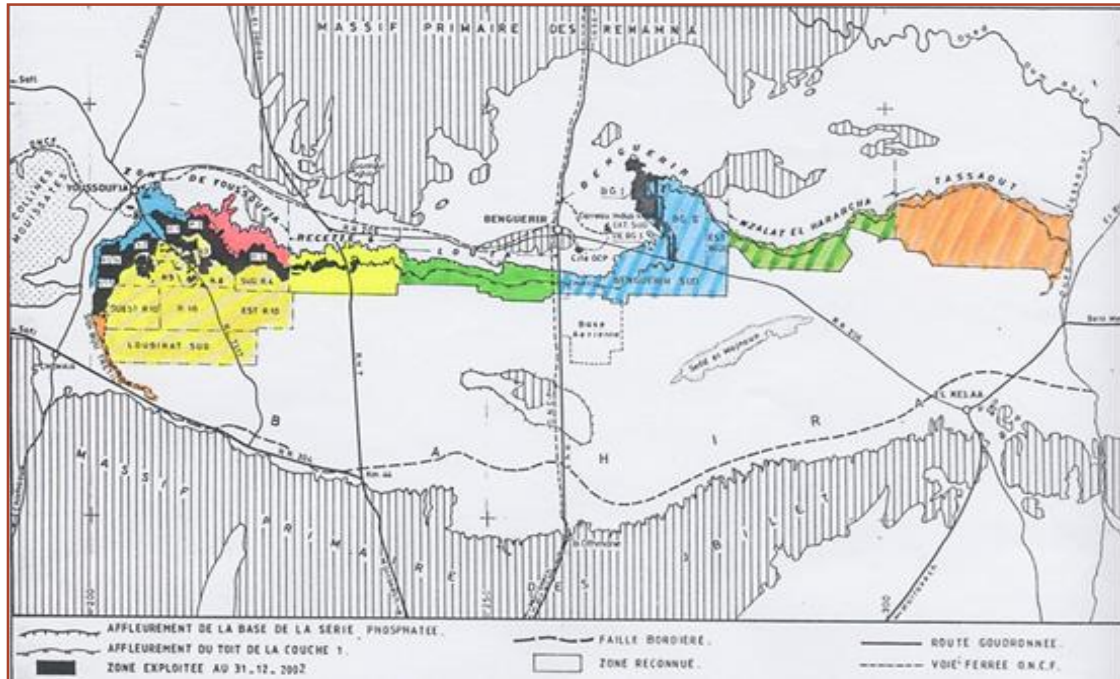


Figure 4: Localisation géographique du bassin des Gantour (OCP).

Le bassin de Gantour s'inscrit; dans l'ensemble; dans un rectangle orienté W-E ; long de 125Km. Ce bassin se subdivise en deux grands domaines : Un domaineméridional et l'autre septentrional à faciès généralement clair. Dans cette zone on distingue 6 zones qui sont de l'Est à l'Ouest (fig.5) :

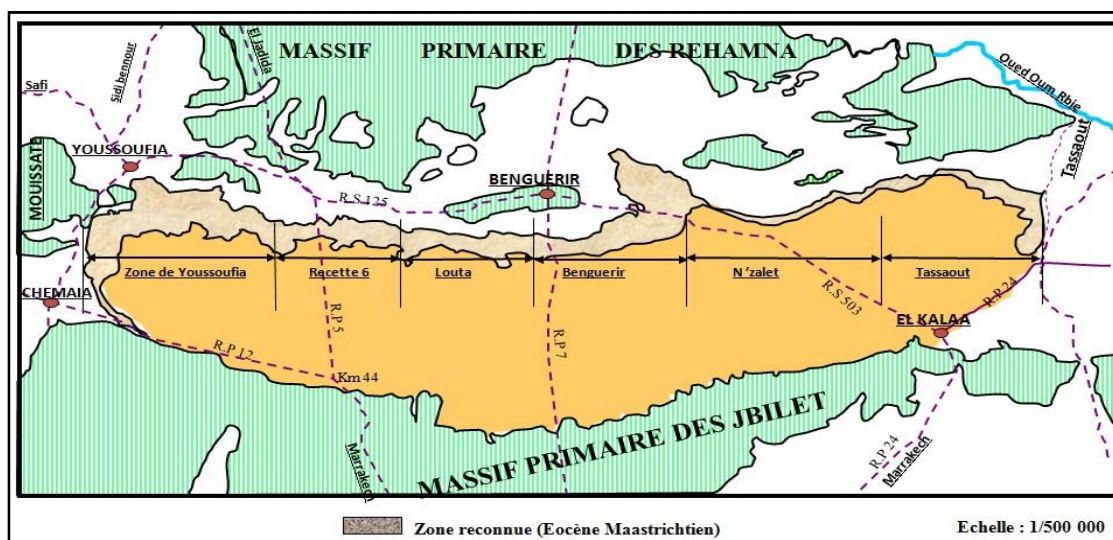


Figure 5: les différents gisements de bassins des Gantour (in rapport ocp)

- Tassaout Est Ouest
- N'Zalet EL Hararcha
- Benguéir Sud
- Benguéir Nord
- Louta
- Youssoufia

## 2.2. Cadre structural

Le plateau des Gantour couvre les formations paléozoïques des Rehamna au Nord, s'enfonce doucement sous les terrains récents de la plaine de la Bahira et se termine en biseau contre le massif primaire des Jbilet. A l'Ouest, il repose sur les collines jurassiques des Mouissate ou sur les formations du Crétacé inférieur de la région de Youssoufia. A l'Est, il est limité par l'oued Tassaout.

Le bassin des Gantour, comme les autres bassins phosphatés de la meseta marocaine, a évolué en plate- forme stable au cours d'une histoire tectonique relativement calme. Le socle primaire est très fortement tectonisé tandis que la couverture sédimentaire n'a été que légèrement affectée par des mouvements orogéniques d'âgetertiaire.

Deux domaines structuraux d'allures très différentes occupent l'ensemble du bassin Gantour-Bahira : (Boujou, 1972)(fig. 6) :

- ❖ Un domaine occidental entre Youssoufia et la route Marrakech-El-Jadida où les affleurements sont orientés Nord-Sud à l'extrémité occidentale, entre Chemaia et Youssoufia puis Ouest-Est, depuis Youssoufia jusqu'au Sud du village de Benguéir.
- ❖ Un domaine oriental où les affleurements redeviennent Nord-Sud à l'Est du gisement de Benguéir pour reprendre la direction Est-Ouest jusqu'à l'extrémité du gisement, au bord de l'Oued Tassaout pour redevenir encore une fois Nord-Sud.

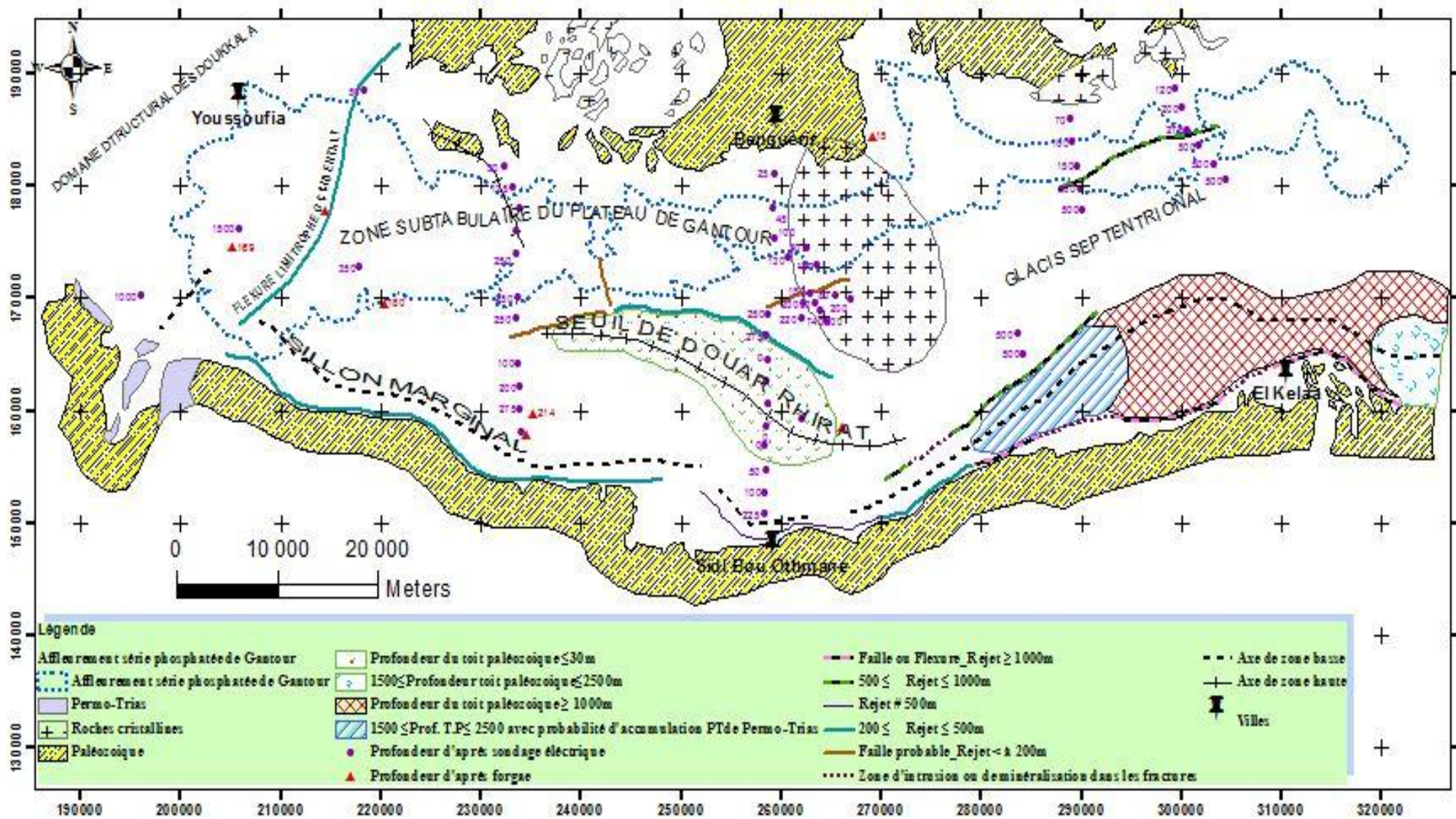


Figure 6: cadre structural de bassin des Gantour-Bahira (Boujou, 1972)

Notons que le domaine occidental est caractérisé par une structure perturbée marquée par la présence de cuvettes et de dômes avec une étendue des cuvettes plus importante que celle des dômes, contrairement au domaine oriental, qui a une structure relativement calme.

### 2.3. Stratigraphie du bassin

Le tableau suivant montre les divers faciès déposés dans le bassin des Gantour depuis le Primaire jusqu'à l'actuelle :

ETAGE		FACIES	PUISSANCE
QUATERNAIRE		Limons anciens et limons récents, souvent salés ; conglomérats galets, cailloutis, croutes calcaires	<b>15 à 30m</b>
TERTIAIRE	<i>Néogène</i>	Calcaires lacustres et conglomérats. Marnes et marno-calcaire rose	<b>20 à 50m</b>
	<i>Eocène</i>	Complexe phosphaté comprenant des couches de phosphate ; des marnes, des calcaires phosphatés à silex ; des lits de silex et des bancs calcaires l'ensemble est couronné par « la Dalle à Thersités » d'âge Lutétien.	<b>100m</b>
SECON- DAIRE	<i>Crétacé (moy-sup)</i>	Marnes, marno-calcaires et calcaires	<b>50m</b>
	<i>Crétacé inferieur</i>	Grès rouges comportant des bancs de petits conglomérats avec boue de calcaires vers le tiers inférieur	<b>100m</b>
	<i>Jurassique supérieur</i>	Calcaires à Gypse (en bordure Ouest dans les Mouissate seulement)	
	<i>Trias</i>	Marnes et Grès rouges avec dépôts de sel gemme	
PRAIMAIRE		Grès et quartzites <i>Schistes</i> avec intrusion de roches éruptives, rhyolites dolérites et granites blancs gréseux ou calcaires.	

Tableau 2: Log stratigraphique de bassin des Gantour (Michel COMBE, 1975).

Ce substratum comprend de bas en haut : la stratigraphie de toute la série sédimentaire de Gantour depuis les terrains primaires jusqu'aux dépôts quaternaires se présente comme suit :

### **2.3.a. Socle paléozoïque**

Le primaire affleure dans les Rehamna au Nord, plonge sous la plaine et réapparaît au sud dans les Jbilet. Il est sub-affleurant au centre du bassin au droit du « seuil de ghirat » (au sud de Benguérir).

- ✓ Dans les Rehamna; le paléozoïque est constitué essentiellement par des schistes et des grés, parfois des calcaires récifaux ; ces niveaux sont séparés par des lacunes et des discordances, souvent soulignés par des conglomérats (COMBE, FERRE, THOUVIN (1975). Cette série est affectée à la partie Sud d'un métamorphisme général peu intense (schistes micacés) et comporte plusieurs massifs granitiques. Le Cambro-Ordovicien épais (4500m (Boujou, 1996)), à faciès schisto-gréseux constitue, avec les terrains granitiques et métamorphiques, la quasi totalité des affleurements primaire des Rehamna.
- ✓ Dans les Jbilet, le socle paléozoïque se compose de sédiments marins schistifiés et partiellement granitisés. Le Cambro-Ordovicien (5000m d'épaisseur ; HUVELIN, 1961) constitué de schistes et grés. A l'Est, le terrain dominant est le silurien schisto-gréseux reposant sans doute sur l'Ordovicien (COCHET, 1975). Dans la partie Occidentale, le socle est recouvert, par endroit en discordance majeure, par des sédiments détritiques continentaux rouges (conglomérats, et des grés et des pélites) d'âges Westphalien Permien (HUVELIN, 1977).

### **2.3.b. Couverture Céno- Mésozoïque**

#### ➤ Trias :

Dans la Bahira-Gantour, la couverture triasique n'est représentée que sous la plaine de Chemaia et à l'extrémité occidentale de la Bahira, et des Jbilet. Elle est constituée essentiellement d'argiles gypso-salifères à intercalations gréseuses et repose en discordance majeure sur les terrains plus anciens. Dans cette partie occidentale, le Trias est disposé suivant des Grabens (HUVELIN, 1977).

