

Unité 1:

Phénomènes géologiques externes

INTRODUCTION



La géodynamique externe étudie la structure et l'évolution des enveloppes externes de la Terre. Son domaine englobe tous les phénomènes dissipant une énergie qui provient, plus ou moins directement, du rayonnement solaire. L'enveloppe superficielle solide de la Terre : la lithosphère, est entourée de plusieurs enveloppes fluides. L'hydrosphère (Enveloppe liquide) et l'atmosphère (Enveloppe gazeuse). Ce sont des enveloppes dynamiques déterminant l'évolution de l'aspect extérieur de la croûte.

Les roches sédimentaires forment le gros morceau de la croûte terrestre. Elles résultent du transport suivi d'une sédimentation de particules issues de l'érosion, lesquelles, très lentement, se transforment en roche (diagenèse). Elles évoluent donc avec le temps et permettent ainsi aux géologues, grâce à divers indices, de reconstituer l'histoire des paysages.

- **Comment réaliser la carte paléogéographique d'une région ?**
- **Quels sont les principes et les méthodes adoptées pour récupérer l'histoire géologique d'une région Sédimentaires ?**

Chapitre 1:

Réalisation de la carte paléogéographique d'une région

INTRODUCTION:

Un sédiment est le résultat d'une histoire complexe dans laquelle interviennent de multiples facteurs (Altération, transport, dépôt).

Les observations faites dans les milieux actuels, transposées aux phénomènes du passé, permettent de reconstituer certains éléments des paysages anciens (Principe d'actualisme).

Les roches sédimentaires sont donc des archives des paysages anciens.

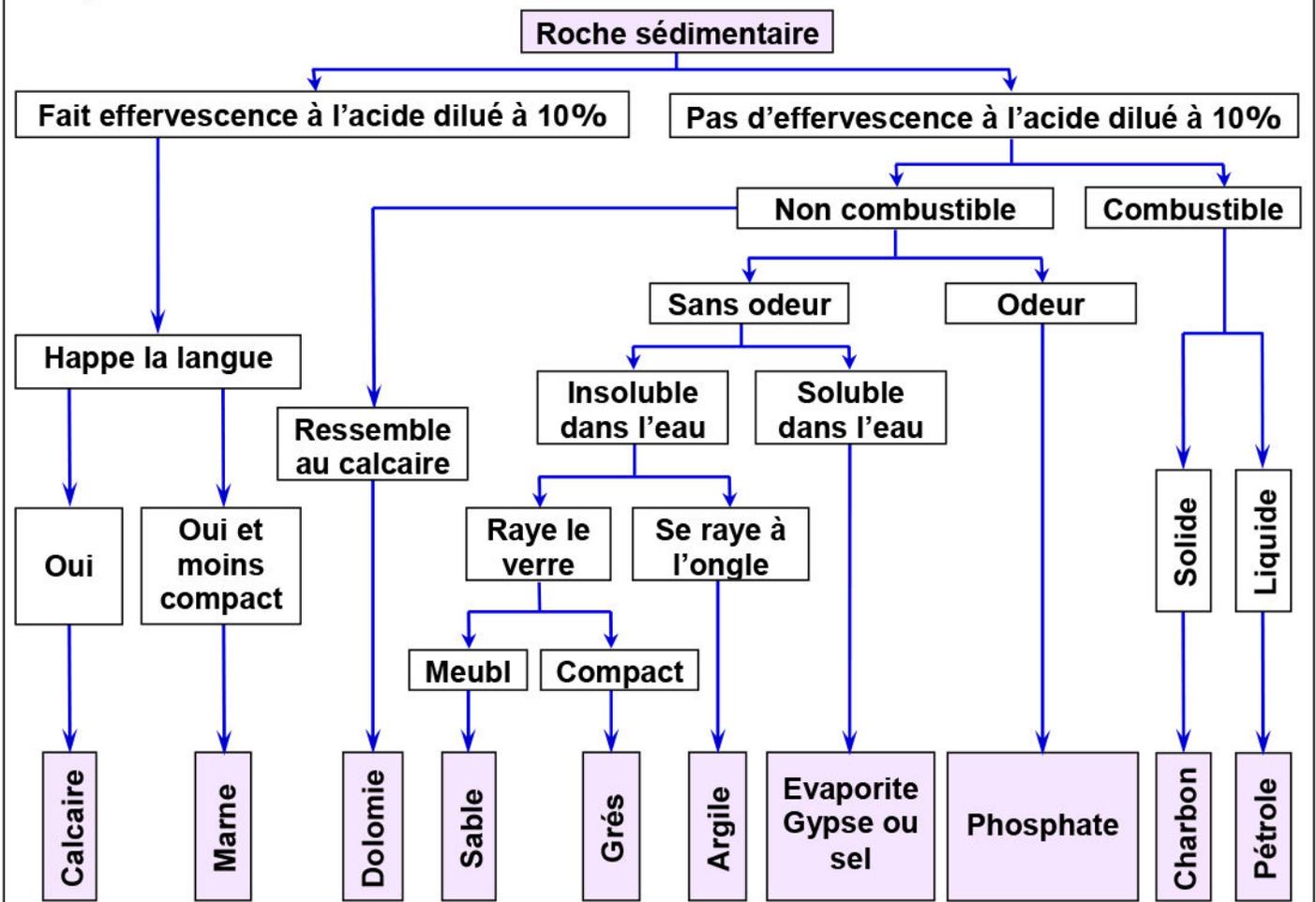
- Quelles sont les propriétés des roches sédimentaires adoptées pour reconstituer les milieux sédimentaires ?
- Comment exploiter les propriétés de ces roches pour déterminer les conditions de dépôt et connaître la nature et les limites des anciens bassins sédimentaires ?

I – Classification des roches sédimentaires:

Une roche sédimentaire se forme à la surface du globe terrestre dans un bassin sédimentaire marin ou continental : c'est une roche exogène. Le document 1 présente les indices permettant d'identifier les roches sédimentaires. (Voir le document 1)

Document 1: Classification des roches sédimentaires:

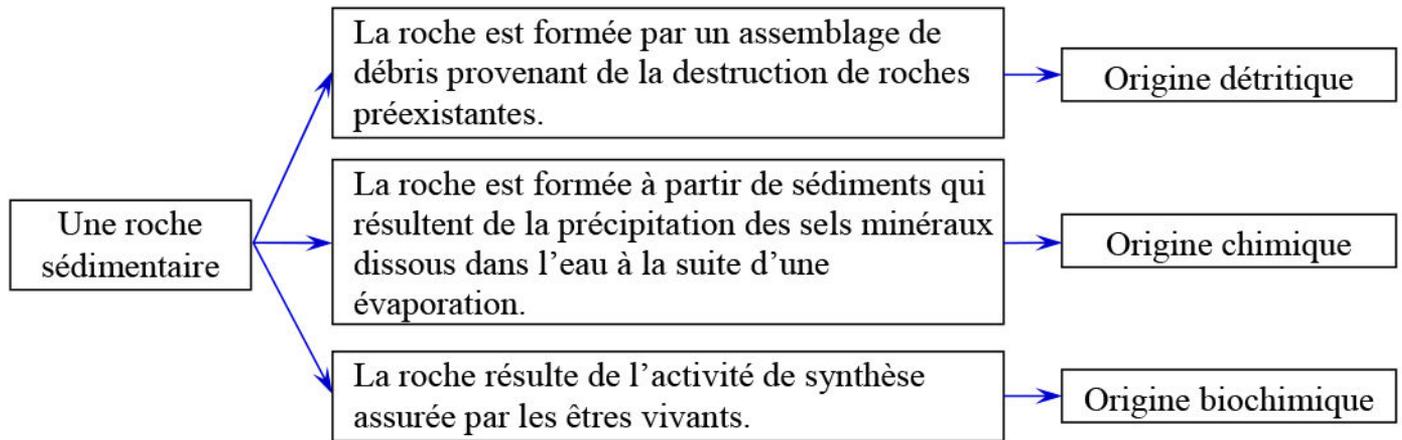
⇒ Figure 1 : Clé d'identification d'une roche sédimentaire :



Document 1 (Suite): Classification des roches sédimentaires :

⇒ Figures 2 : Classification des roches sédimentaires :

❶ Classification selon l'origine des éléments qui les constituent :



❷ Classification simplifiée des roches détritiques:

Nom de la particule	Taille de la particule	Nom du sédiment	Nom de la roche solide	classe
Blocs	> 256 mm	Graviers	Conglomérats (Poudingues si les particules sont arrondies, si non c'est des brèches)	Rudites
Gros cailloux	64-256 mm			
Petits cailloux	2-64 mm			
Sable	1/16-2mm	Sables	Grès	Arénites
Silt	1/256-1/16mm	silts	Siltites	Lutites (pélites)
argile	< 1/256 mm	argiles	argiles	

❸ Classification selon leur composition chimique:

Composition chimique	Classe de roche	Exemple de roche
Silice	Siliceuse	Le silex
Silicate d'alumine	Argileuse	L'argile
Carbonate de calcium	Carbonatée	Calcaire, marne, dolomie
Phosphate de calcium	Phosphatée	Le phosphate
Matière organique	Carbonée	L'antracite
Chlorure, potassium, sodium	Evaporitique	Le sel

En se basant sur les données de ce document et vos connaissances, dégager les critères de classification des roches détritiques.

Selon l'origine et la composition des roches sédimentaires on peut établir un classement assez précis :

★ **Roches chimiques et biochimiques** : elles sont le produit, de phénomènes physico-chimique ou d'une activité biochimique.

⇒ **Roches d'origines chimiques** : formées par des dépôts minéralogiques.

- Les roches carbonatées : ce sont les dépôts formés généralement par précipitation.
- Les roches siliceuses
- Les évaporites : roches salines provenant d'un lessivage continental ou d'une évaporation lagunaire.

⇒ **Roches biochimiques** : sont formées par accumulation de squelettes, de tests ou de constructions d'êtres vivants

- Calcaires d'accumulation
- Calcaires construits ou récifaux : Ils sont formés par l'accumulation, quasiment sur place, des squelettes des organismes constituant les récifs coralliens.
- Roches siliceuses : radiolarites (eaux tempérées), spongolites (spicules d'éponges), diatomites (eaux froides).

★ **Roches détritiques** : elles sont formées de particules minérales issues de l'altération de roches préexistantes.

- Rudites : Ces roches possèdent une majorité de particules dont le diamètre est supérieur à 2 mm
- Arénites : Grains, minéraux compris entre 50 µm et 2 mm
- Pélites ou lutites : Essentiellement siliceuses, les grains font moins de 50 µm. Les minéraux sont généralement des argiles, des micas, des quartzs, de la calcite.

★ **Roches d'origine organique** : elles sont le produit, d'une activité organique

- Charbons : Accumulation de débris végétaux qui sous l'action de micro-organismes anaérobies s'enrichissent en carbone (destruction de cellulose).
- Pétroles : Après l'accumulation de débris organiques en milieu aquatique plus ou moins confiné, il y a transformation des lipides et protéines en hydrocarbures par des micro-organismes.
- Bitumes : Il s'agit d'une forme plus ou moins solide d'hydrocarbure, liée soit à des calcaires soit à des schistes. Ces hydrocarbures peuvent, après traitement, fournir du pétrole exploitable.

II – Etudes statistiques et morphoscopiques des sédiments:

① **Les figures sédimentaires** : (Voir le document 2)

Document 2: Les figures sédimentaires:

Le document présente des photos de quelques figures sédimentaires



Figure 1: Rides actuelles (Ripple-marks).



Figure 2: Rides anciennes (ripple-marks) (-200Ma).



Figure 3: Fentes de dessiccation (Mud-cracks)

Le document présente des photos de quelques figures sédimentaires :



Figure 4: Fentes de dessiccation anciennes



Figure 5: stratification entre-croisée (Cross-bedding)



Figure 6: Terriers à la surface d'un banc.

Décrivez les différentes formes sédimentaires et montrez leurs intérêts dans la connaissance des dynamiques des milieux sédimentaires

Les figures sédimentaires sont des structures qui s'observent sur les roches sédimentaires.

- ★ Les rides (Ripple marks), sont liées à l'écoulement d'un fluide (Eau ou vent) sur les sédiments détritiques.
- ★ Les fentes de dessiccation sont des fissures s'ouvrant dans un sédiment fin qui se dessèche. Elles marquent dans un sédiment ancien une période d'émersion et un climat aride.
- ★ La stratification entrecroisée est une organisation litée avec des fines couches obliques par rapport aux joints de stratification. Les couches les plus jeunes recoupent les plus anciennes. Cette stratification entrecroisée apparaît dans des zones où les conditions hydrauliques varient lors de la sédimentation, comme les rivières (alternance de crues et décrues).
- ★ Les terriers (Abri souterrain creusé par un animal dans la terre) : Par leur activité, les êtres vivants peuvent perturber la surface du sédiment laissant des traces qui peuvent être fossilisées (Empreintes de pas de dinosaures). Ces traces constituent des indicateurs de l'activité des organismes lors de la sédimentation (Indicateurs d'environnement).

Les figures sédimentaires peuvent donc constituer un important indicateur des conditions qui dominaient dans des milieux sédimentaires anciens.

