

# Pétrographie Sédimentaire

STU S3



## Shop

- Cahiers de Biologie + Lexique
- Accessoires de Biologie



## Etudier

Visiter [Biologie Maroc](http://www.biologie-maroc.com) pour étudier et passer des QUIZ et QCM en ligne et Télécharger TD, TP et Examens résolus.



## Emploi


- CV • Lettres de motivation • Demandes...
- Offres d'emploi
- Offres de stage & PFE

# LES EVAPORITES

Environnement et cristallisation de la Halite  
Exemple de Salins-les-Bains (Jura)

**BOUR Ivan**

*Laboratoire Biogéosciences  
Université de Bourgogne*



Qu'est-ce que les évaporites ?

Les évaporites sont des sédiments chimiques composés de minéraux qui cristallisent à partir des substances dissoutes dans les eaux de surface et concentrées par évaporation.

Les solutions mères peuvent être d'origine marine, continentale ou mixte. Les minéraux évaporitiques précipitent, soit directement à partir des eaux libres du bassin, soit à partir des solutions interstitielles au cours de la diagenèse précoce ou tardive.

Les évaporites peuvent aussi bien se déposer au niveau des :

- Ceintures tropicales chaudes et arides (Altiplano de Bolivie).
- zones subtropicales arides et chaudes (Mer Morte, lagunes du sinai, lacs salins du sud des Etats-Unis).
- Régions polaires (Arctique, Groenland, Sibérie, Antarctique).
- Dans les eaux marines, on a jusqu'à 30 à 35 ppm de divers sels

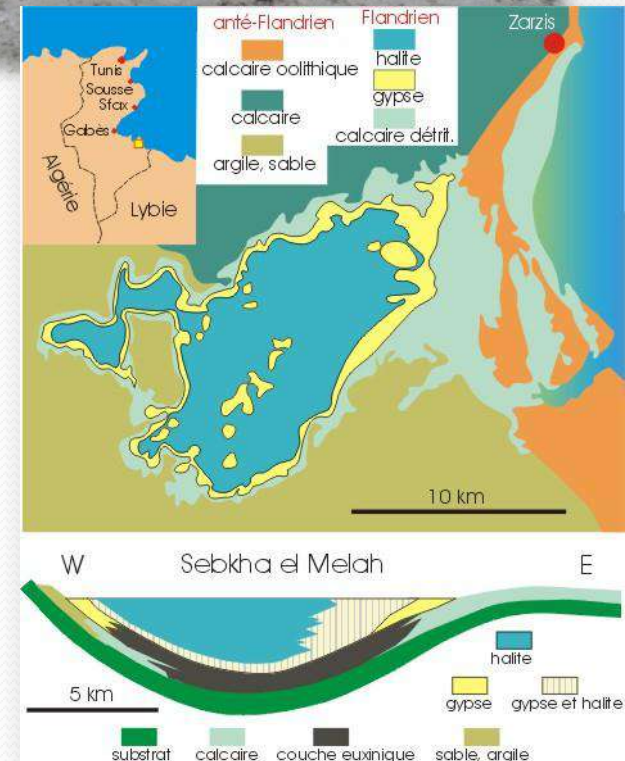
## EVAPORITES CONTINENTALES

Ces dépôts s'accumulent dans des lacs endoréiques en région aride ou semi-aride. La minéralogie de ces évaporites est relativement variable puisqu'elle dépend de la composition des eaux fluviales, elle-même dépendante de la géologie régionale.

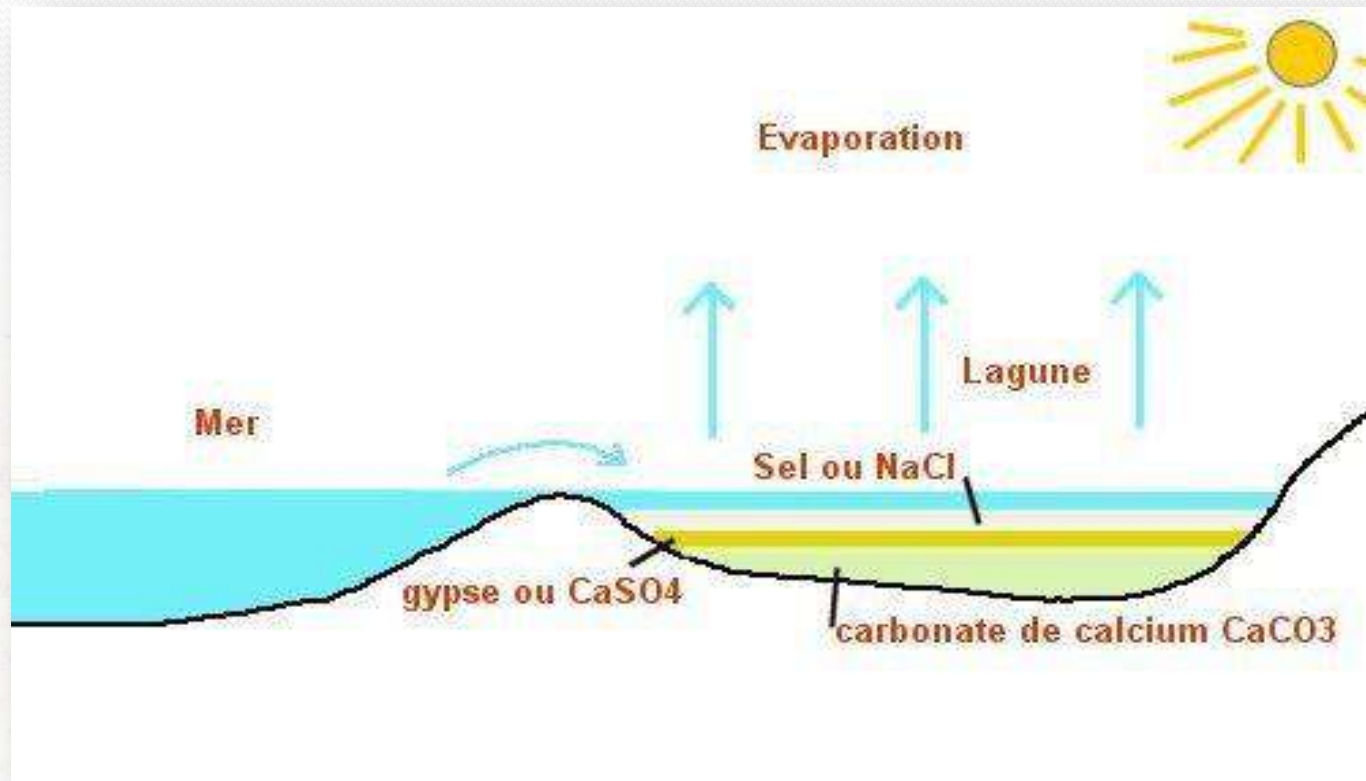


## EVAPORITES MARINES PEU PROFONDES

Ces évaporites comprennent les dépôts inter- et supratidaux comparables à ceux qui se forment actuellement le long du Golfe Persique, de certaines zones de la côte d'Afrique du Nord, etc. et les dépôts subtidaux de plate-forme.



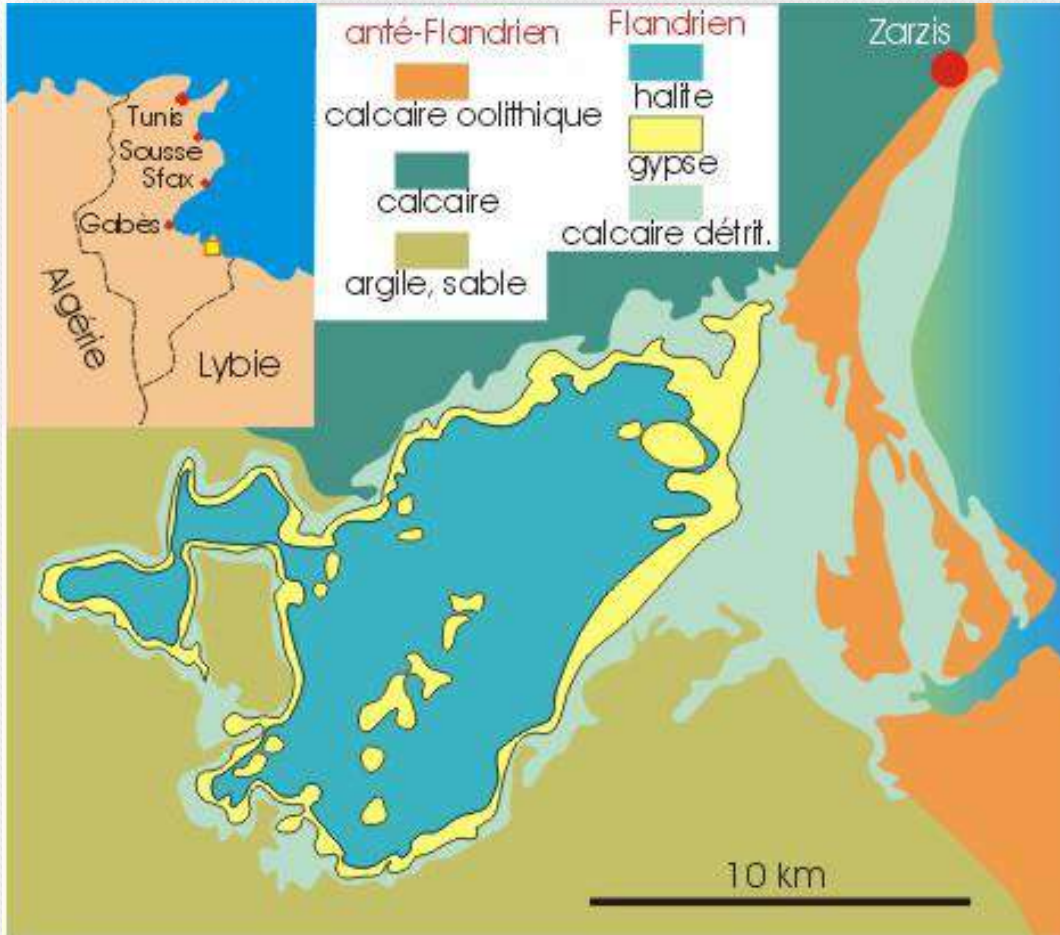
# Les différents minéraux d'une séquence évaporitique



Principaux facteurs régissant les conditions évaporitiques en milieu marin (d'après J.-M. Rouchy, 1999, modifié).