➤ Jurassique :

Au cours du Jurassique, la majeure partie de l'Est du domaine atlasique est envahie par la Méditerranée. La transgression débute au Lias inférieur et s'avance vers le sud jusqu'à l'Anti-Atlas; le domaine mésetien reste émergé pendant le Jurassique inférieur et moyen, et rattaché au continent saharien (CHOUBERT, 1962).

Le socle hercynien et le Permo-Trias ont subi une érosion importante avant d'être recouverts par les sédiments marins transgressifs du Jurassique supérieur (ROCH, 1930). Le Jurassique bien différencié n'existe qu'à l'Ouest du bassin dans les Mouissate il se présente sous forme de calcaires, marno-calcaires jaunâtres avec lits argileux et bancs massifs de gypse très fréquents.

➤ Crétacé :

Contrairement aux transgressions Jurassiques qui étaient d'origine méditerranéenne, les transgressions Crétacées viennent de l'Atlantique. Au niveau de Gantours; les seuls affleurements du Crétacé inférieur existent au Nord-Ouest dans la région de Youssoufia. Il est connu également sous la Bahira grâce à des forages profonds (COMBE, 1975). Il est formé par des conglomérats, des calcaires, des argiles et grès.

Au Crétacé Moyen (début du Cénomaniens), s'observe une importante transgression atlantique qui recouvre la quasi-totalité du domaine atlasique. Deux terres émergées subsistent : le massif central au Nord relié au Rif et au Nord-Est atlasique et l'île Rehamna-jbilet au Sud.

Avec le sénonien commence une nouvelle régression qui se poursuivra, avec des rémissions et des à-coups, jusqu'à l'émergence à l'Eocène moyen.

Au Maestrichtien l'essentiel de la méseta est encore recouvert par la mer. L'extension du Maestrichtien est plus réduite que celle de Sénonien : tout l'Est du domaine atlasique est exondé (fig.7). L'étage se montre cependant transgressif. L'île Rehamna-Jbilet est scindée par le golfe des Gantour, et des faciès marins reposent, parfois en discordance, sur divers terrains antérieurs. A partir de cette époque, l'Atlantique ne mord sur le Maroc que par des vastes golfes, séparés par des îles (Michard, 1976).

Le Crétacé supérieur est représenté dans les Gantour par un Maestrichtien largement transgressif constitué de marnes, de calcaires, de marnes siliceuses et de couches phosphatée. La série Crétacé complète par l'adjonction du Sénonien (marneux), du Turonien (calcaires karstifiés), du Cénomaniens (argiles et grès) qui constituent l'anticlinal de Mzizoua.

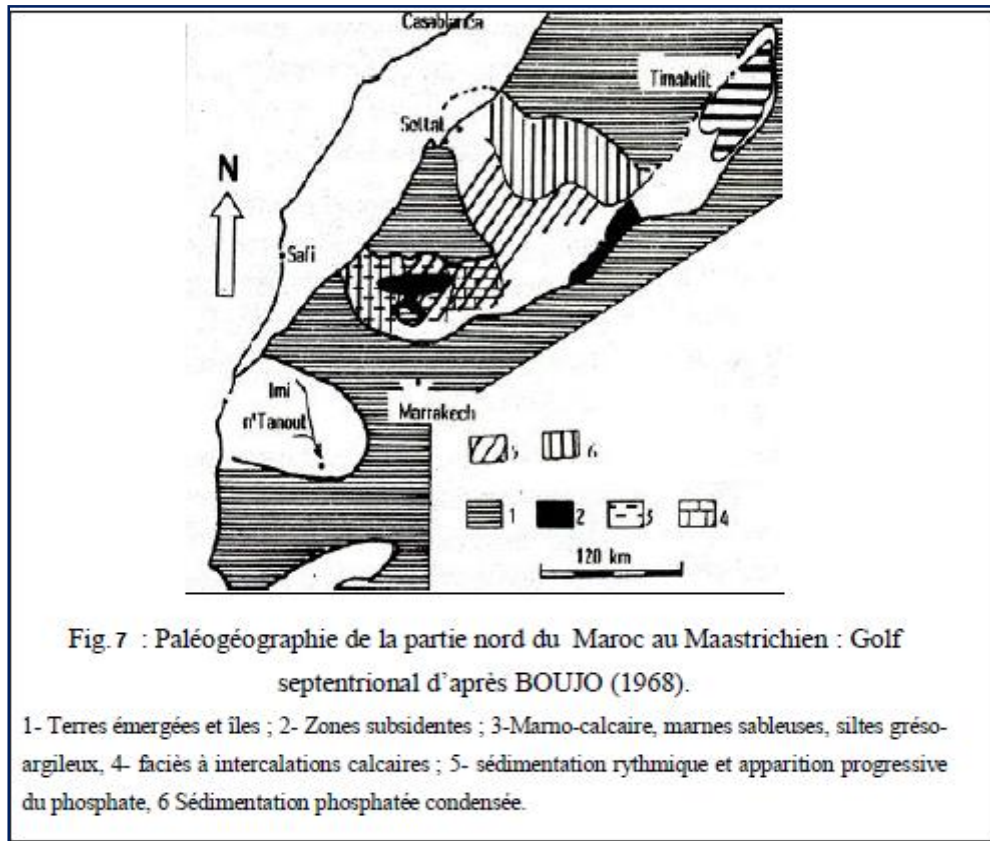


Figure 7: Paléogéographie du Maroc au cours du Crétacé supérieur (in FEDDAN 1988).

○ Tertiaire :

La sédimentation phosphatée a débuté au Maestrichtien supérieur et s'est poursuivie jusqu'au Lutétien A la fin du Lutétien, se produit le premier grand plissement de l'Atlas, suivi d'une exondation totale du domaine atlasique (CHOUBERT 1962).

Le Tertiaire affleure largement sur les Gantour. Il est constitué de phosphates sableux, de marno-calcaires, d'argiles plastiques, de sables phosphatés, d'une série marno-cherteuse et se termine par une dalle calcaire à Thersités.

○ Plio-Quaternaire :

Il affleure dans la Bahira et recouvre les terrains antérieurs.

Le pliocène (Plio- Villafranchien) comprend des calcaires lacustres, des conglomérats et des marnes. Le Quaternaire est constitué par des limons et des croutes calcaires.

## 2.4. Hydrogéologie

Sur le plan hydrogéologique, et suite à plusieurs études réalisées sur le bassin de la Bahira-Gantour, il est évident que l'alimentation souterraine provient essentiellement du plateau Crétacé, de l'Eocène et du Plio-quaternaire. Cette alimentation provient également de l'infiltration dans la basse plaine des petits oueds temporaires provenant du massif primaire des Jbilets au Sud et des Mouissate et du plateau de Youssoufia. Le sens d'écoulement des eaux souterraines se fait du Sud vers le Nord.

Le bassin de la Bahira- Gantour est marqué par un complexe aquifère formé par l'empilement de trois niveaux aquifères :

- Aquifère pléo-quaternaire
- Aquifère éocène
- Aquifère crétacé

## 2.5. Paléontologie

Les Gantour présente une faune fossile, formée essentiellement par une macrofaune de vertébrés et d'invertébrés. La microfaune est caractérisée par sa pauvreté en espèces (Boujou, 1972).

La flore est assez riche en débris de bois fossiles. La macrofaune est marquée dans la série phosphatée par des vertébrés fossiles tels que les poissons, reptiles marins et les invertébrés

Les recherches entreprises par (GENDROT, 1968) puis par (RAHHALI, 1970) à Benguérir, N'zalet ont confirmé l'existence d'une zone à Frondicularia connue aussi à Youssoufia. Boujouet RAHHALI (1971) ont confirmé et précisé les résultats de la macrofaune :



- Maastrichtien est daté à Benguézir par *Gabonella Aff. Distorta* de Meijer.
- Le Paléocène est déterminé par une association comprenant, *Globorotalia pseudobulloides* Plummer, *Globigérina triloculninoi* des Plummer qui datait, d'après (BOLLI, 1957), le Paléocène inférieur et moyen.

### 3. Présentation du bassin de Meskala

#### 3.1. Situation géographique

Le bassin de Meskala (fig. 8) est situé dans la plaine d'Essaouira Haouz. Ce bassin se limite entre les latitudes Nord  $31^{\circ}35'$  et Sud  $31^{\circ}10'$  et les longitudes Est  $8^{\circ}35'$  et Ouest  $9^{\circ}35'$ .

Il est limité :

- Au Nord par les Jbilet et les collines jurassique de Mouissate.
- Au Sud par le Haut Atlas.
- A l'Est par la plaine de Haouz.
- A l'Ouest par la plaine côtière d'Essaouira.

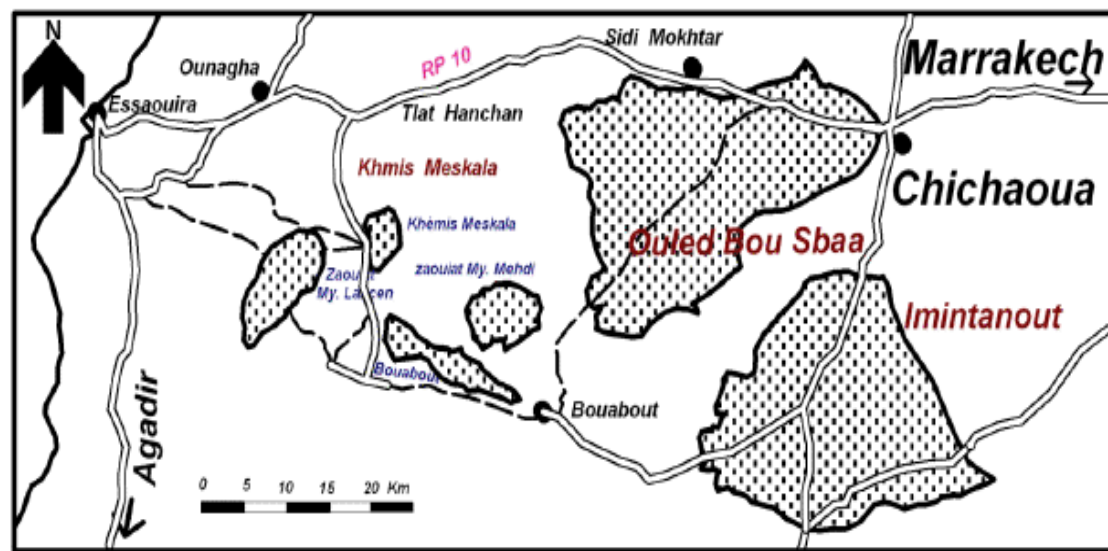


Figure 8: situation géographique du bassin Meskala (OCP)

Il correspond à une composante du grand bassin d'Essaouira situé à la jonction entre les Jbilet et le Haut Atlas Occidental. Le bassin de Meskala correspond à trois cuvettes synclinales ;cuvette d'Imin-Tanout, de Chichaoua, et Khemis de Meskala. Bien que couvrant en sa totalité une superficie presque égale à celle de la partie

occidentale des Gantours, il a été considérablement morcelé par la double action de la tectonique et de l'érosion.

La première cuvette est située directement sur la bordure Atlasique, où la série phosphatée est fortement redressée dans la région d'Imin-Tanout. Sa superficie est de 450 km<sup>2</sup>. La seconde cuvette la plus importante par sa superficie (plus de 500 km<sup>2</sup>), est connue sous le nom des Oulad Bou Sbaa. Elle affecte une forme sensiblement triangulaire d'orientation générale NE-SW. Elle est séparée du précédent par l'anticlinal crétacé du Jbaïl.

La troisième cuvette, elle-même très morcelée, constitue la zone de Meskala. Par suite de l'érosion, la série phosphatée y est rarement complète et n'y est représentée le plus souvent que par ses termes inférieurs (Maestrichtien). Située au Sud-Ouest des précédentes zones (dont elle constitue d'ailleurs le prolongement), la zone de Meskala n'intéresse qu'une superficie de 110 km<sup>2</sup>.

#### ❖ Domaine anti-atlasique et saharien

### 4. Présentation du bassin Oued Eddahab

#### 4.1 Situation géographique

Le bassin Oued Eddahab, situé en zone saharienne, couvre une vaste région qui part de la zone saharienne d'Edchira au Sud-Est de la région près de la confluence de Saquia ElHamra et Oued El Khat et se poursuit en se rétrécissant jusqu'au Sud de la ville de Dakhla. Il se limite au Nord et Nord-Est par les affleurements de la série phosphatée (fig. 9)

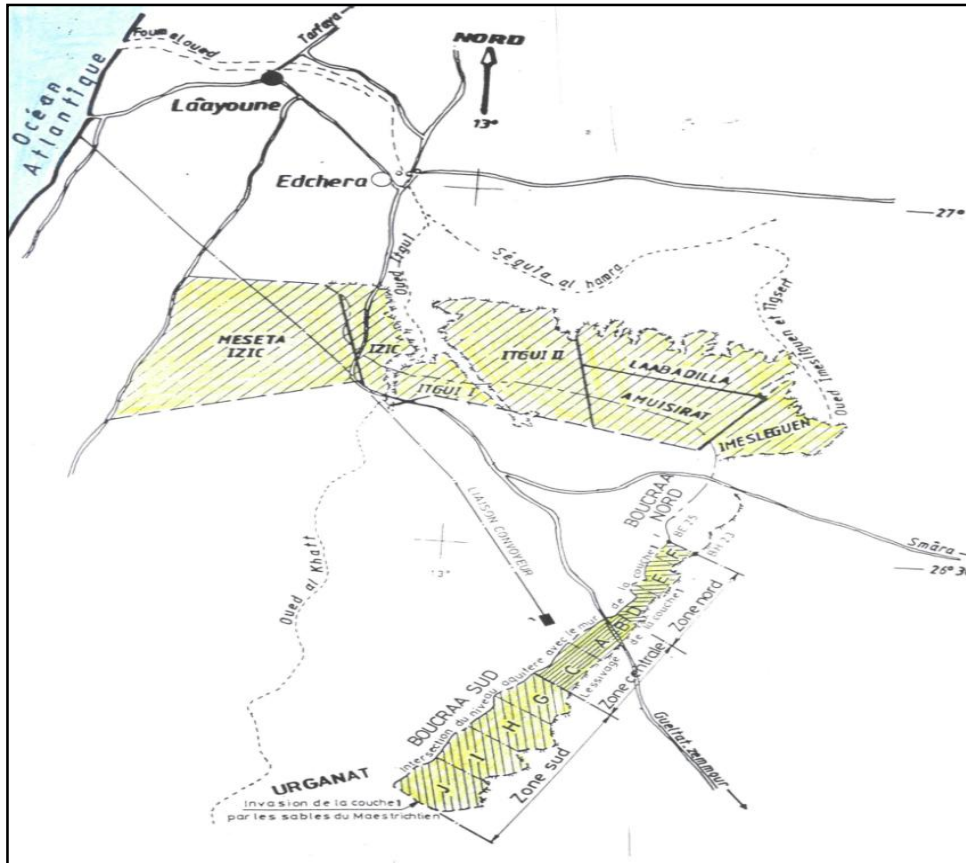


Figure 9: Situation géographique de Bassin Oued Eddahab. (OCP)