② Dynamique et agents de transport des sédiments :

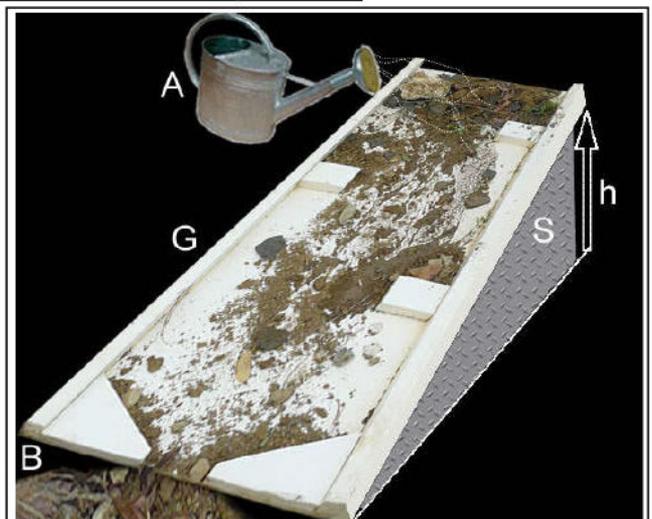
Le transport des sédiments est assuré par les agents de transport, comme l'eau, le vent, la pesanteur, les glaciers... L'importance de ces agents varie d'une région à l'autre et d'une période à une autre.

a) Relation entre le courant et les particules transportées

⇒ **Manipulation** : (Voir document 3)

Document 3: Relation entre le courant et les particules transportées:

On dépose dans la partie supérieure de la gouttière (G), un mélange de 500g de sable, 500g de graviers et 500g de cailloux. On verse sur ces éléments une quantité d'eau par l'arrosoir (A). Le bassin (B) sous le bord inférieur de la gouttière, reçoit les éléments transportés par l'eau. Le tableau résume les résultats de deux manipulations effectués pendant la même durée, avec l'utilisation d'un support (S) de hauteur (h) respectivement 30cm et 50 cm.



	h = 30cm	h = 50cm
Sable	344	484
Graviers	28	185
cailloux	0	46
total	372	705

- 1) A partir de l'analyse des résultats de ces manipulations, déterminer la relation qui lie la hauteur (h) et la vitesse du courant dans la gouttière, la vitesse du courant et la quantité de matière transportée, la vitesse du courant et la taille des éléments transportés.
- 2) Faite le lien entre le modèle expérimental et la pente de la vallée dans la nature.

1) A partir de l'analyse des résultats des manipulations, on peut dire que:

- ★ Plus la valeur de la hauteur (h) du support (S) augmente, plus la vitesse du courant d'eau dans la gouttière augmente.
- ★ Plus la vitesse du courant augmente, plus la quantité de matière transportée augmente.
- ★ Plus la vitesse du courant augmente, plus la taille des éléments transportés augmente.

2) Nous concluons donc que le transfert d'éléments sédimentaires est le résultat de deux forces:

- ★ La puissance du jet d'eau liée au débit du liquide et à la pente.
- ★ La force du poids des éléments mobiles (gravité), liée aussi à la pente.

Le débit et la vitesse sont les principaux facteurs qui déterminent l'énergie à développer par un courant d'eau et de là son pouvoir érosif. La formule suivante explique cette relation:

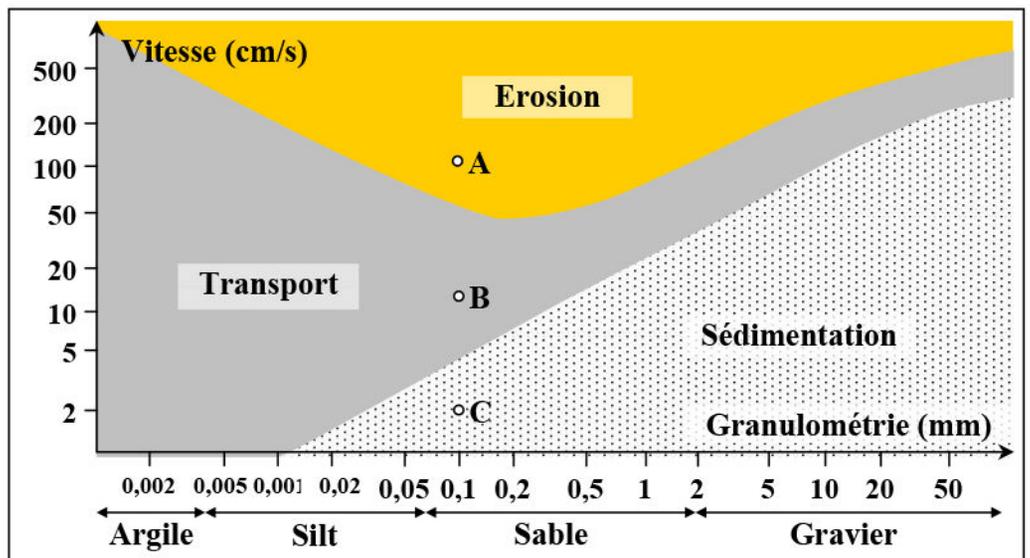
$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 \quad (E = \text{L'énergie motrice}, M = \text{La masse en mouvement}, V = \text{La vitesse de la masse en mouvement})$$

⇒ **Relation entre la vitesse du courant et la taille des éléments transportés:**
(Voir document 4)

Document 4: Diagramme de Hjulström :

Le diagramme de Hjulström permet de relier la vitesse d'un courant à son action sur des matériaux de granulométrie variée.

Le fond d'un chenal est tapissé de particules dont les diamètres sont connus et on observe leur comportement lorsque la vitesse du courant varie.



- 1) A partir de l'analyse du diagramme de Hjulström, indiquer l'attitude des particules de 0,1mm de diamètre, en A, B et C.
- 2) Pour un courant de vitesse égale à 100 cm/s, quel est le diamètre maximal des particules qui peuvent être transportées?

1) Pour les particules de 0,1mm:

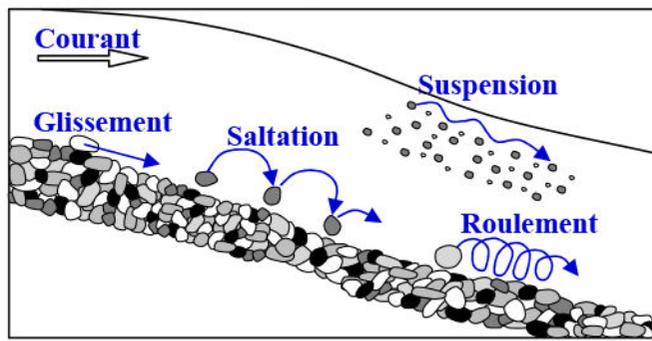
- ★ En A: la vitesse de l'eau est élevée (100cm/s). L'eau circulant à une grande vitesse va séparer les particules et les transporter vers l'aval du chenal (il y a érosion).
- ★ En B: la vitesse est plus faible (14cm/s). L'eau transporte ces particules si ces dernières sont dissociées, par contre, elle ne pourra pas les arracher du fond du chenal où la cohésion des particules est suffisamment importante (il y a exclusivement transport).
- ★ En C: la vitesse du courant est très faible (2cm/s). Les particules qui arrivent dans le chenal se déposent sur place (il y a sédimentation).

2) Pour un courant de vitesse égale à 100 cm/s, le diamètre maximal des particules qui peuvent être transportées est 10 mm.

Document 5: Modes de transport des particules dans un courant:

La vitesse du courant d'eau augmente du fond vers la surface, ce qui constitue un gradient de vitesse. Le dessin ci contre présente les différentes modalités de transport des sédiments par un courant d'eau.

En exploitant les données de ce document, décrire les différentes modes de transport des sédiments par les courants d'eau.



Dans les cours d'eau, les mouvements des sédiments sont variables dans le temps et dans l'espace. Pour un même écoulement liquide, ces mouvements dépendent de la taille et de la densité des particules.

Plusieurs modes de transport ont été observés:

⇒ **Transport par suspension**

La charge en suspension est constituée par des matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Le transport en suspension est en général constitué de matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de limons.

⇒ **Transport sur le fond:**

La charge de fond est formée de matériaux trop grossiers pour être mis en suspension à cause de leur densité et de la vitesse du courant. Ces particules glissent, roulent ou se déplacent par saltation (transport par bonds, suite à des chocs successifs) sur le fond du chenal.

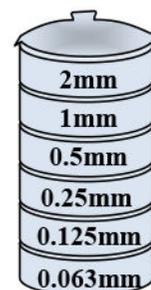
③ **Etude granulométrique des sédiments:**

a) **Analyse granulométrique du sable : (Voir document 6)**

Document 6: Analyse granulométrique du sable:

L'analyse granulométrique nécessite l'utilisation d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Les étapes sont :

- Prendre un échantillon de sable ;
- Dans un tamis de 0.063mm de diamètre de mailles, laver le sable par l'eau pour se débarrasser de l'argile et du limon ;
- Traiter le sable par l'HCl pour éliminer le calcaire, puis l'eau oxygénée pour éliminer la matière organique ;
- Rincer le sable et le sécher ;
- Déposer une quantité de 100g de chaque échantillon de sable dans une colonne de tamis ;
- Mettre à vibrer la colonne sur la tamiseuse pendant 15mn ;
- Peser les fractions retenues par les tamis successifs (Refus).



Réaliser la manipulation décrite par ce document et déterminer le pourcentage de chaque fraction.

b) Exploitation des résultats:

L'analyse granulométrique consiste à étudier la distribution dimensionnelle des différents grains d'un échantillon de sable sec (granulat), en fonction de la taille (diamètre). Cette analyse se fait par tamisage.

Pour exploiter les résultats de l'analyse granulométriques, on suit les étapes suivantes:

⇒ Etape1: Calcul des pourcentages de refus et de refus cumulés:

Après avoir fractionné les 100g de sable sec en plusieurs classes granulaires, on effectue les opérations suivantes:

- On pèse le refus du tamis ayant la plus grande maille: soit R_1 la masse de ce refus.
- On poursuit la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus.
- Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m_1 .
- Les pourcentages de refus et de refus cumulés pour chaque tamis seront déduits.

Classe Granulométrique (Diamètre des particules)	$\emptyset > 2$	$2 \geq \emptyset > 1$	$1 \geq \emptyset > 1/2$ [1-0.5 [$1/2 \geq \emptyset > 1/4$ [0.5-0.25 [$1/4 \geq \emptyset > 1/8$ [0.25-0.125[$1/8 \geq \emptyset > 1/16$ [0.125-0.063[
% Refus	a	b	c	d	e	f
% Refus Cumulé	a	a+b	a+b+c	a+b+c+d	a+b+c+d+e	a+b+c+d+e+f

⇒ Etape 2: représentation graphique des résultats: (Voir document 7)

Document 7: Représentation des résultats de l'analyse granulométriques:

Les résultats de l'analyse granulométrique sont représentés graphiquement par un histogramme et une courbe de fréquence.

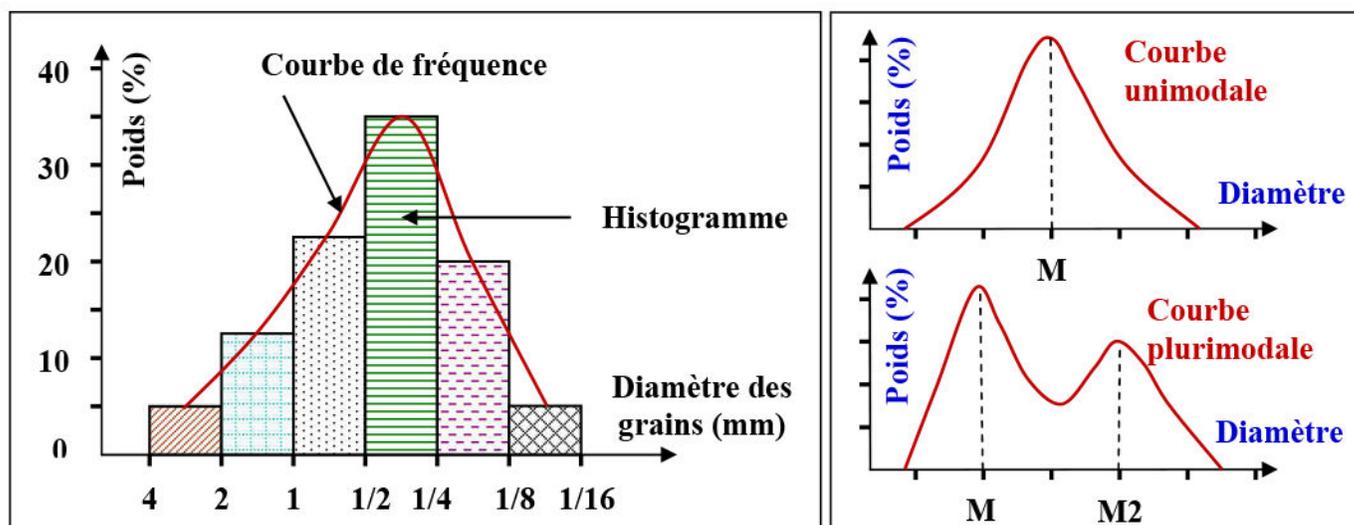


Figure 1 : Histogramme et courbe de fréquence

A partir de l'analyse de la courbe de fréquence on déduit que:

- ✓ Si la courbe de fréquence est unimodale (Un seul pique), le sable est homogène (Plage, éolien ou fluvial).
- ✓ Si la courbe de fréquence est plurimodale (Deux ou plusieurs piques), le sable est hétérogène (mélange de plusieurs sables).

Document 7: Suite:

A fin de caractériser les sables analysés, on trace une courbe cumulative du poids de diverses fractions en additionnant successivement les fractions obtenues.

La courbe des fréquences cumulées croissantes nous permet de retrouver les quartiles Q_1 et Q_2 et la médiane Md .