# Les différents minéraux d'une séquence évaporitique



Exemple de répartition des différents sels évaporitiques au sein d'une lagune littorale épisodiquement isolée du domaine marin

# Diagenèse des évaporites

Sulfates

chlorures

carbonates

NOM	FORMULE CHIMIQUE	SYSTEME CRISTALLIN	DENSITE	SOLUBILITE
<b>Sulfates</b>				
ANHYDRITE	CaSO <sub>4</sub>	orthorhombique	2.96-2.98	2,4g/l
BASSANITE	CaSO <sub>4</sub> .0,5H <sub>2</sub> O	quadratique	2.75	3g/l (20°C)
GYPSE	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	monoclinique	2.32	2g/l
EPSOMITE	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	orthorhombique	1.67	710g/l (20°C)
HEXAHYDRITE	MgSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	monoclinique	1.75	308g/l
KIESERITE	MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	monoclinique	2.75	419g/l (à chaud) faible à froid
LEONITE	K <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	monoclinique	2.20	faible à froid
MIRABILITE	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	monoclinique	1.49	110g/l(0°C), décomposée à 32.3°C
THENARDITE	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	monoclinique	2.66	48g/l (0°C)
LANGBEINITE	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	cubique	2.83	faible, incongruent >60°C
POLYHALITE	K <sub>2</sub> MgCa(SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	triclinique	2.78	incongruent
GLAUBERITE	Na <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	monoclinique	2.85	incongruent
<b>Chlorures</b>				
HALITE	NaCl	cubique	2.17	357g/l (0°C)
SYLVITE	KCl	cubique	1.99	340g/l (20°C) 587g/l (100°C)
BISCHOFITE	MgCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	monoclinique	1.60	1670g/l (à froid), 3670g/l (à chaud)
CARNALLITE	KMgCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	orthorhombique	1.60	645g/l(19°C)
KAINITE	KClMgSO <sub>4</sub> .11H <sub>2</sub> O	monoclinique	2.15	795g/l(18°C)
<b>Carbonates</b>				
NATRON	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	monoclinique	1.46	215g/l
TRONA	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> NaHCO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	monoclinique	2.12	très soluble

Ca, Mg et K  
Na



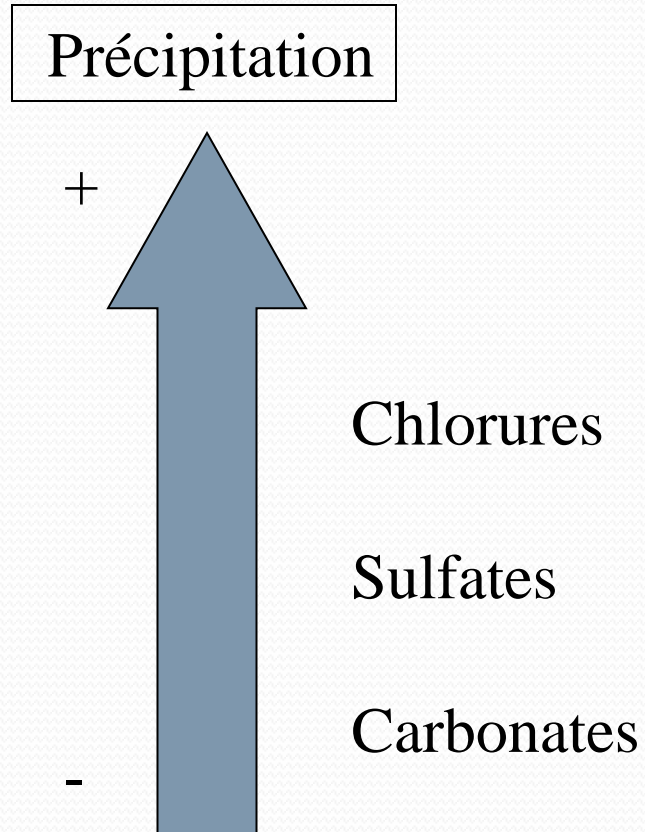
## EAU DE MER

- Salinité = 34,5 ‰
- Chlorinité = 19 ‰
- pH = 8

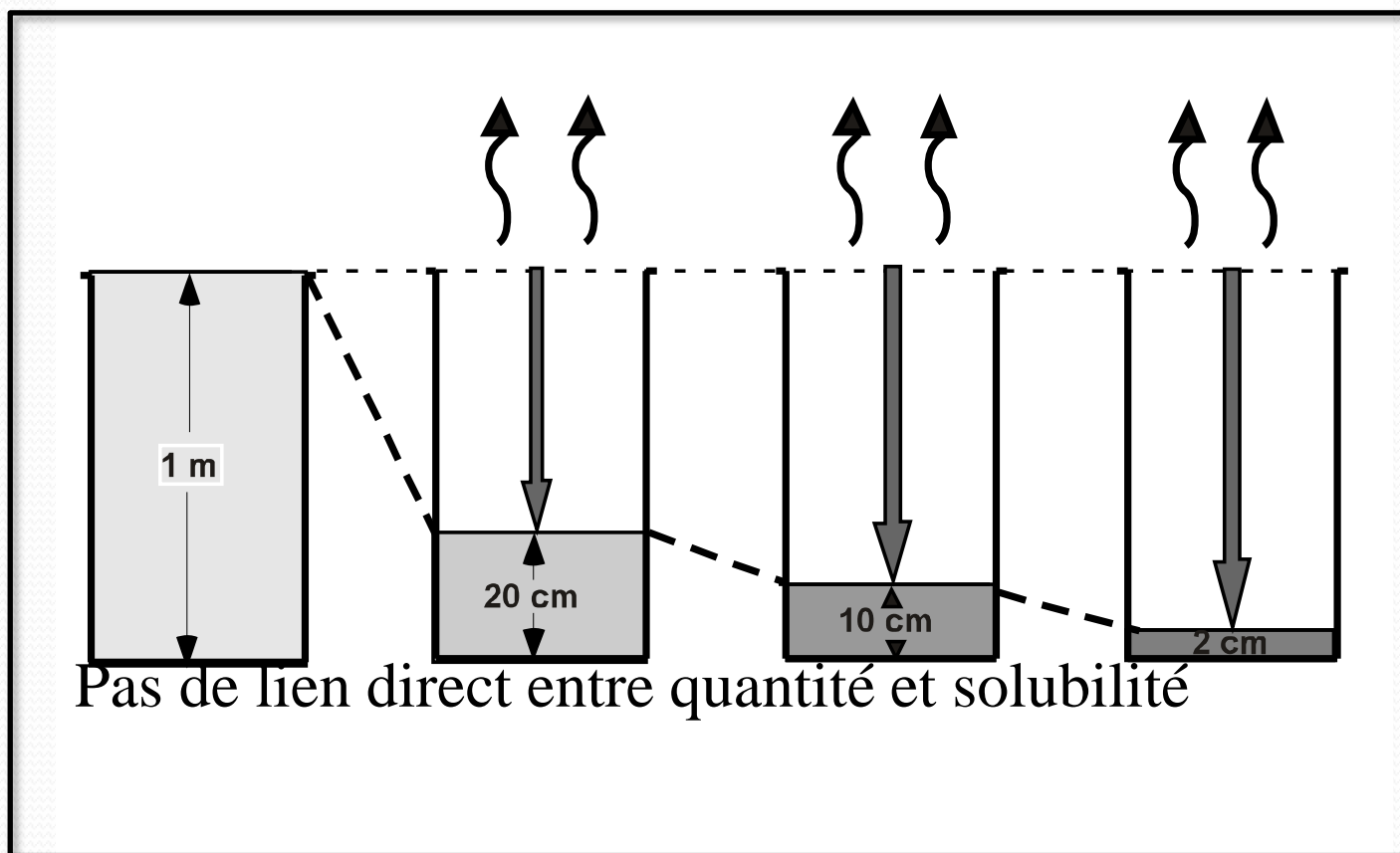
Ions	g/l	% poids total
Na	10,55	30,6
Mg	1,27	3,7
Ca	0,40	1,1
K	0,38	1,9
Sr	0,03	-
Cl	18,98	55
SO <sub>4</sub>	2,65	7,7
HCO <sub>3</sub>	0,14	0,4
Br	-	-
F	-	-

La composition de l'eau de mer est dominée par le chlore et le sodium qui représentent plus de 85% du poids total de substances dissoutes de l'eau de mer. La halite est donc un composant dominant.

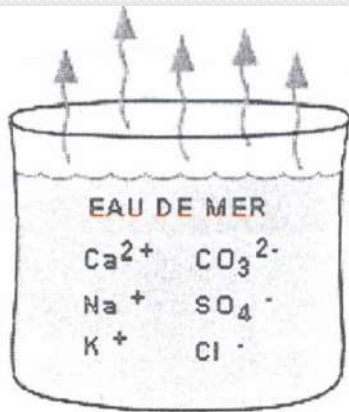
# Ordre de cristallisation des différents sels



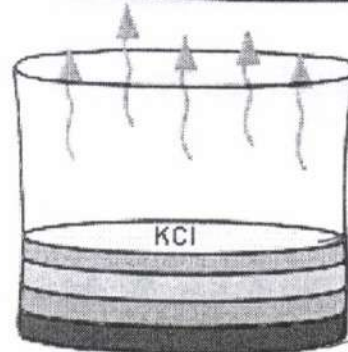
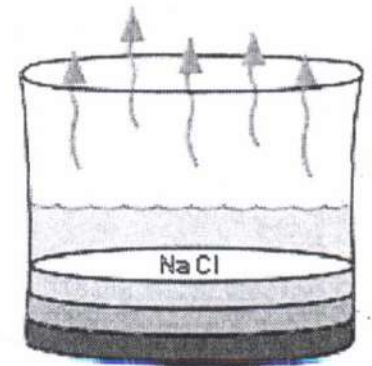
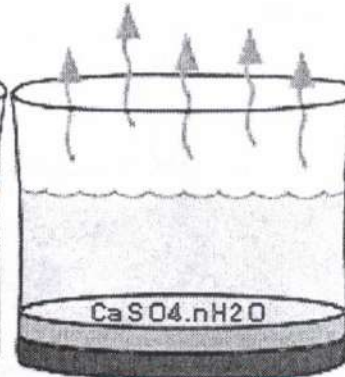
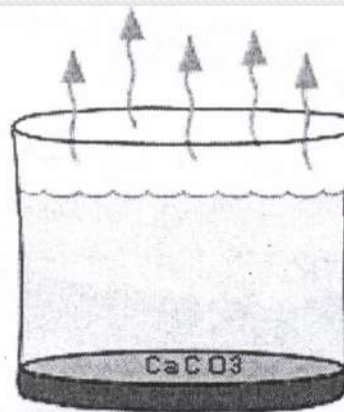
**Ordre de cristallisation des sels** lors de l'évaporation de l'eau de mer: s'établit en fonction de la concentration croissante de la solution et de la solubilité croissante des phases minérales. La concentration de la solution est associée à une réduction croissante du volume initial du liquide et une augmentation de sa densité (d'après Rouchy, 1995).



# Les minéraux d'une séquence évaporitique :

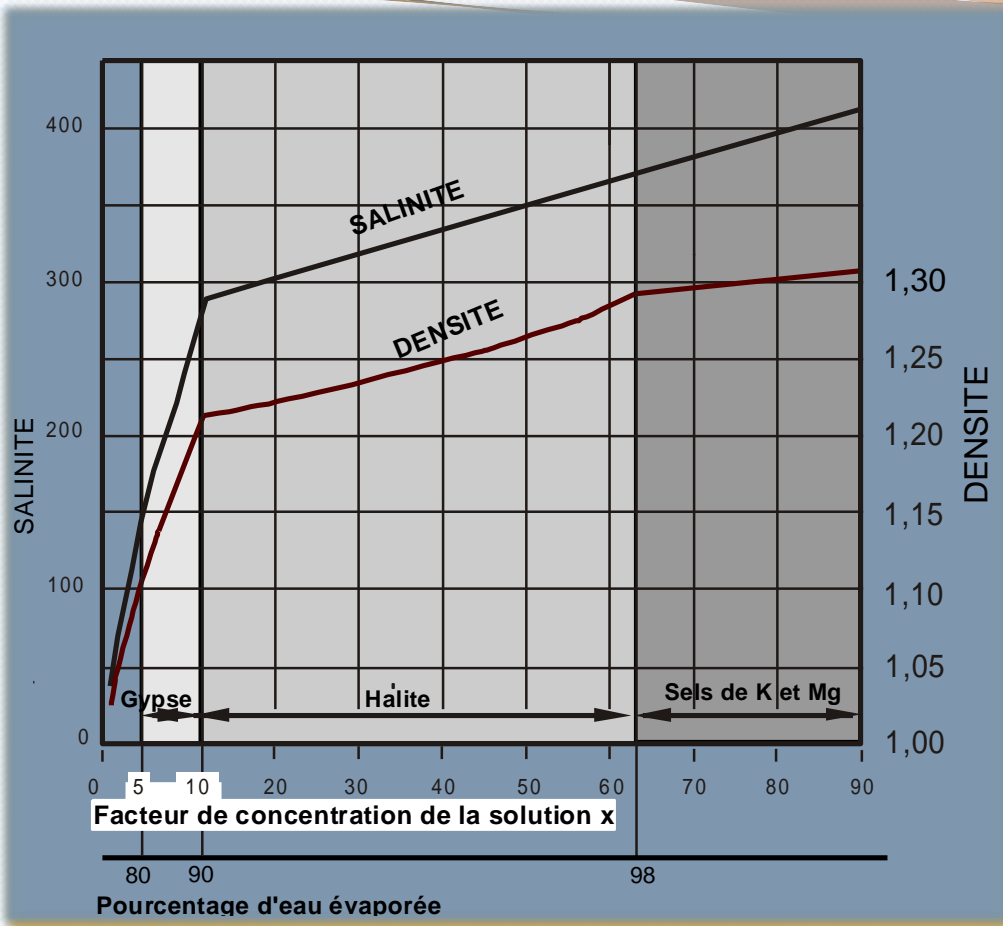


35 ppm,



↑  
 $\text{KCl}$  Sylvite (potasse)  
 $\text{NaCl}$  Halite (sel)  
 $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  Gypse  
 $\text{CaCO}_3$  Calcite

Séquence de précipitation



La cristallisation d'un minéral se produit lorsque le Produit des Activités Ioniques de la solution atteint son produit de solubilité (PK) – saturation pour une espèce minérale donnée.