#### 4.2. Cadre géologique du bassin

Dans ce domaine, le seul gisement exploitable d'après les données actuelles est celui de BouCraâ, Il est situé dans la partie sud entre le Précambrien et le Paléozoïque de la dorsale de Reguibate d'une part et l'Océan Atlantique d'autre part. Il s'étend du Nord au Sud-ouest jusqu'aux environs de Nouadhibou. Il est vraisemblable que ces dépôts phosphatés devraient s'étendre beaucoup plus au Nord que les affleurements actuels ; malheureusement, le jeu de l'érosion a réduit ses extensions. D'après les travaux de Azmany-Farkhany (1986), Boujou et Salvan (1986), les dépôts phosphatés ne sont localisés que dans la partie centrale du bassin créacé mais les prospections récentes de l'OCP montrent que le gisement occupe une vaste étendue, depuis Edchera (au Sud-Est d'El Ayoun) jusqu'aux environs du confluent de la Segouia-el Hamra et de l'Oued el-Khat. Il constitue en ces régions, un ensemble de forme arrondie, qui se rétrécit vers le Sud, où il s'allonge sous forme d'une bande d'environ 3km de large, s'étend jusqu'à Beranga, au Nord-Est de Nouadhibou. La région n'a subi que de

faibles influences tectoniques et par conséquent, les dépôts phosphatés sont plus ou moins subhorizontaux.

## Conclusion

L'histoire géologique du Maroc, a enregistré plusieurs Orogenèses (Précambriennes, Hercynienne, Alpine), qui ont caractérisé différents domaines structuraux. Au niveau de ces derniers, la sédimentation phosphatée s'est développée, pendant plus de dix millions d'années.

Les dépôts phosphatés peuvent se trouver dans divers niveaux stratigraphiques, mais les plus importants se concentrent seulement à partir du Crétacé supérieur (Maestrichtien) jusqu'à l'Eocène moyen (Lutétien). Les ressources phosphatées marocaines (chapitre(2):I) se répartissent du Nord vers le Sud; en quatre principaux bassins sédimentaires économiquement rentables et d'autre moins importants.

On note que le bassin de Gantour (Yousoufia-Benguérir) et celui d'Oulad Abdoun (Khouribga) et de Meskala (Bassin d'Essaouira), situés dans la partie Nord du Maroc et communiquant avec l'Océan Atlantique dans la partie Ouest du Bassin de Gantour. Ce dernier qui se présente par deux centres miniers : Yousoufia (la partie Occidentale) et Benguérir (partie Orientale), en plus la série phosphatée de ce gisement repose en discordance sur un socle paléozoïque faillé et schistosé affleurant en trois localités ; (chap.(2) : 2.2). La stratigraphie de leur série phosphatée est connue depuis les travaux d'ARAMBOURG, 1952) et s'étend du Maestrichtien au Lutétien (Tableau2).

## CHAPITRE 3 : MODES DE GENÈSE DES PHOSPHATES

### Introduction

Le phosphate est une roche sédimentaire marine dérivant de l'apatite. Le phosphore, indispensable à la vie est inégalement réparti sur terre et dans les océans. Les poissons et les oiseaux jouent un rôle important dans sa concentration et dans son retour à la terre. Le cycle biogéochimique et écologique du phosphore a été modifié par l'Homme qui l'a récemment introduit massivement sous forme d'engrais dans les agro-systèmes et indirectement dans les écosystèmes.

### I. Minéralogie des phosphates sédimentaires

#### 1. Structure des apatites

Le phosphore est le principal constituant de toutes les phases phosphatées. Il se trouve chez tous les êtres vivants dans lesquels il se présente sous forme minérale ou organique, dans les os, les dents, les carapaces, test, les coquilles, les cellules,...etc.

Les apatites forment une famille de composés solides cristallins qui dérivent de la fluorapatite  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$  dont la structure a été établie par NARAY-SZABO en 1930 sur des monocristaux naturels, et vérifiée plus tard par (BEEVERS,1946).

La fluorapatite cristallise dans le système cristallin hexagonal qui se caractérise par des axes de symétrie d'ordre 3 (axe ternaire). Ces axes ternaires sont perpendiculaires au plan du système et sont placés aux sommets d'hexagones jointifs (Fig. 10)

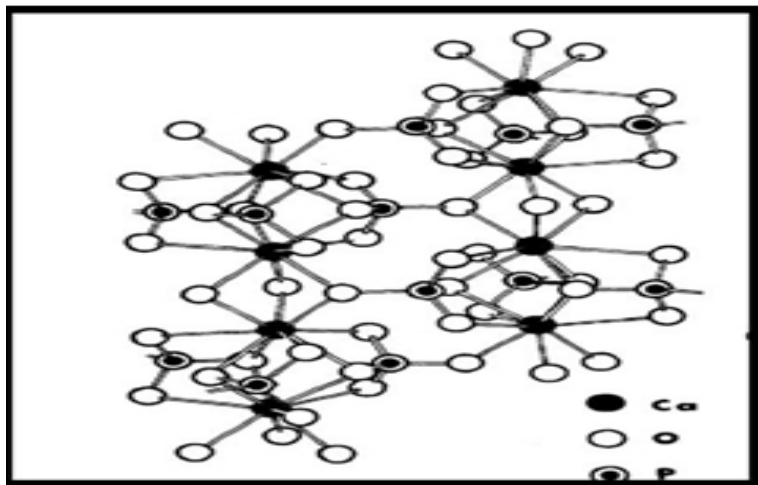


Figure 10 : Association entre deux axes de symétrie ternaires d'après Slansky, 1980.

Au niveau de chaque axe ternaire du système se présente une alternance d'ions de Calcium et d'atomes d'oxygène dont chaque calcium est entouré de 9 atomes d'oxygène : 6 oxygènes en commun et 3 oxygènes libres (situé dans le plan de symétrie)

Dans les roches sédimentaires, la matière phosphatée de base n'est pas parfaitement une fluorapatite, mais elle est formée de composés issus de l'apatite par un ensemble de substitutions isomorphiques partielles. La substitution la plus observée est celle des ions phosphatés  $\text{PO}_4^{3-}$  par les ions carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$ . Le minéral correspondant est la francolite de formule générale simplifiée :  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)^{6-x}(\text{CO}_3)^x\text{F}_{2.0.39-x}$  ( $0.39 < x < 1.39$ ).

Plusieurs minéraux se forment suite à des substitutions variables. Nous citons le minéral le plus abondant dans les phosphates sédimentaires : La francolite ou la carbonate fluorapatite. C'est une apatite réactive puisqu'elle permet l'accès de l'acide à sa structure. Elle est très riche en carbonates « formée suite à une substitution de  $\text{PO}_4^3$  par les ions  $\text{CO}_3^{2-}$  ». (in AIT ELFALEH, 1982)

Le minéral (Apatite) du gisement de Benguerir par exemple : est principalement une Fluor-carbonate apatite, très comparable à celle qui est décrite dans les Bassins avoisinants, mais on note tout de même la faible présence d'une fluorapatite à 0,16% de  $\text{CO}_2$ .

## 2. Synthèse des apatites

### a) Par voie chimique

Dans l'ensemble des travaux antérieurs concernant la synthèse des apatites, des phosphates minéraux solubles sont utilisés comme source de phosphore et des composés solubles ou insolubles jouent le rôle de fournisseur de calcium. Ces travaux visent essentiellement à fabriquer des minéraux hydroxylés, fluorés et carbonatés dans des conditions bien définies afin de comprendre leurs structures et de préciser leur mode de substitution, notamment celui des ions carbonatés. Outre leur intérêt dans les domaines chimique, minéralogique et biologique, les résultats de ces synthèses ont permis à de nombreux chercheurs de tenter de reproduire les conditions physico-chimiques de la précipitation de l'apatite dans l'eau de mer (SMIRNOV et al., 1962 ; Lucas, 1976 ; SASS et NATHAN 1981;) et son étude thermodynamique (KRAMER,

1964, BERGE, 1972; CHIEN et BLACK, 1976; VIEILLARD, 1978). Mais la transposition de ces synthèses par voie chimique à la genèse de l'apatite des phosphorites marines se heurte à deux principales difficultés : la concentration de phosphates solubles dans les eaux marines libres est inconnue ; le Mg contenu dans l'eau de mer inhibe la formation de l'apatite, par ailleurs, l'association fréquente des phosphorites et de la Matière Organique a conduit de nombreux chercheurs à mettre en valeur l'activité biologique (CAYEUX, 1936; SLANSKY, 1980; PREVOT, 1975; RIGGS, 1982).

### b) Par voie biologique

#### ❖ *Le rôle de l'activité biologique :*

Les problèmes concernant les sources du phosphore sont discutés depuis bien longtemps, ce qui donne lieu à l'élaboration de multiples hypothèses (BOUJOU, 1976; SLANSKY, 1980), parmi ces hypothèses, celle qui se base sur l'idée de la concentration préliminaire du phosphore par les organismes est la plus admise.

La teneur en phosphate des eaux chaudes de surface est pratiquement nulle, alors que les eaux profondes en contiennent une quantité significative (tableau. 3).

Composés chimiques	Eaux chaudes de surface	Moyenne des eaux profondes
Phosphate	0	2,5
Carbone dissous total	2000	2275
Ions carbonate	223	90
Dioxyde de carbone gazeux	13	45
Ions calcium	10000	10055

**Tableau 3: La composition des eaux chaudes de surface comparée avec celle des eaux profondes, plus froides (concentration en millionième de mole / litre (AIT ELFALEH, 1982)).**

Ceci s'explique par le fait que le phosphore qui est un élément bio-limitant (BROECKER, 1974) est indispensable aux substances vitales telles que les Acides nucléiques (ADN et ARN), les phospholipides, les coenzymes, ATP, etc.... Après la mort des organismes, les débris organiques tombent au fond des océans (milieu anaérobie) ; la matière organique est décomposée et le phosphore passe en

solution. Ce phosphore et d'autres sels nutritifs comme les silicates et les nitrates remontent à la surface des Océans grâce aux courants ascendants (figure.11). La remontée des eaux froides chargées de sels nutritifs (phosphates, silicates ...) et leur mélange avec des eaux chaudes de surface provoquent une activité biologique importante. Ainsi, le phosphore se trouve fixé par les organismes, en particulier par le plancton. De nombreux auteurs (AIZERLING, 1845 in : BOUJOU, 1976 ; SLANSKY, 1973, 1980; BATURIN, 1982) ont suggéré que le rôle essentiel joué par la matière organique est celui de concentrer le phosphore

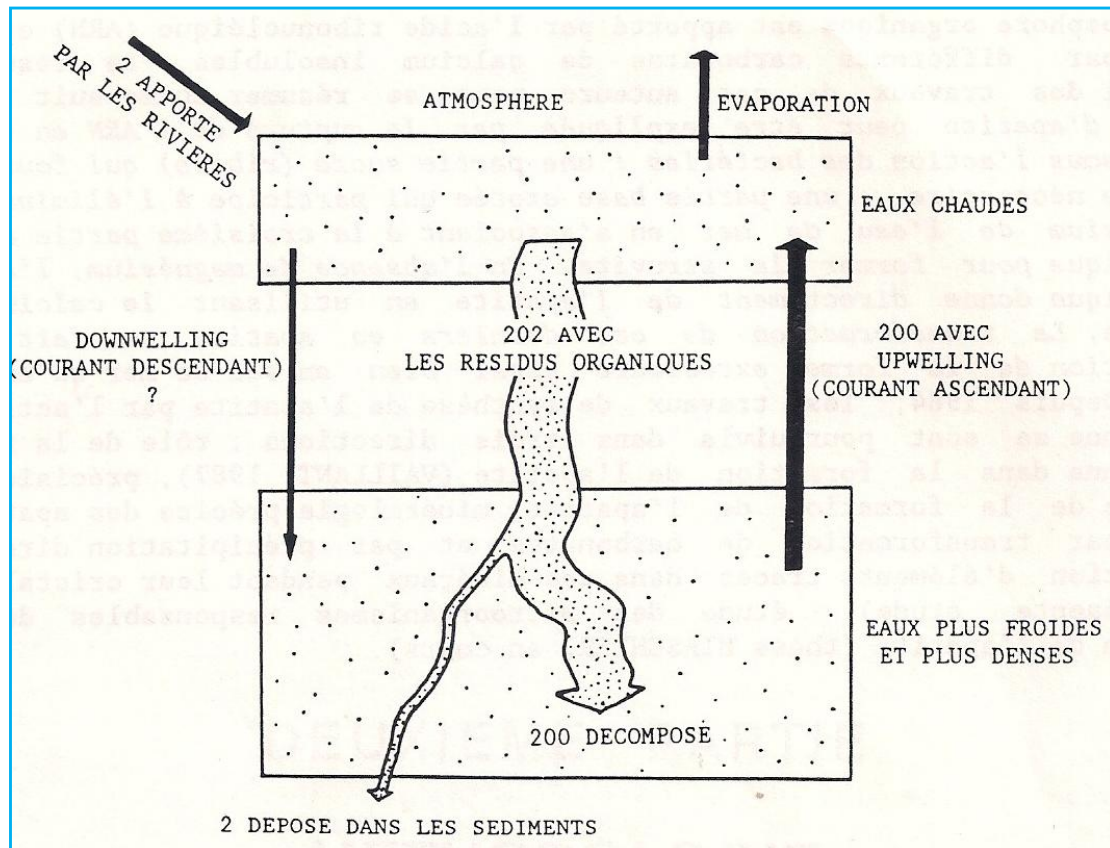


Figure 11: Océan : modèle à deux compartiments. Exemple de cycle simplifié du phosphore (quantité exprimée en dizaines de millions de moles / an (BROECKE, 1974).