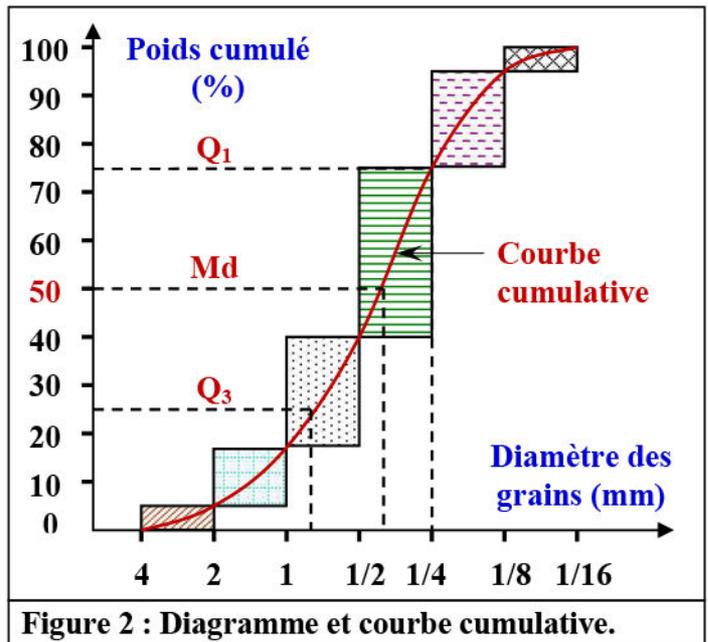


Figure 2 : Diagramme et courbe cumulative.

Pour représenter les distributions granulométriques, on porte les divers pourcentages des refus et de refus cumulés sur un papier millimétré et on réalise :

- Des histogrammes ou diagrammes à colonnes: (Figure 1, document 7)

Ils sont formés de rectangles jointifs dont les bases respectives représentent les intervalles de classes sur une échelle logarithmique et dont les hauteurs correspondent aux fréquences des différentes classes, sur une échelle arithmétique.

- Des courbes cumulatives: (Figure 2, document 7)

Elles représentent les variations des pourcentages en poids cumulés des sédiments sur une échelle arithmétique en fonction de diamètre des grains sur une échelle logarithmique.

⇒ Etape 3: Interprétation des résultats:

★ Courbe de fréquence :

- Si la courbe de fréquence est unimodale, cela signifie que le sable étudié est homogène et on peut dire par la suite que les sédiments n'ont pas subi de remaniement liés au courant (courant stable).
- Si la courbe de fréquence est multimodale, cela signifie que le sable étudié est hétérogène ; on peut penser que les sédiments ont été remaniés et que la force du courant n'est pas constante (vagues de marées).

★ Courbe cumulative :

La courbe cumulative permet de retrouver les quartiles :

- Q_1 qui est la valeur du diamètre des grains correspondant à l'ordonnée 75% des fréquences cumulées.
- Md (Médiane) qui est la valeur du diamètre des grains correspondant à l'ordonnée 50% des fréquences cumulées.
- Q_2 qui est la valeur du diamètre des grains correspondant à l'ordonnée 25% des fréquences cumulées.

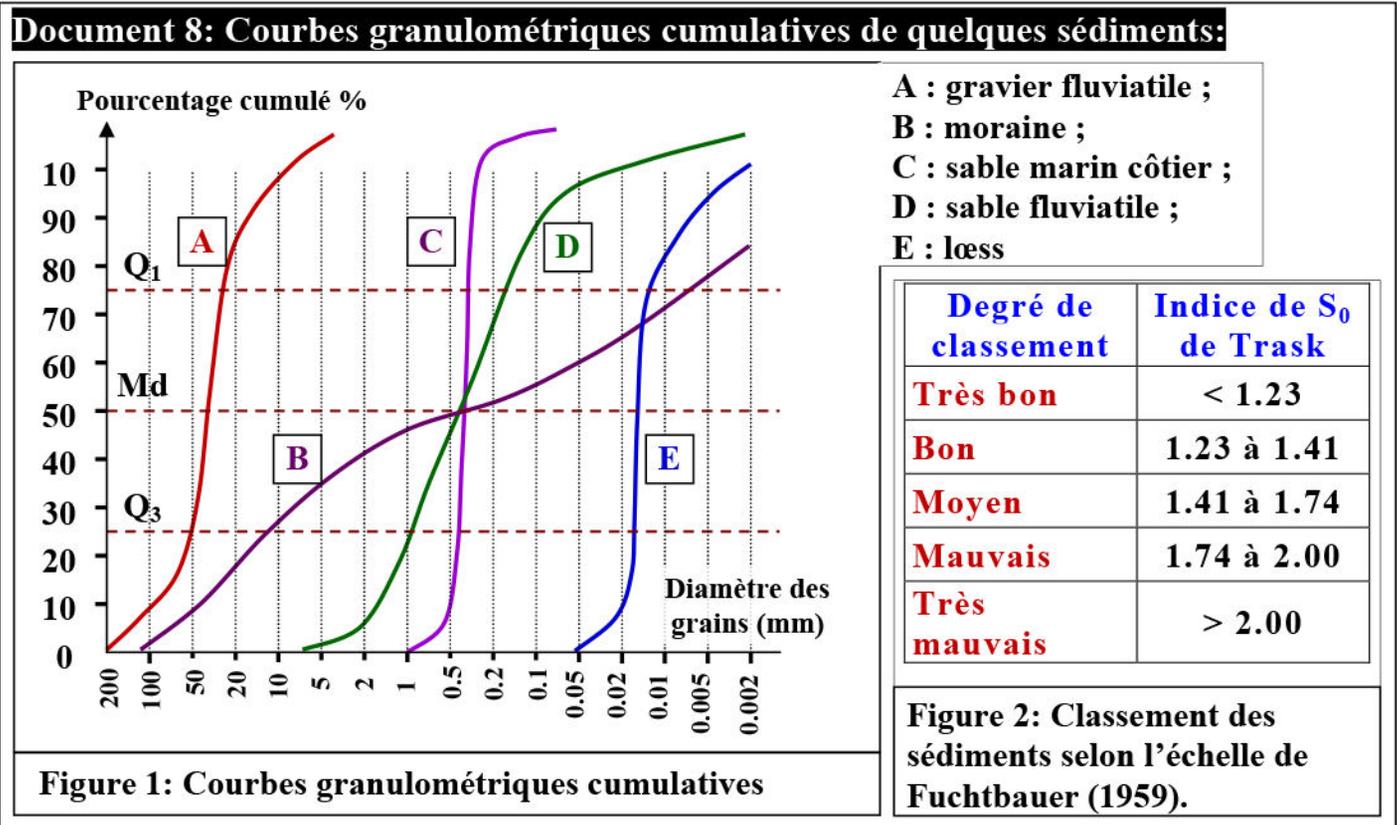
La courbe cumulative permet de calculer l'indice de classement de Trask S_0 :

$$S_0 = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}$$

Exemple : à partir de la figure 2 du document 7 :

$Q_1 = 0.25$, $Q_3 = 0.8$ donc $S_0 = \sqrt{0.8/0.25} = 1.79$

L'indice de classement de Trask S_0 permet de déterminer le type de classement qui caractérise le sédiment étudié et déduire l'environnement de dépôt, en utilisant l'échelle de Fuchtbauer (1959), (Voir document 8).



$1.74 < S_0 < 2 \Rightarrow$ d'après l'échelle de Fuchtbauer, ce sédiment présente un mauvais classement, ce qui caractérise le sable fluviatile.

c) Conclusion:

Les études morphoscopiques et statistiques des sédiments contribuent à la reconstitution de l'itinéraire évolutif probable de ces sédiments, et permettent la reconstitution de la paléogéographie du milieu sédimentaire.

d) Exercices:

\Rightarrow **Exercice 1:** (Voir document 9)

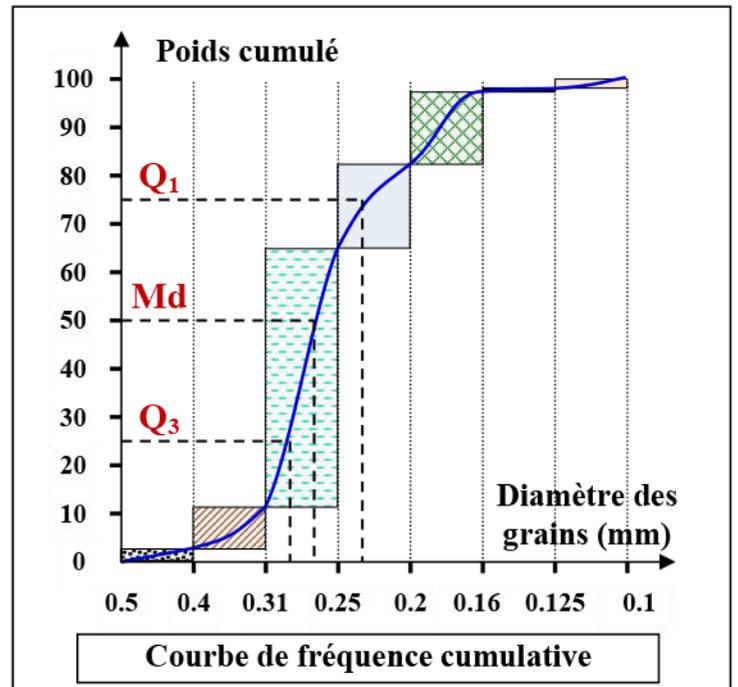
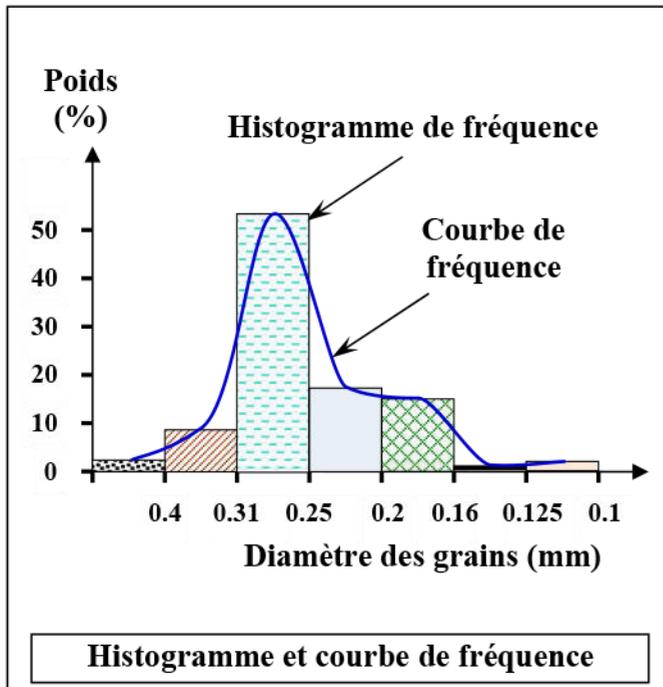
Document 9: Exercice 1:

Le tamisage d'un échantillon de sables anciens a donné les résultats indiqués dans le tableau suivant :

N° du tamis	1	2	3	4	5	6	7
Diamètre des mailles	0.4	0.31	0.25	0.20	0.16	0.125	0.1
Refus	0.6	12.8	69.8	23.8	20.9	0.3	0.4
Pourcentage	0.47	9.95	54.28	18.51	16.25	0.23	0.31
Pourcentage cumulé	0.47	10.42	64.7	83.21	99.46	99.69	100

- 1) Complétez le tableau puis construire sur le même graphique, l'histogramme et la courbe de fréquence. En utilisant les données du tableau, tracer la courbe cumulative
- 2) Retrouver les quartiles Q_1 , Md et Q_3 puis calculer l'indice de Trask S_0 .
- 3) Quelle conclusion peut-on tirer sur le classement de cet échantillon de sable ?

- 1) Calcule du pourcentage des refus : voir tableau sur le document ;
Construisons l'histogramme, la courbe de fréquence et la courbe cumulative:



2) $Q_1 = 0.23$; Md = 0.26 ; $Q_3 = 0.27$; L'indice de Trask $S_0 = \sqrt{0.27/0.23} = 1.08$

3) $S_0 < 1.23 \Rightarrow$ d'après l'échelle de Fuchtbauer, ce sédiment très bien classé.