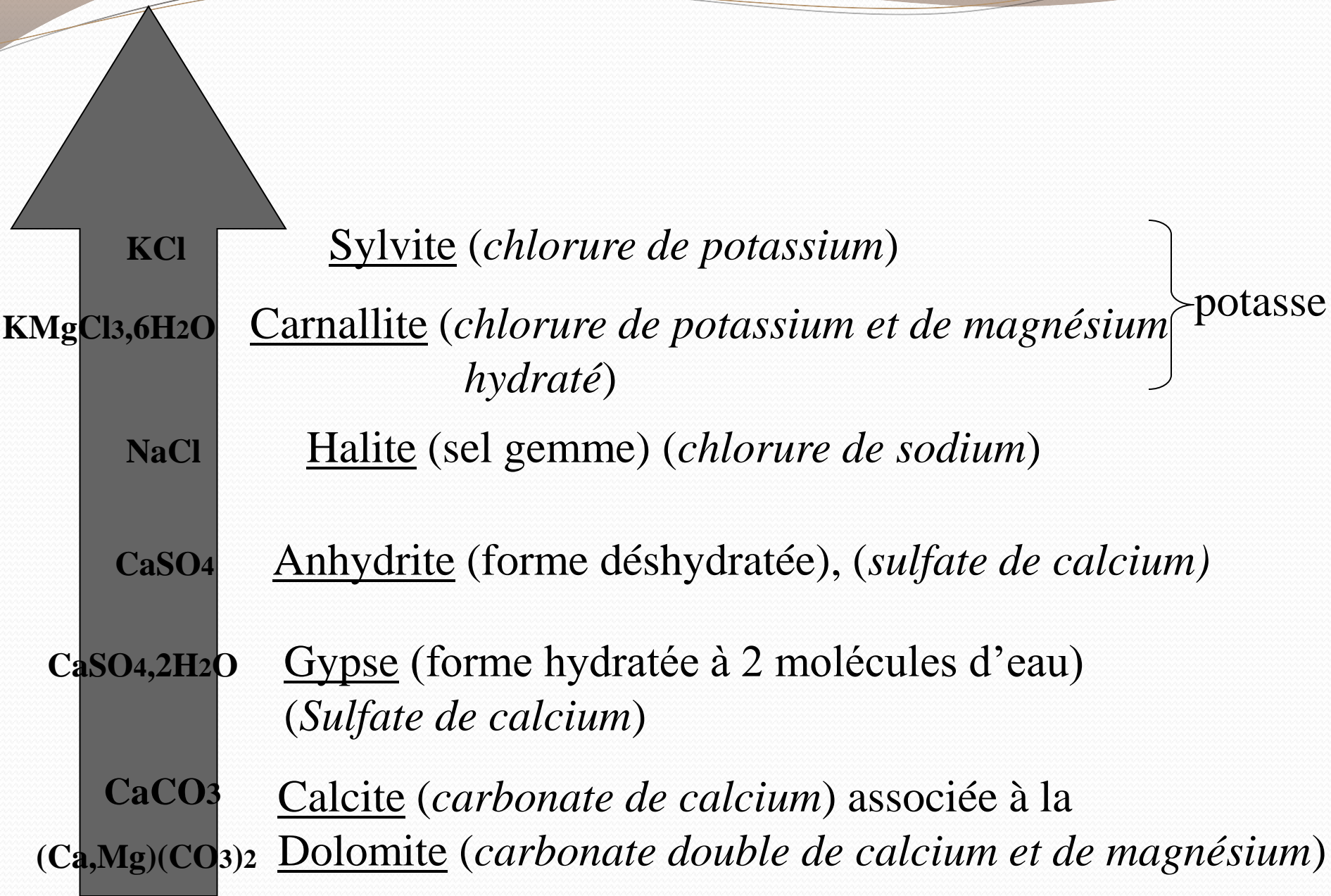
## Dans le cas de l'eau de mer :

- Le **gypse** précipitera en 1<sup>er</sup> lorsque 80% de la solution sera évaporée et que la concentration sera voisine de 130‰.
- La **halite** lorsque 90% du liquide sera évaporé et que sa concentration sera proche de 300‰.
- Les **sels ultimes**, lorsqu'on aura 98% de l'eau évaporée et une concentration supérieure à 350‰.

L'évaporation d'une colonne d'eau de mer de 1000 mètres ne produira que environ :

- 5 cm de carbonates
- 50 cm de gypse
- 12 mètres de Halite
- 5 à 6 mètres d'un mélange de halite et de sels de K et de Mg

# Précipitation:



## Cristallochimie

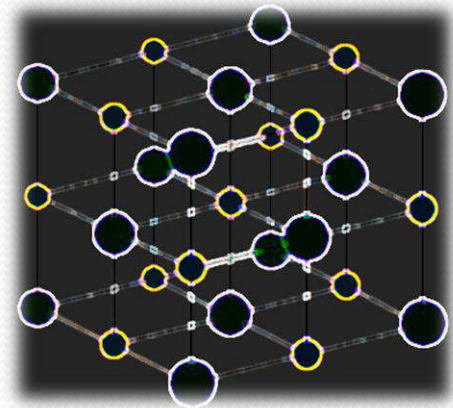
La halite se présente sous forme d'un réseau cubique d'ions hexacoordonnés, c'est-à-dire que chaque anion est entouré de façon octaédrique par six cations, et réciproquement.

### Groupe de la halite

Groupe de la halite			
Minéral	Formule	<u>Groupe ponctuel</u>	<u>Groupe d'espace</u>
<u>Carobbiite</u>	KF	4/m 3 2/m	Fm3m
<u>Griceite</u>	LiF	4/m 3 2/m	Fm3m
Halite	NaCl	4/m 3 2/m	Fm3m
<u>Sylvine</u>	KCl	4/m 3 2/m	Fm3m
<u>Villiaumite</u>	NaF	4/m 3 2/m	Fm3m

## Cristallographie

- La structure de la halite est, pour l'essentiel, celle du chlorure de sodium.
- La halite cristallise dans le système cristallin cubique, avec le groupe d'espace  $Fm\bar{3}m$  ( $Z = 4$  unités formulaires par maille conventionnelle)7.
- Paramètre de la maille conventionnelle :  $a = 5,6402 \text{ \AA}$  (volume de la maille  $V = 179,43 \text{ \AA}^3$ )
- Masse volumique calculée =  $2,16 \text{ g/cm}^3$
- Cette structure correspond à deux sous réseaux cubiques à face centrée d'ions, décalés de la moitié du côté de la maille selon l'une des directions des côtés de la maille.
- Les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  ont chacun une coordinence 6 : n'importe quel ion  $\text{Cl}^-$  est entouré de 6 ions  $\text{Na}^+$ , formant un octaèdre autour du  $\text{Cl}^-$ .



# La halite de Salins-les-Bains

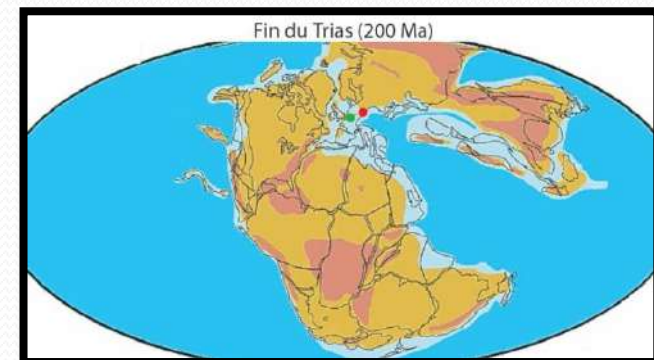


Salins-les-Bains se situe au sein du bassin salifère comtois, au cœur d'une reculée creusée par un des affluents de la Loue, la Furieuse. Le soubassement de la vallée est constitué de marnes à sel gemme, formées par l'évaporation d'une ancienne mer chaude et peu profonde lors du Keuper inférieur et moyen (Trias).

Durant le Trias supérieur (215 millions d'années), une extension épicontinentale (mer triasique) de l'océan Paléo-Téthys qui recouvrait tout l'est de la France (partie intégrante du supercontinent Pangée) se retire et laisse une lagune peu profonde de saumure d'eau de mer qui par évaporation forme une très importante série évaporitique de plus de 100 m d'épaisseur. Le massif du Jura se forme il y a 35 millions d'années (Priabonien) par la compression et plissement exercée par les contraintes tectoniques alpines plus au Sud. Les niveaux évaporitiques remontent localement vers la surface selon la forme des plis et le mode d'érosion.

Les couches du trias sont traversées par des exurgences et se chargeant en sel au contact de la roche évaporitique. Les eaux d'infiltrations se charge et se sature en sels et resurgit par résurgence et constituent les sources salées (saumures) de la région.

Les reliefs jurassiens surplombant Salins-les-Bains sont composées de marnes à gypse du Keuper supérieur, de marnes du Lias et de calcaires du Bajocien.