### ❖ La genèse de l'Apatite

Lorsque la matière organique, dans laquelle le phosphore est concentré, s'accumule dans des pièges morphologiques liés à l'évolution des marges continentales ( LUCAS et PREVOT, 1975), elle se dégrade par oxydation ménagée ou plus certainement par des bactéries (RAUSCHER et al., 1987) dont la présence dans les phosphorites a été suggérée par un nombre de chercheurs ( CAYEUX, 1936 ; RIVIERE, 1941 ; ZANIN et LETOV, 1984 ; PREVOT et LUCAS, 1986 ). Ces bactéries n'agissent pas dans l'eau



libre, mais dans les eaux interstitielles des dépôts, c'est –à-dire dans une boue riche en matière organique, pendant une période de diagenèse précoce (LUCAS et PREVOT, 1975,1984). Le phosphore libéré suite à la dégradation de cette matière organique réagit avec le calcium soluble ou apporté par des organismes carbonatés pour former l'apatite.

## Conclusion

La synthèse des apatites par transformation des carbonates ou par précipitation directe est possible dans l'eau douce comme dans l'eau de mer. Dans les deux cas, cette synthèse nécessite une activité bactérienne indispensable pour dégrader la matière organique (ARN) et libérer le phosphore. Cette biodégradation est rendue visible grâce aux changements de couleur du milieu de synthèse et au dégagement de CO<sub>2</sub> et d'ammoniac.

Le phosphore minéralisé réagit soit avec le calcium libéré à la suite de la dissolution du carbonate (à un Ph voisin de 8) dans le cas d'une transformation, soit avec le calcium qui se trouve déjà dans la solution et dans le cas d'une précipitation. Dans les deux cas, le phénomène de cristallisation des apatites est rapide et il est très important dans le cas de la précipitation, notamment au début de la synthèse. Il en résulte des précipités de petite taille, donc moins bien cristallisés. L'état de la cristallisation de ces précipités s'améliore en fonction du temps. Malgré leur faible taille, les précipités formés en début de synthèse ont une organisation structurale et une composition chimique identiques à celles des précipités évolués. L'amélioration de la cristallinité est donc due à une augmentation de la taille des cristaux par coalescence et non à un changement minéral. (Mouflih, 1991).

## II. Modèles de la phosphatogenèse

La phosphatogenèse est l'ensemble des processus physico-chimiques et/ou biologiques aboutissant à la formation des dépôts phosphatés. L'unité minéralogique des phosphates sédimentaires est le très petit cristal d'apatite de (2 micromètre) ou moins, très différent des grandes apatites métamorphiques.

L'existence d'un gisement de phosphates dans un bassin sédimentaire dépend notamment :

- ✓ d'une source suffisante en phosphore,
- ✓ des conditions favorables à la formation d'apatite dans les sédiments,
- ✓ et des conditions favorables à la concentration de l'accumulation des éléments phosphatés ainsi formés.

Plusieurs modèles génétiques, le plus souvent divergents, ont été proposés par plusieurs auteurs pour expliquer la formation des gisements phosphatés, dont en voici les plus connus sont:

- pour Kazakov (1937), Cheney et Sheldon (1959), le milieu phosphaté doit largement communiquer avec la haute mer pour permettre l'étalement des courants ascendants, alors que pour d'autre (Ochsenius, 1877, Strakov, 1960 ; Boujou, 1972,1976); la sédimentation phosphatée s'effectue dans des cuvettes séparées de l'océan par des seuils qui empêchent le renouvellement des eaux.

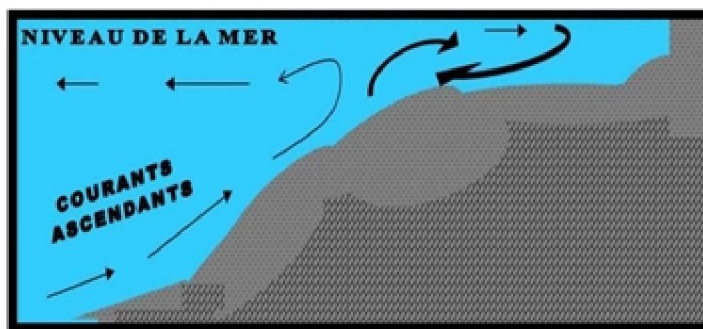


Figure 12: Modèle de (KAZAKOV, 1950)

- Keyser et Cook (1972) étudiant les phosphates cambriens du Nord de Queensland, considèrent que les phosphates se sont formés sur une zone anticlinale, puis étalé de part et d'autre de cette zone haute pour donner du coté interne des sédiments riches en phosphates et du coté externe des dépôts pauvres.

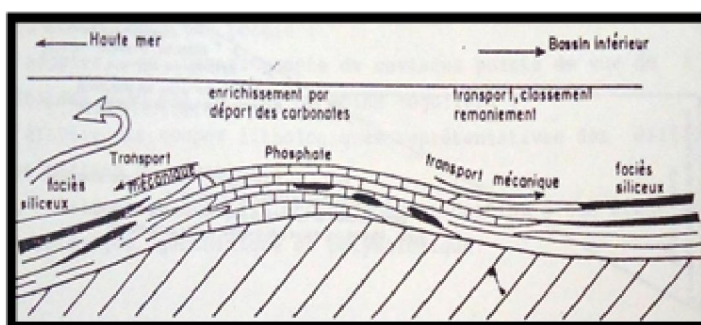


Figure 13:Modèle de (Keyser et Cook, 1972)

- Hite (1974) attribue aux bassins évaporitiques un rôle essentiel dans la formation des phosphates, (1978, Hite et d'autres chercheurs) ont mis en évidence une séquence phosphatée encadrée par deux séquences gypseuses.



Figure 14: Modèle de (Hite, 1974)

- Pour Slansky (1979, 1980) et Lucas et Prévôt (1975), l'existence d'un piège est un facteur primordiale car il permet l'accumulation de la matière organique qui serait indispensable pour la sédimentation phosphatée. il faut remarquer que la notion de piège a été utilisée pour la première fois par (Pevear, 1966) à propos des estuaires qui auraient constitué des « pièges à phosphates ». Ces pièges peuvent trouver leurs origines soit dans des dépressions locales des fonds marins, soit dans des zones éloignées des courants ou protégés de ces derniers par une ride du fond, soit dans une partie d'un bassin partiellement isolé par seuil, soit à l'intérieur d'un golfe étroit.
- Pour Busson (1979, 1980), le confinement morphologique représente un élément essentiel dans la formation des phosphates.

### III. Les sources possibles du phosphore

La plupart des chercheurs (géologues) s'accordent en général pour faire de l'apatite des roches magmatiques la source première du phosphore des dépôts sédimentaires, des divergences de vues existent quant aux mécanismes permettant de passer de l'apatite aux phosphorites des gisements sédimentaires. Quatre théories principales s'affrontent :

- Origine continentale par une alimentation directe en phosphore des sédiments par altération et apports continentaux.

- Origine eaux profondes c.-à-d. une alimentation à partir de solutions préalablement riches et mises en réserve dans les fonds océaniques.
- Origine biologique du phosphore ou source matière organique.
- Origine volcanique suite à des activités volcaniques.

### 1. Source continentale

L'alimentation directe à partir du continent est notamment défendue par (Bushinski, 1964). Il cite à l'appui de cette idée le cas de la Volga qui déverse chaque année dans la mer Caspienne un tonnage très important sous forme de phosphate minéral en solution et sensiblement deux fois plus de phosphore sous forme organique.

La pédogenèse en climat chaud et humide, avec son intensité et son rôle de « filtre séparateur » permet aussi d'accroître l'alimentation du bassin en solutions phosphatées, tout en réduisant l'apport détritique.

Le phosphore se présente en effet sous plusieurs formes dans des sols comme le montre (Walker, 1972) (figure.15) : une partie de la solution minérale issue de l'altération de l'apatite de la roche mère est évacuée hors du profil, une autre conduit à des phosphates organiques tandis que les ions phosphatés restants s'associe à des hydroxydes de Fe et Al. Cette dernière fraction joue un rôle actif dans l'évolution du profil et l'alimentation des plantes jusqu'à ce qu'une pellicule externe d'hydroxydes, ou un concrétionnement, en fasse une fraction phosphatés immobilisée pratiquement inactive dans le profil ou s'accumule avec certains résidus insolubles de la roche mère. La figure suivante schématisé les relations mutuelles entre ces phases, évoquant la possibilité d'un apport extérieur (faible) de phosphate par les pluies.

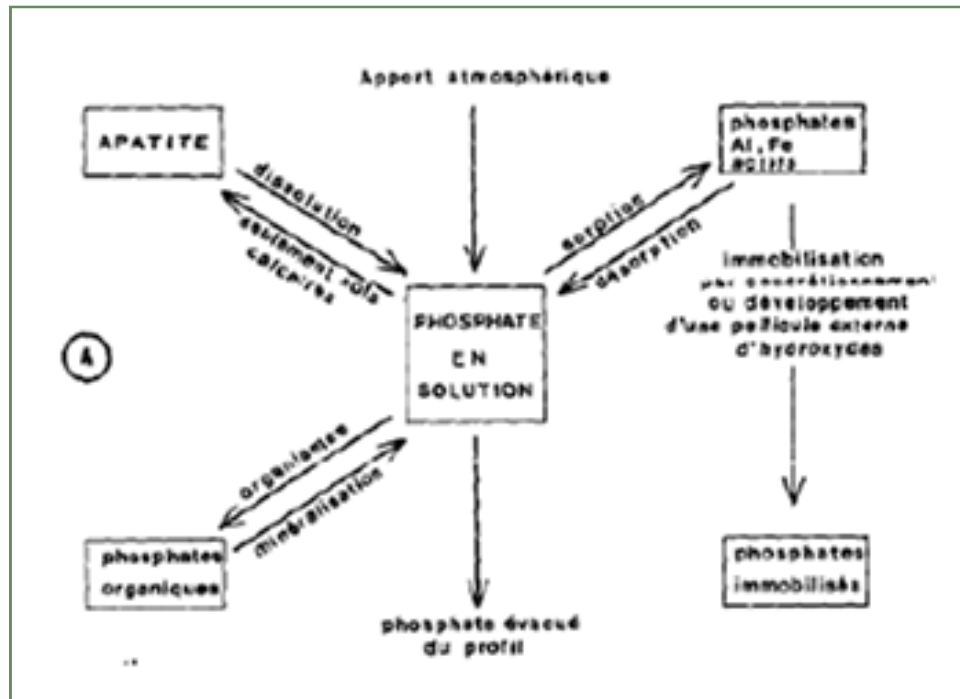


Figure 15 :Forme du phosphore dans le sol (WALKER, 1972), in MOUFLIH, 1980).

## 2. Source eaux marines profondes

La mer contient en moyenne 70 à 75 microgrammes /litre surtout sous quatre formes, en solution ou en suspension :

- ⇒ Sous forme dissoute : ions phosphate et composés organiques solubles du phosphore
- ⇒ En suspension : phosphate insolubles ou adsorbés, et composés organiques

La proportion d'ions phosphate en solution augmente avec la profondeur et ces ions représentent pratiquement le phosphore total à partir de quelques centaines de mètres de profondeur.

Les mesures océanologiques montrent que la quantité de phosphate en solution dans les océans augmente avec la profondeur, jusqu'à 1000 m environ. Parallèlement le pH et la température diminuent. C'est la théorie de Kazakov (Fig. 16). Ce dernier constate que la teneur en  $P_2O_5$  de l'eau de mer croît avec la profondeur à partir du bas de la zone d'oxydation. Son maximum est atteint vers la profondeur de 500m avec un pourcentage important du gaz carbonique (pH diminue). Si les courants ascendants ramènent les eaux profondes vers la surface en remontant le long du talus continental, le départ du gaz carbonique doit fournir la précipitation des phosphates.

Le dépôt du phosphate s'opère, d'après KAZAKOV (1950), à des profondeurs comprises entre 200 et 500m. On admet que cette théorie est une base d'explication satisfaisant.

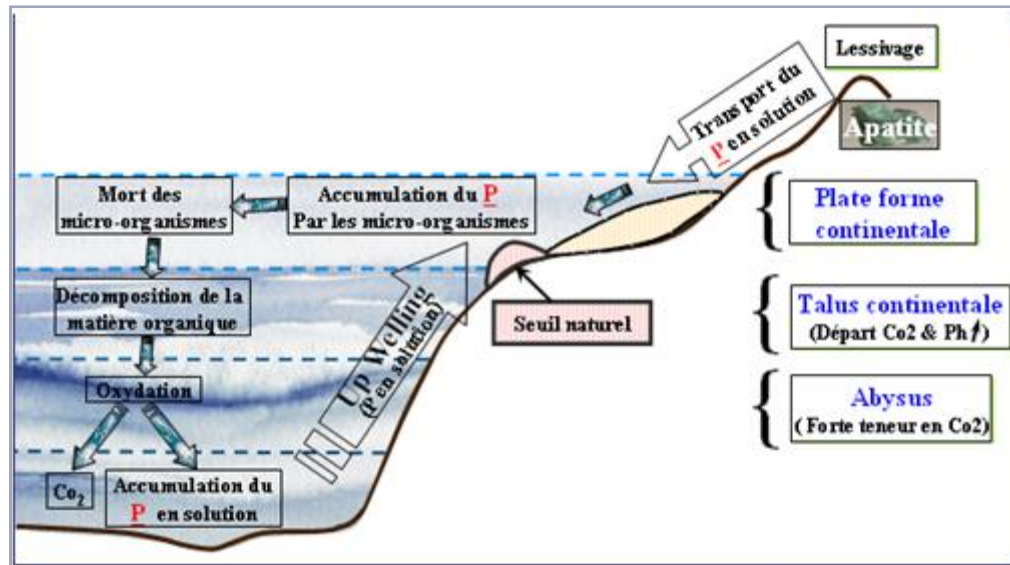


Figure 16 : Mécanisme de formation d'un dépôt phosphaté d'après KAZAKOV(1950).