\Rightarrow **Exercice 2:** (Voir document 10)

Document 10: Exercice 2:

Le tableau suivant présente les résultats granulométriques de trois échantillons de 100g de sable : E₁, E₂ et E₃, prélevés de trois milieux sédimentaires différents:

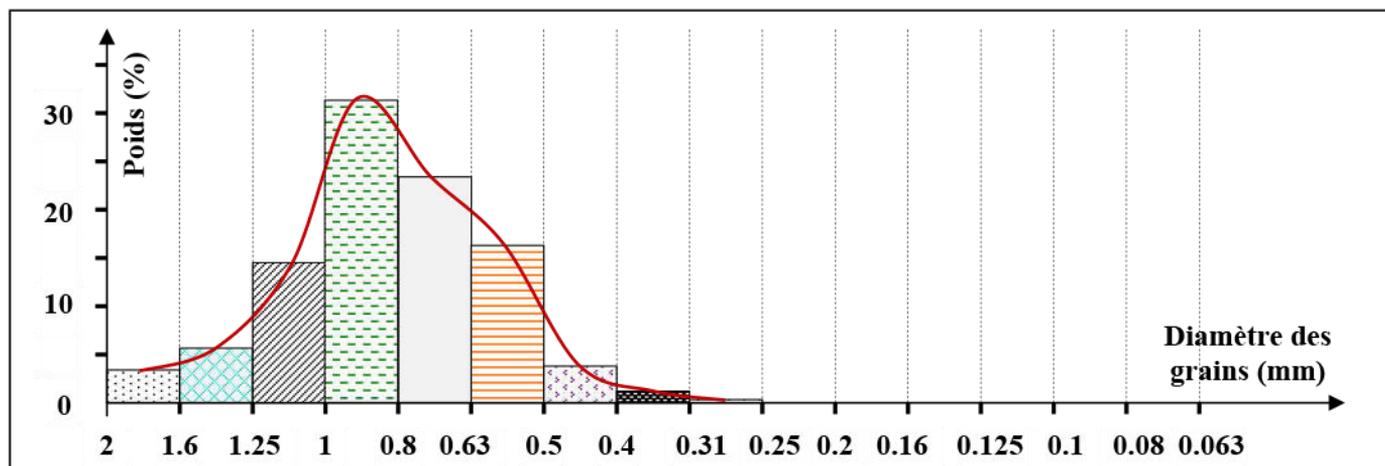
Diamètre (mm)	2	1.6	1.25	1	0.8	0.63	0.5	0.4	0.31	0.25	0.2	0.16	0.125	0.1	0.08	0.063
E ₁	0	3.4	5.7	14.5	31.4	23.4	16.3	3.8	1.2	0.3	0	0	0	0	0	0
% cumulé	0	3.4	9.1	23.6	55	78.4	94.7	98.5	99.7	100	100	100	100	100	100	100
E ₂	0	4	9.3	11.6	5	4.7	8	9.3	11.4	14	10	6.5	3.2	2.5	0.5	0
% cumulé	0	4	13.3	24.9	29.9	34.6	42.6	51.9	63.3	77.3	87.3	93.8	97	99.5	100	100
E ₃	0	0	0	0	0	0	0.4	1.2	5.1	26.1	47.4	12.1	5.6	1.5	0.6	0
% cumulé	0	0	0	0	0	0	0.4	1.6	6.7	32.8	80.2	92.3	97.9	99.4	100	100

- 1) Complétez le tableau puis construisez l'histogramme et la courbe de fréquence. Pour chaque type de sable.
- 2) En utilisant les données du tableau, tracer sur le même graphique les courbes cumulatives des trois types de sable.
- 3) A partir des représentations graphiques précédentes, Quelle conclusion peut-on tirer sur le classement de ces trois types d'échantillon de sable?

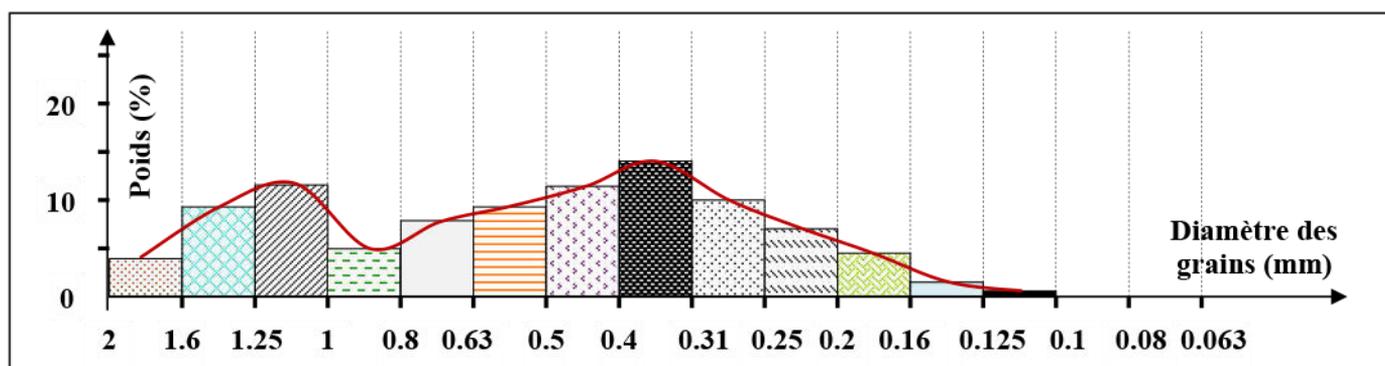
1) Complétons le tableau : (Voir tableau document 10)

Construisons l'histogramme et la courbe de fréquence des trois types de sable:

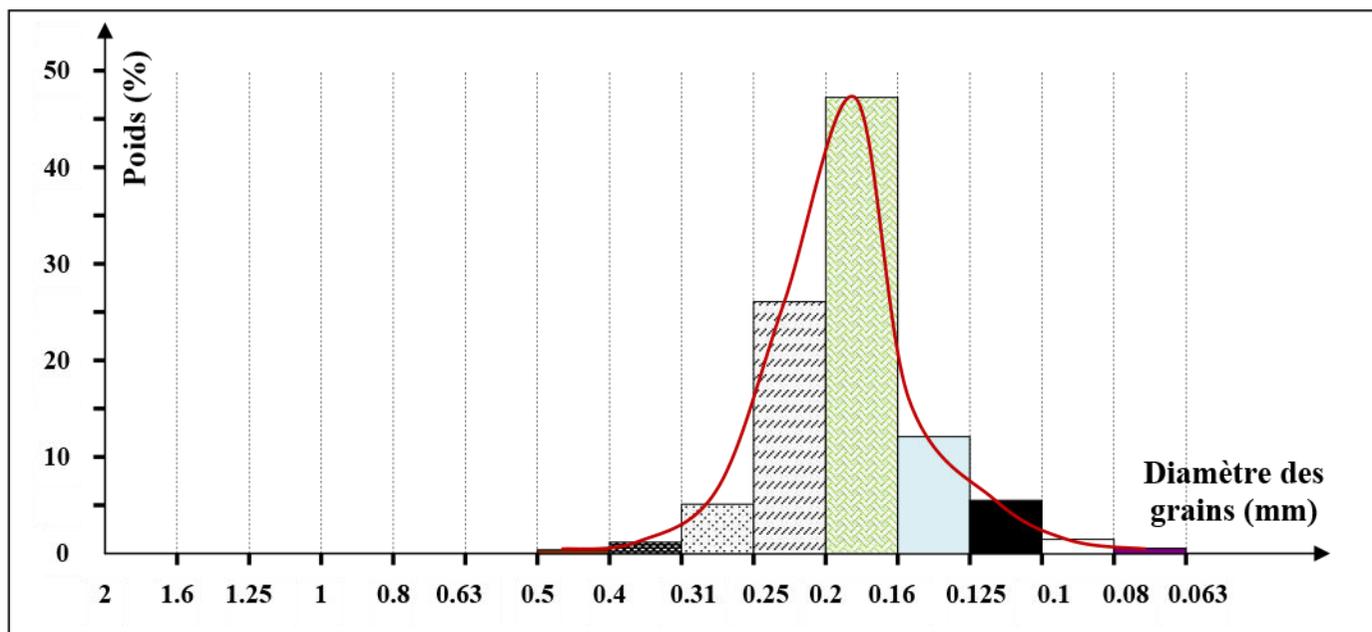
★ L'échantillon E₁:



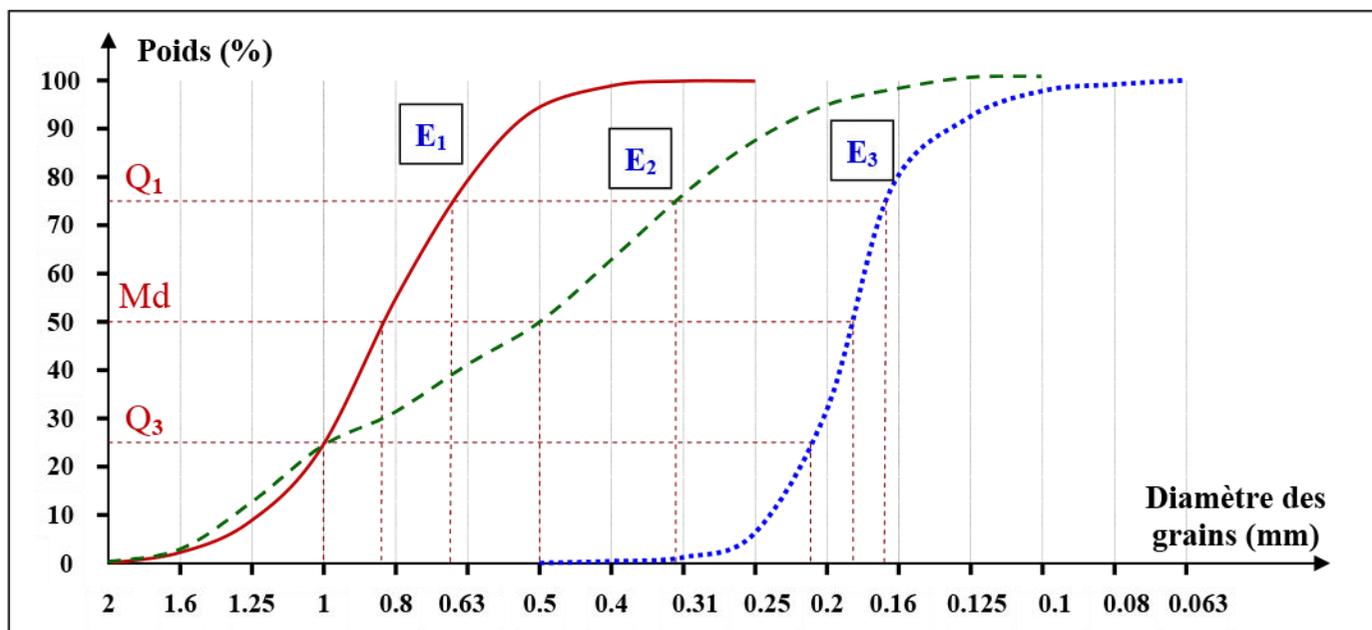
★ L'échantillon E₂:



★ L'échantillon E₃:



2) Traçons les courbes cumulatives des trois types de sable :



3) A partir de la courbe cumulative permet de calculer l'indice de classement de Trask S_0 pour chaque échantillon de sable :

★ L'échantillon E₁:

$$Q_1 = 0.66, \quad Q_3 = 1 \quad \text{donc } S_0 = \sqrt{1/0.66} = 1.23$$

★ L'échantillon E₂:

$$Q_1 = 0.32, \quad Q_3 = 1 \quad \text{donc } S_0 = \sqrt{1/0.32} = 1.77$$

★ L'échantillon E₃:

$$Q_1 = 0.17, \quad Q_3 = 0.22 \quad \text{donc } S_0 = \sqrt{0.22/0.17} = 1.14$$

A partir des données précédentes, on peut établir le tableau suivant :

	Echantillon E ₁	Echantillon E ₂	Echantillon E ₃
Courbe de fréquence	Etroite unimodale	Étalée plurimodale	Etroite unimodale
Courbe cumulative	Forte pente	Faible pente	Forte pente
Degré de classement	Bon classement	Mauvais classement	Très bon classement
Conclusion	Sable de plage	Sable fluviatile	Sable dunaire

④ Etude morphoscopique des sédiments:

La forme et l'aspect des grains de quartz d'un sable observé à la loupe binoculaire témoignent de l'intensité et de la durée des actions d'érosion auxquelles ils ont été soumis.

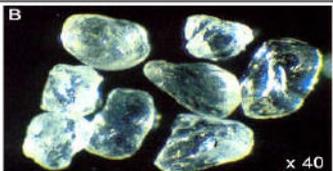
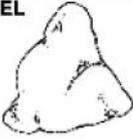
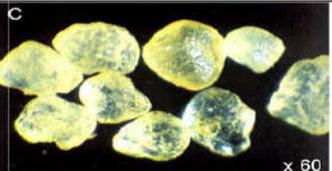
a) Observation microscopique des grains de sable: (Voir document 11)

Document 11: Etude morphoscopique des grains de sable:

Pour observer les grains de quartz d'un échantillon de sable ayant reçu au préalable à une étude granulométrique, on suit les étapes suivantes :

- ✓ On lave le sable avec de l'eau pour éliminer les éléments argileux ;
- ✓ On lave le sable avec de l'acide chlorhydrique pour éliminer les grains de calcaire ;
- ✓ On lave le sable avec de l'eau oxygénée diluée pour éliminer les éléments organiques ;
- ✓ On observe le sable à l'aide d'une loupe binoculaire.

L'observation permet de distinguer trois types de grains :

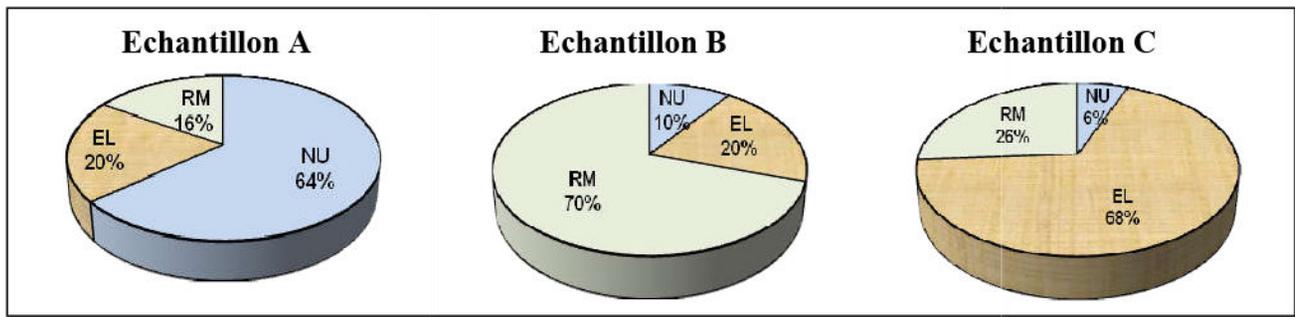
	Echantillon A	Echantillon B	Echantillon C
	 	 	 
Aspect des grains	Transparents, anguleux à arêtes tranchantes	Transparents, facettes brillants à arêtes usées	Translucides, facettes dépolies
Types de grains	Non usés (NU)	Emoussés luisants (EL)	Ronds mats (RM)
Mode de transport	Altération physique Transport glaciaire ou fluviatile (Faible transport)	Transport prolongé dans l'eau (plage marins, cours inférieurs des fleuves)	Un long transport par le vent

L'étude statistique des grains de quartz de trois échantillons de sable (A, B et C) extrait de trois couches distinctes a donné les résultats du tableau ci-dessous:

	Forme des grains de sable		
	% NU	% EL	% RM
Echantillon A	64	20	16
Echantillon B	10	20	70
Echantillon C	6	68	26

- 1) Représentez les résultats du tableau sous forme d'un diagramme circulaire « en camembert »
- 2) Interprétez ces résultats et déterminez le mode de transport subi par ces échantillons de sable.