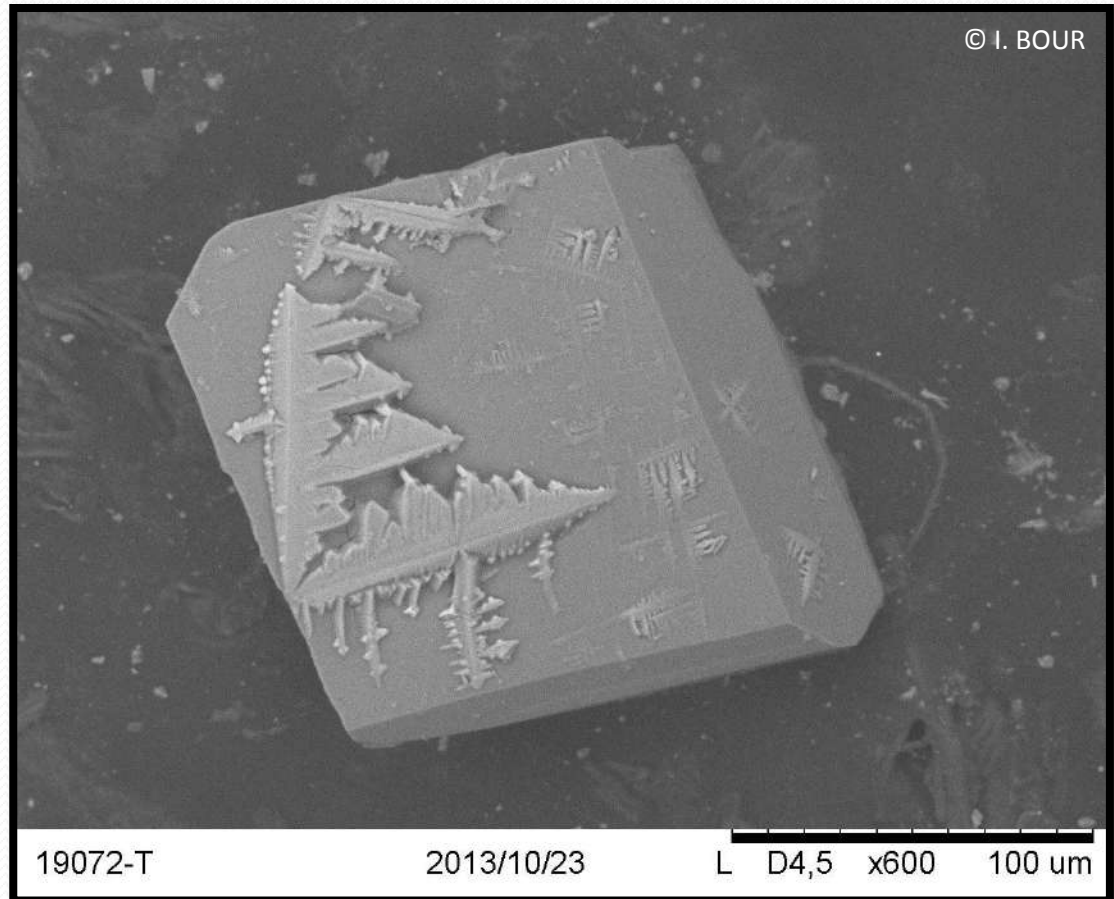




# La Halite de Salins-les-Bains vue au microscope électronique à balayage (MEB)

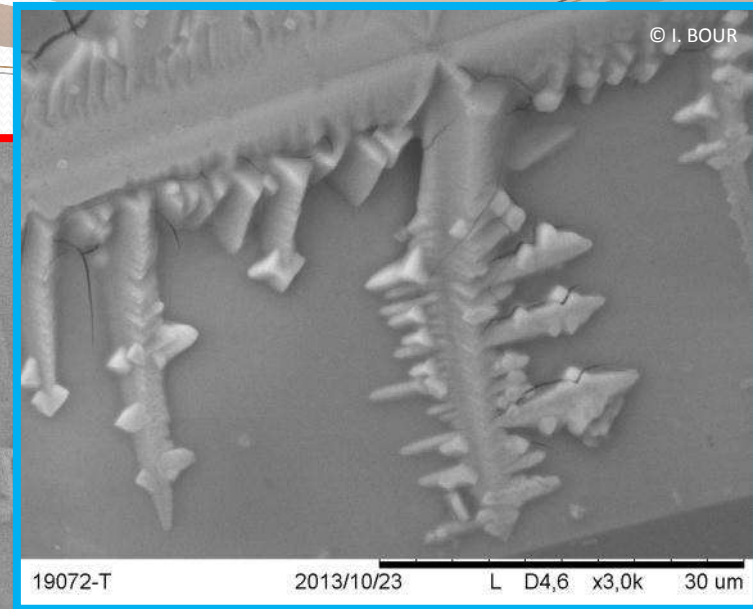
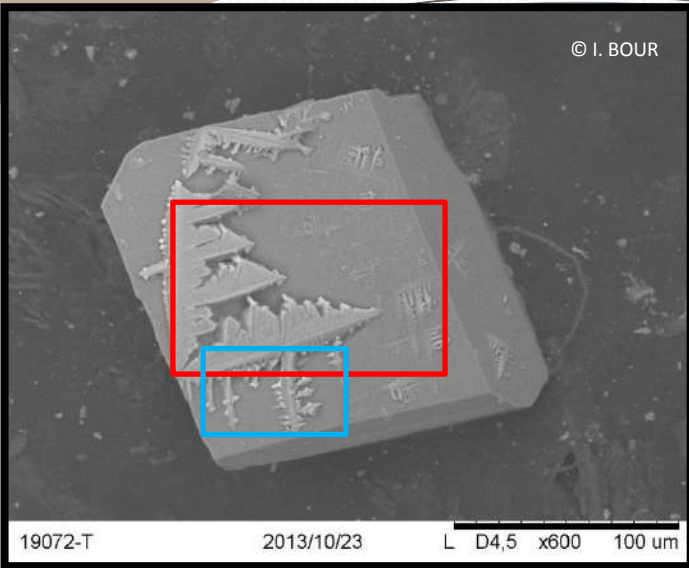


Saumure mise à l'évaporation afin de concentrer et de faire cristalliser les sels évaporitiques (ici la halite)

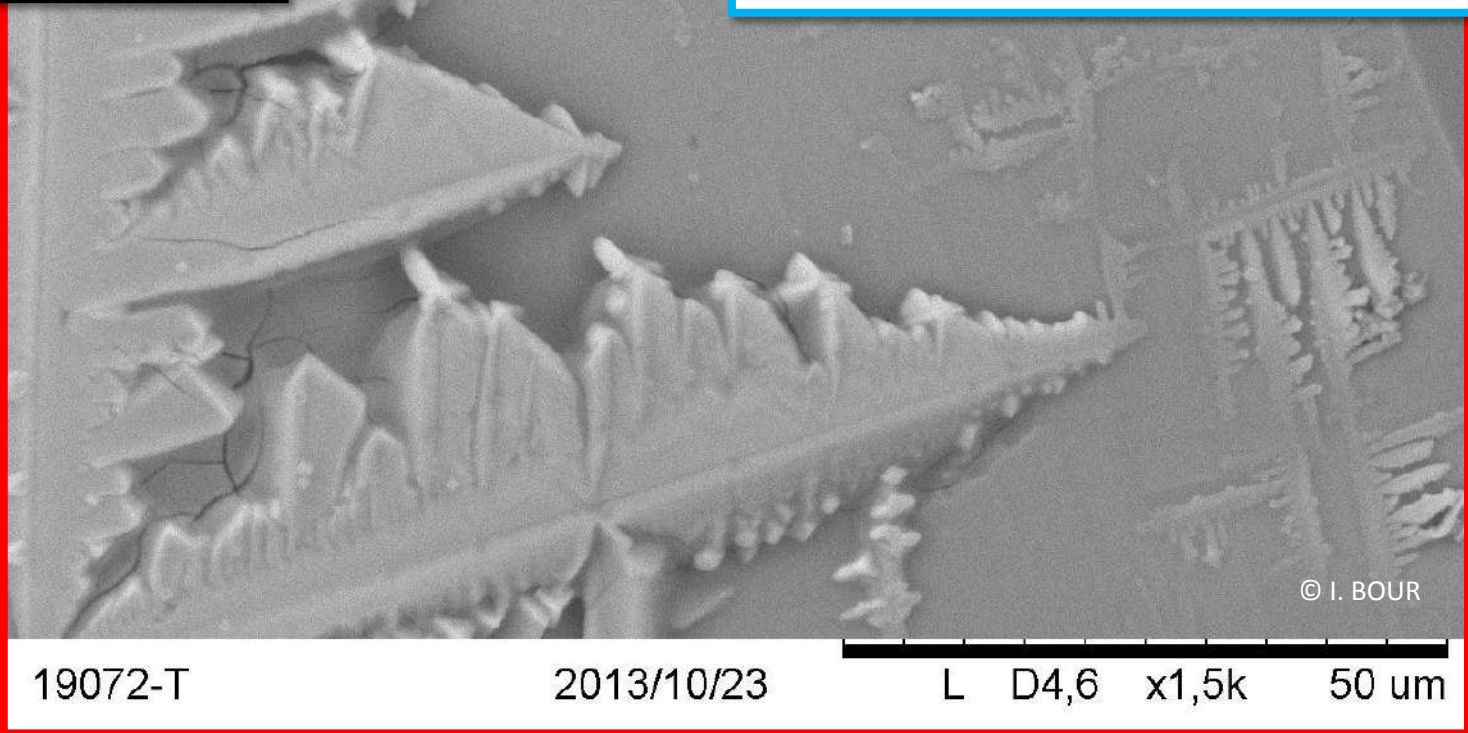


Vue d'un cristal de halite au MEB, issu du bac d'évaporation ci-contre. Noter la forme générale d'aspect octaédrique et les multiples chevrons de croissances en dendrite complexe participant la croissance progressive du cristal de sel,

# La Halite de Salins-les-Bains vue au microscope électronique à balayage (MEB)



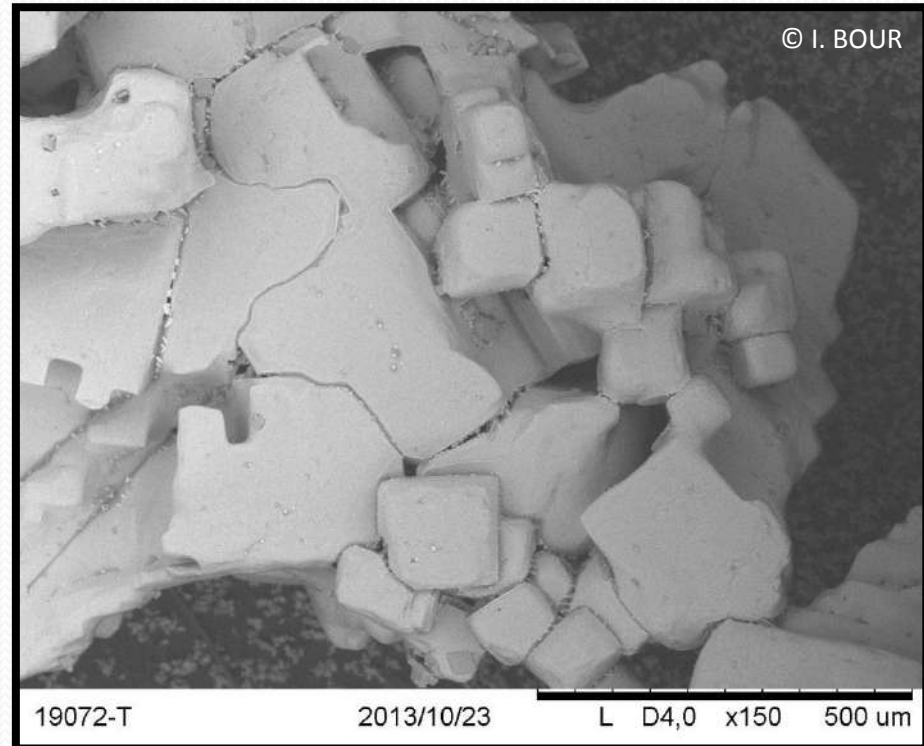
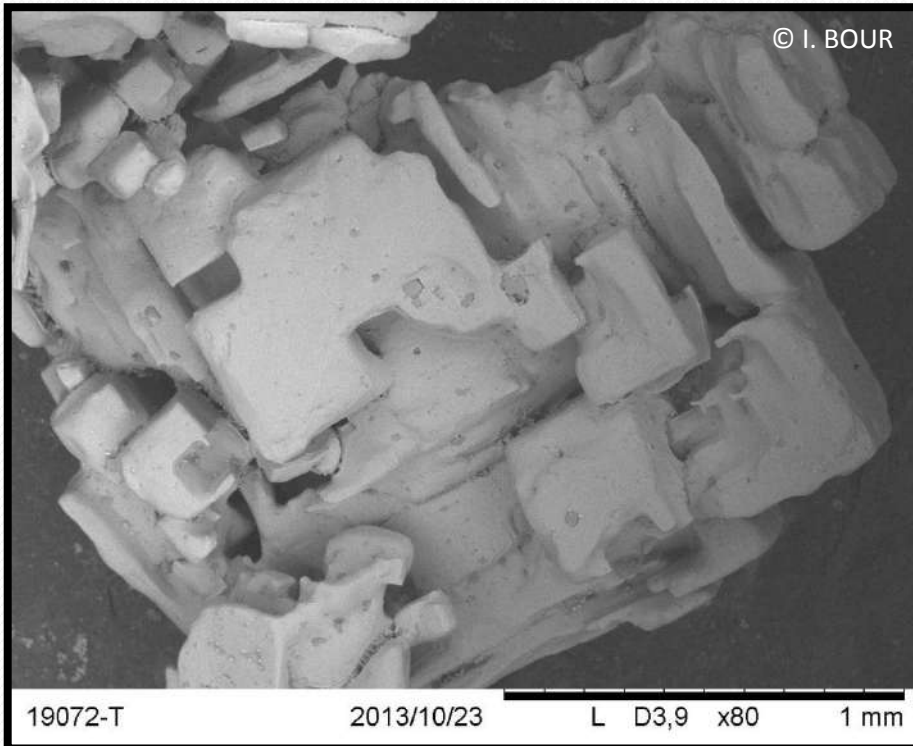
Vue rapprochée des chevrons de croissances en dendrite complexe (sorte de macles nanométriques en fer de lance). Des dendrites de différentes phases de maturités sont visibles. Ces croissances en chevrons finissent par se rejoindre et fusionner, participant ainsi à l'accroissement en volume du cristal,





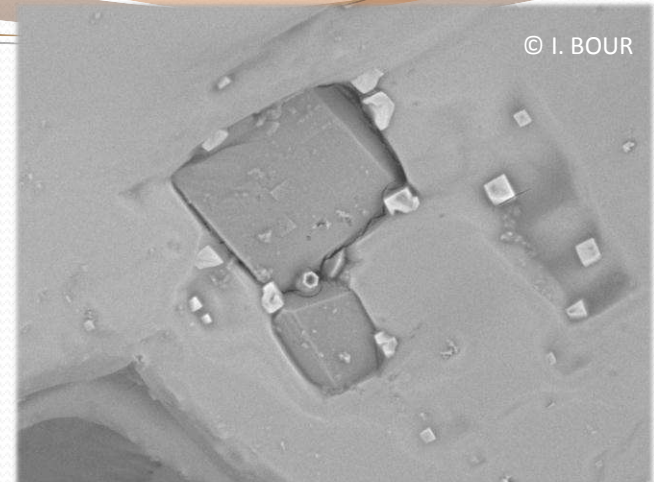
# La Halite de Salins-les-Bains vue au microscope électronique à balayage (MEB)

Vues élargies de plusieurs amalgames de cristaux de halite. On peut aisément identifier les octaèdres dont la forme émoussé est à mettre en relation avec une croissance incomplète dans une saumure soumise à un brassage.