### 3. Source biologique

Il se limite à l'intervention des organismes (assimilation du phosphore dissout dans les eaux de mers) lorsque les conditions deviennent insupportables (salinité, refroidissement ...) les organismes sont fossilisés et cimentés par la calcite ou rarement la silice.

De nombreux organismes marins concentrent le phosphore. Les algues sont souvent très abondantes dans les mers on constate par exemple que les phéophycées telles que *Laminaria* ou *Fucus vesiculosus* montrent des teneurs moyennes en  $P_2O_5$  sont de 3 à 5 %. Ces algues concentrent d'ailleurs plus le calcium que le magnésium puisque le rapport  $MgO/CaO$  est toujours bien inférieur à sa valeur dans l'eau de mer (3,7).

Le cas du phytoplancton est intéressant à considérer à cause de son association fréquente avec les dépôts phosphatés. Les Diatomées sont très abondantes dans les sédiments à nodules phosphatés du fond des mers.

#### 4. Source volcanique

Divers auteurs ont envisagé la possibilité d'un rôle actif, direct ou indirect, du volcanisme dans la sédimentation phosphatée. Ainsi par exemple Mansfield(1940) pense que le fluor volcanique favorise la formation des minéraux phosphatés.

Les périodes de volcanisme intense ont pour effet d'augmenter la teneur en P des eaux marines, donc le développement du plancton apportant le phosphore aux sédiments. Plusieurs gisements ou dépôts phosphatés sont étroitement associés à des phénomènes volcaniques. Notons toutefois aussi qu'aucune trace de volcanisme n'a été signalée jusqu'à présent dans des grands gisements tels que ceux des montagnes rocheuses, du Maroc, du Togo,...etc.

### IV. Mécanismes de formations des minéraux phosphatés à partir des solutions marines

Dans l'hypothèse de KAZAKOV (1950), le dépôt du phosphate est une précipitation chimique directe par sursaturation au cours de l'ascension des upwellings(eaux froides des fonds océanique enrichies en phosphore, par suite de l'élévation de la température et du pH, et de la réduction de pression de CO<sub>2</sub>). Cette précipitation peut intervenir à partir de 200m de profondeur et s'arrête vers 50m dans la zone de photosynthèse où le phosphate est surtout consommé par le phytoplancton.

- **Milieu de formation de ces minéraux phosphatés**

Dans la plupart des cas, le phosphore concentré par les organismes est remis en solution dans la mer, et dispersé immédiatement après la mort de ceux-ci. Cette dispersion rapide n'est évitée que dans la mesure où il existe dans le bassin un « piège » dans lequel la matière organique puisse s'accumuler. Et c'est à l'intérieur de ce dépôt organique accumulé que, dans des conditions favorables, les apatites sédimentaires vont pouvoir se former. Les boues à diatomées du plateau continental occidental de l'Afrique du sud, dans lesquelles se forment actuellement des concrétions phosphatées, permettent d'avoir une idée des caractéristiques d'un tel dépôt.

## 1. Processus de formation des apatites sédimentaires :

Les carbonate-fluorapatite des dépôts peuvent résulter de trois modes de formations

Principaux : biogenèse, précipitation directe, épigénie.

### **Biogenèse**

La teneur en phosphate de Ca du niveau qui contient les carbonates-fluorapatite dépend ainsi directement de leurs possibilités d'accumulation et de fossilisation. Il en est de même pour les débris de squelettes de poissons ou d'autres vertébrés marins ou littoraux, également riches en phosphate dès l'origine. Ces débris subissent toutefois une évolution diagénétique plus marquée, consistant surtout à transformer le carbonate hydroxylapatite initiale en carbonate-fluorapatite.

Les coprolithes phosphatés sont parfois rangés parmi les éléments phosphatés biogéniques. En fait les pelotes fécales aptes à la fossilisation n'ont que de très faibles teneurs en phosphore (0,2 à 0,4%  $P_2O_5$ ). Aussi, sauf dans l'éventualité d'organismes limivores nourris d'une vase déjà très fortement enrichie en phosphate par une autre voie, la forte teneur des coprolithes ne peut avoir une origine biologique directe.

### **Précipitation directe**

Difficile à concevoir dans un milieu marin ouvert, la précipitation directe de phosphates de Ca peut être beaucoup plus aisément envisagée au sein de dépôts organiques aux eaux interstitielles considérablement enrichies en phosphore.

Pour Baturin, la phosphatisation est un phénomène diagénétique à étapes successives, la première étant le dépôt de gels de phosphates de Ca à partir de solution interstitielles saturées. La structure de la vase initiale est d'abord préservée, puis s'estompe et disparaît au fur et à mesure de la déshydratation et du durcissement pendant lesquels l'apatite cristallise, épigénisant plus ou moins les inclusions non phosphatées.

Deux possibilités de précipitation de phosphate de Ca à partir des eaux interstitielles des vases organiques apparaissent : précipitation directe sous forme d'apatite, ou formation d'un gel initial au sein duquel l'apatite cristallise ensuite.



Les travaux de Martens et Harris(1969) fournissent une explication à cette alternative. Leursexpériences de précipitation de phosphate de Ca en milieux marins reconstitués montrent en effet que selon la valeur du rapport Ca/Mg, un apport de phosphate en solution conduit à la formation d'un gel amorphe de phosphate de Ca ou à la précipitation directe d'apatite cristallisée. A pH 7,5 à 8, ce rapport doit être au moins égal à 5,2 pour que l'apatite précipite. Aux pH inférieurs la valeur limite de ce rapport est plus basse (1,2 à pH 7) tout en restant toutefois supérieure à celle de l'eau de mer, voisine de 0,3. Martens et Harris ont en outre montré que le gel amorphe qui précipite lorsque le rapport Ca/Mg est trop faible, peut évoluer rapidement en apatite si on le place dans un milieu appauvri en ions Mg.

Il donc possible d'imaginer que ce rapport joue un rôle comparable au sein des eaux interstitielles et oriente de la même manière la formation du phosphate de Ca.

Les concentrations en P des eaux interstitielles et les variations des teneurs relatives en Ca et Mg qu'elles sont susceptibles de présenter, permettent donc d'envisager une précipitation directe de minéraux apatitiques au cours de la diagenèse, au sein des vases organiques des milieux pauvres en oxygène. La précipitation de gels amorphes de phosphate de Ca parait par contre moins adaptée aux teneurs moyennes des solutions interstitielles des dépôts à Diatomées ; mais les fortes augmentations de concentration de ces solutions enregistrées par Biturin dans des échantillons stockés permettent d'envisager l'existence au sein du dépôt de zones privilégiées, partiellement isolées dans lesquelles les gels trouvent des teneurs en P suffisantes pour leur formation.

### épigénie

L'examen pétrographique des roches phosphatées montre assez fréquemment des grainsphosphatés nés du remplacement de bioclastes ou de lithoclastes précédemment calcaires. Ces observations ont conduit divers auteurs, Lucien Cayeux, Lucas, 1976), par exemple, à donner à l'épigénie des carbonates un rôle important, voire essentiel, dans la sédimentationphosphatée. Pour sa part AMES, 1959 a montré expérimentalement que de faibles concentrations de phosphate en solution (0,1ppm PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) suffisent pour provoquer un telremplacement qu'il a donc considéré comme mécanisme principal de formation des dépôtsphosphatés marins.( in Mouflih, 1991)

## **2. Déclenchement de la formation des apatites sédimentaires**

Malgré leurs possibilités de concentrer P, Ca, F et de fournir les ions carbonates nécessaires, les vases organiques à phytoplancton n'évoluent pas toutes en couches phosphatées, loin s'en faut. Les conditions supplémentaires nécessaires habituellement proposées pour favoriser cette évolution peuvent être regroupées en deux catégories :

- Modification adaptée des apports
- Zone favorable à la formation des phosphates

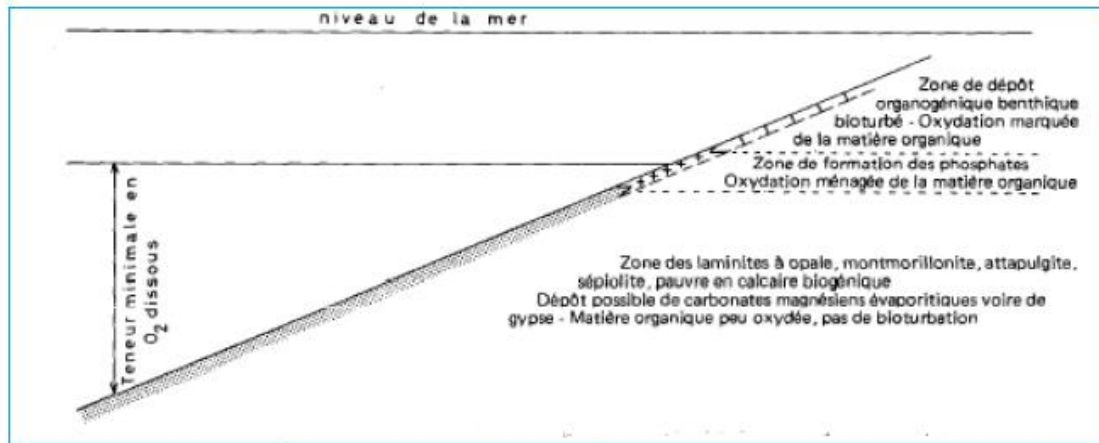
### **2.1. Modification adaptée des apports**

Modification des apports susceptibles de favoriser la sédimentation phosphatée est liée au phénomène des « eaux rouges » qui se produit périodiquement dans les régions à courants ascendants. Ce phénomène, dû à une prolifération particulièrement intense, généralement monospécifique, de Dinoflagellés, peut en effet, s'il est fréquent, d'accroître la part du phosphore dans la fraction minérale du dépôt grâce à la fois aux Dinoflagellés eux-mêmes et aux mortalités de poissons qui l'accompagnent.

Notons qu'un apport massif de poissons dans le dépôt a également pour effet d'augmenter la valeur du rapport Ca/Mg.

### **2.2. Zone favorable à la formation des phosphates**

La zone favorable à la formation des phosphates au sein du dépôt organique, entre la zone à laminites, à matière organique préservée par l'absence de bioturbation, et la zone à dépôts plus largement bioturbés ou l'oxydation de la matière organique s'accroît et où les organismes benthiques enrichissent le dépôt en calcaire biogénique. (Figure. 17) :



**Figure 17 : position schématique de la zone favorable à la formation des phosphates (inMouflih, 1991)**

Plus généralement d'ailleurs, le milieu organique dans lequel se forme le phosphate incite à donner un rôle important aux substances organiques et aux organismes présent. L'action possible d'une enzyme, l'anydrase de la Lingule, au voisinage de son test en francolite, et qu'il a utilisée pour précipiter une carbonate-apatite en milieu artificiel.

D'autres enzymes, des phosphatases produites par des algues, sont susceptibles d'accélérer l'extraction du phosphore contenu dans la matière organique. Inversement des phosphonates organiques peuvent inhiber la croissance des cristaux d'apatite comme l'ont montré Meyer et Nancollas(1973) pour l'hydroxyapatite. Il est donc possible d'imaginer qu'en fonction du milieu, la précipitation de l'apatite sédimentaire puisse être déclenchée et entretenue par des bactéries et certains enzymes, ou au contraire inhibée par d'autres substances organiques.

### 3. Formation des particules phosphatées :

Dans la plupart des cas, la fraction phosphatée des roches sédimentaires se présente sous forme d'éléments figurés bien individualisés de la taille des arénites, et moins fréquemment, des rudites résulte de mécanismes divers qui peuvent être répartis entre cinq groupes :

- remaniement d'éléments phosphatés préexistants
- épigénie d'éléments non phosphatés préexistants ;
- remplissage de cavités ou de milieux poreux,

- phosphatisation de pelotes fécales,
- précipitation directe sur un support.

- Le remaniement d'éléments phosphatés préexistants est évident lorsqu'il s'agit de bioclastes issus de tests de brachiopodes inarticulés constitués de francolite dès l'origine, ou d'éléments de squelettes de vertébrés, évoluant en francolite au cours de la fossilisation.

- La substitution par le phosphate de Ca peut affecter des éléments de nature variée, par exemple des fragments de bois. L'épigénie la plus fréquente est toutefois celle qui concerne des bioclastes ou lithoclastes calcaires : fragments plus au moins arrondis de micrite, débris de tests de Lamellibranches, d'Echinodermes, articles d'encrines. Mais les éléments phosphatés issus de ce seul mode de formation ne sont généralement pas très abondants. Plus fréquents sont les éléments qui combinent plusieurs modes de formations : l'épigénie des tests de Foraminifère est ainsi souvent associée à un remplissage phosphaté des loges et la formation d'une pellicule externe de carbonate-apatite.

- D'autres cavités ou milieux poreux peuvent être également utilisés pour la formation d'éléments phosphatés. De même, des structures algaires ont orienté la formation des phosphatites stromatolithiques précambriennes du Rajasthan, en Inde. Ces cavités ou milieux poreux sont comparables aux « cellules de phosphatisation » à l'issue de l'étude des phosphorites du plateau continental du Nord-Ouest de l'Espagne. Ces « cellules de phosphatisation » sont de petits volumes poreux semi-confinés par rapport à l'environnement général par suite de discontinuités sédimentaires ou biologiques dans lesquels le phosphate de Ca cristallise par précipitation directe ou épigénie. Les éléments phosphatés peuvent naître d'une ou de plusieurs « cellules de phosphatisation » jointives.

- Le rôle des pelotes fécales, c'est-à-dire des coprolithes dans la sédimentation phosphatées, souvent évoqué, est cependant difficile à préciser faute de données détaillées sur les propriétés initiales des déjections des animaux marins. D'après Moore (1955), les pelotes fécales des animaux carnivores sont peu consistantes appartenant aux animaux se nourrissant de vase (limivores). Les déjections des animaux limivores paraissent susceptibles de jouer un rôle comparable dans la

formation des pellets d'apatite ; on peut néanmoins s'interroger sur leur abondance dans le milieu relativement peu oxygéné ou se place la première étape de la formation de la couche phosphatée.