1) Représentons les résultats du tableau sous forme d'un diagramme circulaire :



2) Interprétation des résultats :

Pour caractériser un milieu de dépôt et déterminer l'agent et les conditions de transport, on procède à l'analyse morphoscopique des sédiments.

L'analyse des grains de quartz dans un sédiment permet de distinguer entre trois types : Les grains non usés (NU), les grains émoussés luisants (EL), les grains ronds mats (RM).

Selon les pourcentages des trois types de grains, on déduit l'agent de transport dominant :

- Si le pourcentage des grains EL $> 30\%$, c'est un sable marin.
- Si le pourcentage des grains $20\% < EL < 30\%$, le sable est fort probable un sable marin (ou fluviatile).
- Si par contre le pourcentage des grains $EL < 20\%$, l'origine marine du sable est alors contestée (Mettre en cause).

D'après les données du tableau on constate que :

- Dans l'échantillon A : le pourcentage des grains NU est élevé (64%), cela signifie que le transport est limité. Puisque le pourcentage des grains EL est égal à 20%, c'est un sable fluviatile.
- Dans l'échantillon B : le pourcentage des grains RM est élevé (70%), cela signifie que le sédiment a subi un long transport par le vent (milieu éolien). Donc c'est un sable qui caractérise le milieu désertique.
- Dans l'échantillon C : le pourcentage des grains EL est élevé (68%), cela signifie que le sédiment a subi un long transport par l'eau. Donc c'est un sable qui caractérise le milieu marin côtier.

b) Conclusion:

Les études statistiques et morphoscopiques des grains de quartz d'un sédiment, contribue à la reconstitution de l'itinéraire évolutif probable de ce sédiment, et permet la reconstitution de la paléogéographie de milieux de sédimentations.

III – Les milieux sédimentaires actuels:

Les débris de l'érosion sont transportés par les agents de transport, et finissent par se déposer et s'accumuler dans un milieu de sédimentation.

Les milieux sédimentaires sont des structures géomorphologiques où règne un ensemble de facteurs physiques, chimiques et biologiques suffisamment constants pour former un dépôt caractéristique. Ainsi, le géologue pourra reconstituer les conditions ayant régné dans un milieu ancien à l'aide des caractéristiques de ses dépôts.

- Quels sont les principaux milieux de sédimentation ? (Voir document 12 et 13 (fig 1))

Document 12: Principaux milieux de sédimentation actuels:

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques des différents milieux de sédimentation actuels.

Milieux de Sédimentation		Types de sédiments
milieux continentaux	Vallées torrentielles	Alluvions (Dépôt de débris (sédiments))
	Milieux glaciaires	Moraines (accumulations de blocs éboulés sur le glacier ou arrachés et transportés par lui)
	Dépôts éoliens	dunes de sables, loess (dépôt sédimentaire détritique meuble, non stratifié, argilo-calcaire et silteux, à grain inférieur à 62,5µm)
	Plaines alluviales	(grandes rivières permanentes): granulats (sables, graviers et galets)
	Lacs et marécages	Détritiques
Chimiques		gypse, l'halite, la sylvite, calcaires rares.
Organiques		roches carbonées (charbon, hydrocarbure), des diatomites.
Milieux intermédiaires	Estuaire	Embouchure d'un fleuve et où l'influence de la mer est prépondérante : dépôt essentiel est la vase formée de sable quartzeux ou calcaire.
	Delta	Embouchure d'un fleuve qui a une action dominante sur les marées; sédimentation abondante : dépôts formés de sables surmontés par des argiles.
	Lagune	Étendue d'eau plus ou moins salée séparée de la mer par un cordon littoral. Evaporites (gypse, l'halite, la sylvite), calcaires dolomitiques, dolomies, marnes
milieux marins	Plage et plate-forme	le plateau continental , zone plane, légèrement inclinée vers la mer, large en moyenne de 80 km, profonde de 200 m tout au plus; - sédimentation à dominance siliceuse quand l'apport détritique est fort ; sédimentation à dominance carbonatée là où l'apport détritique est faible et le climat favorable au développement des organismes constructeurs (coraux par exemple).
	Talus	la pente continentale (ou talus continental), large de 45 km en moyenne et dont la profondeur va de 200 à 4000m, entamée par des canyons sous-marins ; sédiments détritiques rythmés mis en place en bas du talus par les courants de turbidité.
	Plaine abyssale	détritiques fins (argiles) venant du talus auxquels s'ajoutent les particules fines calcaires tombant de la surface: débris planctoniques,... dépôt de boues pélagiques (des êtres flottants ou nageant).
	Grands fonds	A plus de 5000m de profondeur Argiles rouges, avec absence du calcaire sous le niveau 5000m de compensation des carbonates.

En se basant sur les données de ce tableau et les figures des documents 13, 14, 15 et 16, décrire les caractéristiques des milieux de sédimentation.

Document 13: Principaux milieux de sédimentation actuels:

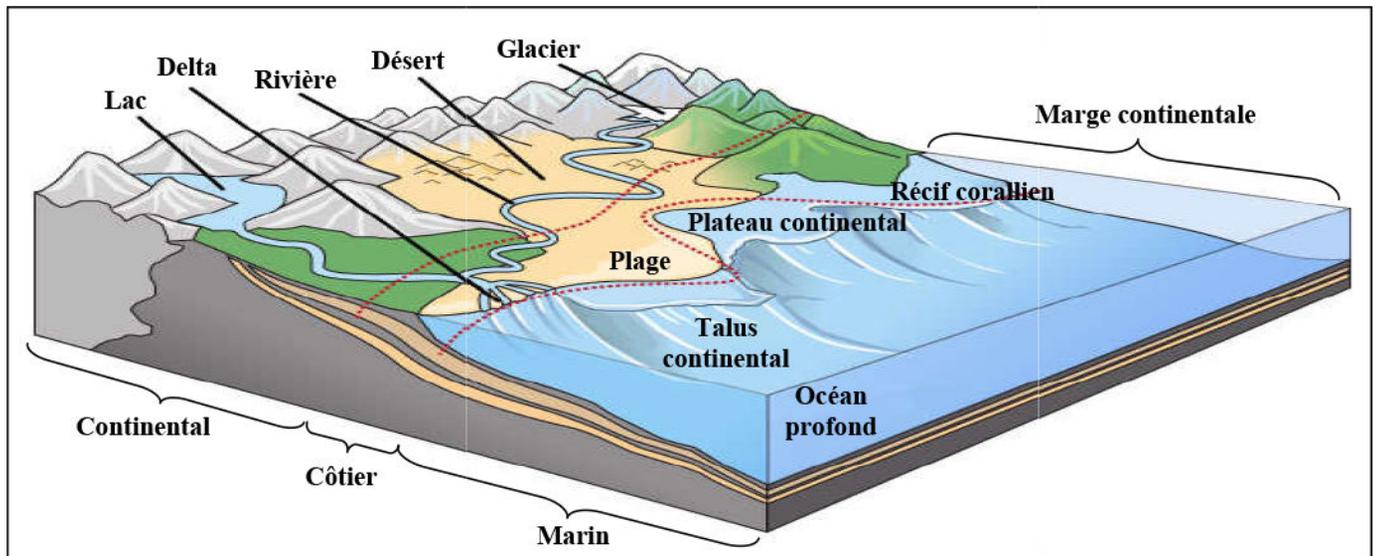
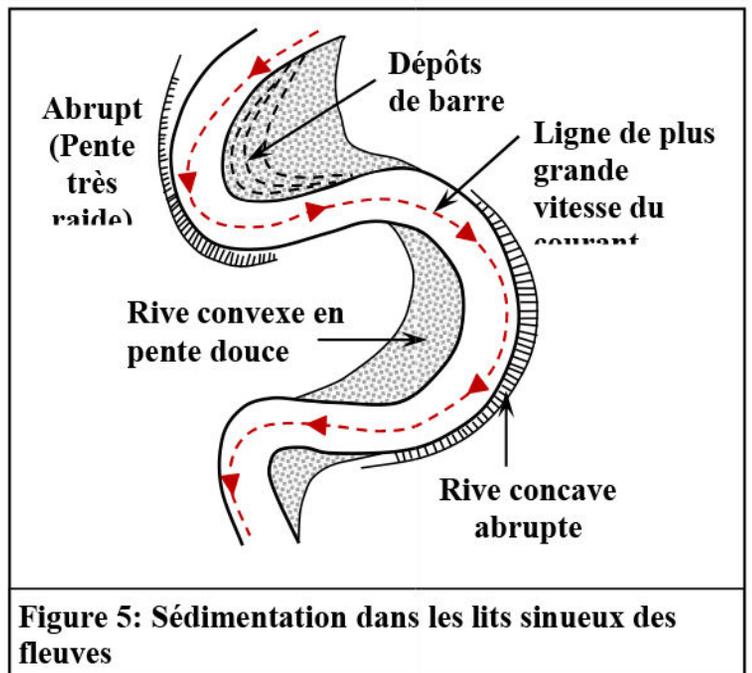
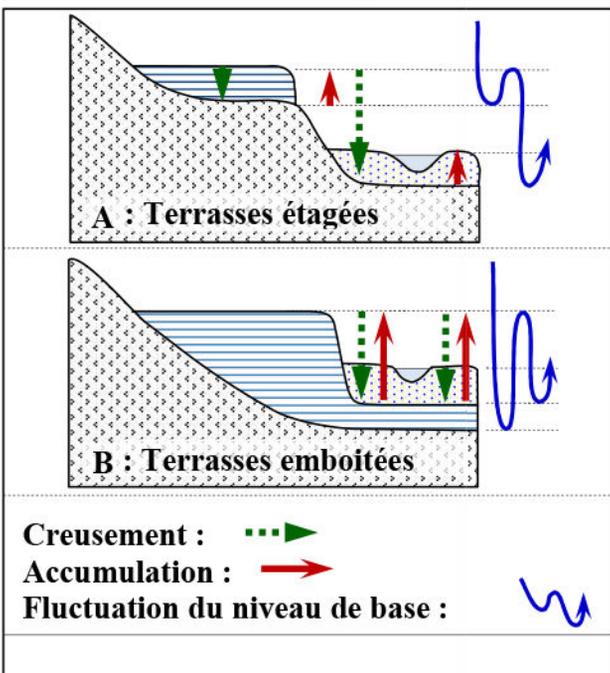
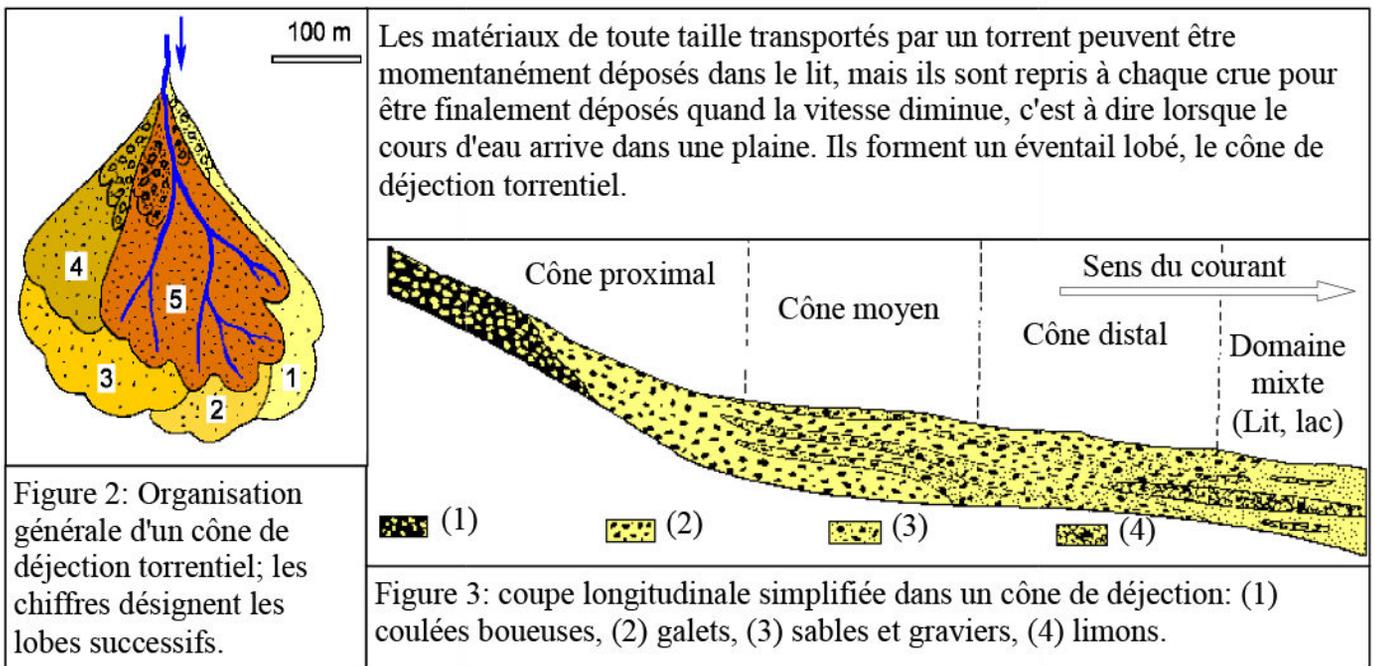


Figure 1: Principaux milieux de sédimentation.