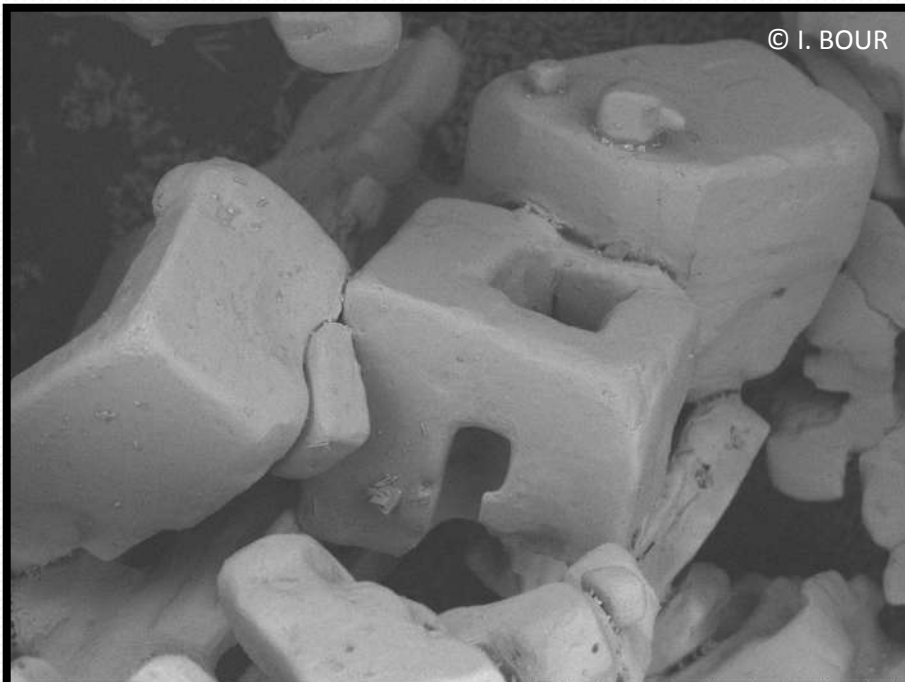


# La Halite de Salins-les-Bains vue au microscope électronique à balayage (MEB)

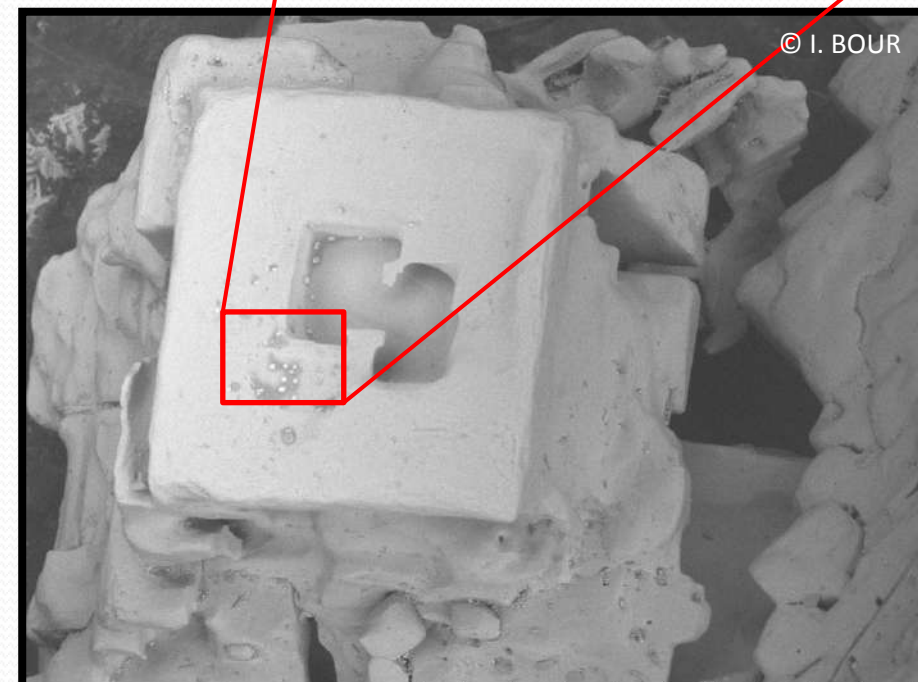
Vues d'octaèdres émoussés avec mise en évidence d'une croissance s'effectuant par les arrêtes avec un remplissage progressif du cristal vers l'intérieur par cristallisation successif de nanocristaux de halite dans une saumure riche en impureté (argile notamment).



19072-T 2013/10/23 L D3,8 x1,2k 50 µm



19072-T 2013/10/23 L D3,5 x150 500 µm



19072-T 2013/10/23 L D3,9 x100 1 mm

## Caractéristiques majeures des environnements évaporitiques:

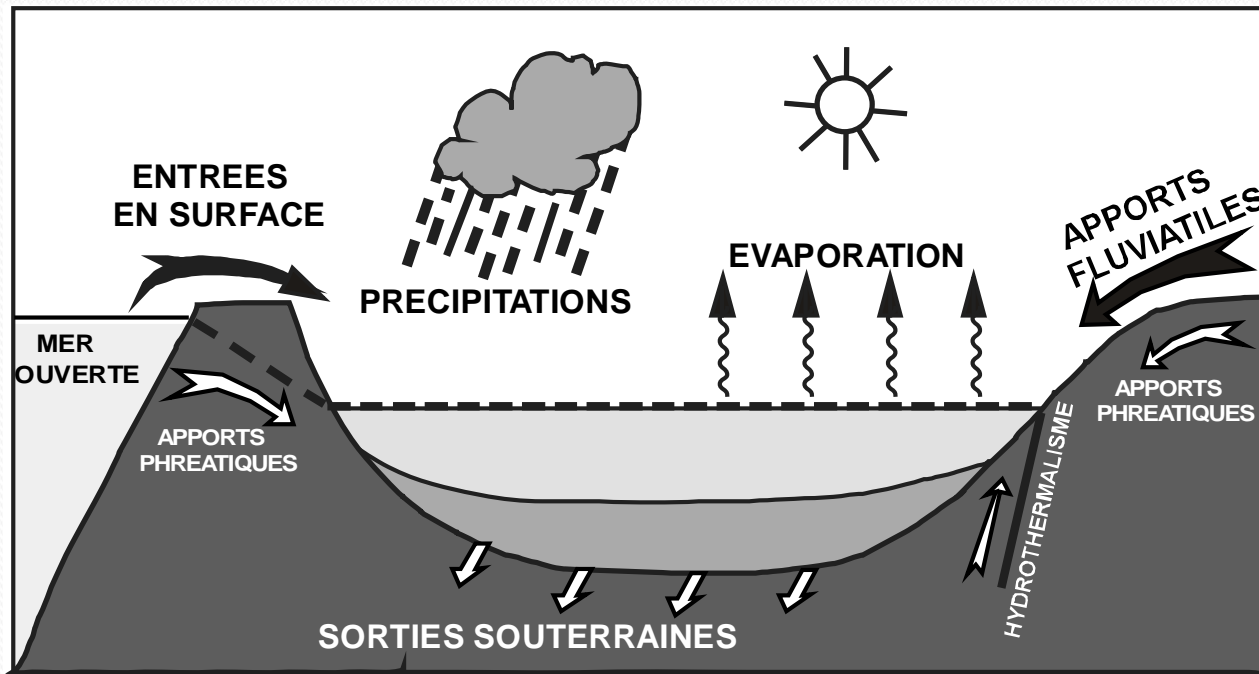
- Abaissement du plan d'eau sous le niveau océanique mondial (Maiklem, 1971)
- Variations eustatiques autogénétiques = restriction et bilan hydrique local



## Principaux paramètres contrôlant l'évolution des milieux évaporitiques

Le développement de conditions évaporitiques dans un bassin, soit marin, soit continental est réglé par deux paramètres :

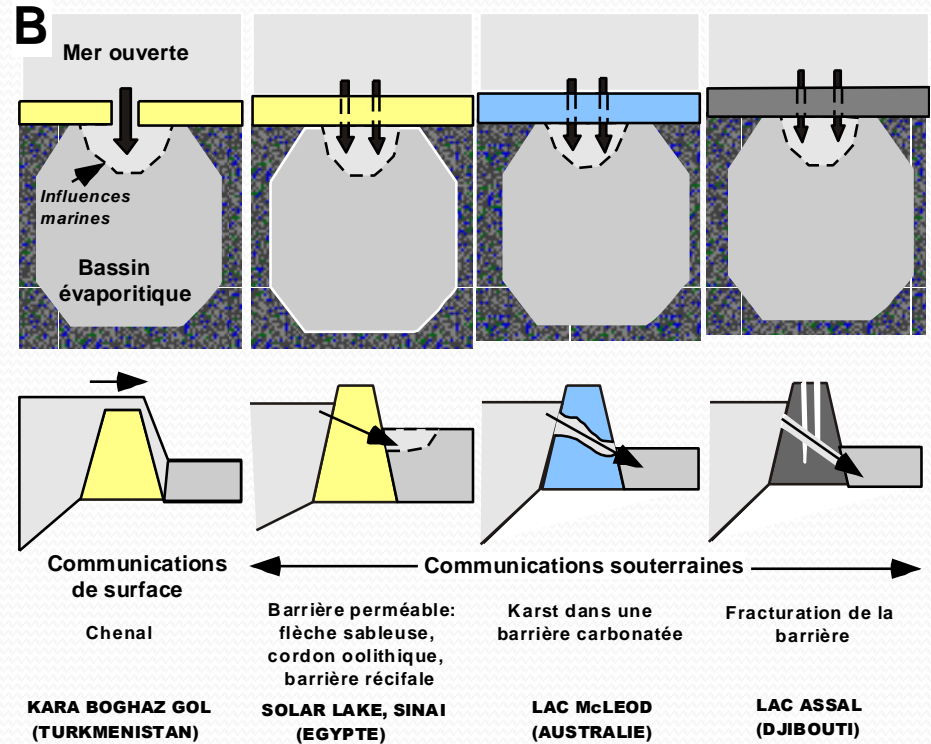
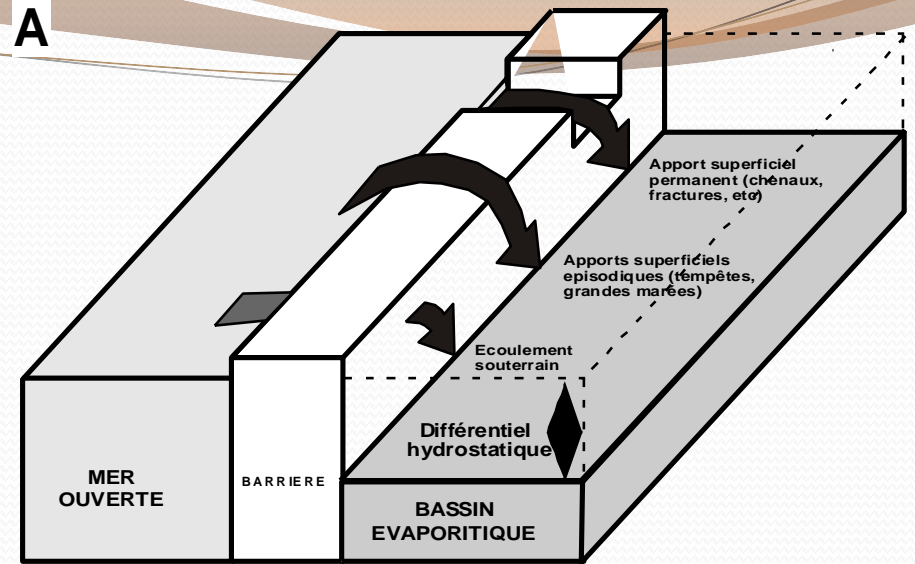
- le degré d'isolement
- l'aridité climatique



Les conditions pour qu'un bassin évolue vers des conditions hypersalines = la perte d'eau due à l'évaporation supérieure aux apports d'eau douce et non compensées par les apports d'eau à salinité plus faible (réservoirs océaniques, marin ouvert ou lacustre).