- La précipitation directe du phosphate au sein de la vase à Diatomées paraît bien établie dans le cas des concrétions décrites par Baturin (1970) sur la marge occidentale de l'Afrique du sud, le nourrissage des concrétions se faisant aux dépens des eaux interstitielles environnantes dont la teneur en  $P_2O_5$  descend en dessous du seuil de saturation.

Une fois déclenchée, la précipitation du phosphate semble donc pouvoir se poursuivre grâce aux apports ioniques latéraux ; mais comment s'amorce-t-elle ? Pour Burnett (1974) cet amorçage est lié à l'existence d'un support dont la surface catalyse la précipitation de l'apatite. Dans le cas de la marge continentale péruvienne, ce support est une valve de Diatomée. Les expériences de Stumm et Leckie, 1970 puis de Kanelet Morse, 1978 semblent indiquer toutefois que les meilleurs supports sont des particules calcaires, en calcite ou aragonite. D'autres supports sont également fréquents : tests de Radiolaires, débris osseux, débris de quartz ou de feldspath etc.... Dans un élément phosphaté, la précipitation de l'apatite peut être déclenchée à partir d'un seul support ou « site de nucléation » ou à partir de plusieurs sites, notamment dans le cas des nodules.

Les éléments phosphatés des gisements ont généralement été remaniés après leur formation dont l'étape initiale est ainsi plus ou moins masquée. Il est toutefois possible d'avancer, avec prudence, les conclusions suivantes :

- la précipitation directe sur support calcaire ou siliceux est fréquente. La matière organique paraît jouer un rôle dans cette précipitation. Le support, simple ou multiple, est souvent épigénisé plus ou moins complètement ensuite.
- lorsque l'élément phosphaté s'est formé à l'intérieur d'une cavité, une formation par précipitation directe peut être fréquemment envisagée également.
- les coprolithes bien caractérisés sont assez peu fréquents.

## V. Conditions contrôlant la formation des gisements sédimentaire

Après l'examen des mécanismes de formation des éléments phosphatés, voyons dans quelles conditions ces éléments sont susceptibles de s'accumuler dans les bassins sédimentaires pour former des gisements de phosphatites à teneurs et tonnages économiques. Dans cette optique seront examinés successivement:

- *-Vitesse de la sédimentation phosphatée*
- *-Périodes favorables à la phosphatogenèse*
- *-Régions favorables à l'accumulation des phosphatites*

### V.1. Vitesse de la sédimentation phosphatée

Tous les gisements de phosphatites témoignent d'un faible taux de sédimentation. Au Maroc par exemple, la sédimentation phosphatée est surtout répartie depuis la partie supérieure du Maestrichtien jusqu'au sommet de l'Yprésien, c'est-à-dire sur une période de 15 à 20 millions d'années.

L'épaisseur de cette série varie de 25m, dans la région de Khouribga, à environ 80m dans la région de Youssoufia.

Un ordre de grandeur de la vitesse de la sédimentation phosphatée a été déduit des données de plusieurs lieux: 200000 à 1 millions d'années pour 1m de dépôt. La vitesse de sédimentation n'est certainement pas constante, comme le montrent les variations séquentielles et les discontinuités fréquentes des formations phosphatées. Une évaluation plus théorique de Baturin, 1970, tenant compte de la productivité actuelle en phytoplancton de la marge continentale Occidentale de l'Afrique du Sud, et d'une utilisation optimale du phosphore organique, conduit à estimer à 1 à 2 m l'épaisseur maximale de phosphorites susceptible d'être accumulée en 100 000 ans.

Ces évaluations permettent de souligner que la sédimentation phosphatée est globalement approximativement un phénomène lent inadaptée aux périodes et régions à sédimentation rapides. Un apport terrigène abondant ou une région fortement subsidente apparaissent a priori défavorable à la concentration du phosphate. La formation d'un dépôt phosphaté épais implique d'autre part une longue stabilité des conditions paléogéographiques favorables.

## V.2. Périodes favorables à la phosphatogenèse

Les dépôts phosphatés sont largement répartis dans l'échelle stratigraphique et l'on connaît des gisements ou des concentrations de phosphate, pratiquement dans toutes les périodes géologiques: depuis le Précambrien jusqu'au Pliocène. Voir le (Tableau1) dans le premier chapitre.

La variété de la répartition de la sédimentation phosphatée a donné lieu à un essai d'estimation de l'abondance stratigraphique des dépôts phosphatés (Cook et Elhinny, 1979). Leur évaluation est reportée dans la partie gauche de la (figure. 18). La courbe obtenue souligne plusieurs périodes favorables à la sédimentation phosphatée dont le Cambrien, l'Ordovicien, le Permien, le Jurassique et la base du Crétacé, l'Eocène et le Miocène.

Mais si l'on tente de ne tenir compte que des gisements économiques ou sub-économiques (figure.19) On obtient une répartition stratigraphique des réserves estimées (la partie droite de la figure. 18) qui présente avec la courbe d'abondance des points communs mais aussi des différences. Ces dernières montrent que l'existence d'un gisement de taille économique ne dépend pas uniquement de la fréquence des dépôts phosphatés contemporains connus.

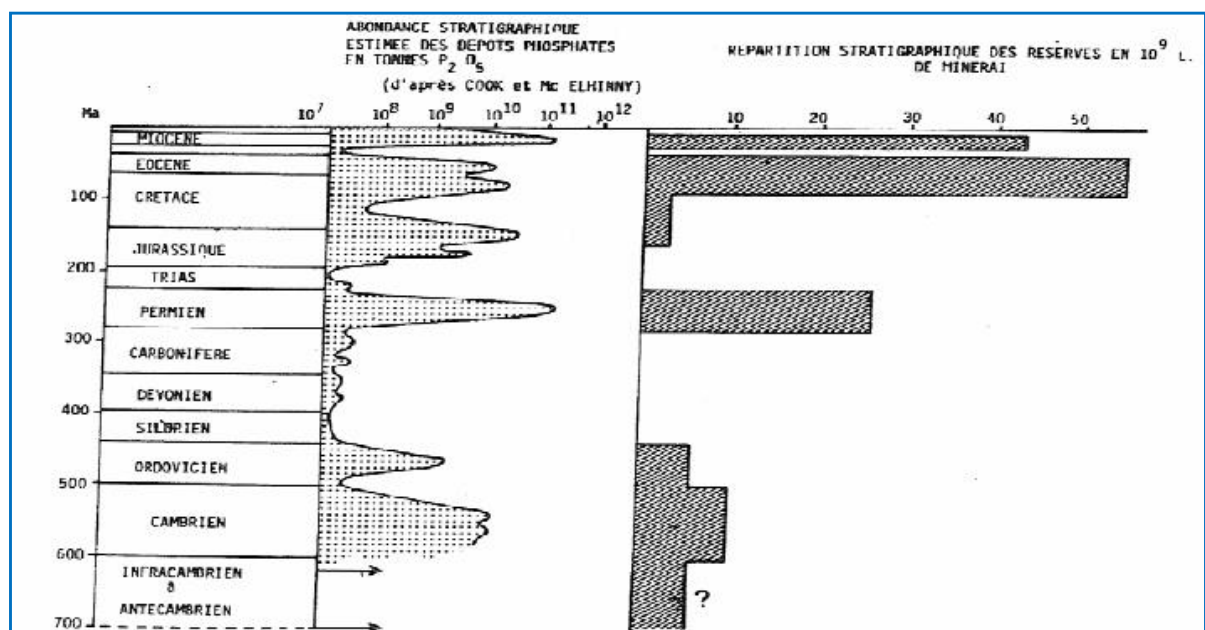
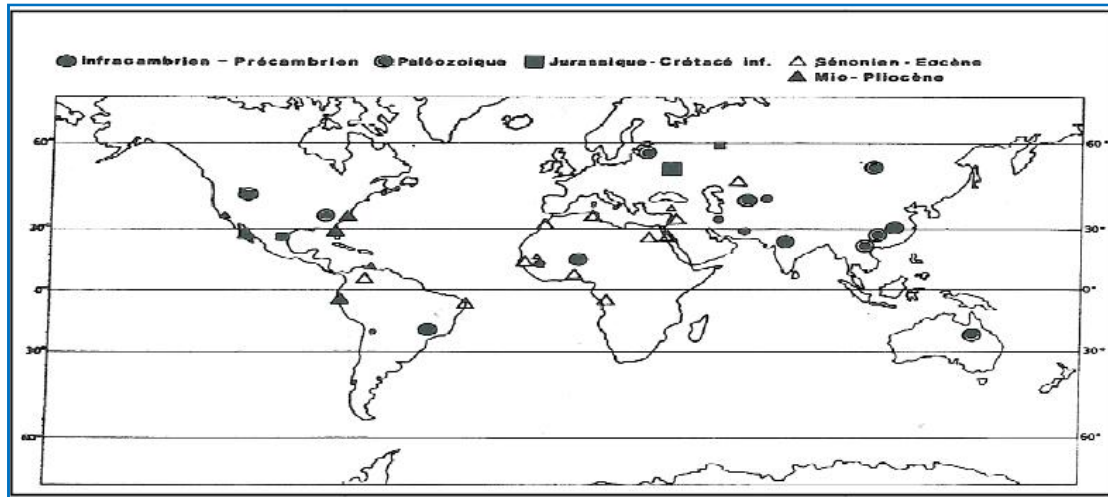


Figure 18 : Répartition stratigraphique des dépôts phosphatés in (Slansky, 1982)



**Figure 19 : Localisation actuelle des principaux gisements de phosphate (Slansky, 1982).**

Malgré une grande répartition stratigraphique de la sédimentation phosphatée, les dépôts et gisement connus soulignent donc l'existence de périodes privilégiées. Quelles sont les caractéristiques sédimentologiques et paléogéographiques de ces périodes ?

Les travaux de Fisher et Arthur (1977) apportent des éléments de réponse à ces questions. Dans l'histoire des océans il y a une alternance de périodes polytaxiques et oligotaxiques.

- Les périodes polytaxiques sont caractérisées par une grande diversification des espèces planctoniques dans des eaux à températures élevées et relativement uniformes; ces eaux sont hautes et s'étalent largement sur des plateaux continentaux très développés, bien alimentés en dépôts organiques d'origine planctonique dont l'augmentation notable de l'épaisseur de la couche à teneur minimale en oxygène des eaux marines favorise la persistance. La profondeur de dissolution intense des carbonates diminue.
- Les périodes oligotaxiques, plus pauvres en espèces, ont des eaux froides et plus basses, des gradients de températures plus marqués qui favorisent les circulations océaniques.

Des conditions plus oxydantes règnent sur des plateaux continentaux de surface plus restreints, moins favorables à la conservation des dépôts organiques. La profondeur de dissolution intense des carbonates augmente. La période actuelle est oligotaxique. Les périodes polytaxiques sont les plus favorables à la phosphatogenèse



notamment parce qu'elles accroissent les réserves phosphatées de la mer grâce au ralentissement des grands courants océaniques, c'est-à-dire à l'augmentation du temps de résidence du phosphore.

L'anomalie, au moins apparente du paléocène montre que les propositions de Fischer et Arthur, qui cherchent en outre à démontrer une périodicité de 32 millions d'années pour les périodes oligotaxique, ne peuvent être suivies dans tout leur détail pour situer les moments favorables à la phosphatogenèse. Ces propositions ont cependant l'intérêt d'éclairer certains aspects importants de la sédimentation phosphatée, lorsqu'est abondante.

Le niveau élevé des eaux marines des périodes polytaxiques a en effet plusieurs conséquences :

- Il limite l'apport terrigène dans les bassins par une atténuation relative des reliefs,
- Il permet d'accroître la surface du plateau continentale favorable aux dépôts phosphatés,
- Il permet le développement de la sédimentation phosphatée des régions marines profondes, sur la plate-forme littorale ou au-delà,

L'augmentation d'épaisseur de la couche marine à teneur minimale en oxygène, qui peut atteindre près de 2000 m d'après Fischer et Arthur, provoque pour sa part:

- le développement dans le bassin des faciès à laminites de type (black shales) riches en matière organique d'origine planctonique,
- la mise en réserve dans ces faciès d'une quantité importante de phosphore qui pourra être restitué aux eaux du bassin, accroissant encore les qualités nutritives des courants ascendants qui s'y produisent.
- un accroissement considérable des processus bactériens de dénitrification qui va entraîner une réduction du rapport N/P des eaux du Bassin. Cette réduction influe sur le développement des organismes planctoniques, ayant pour effet de multiplier les

phénomènes d'eau rouges à dinoflagellés et les mortalités en masse qui leur sont liées, favorisant d' autant plus la sédimentation phosphatée.

Enfin la température élevée des eaux marines est responsable de l'abondance des organismes benthiques calcaires (lamellibranche) sur les fonds situés au dessus de la pycnocline.

Compte tenu de ces diverses remarques, une période favorable à la phosphatogenèse peut être caractérisée par deux types principaux de sédimentation : des laminites riches en matière organique d'origine planctonique, et des faciès organogéniques benthiques généralement calcaires et éventuellement siliceux. Les dépôts phosphatés se situent en position intermédiaire entre ces deux types de faciès en étant plus ou moins influencés par l'un ou par l'autre selon qu'ils se seront formés plutôt sous la pycnocline ou plutôt au-dessus; ils peuvent d'ailleurs se déplacer latéralement ou disparaître en fonction du mouvement des eaux ou des déformations du bassin.