① Les milieux de sédimentation continentaux :

⇒ **La sédimentation torrentielle:** (Voir figure 2 et 3, document 13)

Ce sont des sédiments qui se déposent dans les torrents. Ils forment un éventail lobé, Le cône de déjection torrentiel correspond à l'étalement des matériaux lors d'une crue; ceux-ci sont granoclassés d'amont en aval, les éléments fins sont emportés le plus loin.

⇒ **La sédimentation fluviale:** (Voir figure 4 et 5, document 13)

Les milieux fluviaux (Rivières, fleuves...) sont caractérisés par des structures sédimentaires appelées terrasses fluviales. On distingue deux types : des terrasses étagées et des terrasses emboîtées.

Les rivières déposent des sédiments aux endroits où la vitesse du courant diminue, c'est à dire le long de leur cours et finalement à leur embouchure.

Un méandre est une sinuosité très prononcée du cours d'un fleuve ou rivière

Les méandres sont des lieux de dépôt particuliers. En effet, dans un méandre, l'érosion se produit sur la rive concave, à pente raide, là où la vitesse du courant est la plus grande. Le dépôt se réalise sur la rive convexe, là où la vitesse du courant est la plus faible, formant une terrasse alluviale (ou barre de méandre).

⇒ **La sédimentation Lacustre:**

Un lac est un corps d'eau permanent enclavé dans le continent. La nature de sédimentation dépend de plusieurs facteurs : le climat, la profondeur, du lac, l'apport des rivières et la végétation.

La sédimentation lacustre est caractérisée par des dépôts calcaires de nature chimique riche en fossiles indicateurs de conditions écologiques régnant dans ces milieux.

Les sédiments se déposent dans le lac selon une zonation concentrique (la taille des particules diminue de la périphérie vers le centre).

⇒ **La sédimentation glaciaire:** (Voir figure 1, document 14)

La sédimentation dans les montagnes glaciaire est liée surtout au climat. la force et l'énergie des glaciers en mouvement est à l'origine de l'érosion, du transport et de la sédimentation.

Les matériaux transportés par les glaciers se déposent lorsque la glace fond, et s'accumulent en une moraine (Amas de débris rocheux (appelé aussi till), entraînés par le mouvement de glissement d'un glacier). La moraine est caractérisée par des sédiments très hétérogènes, non classés formés de blocs et de galets anguleux, et parfois striés et de grains de quartz anguleux.

Document 14: Principaux milieux de sédimentation actuels:

Figure 1: La sédimentation dans les milieux glaciaires.

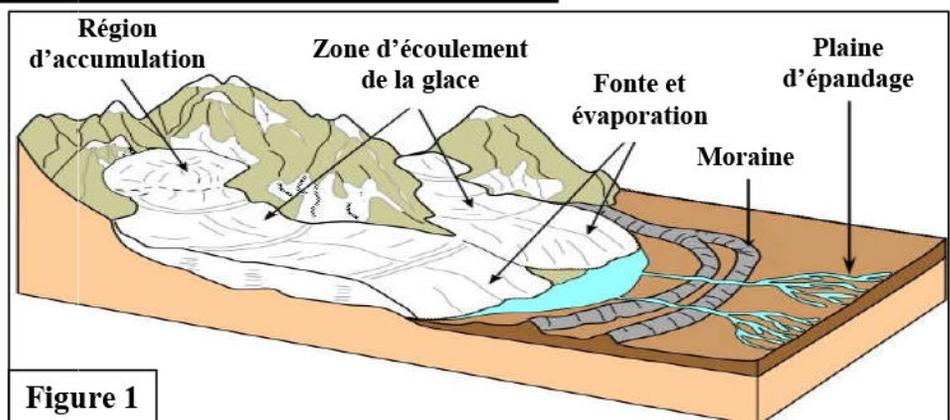


Figure 1

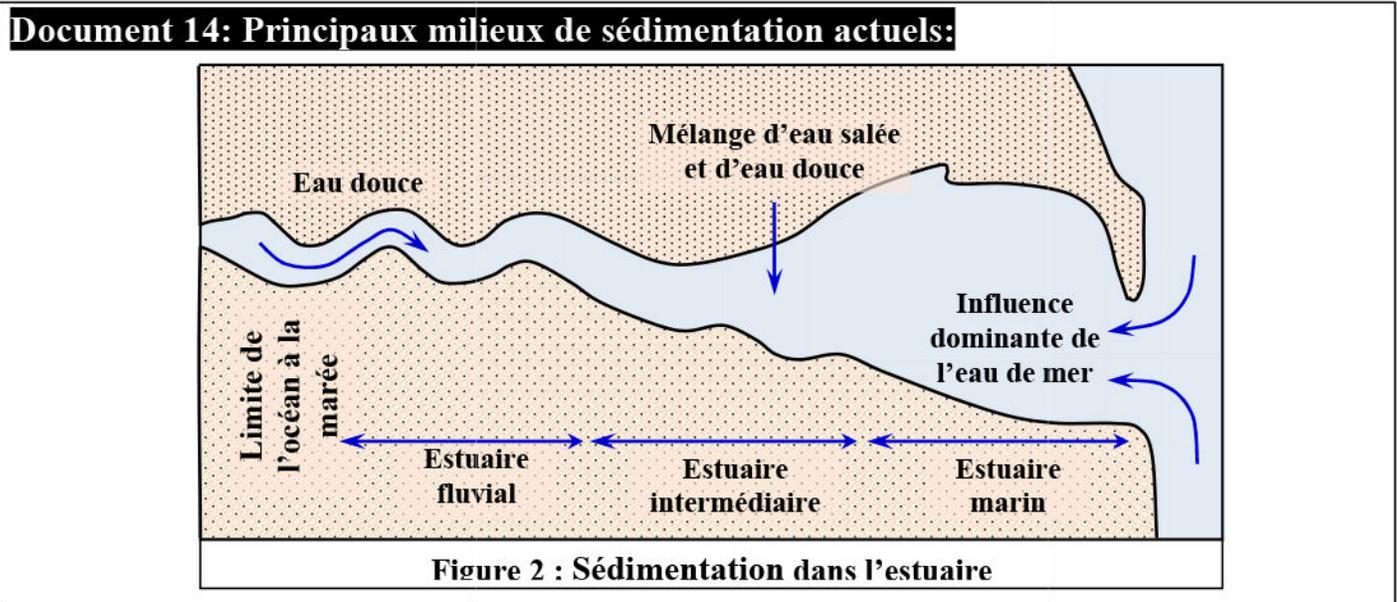
⇒ La sédimentation éolienne :

Dans les milieux désertiques, ce sont les dépôts éoliens qui constituent la majeure partie des sédiments actuels. Les roches sédimentaires d'origine désertique sont caractérisées par des grains sableux arrondis et dépoli (rond-mat) bien classés. Les dépôts de sables forment les dunes (nebka, barkhanes, seifs, ergs...). Les régions d'accumulation des sables alternent avec des régions dénudées.

② Les milieux de sédimentation intermédiaires:

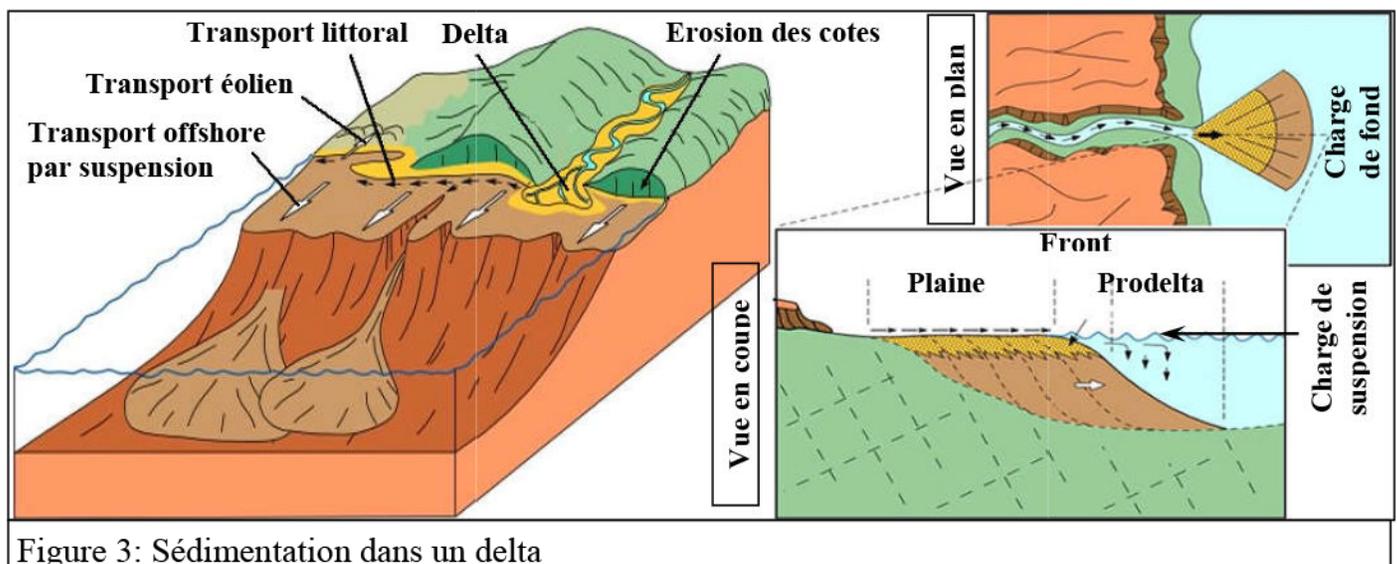
Ils sont situés aux limites du domaine marin et du domaine continental et présentent des caractères mixtes. Ils sont soumis aux processus continentaux et aux processus marins.

⇒ L'estuaire: (Voir figure 2, document 14)



C'est l'embouchure d'un fleuve, de forme évasée et où la mer remonte (l'effet de la mer ou de l'océan dans lequel il se jette est dominant). C'est une zone de mélange entre eaux douces et eaux marines. La plupart des sédiments apportés par les rivières dans les estuaires sont piégés à l'intérieur de l'estuaire sous forme de boue.

⇒ Le delta: (Voir figure 3, document 14)



Lorsque le fleuve a une action dominante; on parle de delta.

Les sédiments dans le cours d'eau sont transportés souvent avec une vitesse assez élevée.

Lorsque la charge du cours d'eau arrive dans la mer, le courant perd son énergie et les sédiments se dispersent, en s'étalant sur un delta: une zone d'accumulation triangulaire en plan.

L'apport continu des sédiments dans le delta fait avancer ce dernier dans le domaine marin : c'est la progradation deltaïque.

⇒ La lagune: (Voir figure 4, document 14)

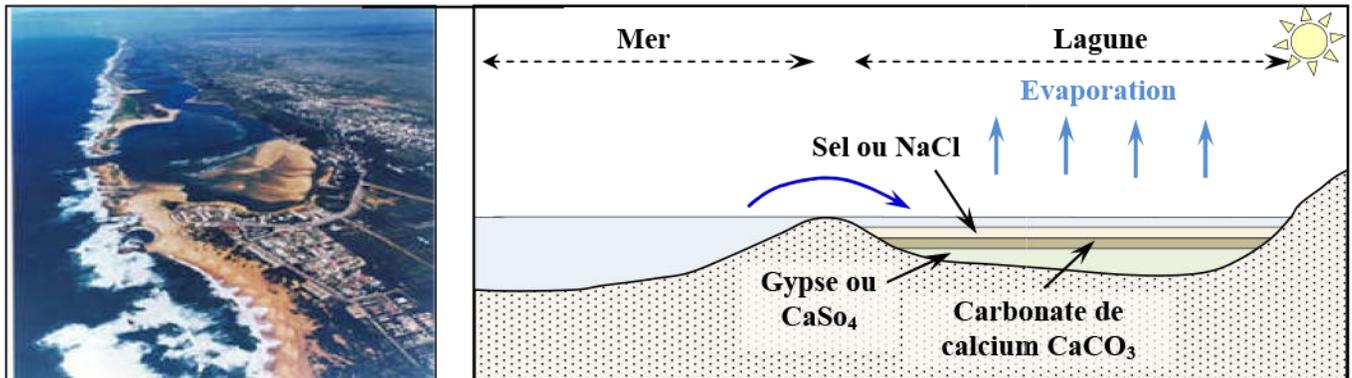


Figure 4: Sédimentation dans La lagune (Exemple Oualidia à El-Jadida, Maroc)

C'est une étendue d'eau généralement peu profonde séparée de la mer par un cordon littoral souvent constitué de sable fin.

A climat chaud, la concentration saline des lagunes augmente par la forte évaporation. Lorsque la saturation est atteinte, les sels cristallisent et se déposent au fond du bassin formant des évaporites (halite (NaCl), gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sylvite (KCl), borates ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$))

③ Les milieux de sédimentation marins: (Voir figure 5, document 14 et document 15 + 16).