1. Restriction des bassins (water inflow/water outflow) et l'endoréisme (absence d'exutoire),
2. Le degré d'aridité climatique à apports externes constants (déficit hydrique),
3. Le piégeage des solutions concentrées dans le bassin ou différentiel hydrostatique: (exemple de la méditerranée),
4. Taux évaporation des solutions (TE), inversement proportionnel à la concentration,
5. Augmentation de la densité (pycnocline-halocline).

# Restriction des bassins: connexions



## 3 grands groupes

Minéraux peu dur, se rayent facilement

- Carbonates → calcite, aragonite, dolomite
- Sulfates → gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ )

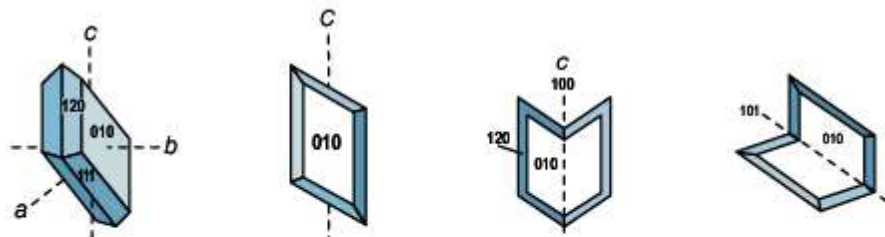
transformation diagenétique (perte en eau par enfouissement)

- Chlorures → halite ( $\text{NaCl}$ ), sylvite ( $\text{KCl}$ )

mélange des deux = sylvinite

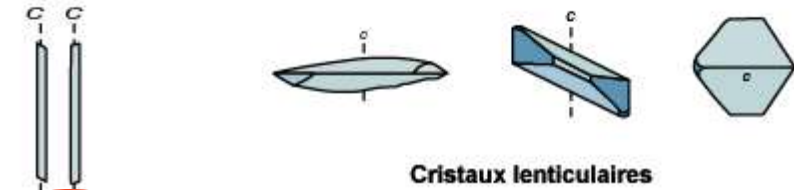
# Cristallisation des minéraux évaporitiques

## Cas du Gypse



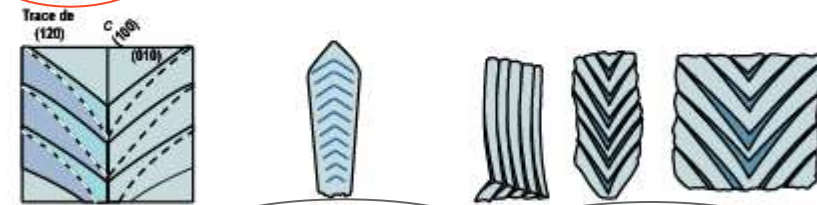
Prisme monoclinique élémentaire

Cristaux mâclés en fer de lance ou queue d'aronde



Cristaux aciculaires

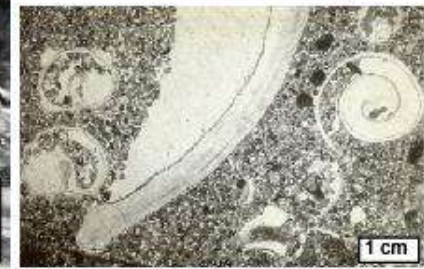
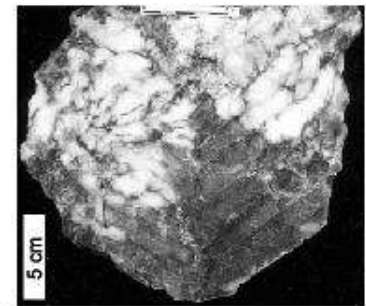
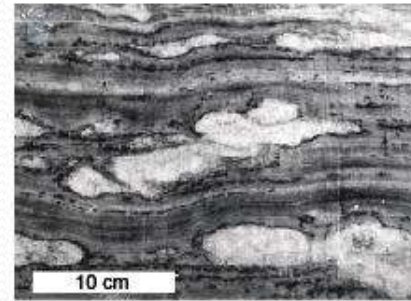
Cristaux lenticulaires



Principales orientations cristallographiques

Monocristaux

Macles en fer de lance



- En surface et intérieur des saumures
- Sur le fond





Gypse saccharoïde, Aude



Gypses maclés en fer de lance, Aude



SEBKHA de OUARGLA  
(ALGERIE)

# Gypse

G  
Y  
P  
S  
E

Rose des sables  
Tunisie



"Croûte" de gypse, Sebkhha de Ouargla,  
Sahara, Algérie



Gypses fibreuse, gypse filonienne





Gypse saccharoïde, Aude



Gypses maclés en fer de lance, Aude



SEBKHA de OUARGLA (ALGERIE)



de Ouargla,

Se macle sous forme de chevron pour certain.  
Polarisation dans les teintes grisâtres.  
Aspect lenticulaire, cristaux allongés.

Forme lenticulaire liée aux impuretés du gypse  
(MO, autres ions présents dans l'eau) :



Cristaux de gypse pur :



Rose des sables  
Tunisie



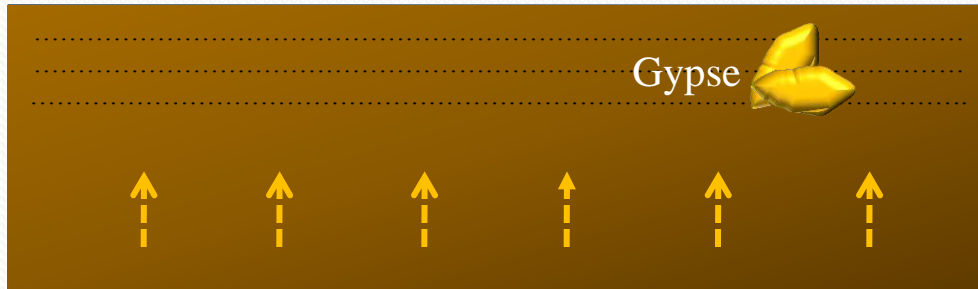
Gypses fibreuse, gypse filonienne



## Exemple de croissance des Roses des sables



Climat chaud



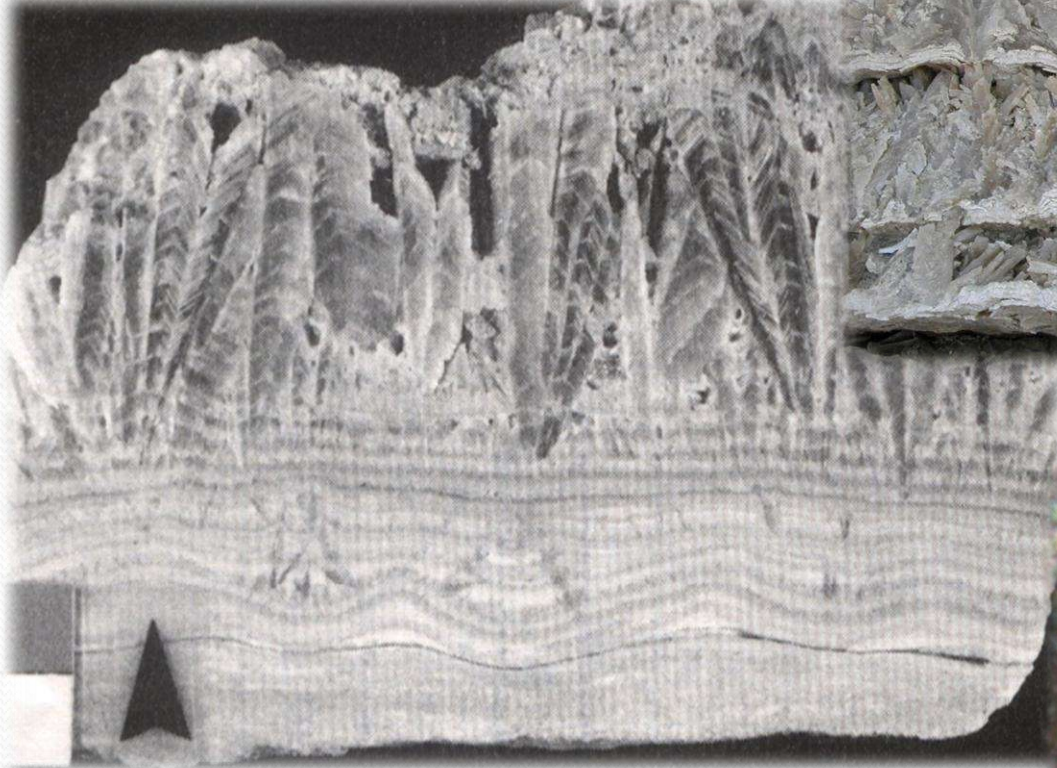
$H_2O$   
 $Ca^{2+}, SO_4^{2-}$

Evaporation de l'eau → pompage  
de l'eau par capillarité  
Conditionne l'alimentation de la  
croissance des cristaux de gypse

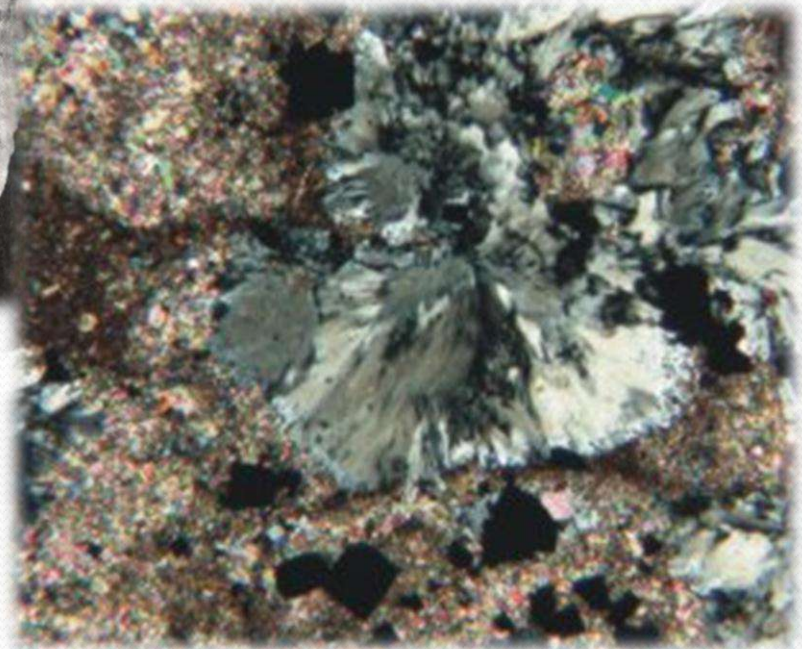
Remontée capillaire de l'eau



**Gypse sélénite  
Messinien de Sicile**

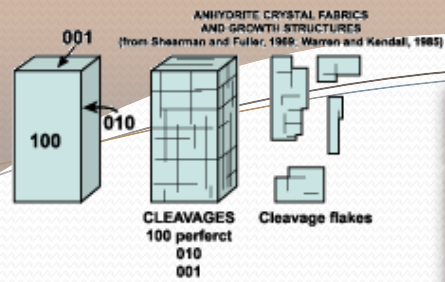


**Gypse pied d'alouette  
Paléogène du  
Bassin de Paris**



*A: dolomie et gypse en rosettes  
en LM (LPA).*



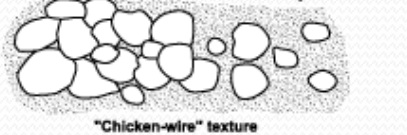
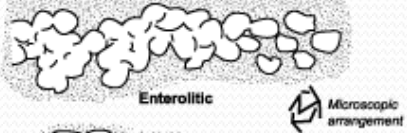