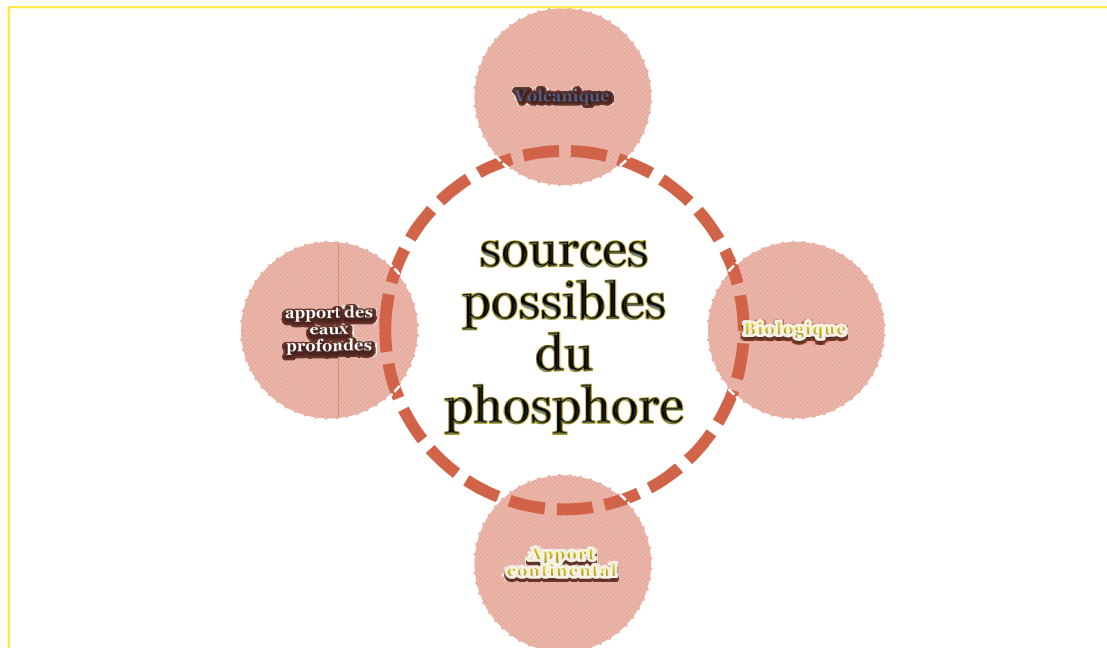
D'un point de vue paléogéographique, les eaux chaudes à faible gradient de température et couche à oxygène minimum épaisse apparaissent a priori peu propices au développement des courants ascendants généralement nécessaires à la sédimentation phosphatée. De tels critères paléogéographiques sont certainement importants dans la définition des périodes favorables à la sédimentation phosphatée ; mais ils sont généralement difficiles à utiliser dans l'état actuel des connaissances.

## Conclusion

La synthèse des apatites par transformation des carbonates ou par précipitation directe est possible dans l'eau douce comme dans l'eau de mer. Cette synthèse nécessite une activité bactérienne indispensable pour dégrader la Matière Organique (ARN) et libérer le phosphore. Cette biodégradation est rendue visible grâce aux changements de couleur du milieu de synthèse et au dégagement de CO<sub>2</sub> et d'ammoniac.

Le fluor, beaucoup plus abondant dans l'eau de mer que le phosphore (GULBRANDSEN, 1969 ; CARPENTER, 1969), ne pose pas de problème, où il serait présent sous forme de CaF<sub>2</sub> coprécipité, avec les CaO<sub>3</sub>. Le problème majeur est le phosphore, car l'eau de mer concentre 1000 fois moins de phosphates que des

carbonates, il est généralement admis que les sources possibles du phosphore se limitent à 4 types dans le cycle suivant:



**Figure 20 : Les différentes sources possibles du phosphore.**

Le phosphore minéralisé réagit soit avec le calcium libéré à la suite de la dissolution du carbonate (à un Ph voisin de 8), dans le cas d'une transformation, soit avec le calcium qui se trouve déjà dans la solution, dans le cas d'une précipitation. Le phénomène de cristallisation des apatites est rapide et il est très important dans le cas de la précipitation.

Parmi les trois modes de formation des apatites sédimentaires évoquées, par exemple dans notre cas du bassin de Gantour ; la précipitation directe et l'épigénie apparaissent comme les plus généraux sans que l'on puisse définir toutefois a priori leur importance relative. La biogenèse, c'est-à-dire l'origine biologique directe des minéraux phosphatés, est moins fréquente malgré sa grande importance locale possible.

Plusieurs chercheurs proposent des modèles génétiques pour expliquer la formation des phosphates sédimentaire, on constate que la Théorie la plus répondu dans notre cas (bassin des Gantour), et celle de KAZAKOV et SHELDON ; qui sont pour un environnement sédimentaire largement ouvert avec la haute mer pour faciliter l'étalement des courants ascendants. En plus, la théorie de BOUJOU, qui propose un bassin fermé, ne possédant qu'une restreinte communication avec la haute mer.

Cette dépression reçoit le phosphore des eaux froides profondes par l'intermédiaire de courants de distribution qui complète l'action des upwellings.

Les dépôts phosphatés du bassin des Gantour sont transgressifs sur un substratum paléozoïque. Cette série phosphatée de 20 à 80 m d'épaisseur est subdivisée en deux systèmes sédimentaires, séparée par une discontinuité à la valeur régionale à supra régionale. C'est une surface de condensation siliceuse à perforation et oxydes de Fer.

- Les dépôts de premier système traduisent trois environnements sédimentaires distincts qui se sont superposés au cours du temps. C'est une plaine côtière, drainée par des chenaux de marée. Celle-ci est protégée de la mer ouverte par des barres sableuses (mégarides ou sandwaves).
- Les dépôts de deuxième système reflètent un environnement marin type plate forme où les variations bathymétriques ont été très sensibles, favorisant tantôt la concentration des phosphates, tantôt sa dilution.

## CHAPITRE 3 : SEDIMENTOLOGIE ET DECOUPAGE SEQUENTIEL DE LA TRANCHEE DE RECHERCHE « BOUT EL MEZOUE »

### I. Localisation géographique de la tranchée

Le gisement de Benguérir constitue la partie centrale du bassin des Gantour. Il a fait l'objet d'une série d'études géologiques de reconnaissance et de valorisation. Les études ont été entamées en 1965, et l'exploitation n'a eu lieu qu'en 1985.

La série phosphatée de Benguérir, est constituée d'une alternance de couches de phosphate séparées par des niveaux silico-carbonatés stériles.

Du bas en haut, la série phosphatée est constituée des couches de phosphate suivantes : Couche 6 – Couche 5 - Couche 4 - Couche 3 - Couche 2 – Couche 1 – Couche 0 – sillon A2 – sillon B.

La mine de Benguérir est située à :

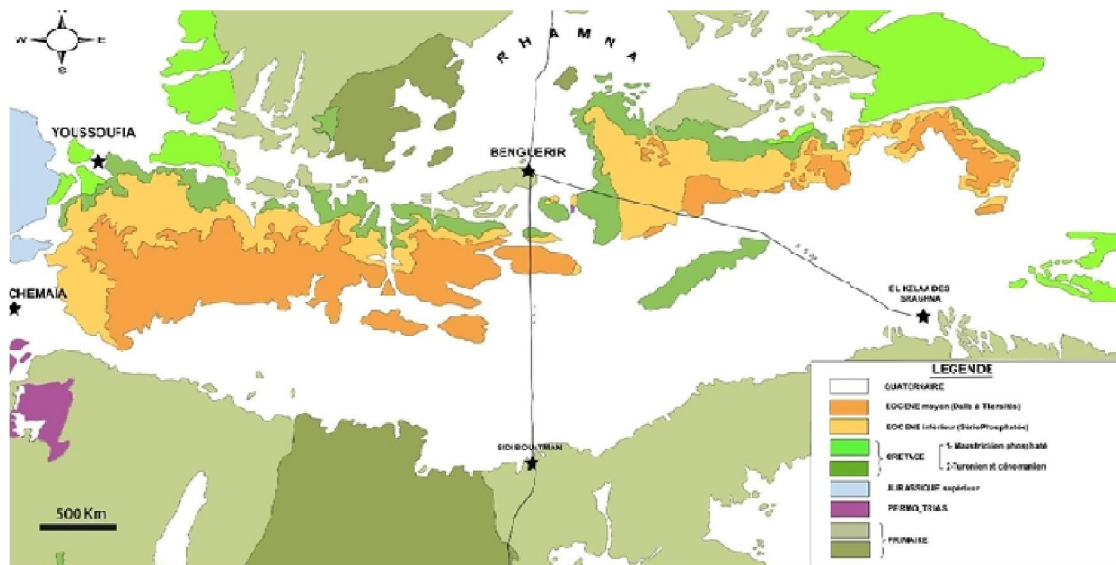


Figure 21 : Situation géographique de gisement de Benguérir :

- 17 km à l'Est de la ville Ben guérir,
- 67 km de Yousseoufia,
- 190 km de Casablanca,
- 70 km de Marrakech,
- 170 km de Safi,

La tranchée de recherche Bout El-Mezoued (*voir la coupe*) est située tout à fait au Nord du gisement de Benguérir sous un bout témoin de la Dalle à Thersités. Cette Tranchée, recoupe l'ensemble de la série existaient sur cette vaste portion des Gantour central. Nombreuses missions de terrain ont été réalisées durant cestage dans le but de dégager les caractéristiques des faciès à Benguérir, puis de réaliser la coupe lithostratigraphie de la Tranchée "Bout El-Mezoud".

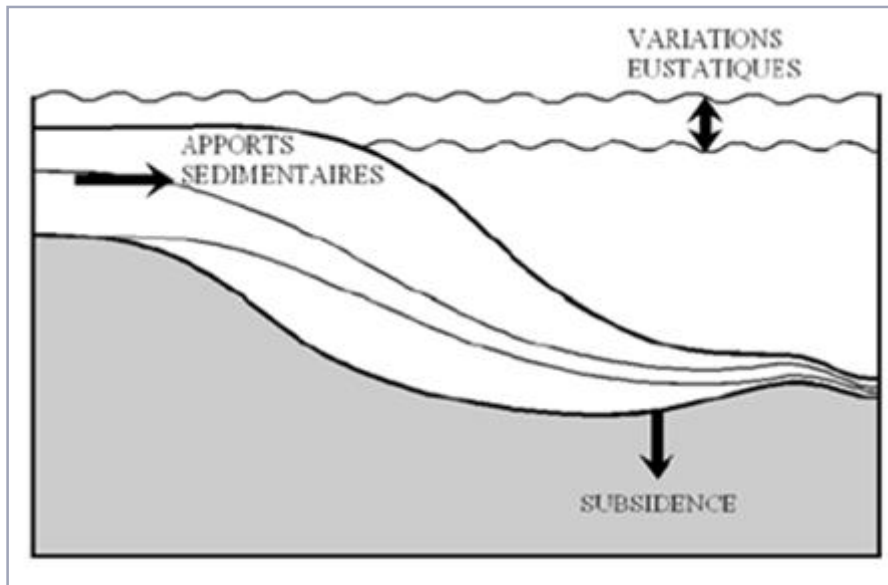
## II. Méthode adopte lors du découpage séquentiel

La succession des faciès sédimentaires se fait selon une logique évoluant dans le temps et dans l'espace, à l'intérieur d'un même bassin sédimentaire. L'analyse séquentielle est un outil qui permet de retrouver cette logique et de reconstituer la paléogéographie de l'aire sédimentaire.

La structure et la position des corps sédimentaires sur un profil plate-forme / bassin dépendent de l'espace potentiellement disponible pour l'accumulation des sédiments. Trois facteurs contrôlent cet espace disponible (VAIL et al, 1987) (fig. 22):

- 1) les variations du niveau marin absolu (eustatisme) ;
- 2) la subsidence qui est un mécanisme de déformation de la croûte dû à l'effet de contraintes tectoniques, isostatiques ou thermiques;
- 3) les apports sédimentaires qui comblent cet espace, considérés constants dans le modèle de stratigraphie séquentielle.

La stratigraphie séquentielle est un outil d'étude des bassins sédimentaires relativement récent, dont l'objectif est de connaître la géométrie des dépôts pour établir des corrélations à l'échelle régionale et de disposer d'un modèle prédictif et reproductible de mise en place des géométries sédimentaires.



**Figure 22 : Principaux facteurs affectant la géométrie des corps sédimentaires (VAIL et al, 1987).**

La stratigraphie séquentielle est fondée sur la reconnaissance, dans l'enregistrement sédimentaire, des séquences de dépôts qui sont composées d'une succession plus ou moins concordante des strates génétiquement liées, limitées à la base et au sommet par des surfaces de discordance ou leur équivalent latéral concordant.

Les paraséquences sont des petites unités de séquence de dépôts, de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Ils sont définis comme une succession relativement concordante de dépôts génétiquement liés, délimités par des surfaces d'inondations marines, ou par les surfaces de concordances équivalentes (VAIL et al, 1987).

L'application de la stratigraphie séquentielle à la série étudiée permet de visualiser les discontinuités sédimentaires qui expriment des ruptures dans les processus génétiques et déchiffrent la rythmicité de la série étudiée. Elle permet également de cerner l'évolution latérale des corps sédimentaires phosphatés.

La récurrence des couches phosphatées dans les phosphates marocains évoque une sédimentation rythmique. Plusieurs auteurs ont traité cette information par l'analyse séquentielle,

- ✓ BOUJOU, 1968 ; en étudiant la série phosphatée du bassin des Gantour,
- ✓ Les travaux de WADJINI en 1979 sur les couches inférieures de Benguérir se basent sur la granulométrie et l'apparition des faciès carbonatés à dolomie pour

définir la séquence élémentaire.

- ✓ MOUMNI en 1982 ; définit quatre mégaséquences dans le bassin Ouled Abdoun en se basant sur la répartition des fractions biogène (coprolithes, bioclastes, débris d'os,.....)
- ✓ BELFKIRA (1983) ; en étudiant le bassin des Gantour, définit les séquences élémentaires et les macroséquences en se basant sur l'évolution granulométrique des sédiments.

A partir de ce bref historique on constate que les études séquentielles des séries phosphatées marocaines se sont basées sur quatre critères, essentiellement :

- ✚ La lithologie,
- ✚ La granulométrie,
- ✚ La répartition des débris biogènes,
- ✚ L'étude statistique,

### III. DESCRIPTION ET DECOUPAGE SEQUENTIELL DE LA COUPE DE TRANCHEE

La série phosphatée des Gantour est formée par plusieurs couches phosphatées puissantes, présentant une concentration en  $P_2O_5$  assez élevée et variée, elle s'étale du Crétacé supérieur à l'Eocène inférieur (Boujou 1972). Cette série est couronnée dans la partie méridionale du bassin par une « Dalle à Thersités » de calcaire siliceux caractérisée par des fossiles (des vertébrés et invertébrés) d'âge Eocène moyen (Boujou, 1972). Cette large faune variée, caractérisant les étages permettent une détermination précise de la stratigraphie de ces dépôts phosphatés.