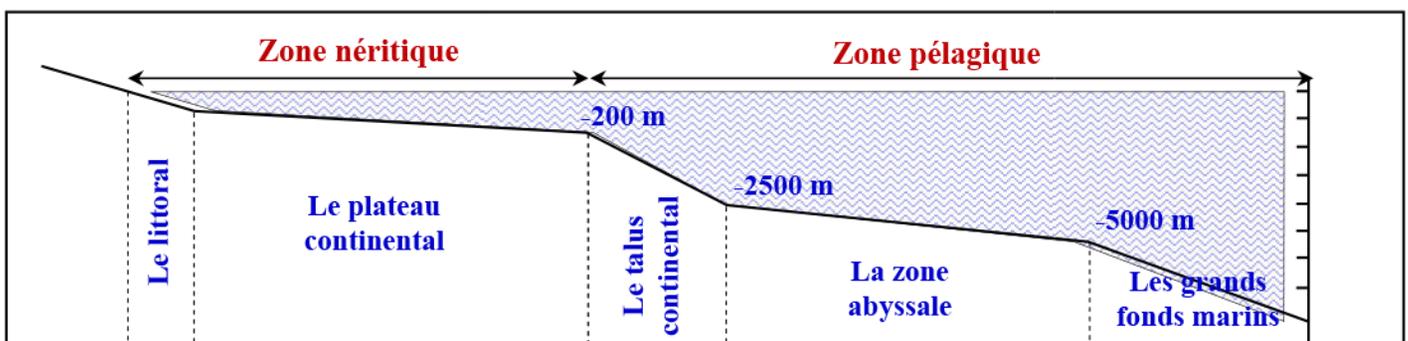


Figure 5: Morphologie du milieu marin et zones de sédimentation.

Document 15: Les conditions de sédimentation dans le milieu marin:

Un récif corallien est une structure naturelle qui résulte de l'activité d'êtres vivants fixés : les coraux, capables d'utiliser le calcium dissous dans l'eau pour édifier leur squelette.

Pour se développer, les coraux ont besoin de conditions de vie précises :

- Eau claire bien oxygénée.
- Température supérieure à 20°C.
- Profondeur inférieure à 100m (plateforme).



Figure 1 : les récifs coralliens

Document 15: Les conditions de sédimentation dans le milieu marin:

Les courants de turbidité sont des écoulements gravitaires dans lesquels le sédiment est maintenu en suspension par la turbulence du fluide interstitiel. Ce mélange d'eau et de sédiment possède une densité plus grande que celle de l'eau et se déplace vers le bas sous l'effet de la gravité.

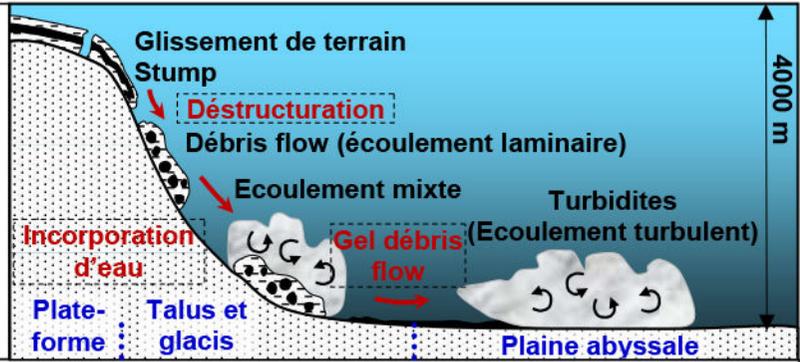
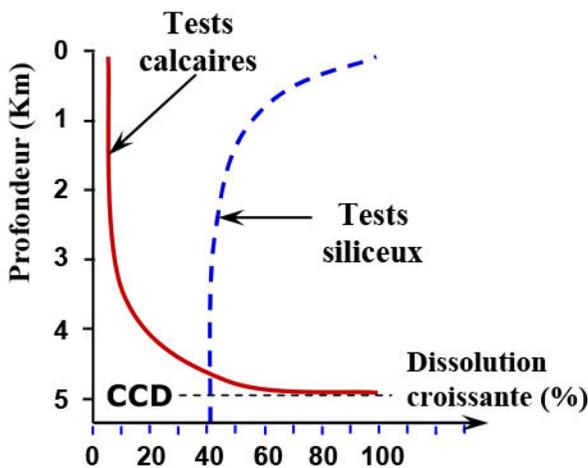
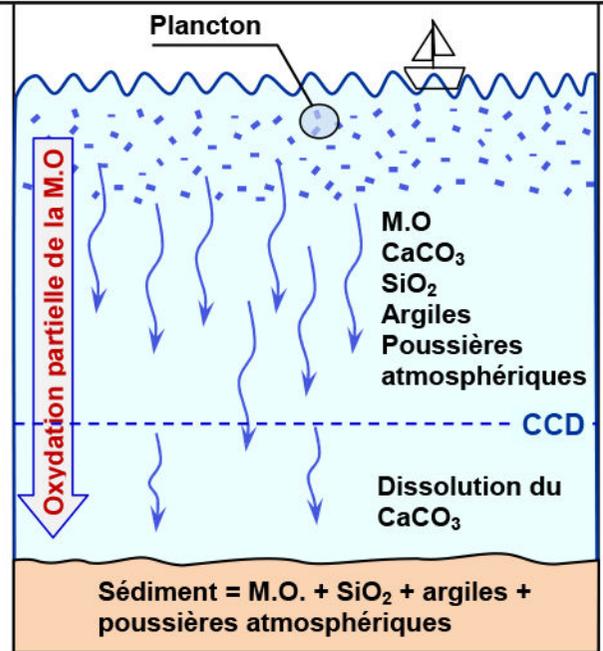


Figure 2 : Glissement de terrain dans la partie supérieure du talus continental.

Figure 3 : Le niveau de compensation des carbonates (CCD)

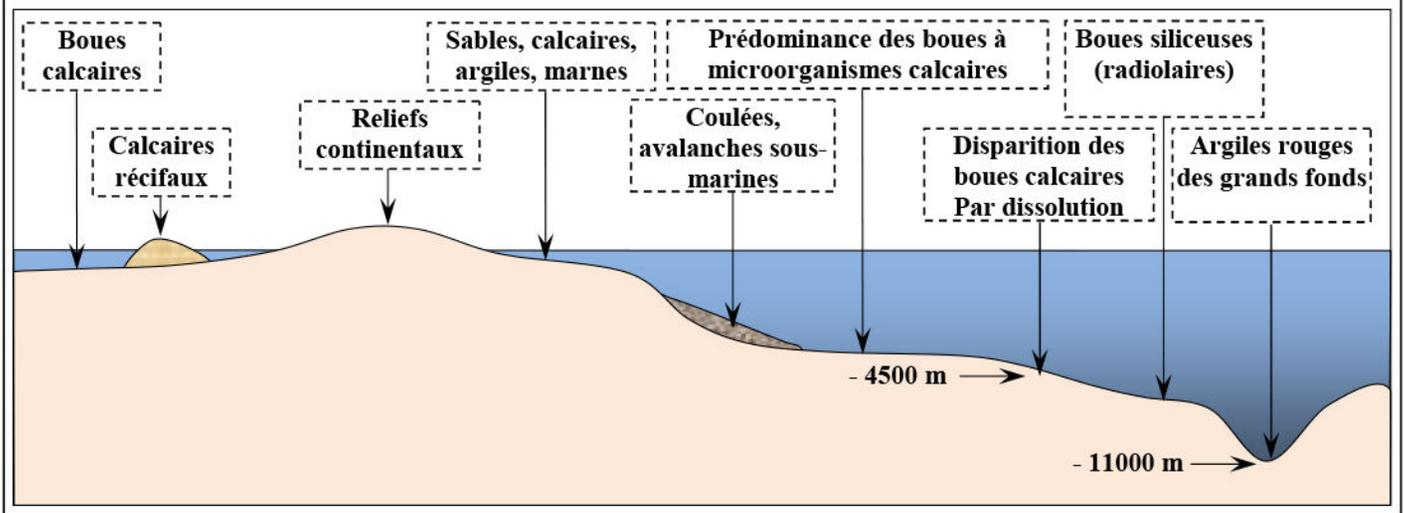
La CCD est un niveau en milieu océanique, sous lequel le carbonate de calcium (CaCO_3) se dissocie, c'est-à-dire que lorsque des particules de CaCO_3 , comme celles qui viennent du plancton, atteignent ce niveau, elles sont dissoutes et se retrouvent dans l'eau sous leur forme ionique Ca^{2+} et HCO_3^- . Ce niveau est contrôlé par la température de l'eau. Il se situe à des profondeurs variables selon la latitude et la nature de la circulation océanique.



Courbes de dissolution des tests siliceux et calcaires en fonction de la profondeur.

La CCD exerce donc une influence sur la composition des sédiments des fonds océaniques. Les couches supérieures de la surface océanique produisent une pluie de matériaux fins composés de matières organiques, de CaCO_3 , de SiO_2 , ainsi que d'une certaine quantité d'argiles décantées de la sédimentation terrigène et de poussières atmosphériques qui se déposent à la surface des océans.

Document 16: Répartition des principaux types de sédiments marins:



⇒ Zone littorale:

En plus de la cote, s'ajoute la plateforme immergée dont la profondeur ne dépasse pas 200m. On y trouve les dépôts amenés par les fleuves, le vent mais aussi des sédiments biochimiques et biologiques ainsi que des constructions d'organismes (récifs correspondant à des températures de 20 à 35°C et à des profondeurs faibles mais à eaux agitées permettant une bonne oxygénation).

Les dépôts détritiques de plate forme sont classés, répartis, étalés par les marées, les vagues et les courants littoraux et de plateaux.

- Sédimentation à dominance silico-clastique quand l'apport détritique est fort.
- Sédimentation à dominance carbonatée là où l'apport détritique est faible et le climat favorable au développement des organismes constructeurs.

⇒ Le plateau continental:

C'est une plateforme qui s'incline progressivement vers les fonds marins. Sa largeur atteint 80km et sa profondeur avoisine 200m. Elle est caractérisée par la dynamique des eaux due aux vagues, aux orages et à l'alternance incessante des marées.

On distingue plusieurs types de sédiments en fonction de la dynamique des eaux. Dans les eaux profondes, l'état calme favorise la sédimentation d'éléments organiques.

⇒ Le talus continental:

C'est une formation géologique à pente raide (5° environ). Il est caractérisé par des glissements de terrains dans sa partie supérieure, ce qui mobilise une grande masse de sédiments aboutissant à la formation de courant de turbidité. Ces sédiments sont appelés des turbidites. Ils finissent par se déposer sous l'effet de la gravité.

⇒ Les grands fonds marins:

C'est à ce niveau qu'a lieu la sédimentation détritique fins venant du talus auxquels s'ajoutent les particules fines tombant de la surface (débris planctoniques, poussières volcaniques, dépôt de boues calcaires ou argileuses).

Le plancton constitue l'ensemble des microorganismes qui vivent à la surface des océans. Une grande proportion de ces microorganismes possède un squelette minéralisé, soit en carbonate de

calcium (CaCO₃), comme par exemple les foraminifères, soit en silice (SiO₂), comme les diatomées et les radiolaires.

Le carbonate de calcium est dissous en profondeur; il n'y a plus de carbonate dans les mers actuelles au delà de 5400 m de profondeur. Les tests calcaires de foraminifères issus du plancton sont dissous et ne laissent plus de trace dans le sédiment. La profondeur de compensation des carbonates (Carbonate Compensation Depth ou CCD) varie selon les mers actuelles, à plus forte raison pour les mers anciennes. Néanmoins on peut toujours affirmer qu'un sédiment carbonaté ne s'est pas formé à grande profondeur: c'est le cas de la craie constituée de test calcaires de micro-organismes planctoniques.

IV – Les conditions de sédimentation dans un milieu de sédimentation ancien (Cas du bassin des phosphates au Maroc):

a) Répartition spatiale et temporelle des gisements de phosphate au Maroc: Voir doc 17

Document 17 : Répartition des gisements de phosphate au Maroc:

Le Maroc contient 75% des réserves mondiales en phosphates. Il dispose de plusieurs gisements (Figure 1):

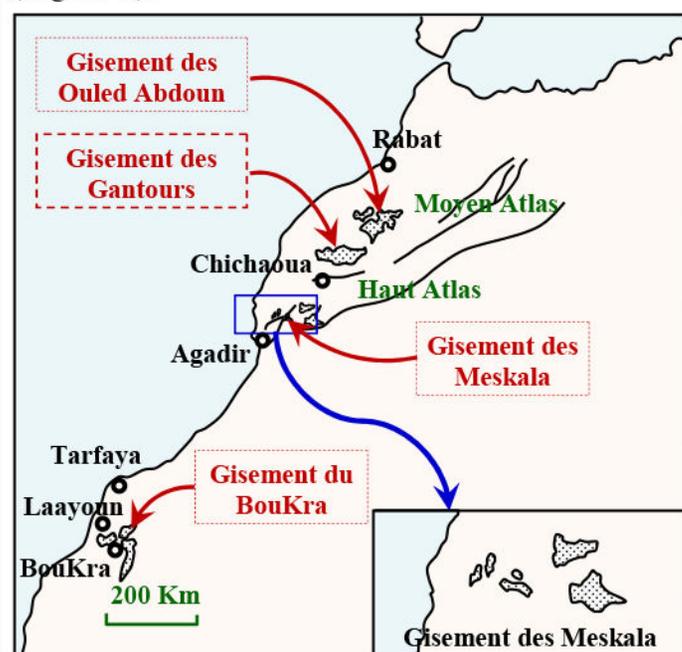


Figure 1 : Répartition géographique des principaux bassins phosphatés marocains

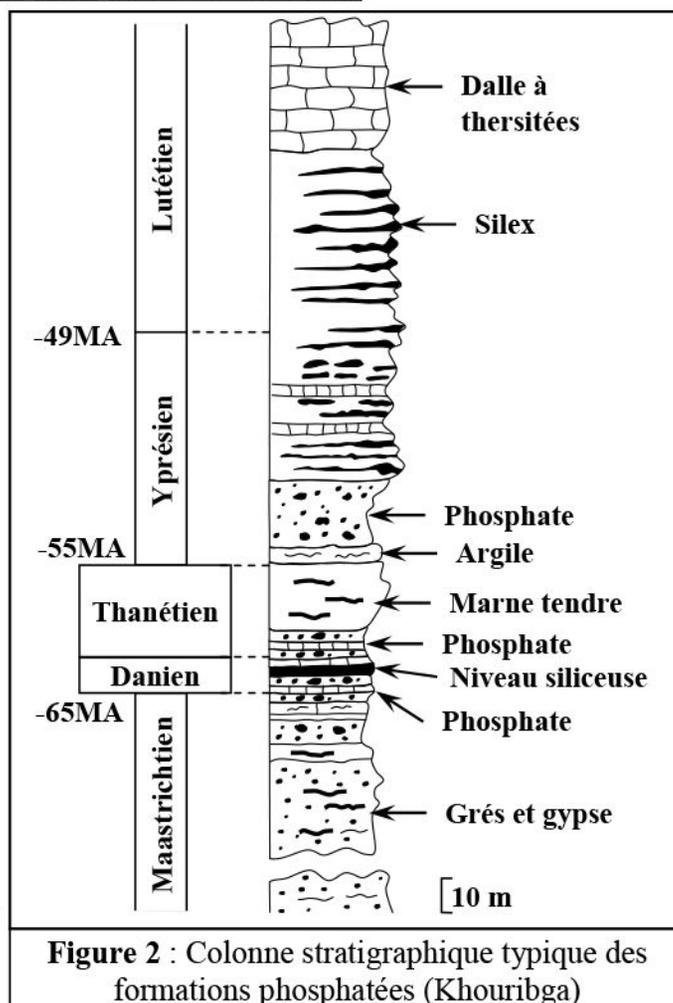


Figure 2 : Colonne stratigraphique typique des formations phosphatées (Khouribga)

- ✓ Bassin d'Ouled Abdoun: à Khouribga. C'est le plus important (9000 Km²).
- ✓ Bassin de Gantour, près de youssoufia;
- ✓ Bassin de Meskala: à l'ouest de Marrakech;
- ✓ Bassin d'Oued Eddahab: Au sud dans la région du BouKraa (sud de laayoun).