# Anhydrite

sulfate anhydre  $\text{CaSO}_4$  ou  
*anhydrite*

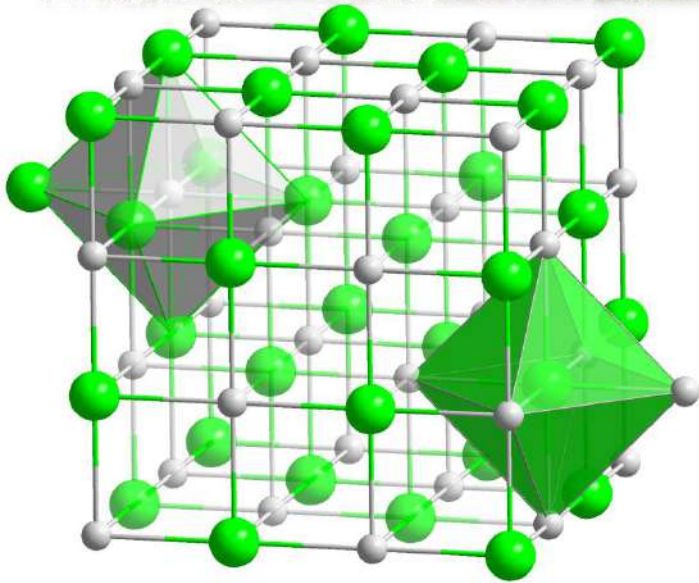


## DEPOSITIONAL STRUCTURE



Aspect transparent se présentant en paillettes,  
LPNA: teinte grisâtre ou violacée,  
LPA: haute couleur de biréfringence (rougeâtre)





## Halite

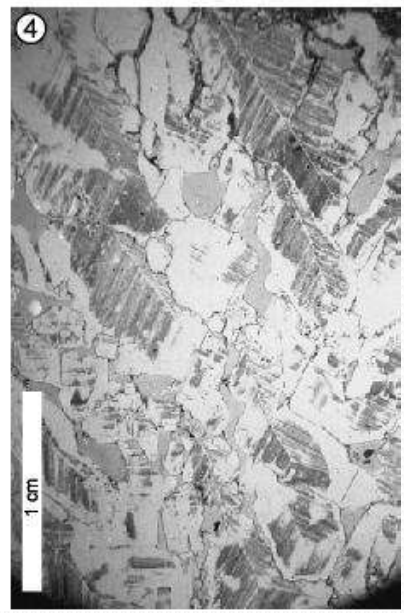
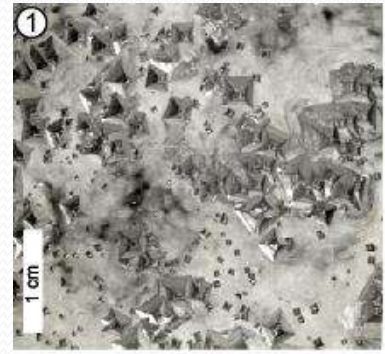
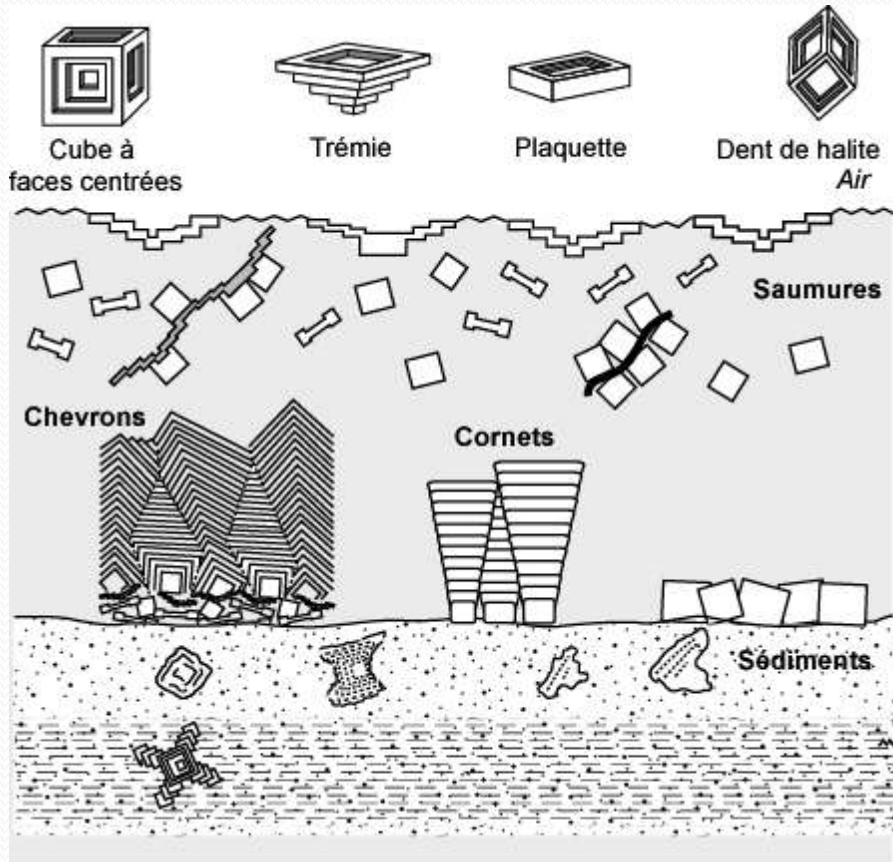


### Légende :

- Bleu : =  $\text{Na}^+$
  - Vert =  $\text{Cl}^-$
- Mise en valeur des polyèdres de coordination au sein de la maille



# Faciès cristallins de la Halite (NaCl)







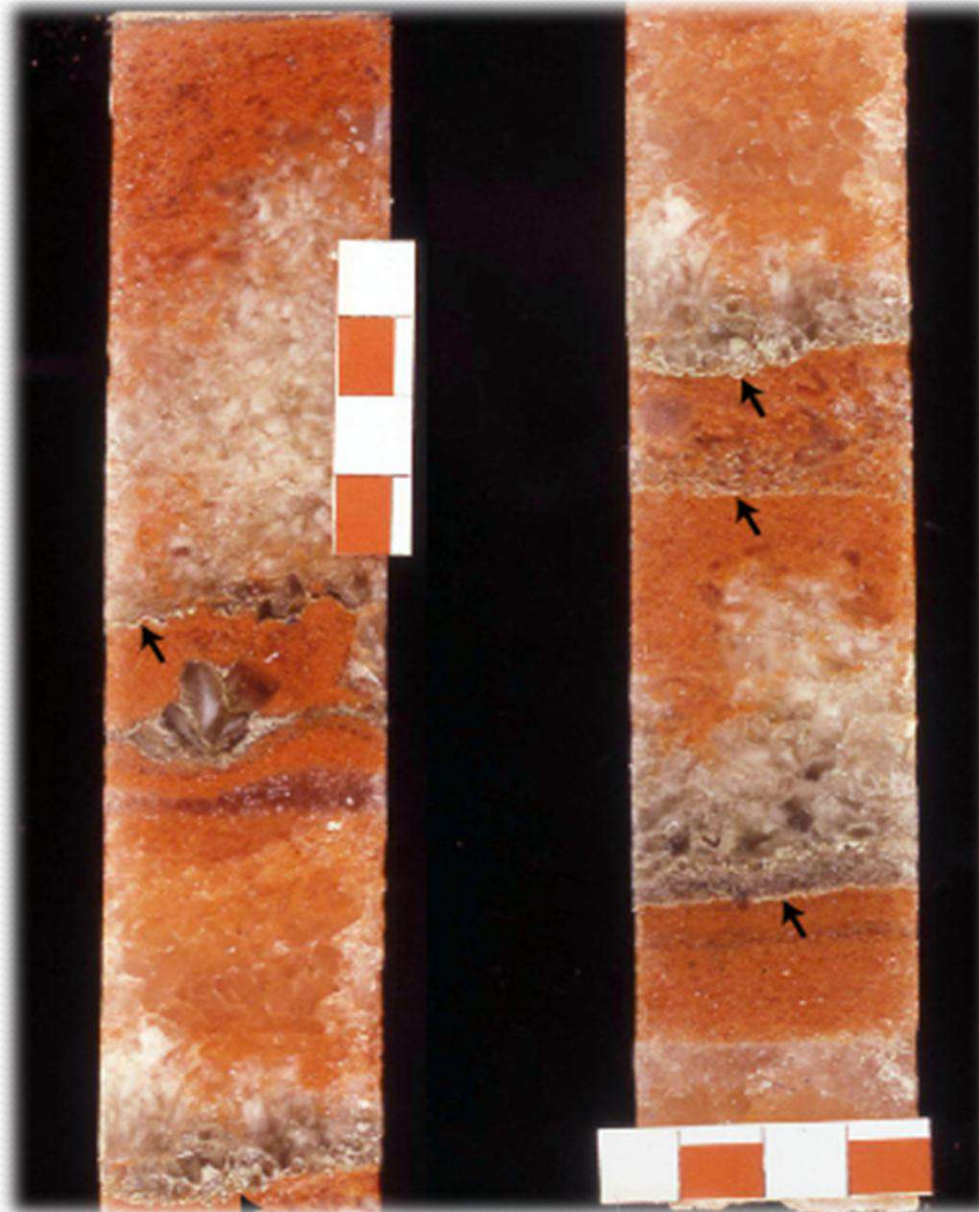
# Sylvite + Halite

(KCl) (NaCl)