Dans la tranchée étudiée, la série phosphatée s'étale du Maastrichtien au Lutétien avec des niveaux diverses et se présente sous forme de bancs phosphatés (couches, sillons et faisceaux) et de niveaux stériles à peu phosphatés (intercalaires).

La coupe est composée à la base (la série préphosphatée) par :

- un ensemble de détritiques très fins, d'au moins 49 m de puissance,
- des argiles blanches, et jaunes avec des grés argileux dolomitiques,
- un banc unique de silex (0,1m d'épaisseur).



Notons qu'on s'est basé sur la granulométrie pour déterminer les paraséquences constituant la tranchée et sur les figures sédimentaires pour les séquences de dépôts. Ainsi de la base au sommet de la coupe, six séquences de dépôts sont identifiées qu'on a subdivisé en 13 paraséquences :

Les séquences de dépôt d'âge Maastrichtien :

**-1er séquence de dépôt (D1)**, elle comporte deux paraséquences (P1 et P2)

La première paraséquence (P1) comprend deux niveaux phosphatés, dont le premier (C6), est constitué par une couche de phosphate grossier, grise-beige organo-détritique reposant en général sur des marnes jaunes qui marquent le début de la série phosphatée. Il est surmonté par des phosphates pulvérisés de couleur gris beige. Le deuxième niveau contient une couche peu épaisse à phosphate de type coprolithique (C5/6) à teneur en BPL très élevée et renfermant quelques rognons de calcaire.

La deuxième paraséquence (P2) dont la base est constituée par une couche de phosphate coprolithique légèrement marneuse, organo-détritique (C5). Elle est surmontée par une alternance de marnes et marno-calcaires grises, et calcaires phosphatés, à nombreux lits de silex brun phosphaté et de calcaire siliceux plus dur. On remarque l'apparition d'un niveau phosphaté sableux gris (C4/5) dans quelques endroits avec des passés de marne grise siliceux au centre.

**-2ème séquence de dépôt (D2)**, comporte deux paraséquences (P3) et (P4) :

La première paraséquence (P3) comprend un seul niveau phosphaté (NIV 4/5) c'est un phosphate sableux plus ou moins calcifié avec des rognons de silex phosphatés et quelques passées irrégulières de calcaire gris phosphaté. Ce niveau est surmonté d'une alternance de marno-calcaire.

La paraséquence (P4) : Débute par un premier niveau phosphaté (C4) constitué d'un phosphate grossier à exogangue siliceuse, avec la présence toujours d'une proportion importante des débris de coquilles. Le deuxième niveau (intercalaire C3/C4) est constitué des marnes rosâtres à blanchâtres avec des silex au toit d'un phosphate friable, surmonté par des argiles jaunes rougeâtre, qui présentent un niveau repère de la série phosphatée du Gantour, suivies par des marnes et des marnes siliceux

plus dures que les argiles jaunes.

**-3ème séquence de dépôt (D3)** avec trois paraséquences:

La première paraséquence (P5) comprend un seul niveau phosphaté, c'est la couche (C3) avec son intercalaire. Ce niveau peut être divisé par un calcaire. Le niveau phosphaté est constitué par un phosphate sableux gris brun riche en débris organiques à coprolithes.

La deuxième paraséquence (P6) : qui comprend une seule couche phosphatée (C2), avec un phosphate grossier beige altérés et riche en débris, banc de silex brun au toit et peu de calcaire.

La troisième paraséquence (P7) : comprend un niveau phosphaté oolithique (SX) avec présence des coprolithes et bioclastiques.

**-4ème séquence de dépôt (D4)** d'âge Danien

Elle comporte une seule paraséquence (P8). Deux niveaux phosphatés sont distingués dans cette paraséquence: le premier est constitué par un phosphate d'aspect sableux grossier riche en débris organique calcifié aux toit (C1,0), ici il manque le calcaire à Cardita, puis des marnes grises et marnes siliceuses à quelques passées de silex brun. Le deuxième niveau phosphaté est un phosphate gris plus ou moins calcifié. Ce niveau est surmonté par une alternance de bancs calcaires gris et des marnes jaunes siliceuses.

**-5ème séquence de dépôt (D5)** d'âge Thanétien

Elle contient la paraséquence P9. Le (Sous faisceau A1) est constitué d'un phosphate marneux calcifié, avec la dominance de marnes friables tout au long de ce niveau. Le (Sous faisceau A2) c'est un phosphate dont la puissance est supérieure à 2,50 m dans la majorité du gisement. La dernière partie de ce faisceau est formée par des phosphates meubles gris clairs calcifiés.

Le toit de cette séquence de dépôt est formé par une argile jaunâtre qui constitue un repère lithologique.

### - 6<sup>ème</sup> séquence de dépôt (D6) d'âge Yprésien :

Elle est composée de quatre paraséquences (de P10 à P13) à termes phosphatés nommés par les mineurs en sillons supérieurs de la série phosphatée.

La première paraséquence (P10) commence par un niveau phosphaté grossier coprolithique et siliceuse. Il est surmonté par un phosphate coprolithique d'aspect oolithique : c'est le sillon (SB). Le toit comporte généralement un horizon de marne gris surmonté par des marnes blanches ou parfois par des calcaires phosphatés et quelques passées minces argileuses.

Les paraséquences (de P11, P12, P13) contiennent quatre niveaux de phosphates marneux très coprolithiques (Sillons supérieurs C, D, E et F). Chaque niveau est surmonté par des marnes, dans l'ensemble, sont siliceux et riches en silex. On note que le sillon C est très altéré.

Lutétien : La limite entre Lutétien et Yprésien est difficile à cerner. Elle se situe au sein d'un complexe marno-siliceux «Zone de Transition» et ne montre aucune discontinuité (JOURANI, 1997). Le Lutétien est constitué par des calcaires dolomitiques à gros gastéropodes (Calcaire à Thersitées), où la sédimentation phosphatée disparaît complètement avec un amortissement des couches bien distincte.

## Conclusion général

La synthèse bibliographique sur les modalités de la phosphatogenèse dans les bassins phosphatés dans le monde et au Maroc nous a permis de retenir les conclusions suivantes :

- L'existence d'un gisement de phosphates dans un bassin sédimentaire dépend notamment :
  - d'une source suffisante en phosphore,
  - des conditions favorables à la formation d'apatite dans les sédiments,
  - et des conditions favorables à la concentration de l'accumulation des éléments phosphatés ainsi formés.
  
- Plusieurs modèles génétiques, le plus souvent divergents, ont été proposés par plusieurs auteurs pour expliquer la formation des gisements phosphatés. Cependant la plupart des auteurs s'accordent, aujourd'hui, à admettre l'existence de toute une dynamique phosphatogène dont l'enchaînement s'accomplit au long des étapes suivantes (Kazakov, 1937 ; Baturin et al, 1972 ; Slansky et Fauconnier, 1975 ; Lucas et Prevôt, 1975) :
  - remontée de courants ascendants froids (upwelling-water) riches en éléments nutritifs (P, N, O,...) entraînant une forte productivité biologique
  - accumulation de grandes quantités de matière organique planctonique subissant une minéralisation partielle dans des conditions protectrices permettant la non- dispersion de la matière organique et des éléments issus de sa minéralisation.
  - augmentation de la teneur en anions phosphatés dissous dans les solutions interstitielles sédimentaires permettant la précipitation de phosphate de calcium.
  
- Au Maroc, les dépôts phosphatés peuvent se trouver dans divers niveaux stratigraphiques, mais les plus importants se concentrent seulement à partir du Crétacé supérieur (Maestrichtien) jusqu'à l'Eocène moyen (Lutétien). Les ressources phosphatées marocaines se répartissent du Nord vers le Sud; en quatre principaux bassins sédimentaires économiquement rentables et d'autre moins importants.

- Le phosphate des Gantour s'est déposé dans un golfe long et étroit, ne communiquant avec la mer que par une ouverture située à l'ouest du bassin. Ce golfe englobe aussi les Ouled Abdoun, le bassin du Tadla, et les synclinaux du Moyen Atlas qui occupent une position beaucoup plus interne.
- Du point de vue génétique, la position du bassin phosphaté des Gantour sur la côte occidentale de l'Afrique, les caractères morphologiques de la marge continentale au Crétacé et à l'Eocène et sa position latitudinale basse, sont des facteurs qui ont favorisé l'action des courants ascendants "upwelling-water" dans ce bassin.
- Pour les Gantour, les preuves existent d'une activité organique intense, et de sa contribution à la formation des phosphates. Le phosphate précipite essentiellement de façon chimique, comme n'importe lequel des faciès associés, mais les organismes interviennent dans le cycle de dépôts en participant à sa mise en réserve et à sa libération.

L'analyse séquentielle, de la série phosphaté de la tranché " Bout El Mezoud " nous a permis de mettre en évidence l'existence de six séquences de dépôts qu'on a subdivisé en 13 paraséquences échelonnées depuis le Maestrichtien jusqu'à Lutétien :

- Les trois premières séquences de dépôts d'âge Maestrichtien avec six paraséquences, avec des niveaux phosphatés coprolithiques,
- la quatrième séquence d'âge Danien,
- puis le Thanétien qui comprend la cinquième séquence avec des argiles jaunâtres comme repère lithologique au toit,
- En fin la sixième et la dernière séquence avec cinq paraséquences contenant quatre niveaux de phosphates marneux très coprolithiques.
- Après l'Yprésien (la Dalle) il n'ya aucune surface de discontinuité.

## Bibliographie :

- **AIT ELFALEH, 1988.**, Synthèse des apatites par l'intervention des bactéries, Thèse de Doctorat, Paris, 248p.
- **AMES. L 1959:** The genesis of carbonate apatites. *Economie Géologie* 54, 829-841.
- **ARTHUR, 1985.**, Francolite geochemistry- Compositional controls during formations, diagenesis, 49.
- **AZMANY-FERKHANY, BOUJO et SALVAN (1986)** ; Phosphates, Gites minéraux marocains (Tome 3). Note et Mèm. serv. Géol. Maroc, N° 276.
- **BATURIN, LUCAS, j, Prévot- Lucas. (1995)**, Phosphorus behaviour in marine sedimentation continuous. P- behaviour versus discontinuous phosphogenesis compte rendus de l'Académie des sciences de Paris.
- **BELFKIRA, 1980.**, Evolution sédimentologique et géochimiques de la série phosphatée du Maactrichtien des Ouled Abdoun (Maroc). Thèse Doct. spec. Géol. Appl., Univ. Grenoble, 164 p.
- **BENALI OULHAJ, 1991.**, La formation à phosphates et à schistes bitumineux du bassin des Ouled Abdoun et du bassin de Timahdit; (pétrographie, minéralogie, géochimie et environnement de dépôt), thèse de 3<sup>ème</sup> cycles, Université Louis Pasteur (Strasbourg).
- **BOUJO - D. MARI TON - J. VIAU - L. CHARLOT C. LEMAIRE ET DIANOUX (1968)** ; Caractères géologiques généraux du gisement de Benguerir rapport inédit S.E.G. N° 28
- **BOUJO, 1976.**, contribution à l'étude géologique du gisement de phosphate crétacé-Eocène du Gantour. (Maroc occidentale), Thèse de Doctorat (Université Louis Pasteur de STRASBOURG), 220p.
- **Cheney, T.M., and Sheldon, R.P., 1959**, Permian stratigraphy and oil potential, Wyoming and Utah, in Williams, N.C., ed., Guidebook to the geology of the Wasatch and Uinta Mountains Transition Area: Intermountain Association of Petroleum Geologists, Tenth Annual Field Conference, p. 90–100.
- **Cook, 1972.**, Sedimentary phosphorite deposits, In: handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Amsterdam.

- **Fischer, A.G. & Arthur, M.A. 1977;** Secular variations in the pelagic realm. In: Deep-Water carbonate environments (Ed. by Cook, H.E. & Enos, P.). Soc. Econ. paleontol. Mineral. Sp. Publ. 25, 19-50.
- **HITE, 1978,** Possible genetic relationship between evaporite, phosphorite and iron-rich sediments. The Mountain Geology. p107
- **Kazakov, 1937,** The phosphorites facies and the genesis of phosphorites, Trans, sci. Inst. Fertil
- **KEYSER et COOK (1972),** geology of the middle Cambrian phosphorites and associated sediments of North-western Queensland. Bur. Min. Res. Geol. Geophys. Bul. Canberra, N°138.
- **LABYED, 1997,** Le dénoyage du gisement de phosphate des Gantour, dans la région de Youssoufia.
- **MICHARD, 1976,** The Crétaceus-Tertiary plateaus, pages (331-338).
- **MOUFLIH, 1991,** La série phosphatée du gisement de Benguerir (séquence de faciès, évolution séquentielle, minéralogie et géochimie, Maastrichtien-Lutétien) ; Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Cadi Ayyad (Marrakech) pp 34-55.
- **PIQUE, 1996,** Géologie du Maroc : Géologie du Maroc, Edition PUMAG, 1994 .
- **Prévoit- Lucas, 1975,** (Soc. Sedim. Géol) spec ,Pub.
- **RIGGS, 1982,** Cyclic deposition of Neogene phosphorites in the Aurora Area. North Carolina and their possible- relationship to global sea-level fluctuations. S East geol. 23, 189-204.
- **SALVAN H.M, 1986,** Historique. Notes et mémoire. Service Géologique Du Maroc.
- **SLANSKY, 1980;** géologie des phosphates sédimentaires. Mémoire des BRGM n°114.p36
- **SLANSKY, 1986,** Géology of sedimentary phosphates North Oxford Academie publ. Ltd. London.
- **VAIL, 1987,** Seismic. Stratigraphie interpretation procedure. In : Atlas of seismic stratigraphy
- **WADJINNY, 1979;** Carbonate construction and decomposition by epilithic and endolithic micro-organisms in salt and freshwater. C.R. Acad. Sci. Paris, T. 173, p.322.
- **WALKER. R.G. 1979,** Shallow marine sands. In: facies Models (Ed. By. R.G Walker) Canada.