Au Maroc les phosphates se trouvent à une profondeur de 100 à 160 m et sous différentes formes (Sable phosphaté; Silex phosphaté et calcaire phosphaté).

La série phosphatée d'Ouled Abdoun (Figure 2), débute du Maastrichtien par des dépôts phosphatés marneux et se termine au Lutétien par une dalle à thersités (Gastéropodes).

A partir de l'analyse des données de ce document, dégager les caractéristiques des faciès phosphatiques (Ensemble des caractères lithologiques ou paléontologiques d'une roche qui témoignent de l'environnement de sa formation).

Au Maroc les gisements de phosphates existent dans plusieurs bassins (Ouled Abdoun à Khouribga, Gantour à Youssoufia, Meskala à l'ouest de Marrakech, Oued Eddahab au Sahara)

Les roches de phosphate se déposent en couches horizontales de faible épaisseur, généralement en alternance avec des couches siliceuses, argileuses, marneuses et calcaires.

L'épaisseur des série phosphatée varie géographiquement d'un gisement à l'autre, et chronologiquement aussi, d'un étage stratigraphique à l'autre. La genèse des bassins de phosphate marocain s'étale du Maastrichtien (La fin du Crétacé) au Lutétien (Début du Tertiaire) durant une période de 15 million d'années.

b) Nature et composition des roches phosphatées marocaines:

(Voir le document 18)

Document 18: Nature et composition des roches phosphatées marocaines:

La roche de phosphate a l'aspect d'un sable fin, assez compact. Elle forme des couches horizontales de faible épaisseur. On distingue entre trois types de faciès: le phosphate sableux, le calcaire phosphatique et le silex phosphatique. Les roches de phosphate sont caractérisées par la diversité de leurs composés minéralogiques et paléontologiques.



Figure 1 : Sable phosphaté dans une carrière

Composants	Pourcentage
Phosphate tricalcique	75 %
Carbonate de calcium	8.5 %
Fluorure de calcium	6.5 %
Sulfates de chaux	3 %
Eau combinée et matières organiques	2.5 %
Matières siliceuses	2 %
Oxyde de fer et d'alumine	0.5 %
Sels alcalins et magnésiens	2 %
Uranium	Traces

Figure 2 : principaux composants chimiques des roches de phosphate du gisement d'Ouled Abdoun



Humérus (Reptile) Maastrichtien
Hauteur : 240mm



Enchodus (Genre de poisson préhistorique) Maastrichtien
Longueur : 100 mm ; Hauteur dent : 15mm



Nebrius (Requin) Yprésien
Hauteur : 10mm

Figure 3 : Quelques fossiles du gisement de phosphate d'Ouled Abdoun

En se basant sur les données de ce document, déterminer les différentes formes de roches phosphatées et leurs composition minéralogiques et paléontologiques.

Au Maroc les gisements de phosphate existent dans plusieurs bassins, et se caractérisent par leur richesse en fossiles littoral et pélagique. On distingue trois types de faciès:

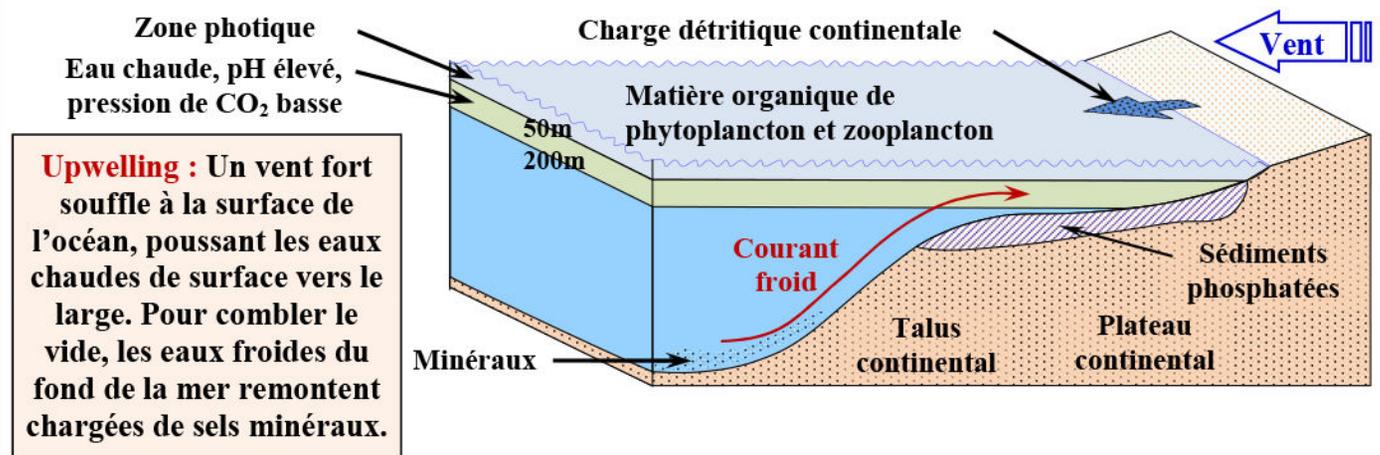
- ✓ Sable phosphatés : formé par des grains fins de formes variées comme la glauconie (Silicate de fer hydraté) et contenant des foraminifères phosphatés (Protozoaires marins), des oolithes phosphatés.
- ✓ Silex phosphaté : contenant un faible taux de phosphate et caractérisé par des couleurs très variées.
- ✓ Calcaire phosphaté : présents dans tous les gisements sous forme d'une roche compacte constituée de calcaire a ciment phosphaté.

c) Conditions de sédimentation des roches phosphatées: (document 19)

Document 19: Conditions de sédimentation des roches phosphatées:

Pour expliquer la formation des phosphates, plusieurs théories ont été émises:

- 1) Théories minérales (1952): les phosphates sont le résultat de précipitation des composés phosphatés directement de l'eau de mer.
- 2) Théories biolithiques (1936): l'accumulation des phosphates est le fait d'êtres vivants par fixation du phosphore dans les squelettes des vertébrés ou par les algues.
- 3) Théories de Kasakov (1937): (Voir figure ci-dessous) la teneur en P_2O_5 de l'eau de mer augmente avec la profondeur, le minimum se trouve dans la zone de photosynthèse (Zone photique) où le phosphore est consommé et le maximum se trouve vers 500m. selon cette théorie, le phosphore précipiterait chimiquement sur les bords du plateau continental, après y avoir été amené par des courants froids ascendants (Upwelling). Avec échauffement des eaux, il y a augmentation du pH et diminution de la pression partielle de CO_2 , ce qui amène à une précipitation de $CaCO_3$ puis de phosphates.



A partir de l'analyse des données de ce document, déterminer les conditions de formation des roches phosphatées au Maroc.

- ★ La sédimentation chimique des phosphates ne peut se produire dans les régions profondes, là où la pression partielle du CO_2 est trop élevée, ni dans la zone de photosynthèse où le phosphore est consommé. C'est donc entre 50 et 200m environ que la phosphorite précipitera. Pour cela il faut une communication facile avec la mer ouverte et des courants ascendants.
- ★ Les idées sur l'origine des phosphates ont fait un grand progrès avec la théorie de russe Kasakov (1937).

Le phosphate qui précipitait chimiquement sur les bords du plateau continental, après y avoir été amené par des courants froids ascendants (Upwelling). Avec échauffement des eaux, il y a augmentation du pH et diminution de la pression partielle en CO_2 , ce qui amène une précipitation du CaCO_3 , puis des phosphates.

d) Reconstitution de la paléogéographie de bassins de phosphate Marocains: (doc 20)

Document 20: Reconstitution de la paléogéographie de bassins de phosphate Marocains:

Pour expliquer la genèse des phosphates au Maroc, plusieurs théories ont été présentées, nous citons les deux plus connues:

- La théorie d'une transgression au centre et à l'ouest du Maroc d'une mer épicontinentale formant un plateau continental qui conditionne la phosphatogenèse et avec des endroits à fond surélevés où il y a absence de ces conditions (Herbig 1986 et Trappe 1989).
- La théorie du bassin fermé en communication restreinte avec la haute mer (Boujo, 1976), ce modèle propose un système de golfs et prévoit que le phosphore et les autres minéraux des eaux froides profondes, nécessaires à la formation des phosphates, seront distribués par l'intermédiaire des courants de distribution dans des cuvettes peu profondes protégées des courants forts venus du large.

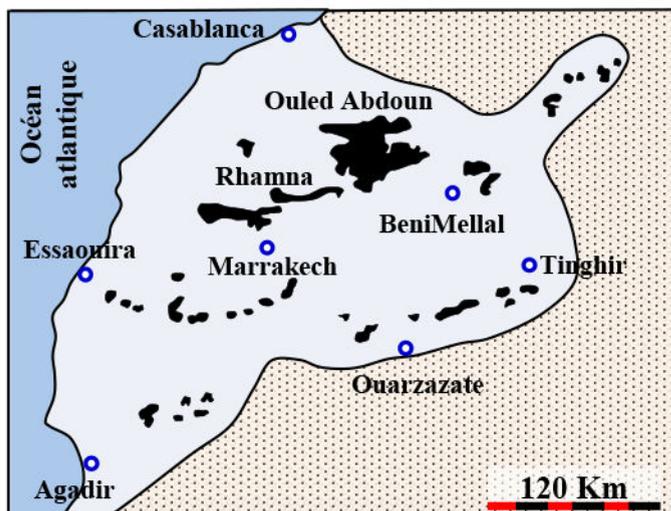


Figure 1: Modèle d'une mer épicontinentale (Modèle de Trappe 1989)

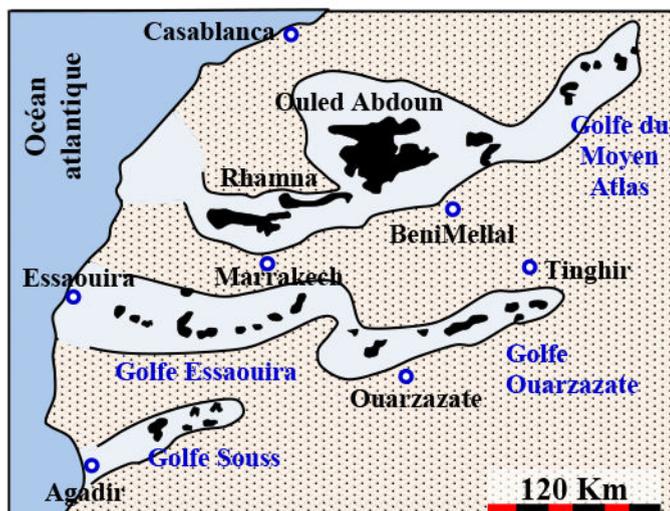


Figure 2: Le modèle des bassins fermés (Golfs) (Boujo 1976)

En exploitant les données de ce document, discuter la reconstitution de la paléogéographie de bassins de phosphate Marocains.

Les bassins de phosphate sont un exemple d'anciens bassins sédimentaires. L'analyse de leurs structures et de leurs constituants fournit des informations sur les conditions et les caractéristiques des bassins sédimentaires anciens.

En comparant la géographie actuelle du Maroc aux conditions de sédimentation des roches phosphatées, on a constaté que le littoral était plus à l'est. Il existe deux tendances qui peuvent être prises en considération pour reconstituer la géographie ancienne du Maroc central:

- ✓ Modèle de trappe qui suppose l'existence d'une mer épicontinentale au milieu et à l'Ouest du Maroc, communiquant avec l'océan atlantique. C'est un golf peu profond, très allongé, entouré d'un environnement terrestre à relief fort évolué. Ce golf présentait des seuils et des irrégularités (hauts fonds, rides) qui conditionnaient la sédimentation.

- ✓ Modèle de boujo qui suppose l'existence de golfes de faible profondeur provenant de l'atlantique, séparés par des terrains émergés. Ces golfes vont constituer des zones dans lesquelles la sédimentation phosphatée va s'installer.