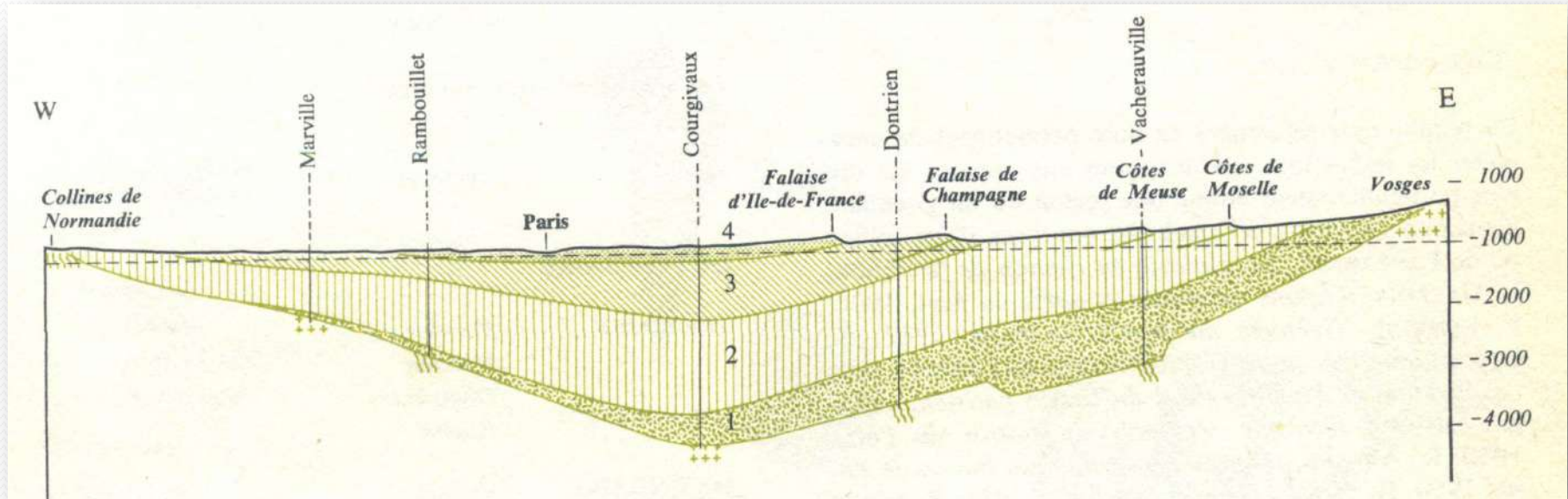
**LES SELS POTASSIQUES  
PALEOGENE DU BASSIN DE MULHOUSE (ALSACE)**

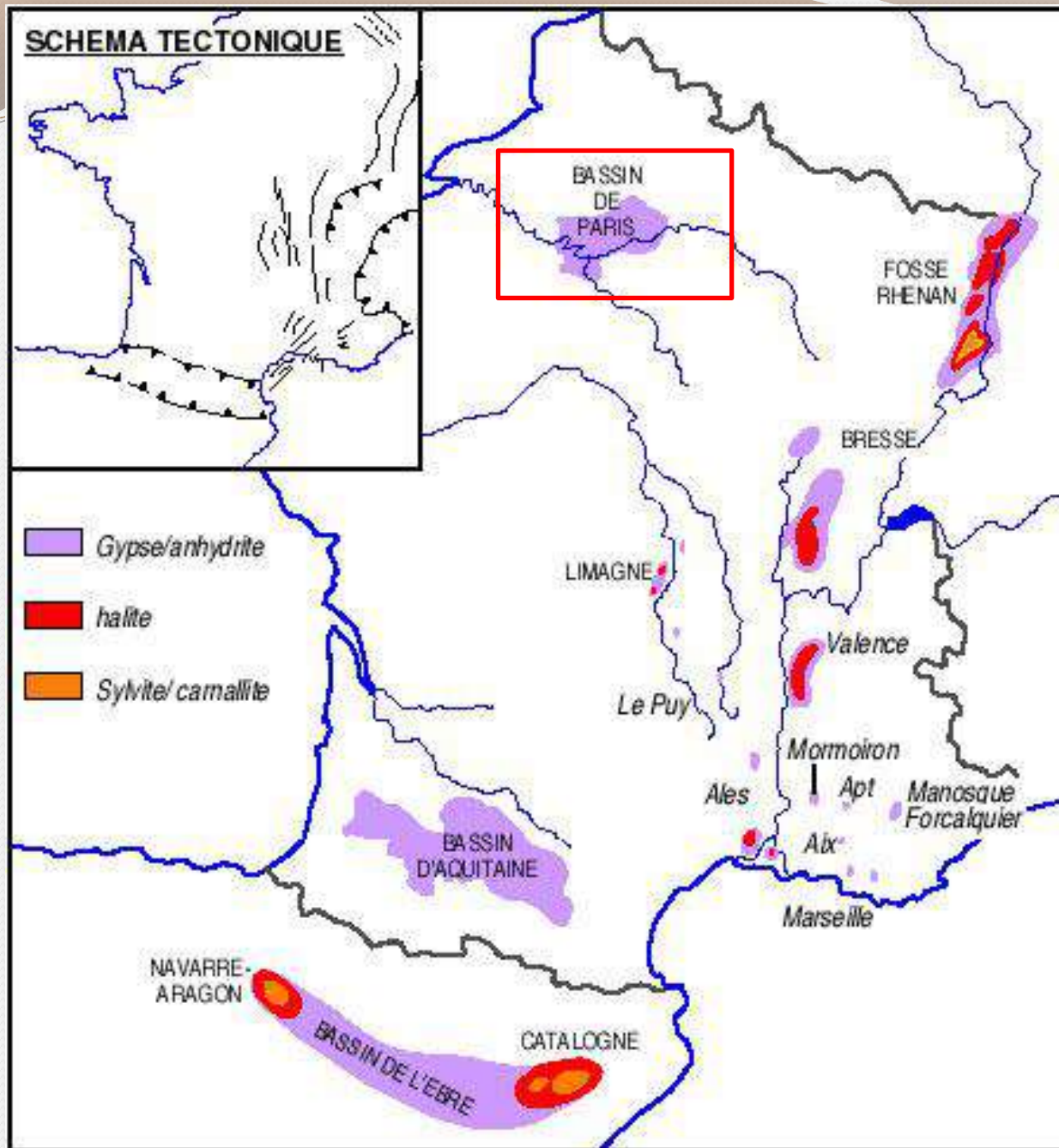


# Les différentes évaporites du bassin parisien

## Le gypse du Tertiaire du bassin de Paris

Le gypse s'est déposé en plusieurs couches à la fin de l'Eocène (Ludien)

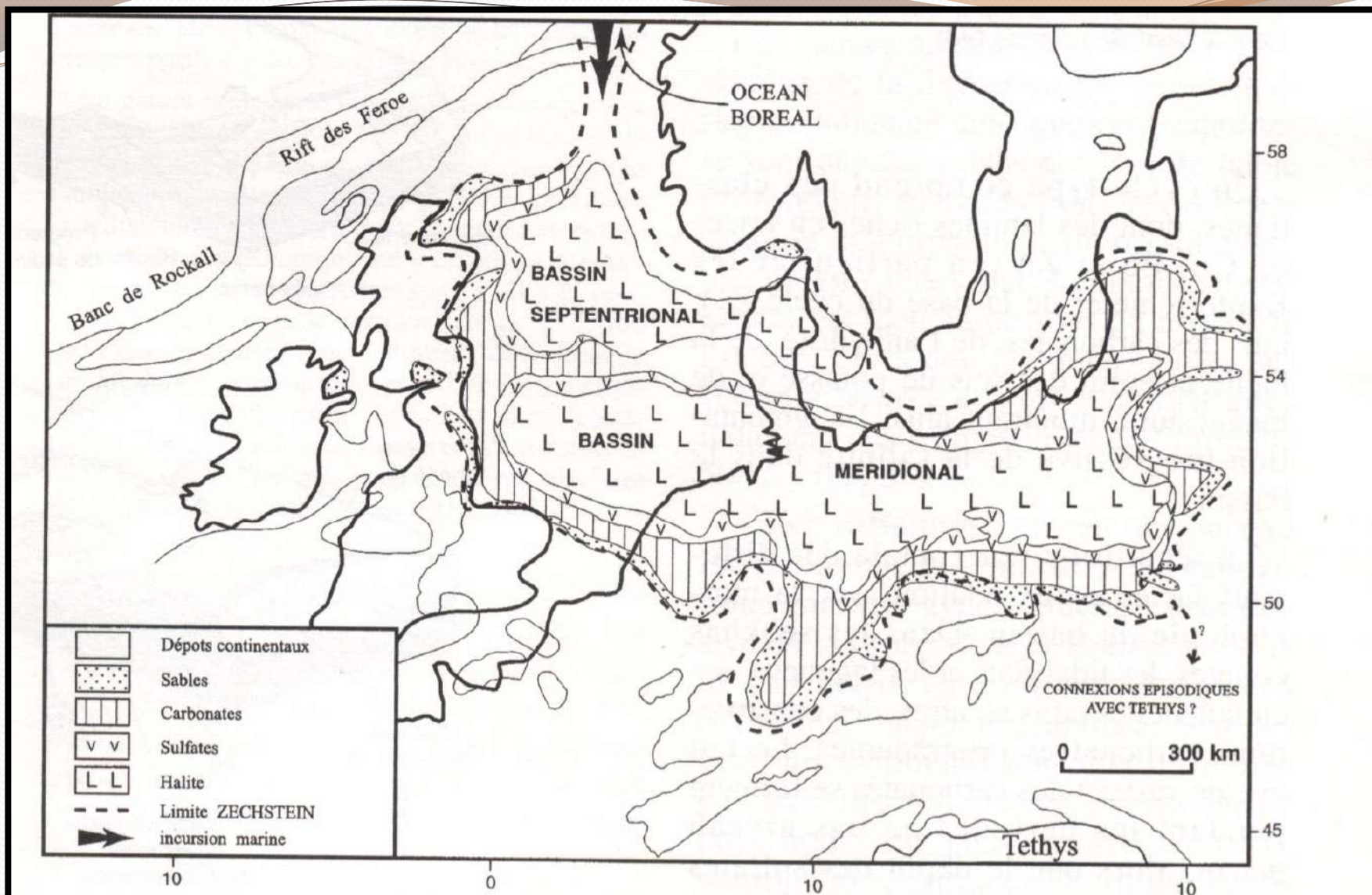




Extension des évaporites d'âge Eocène supérieur-Oligocène dans le rift ouest européen, les zones de plate-forme voisines (Bassin de Paris et d'Aquitaine) et la dépression de l'Ebre en Espagne



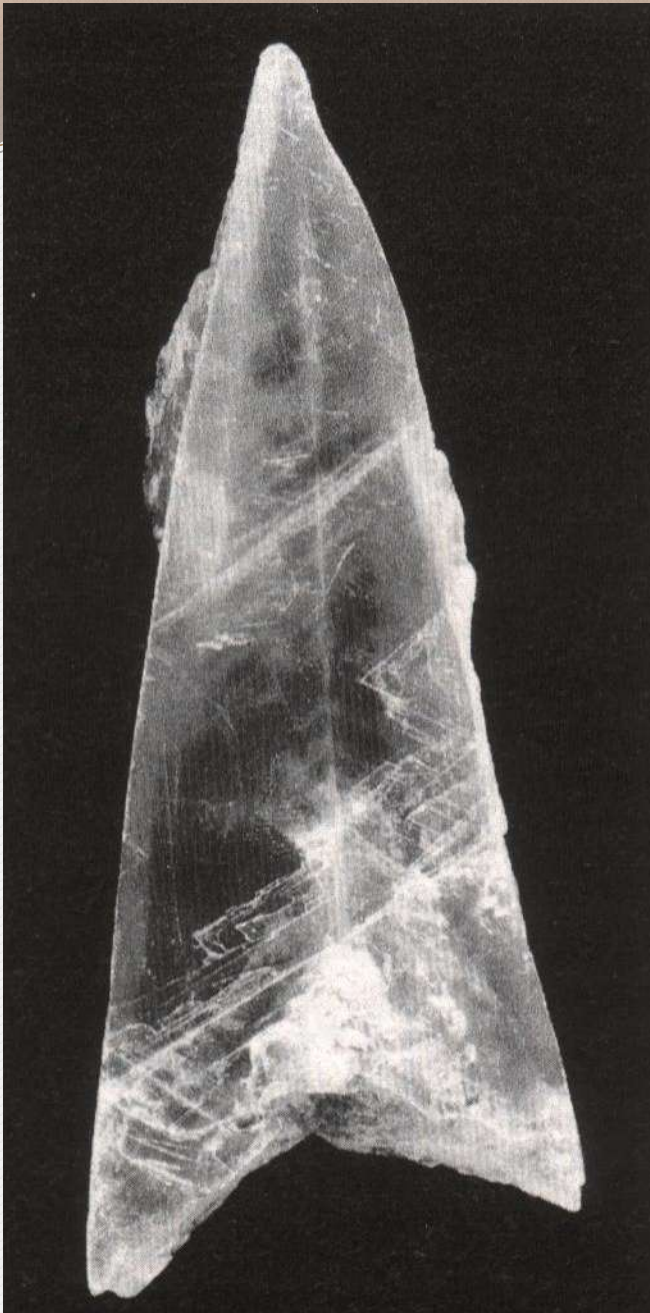
# Le gypse du Trias, en bordure orientale du bassin de Paris



Répartition des faciès évaporitiques dans le bassin du Zechstein. L'alimentation en eau de mer se fait depuis l'océan Boréal (D'après Ziegler, 1982, Geological Atlas of Western and Central Europe, Amsterdam).

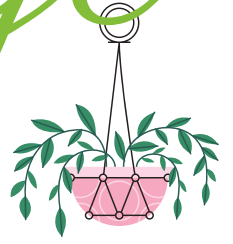
## Le gypse du Trias de Lorraine :

Les gisements se situent dans les zones d'affleurement du Muschelkalk moyen (Trias moyen) et surtout du Keuper (inférieur et base du supérieur) qui est le Trias supérieur.



Cristaux de gypse en fer de lance

# Bon courage



## LIENS UTILES 🙌

### Visiter :

1. <https://biologie-maroc.com>

- Télécharger des cours, TD, TP et examens résolus (PDF Gratuit)

2. <https://biologie-maroc.com/shop/>

- Acheter des cahiers personnalisés + Lexiques et notions.
- Trouver des cadeaux et accessoires pour biologistes et géologues.
- Trouver des bourses et des écoles privées

3. <https://biologie-maroc.com/emploi/>

- Télécharger des exemples des CV, lettres de motivation, demandes de ...
- Trouver des offres d'emploi et de stage

