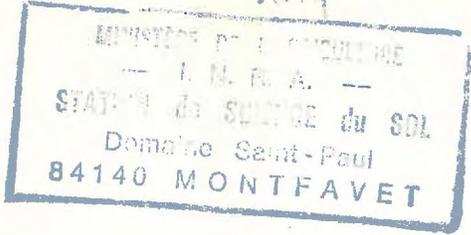


Th. I 10 (double)  
KAY



A Monsieur Monnier, avec tous  
mes remerciements pour le temps  
qu'il m'a consacré.

T H E S E

présentée

à

LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

pour l'obtention

du DOCTORAT 3e CYCLE

Spécialité : GEODYNAMIQUE EXTERNE - Option : Pédologie

par

Melle Christine P L E T

Sujet de la Thèse : INTRODUCTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE

DE LA FORMATION DES ENCROÛTEMENTS

APPLICATION AU CAS DES ENCROÛTEMENTS GYPSEUX

Soutenue le

devant la Commission

Composée de : MM. L. GLANGEAUD  
G. LUCAS  
S. HENIN  
G. PEDRO

Président  
Examineurs  
Invité

# \_\_\_\_ O M M A I R E

°  
° °

\_\_\_\_ VANT - PROPOS

\_\_\_\_ INTRODUCTION

Première Partie -

Discussion du modèle - Examen des conditions expérimentales.

Deuxième Partie -

Etude expérimentale des encroûtements gypseux.

I - Description et analyse des encroûtements gypseux expérimentaux

II - Problème de la mise en place du gypse et des seils en général

III - Signification du débit de l'eau évaporée

IV - Etablissement du bilan général : dépôt et redistribution du sel

Troisième Partie -

Encroûtements expérimentaux de carbonate de calcium.

Conclusions générales -

-----

## AVANT-PROPOS

Avant d'exposer les résultats de cette étude, je tiens à remercier toutes les personnes qui en ont permis la réalisation.

Monsieur le Professeur GLANGEAUD, Membre de l'Académie des Sciences m'a acceptée parmi ses élèves de 3ème Cycle de Géodynamique externe et a bien voulu être Président du jury de cette Thèse. Je tiens à lui exprimer ici toute ma respectueuse reconnaissance.

Monsieur HENIN, Membre de l'Académie d'Agriculture, Chef de Département à l'Institut National de la Recherche Agronomique, m'a accueillie au Laboratoire des Sols, et m'a fait l'honneur de diriger ce travail de Pédologie expérimentale, qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de ma profonde gratitude pour les précieux moments qu'il a bien voulu me consacrer.

Que Monsieur le Professeur LUCAS soit vivement remercié pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de participer à ce Jury.

Monsieur PEDRO, Maître de Recherches au C. N. R. A., m'a fait profiter de ses critiques et de ses nombreux conseils tout au long de ce travail. Je l'en remercie très sincèrement.

Que Monsieur MONNIER Maître de Recherches au C. N. R. A. trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour l'aide constante et efficace dont il m'a fait bénéficier. Il n'a cessé de suivre les expériences, d'examiner les résultats et de critiquer les interprétations au cours de cette période particulièrement formatrice.

Je remercie Monsieur ROBERT, Chargé de Recherches au C. N. R. A., dont la compétence dans le domaine de la chimie m'a été très utile.

Enfin, je tiens à remercier Monsieur BETREMIEUX, Directeur du Laboratoire des Sols au C. N. R. A. qui a facilité mon travail en mettant à ma disposition tout le matériel nécessaire à sa réalisation, ainsi que tous les membres de l'équipe du Laboratoire des Sols, pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont apportés, parmi lesquels je ne saurais oublier Monsieur JEANDET et Monsieur L'ESSIER.

## I NTRODUCTION

°  
° °

Les encroûtements de sels solubles, type évaporites, en particulier les encroûtements gypseux et calcaires sont l'objet de cette étude expérimentale,

- De nombreux travaux ont été et sont menés sur le terrain à leur sujet. Leur vaste répartition géographique dans les zones arides et semi-arides à caractère endoréique, attire l'attention et soulève de nombreux problèmes de genèse,

- Beaucoup d'hypothèses ont été proposées : il en ressort que, en ce qui concerne les encroûtements gypseux, la plupart d'entre eux doivent résulter de l'évaporation de nappes d'eau séléniteuse à travers un matériau en place,

- Si l'on considère donc que l'évaporation est le moteur de la dynamique des sels se déposant dans un sédiment ou un sol, on peut se demander comment ce processus donne naissance à des encroûtements épais de 1 m à 1,50 m sans que le facteur qui est à l'origine de cet encroûtement soit annihilé par l'encroûtement lui-même,

Cela pose le problème du dépôt du sel qui colmate peut être la porosité du matériau, auquel cas, ce mode de mise en place dans le sol paralyse l'évaporation de la nappe d'eau.

La structure de ces formations telle qu'elle peut être observée sur des lames minces, montre une pauvreté en éléments clastiques qui incite à poser des questions sur le devenir des matériaux préexistants, sur le rôle du matériau vis à vis du sel,

Par ailleurs, on peut se demander si le sel déposé assure à lui seul la cohésion de l'encroûtement, les éléments constituant le sédiment s'y trouvant alors à l'état de simples inclusions ; ou bien si des liaisons sel-éléments du sédiment participent à la consolidation de l'ensemble,

D'autres phénomènes sont obscurs comme la superposition de ces formations qui pose le problème de l'ordre chronologique de leur genèse.

.../...

Dans la nature, un très grand nombre de facteurs influent les uns sur les autres, il est difficile de faire la part de chacun. Aussi, est-ce en utilisant un modèle expérimental simple que nous avons abordé le sujet cherchant ainsi à mettre en évidence certains mécanismes susceptibles d'intervenir dans la genèse d'un encroûtement,

Pour tenter de répondre à ces questions, il paraît indispensable de recourir à une méthode qui permet d'analyser les phénomènes séparément,

Autour d'une expérience-type dont le but est de reproduire un encroûtement consécutif à l'évaporation d'une solution saline, se greffent des expériences annexes, modèles de la manipulation principale, mettant en cause une partie des facteurs intervenant dans l'expérience fondamentale, ils permettent de préciser les modalités de leur action et analyser chaque question se présentant séparément des autres,

Les points développés dans ce travail portent sur la localisation, la vitesse et la nature du dépôt obtenu et sur les facteurs permettant sa réalisation, c'est à dire : l'évolution du squelette permettant à l'évaporation de se poursuivre, sa stabilité étant soumise à l'aptitude du sel à diffuser,

°  
° °  
°

.../...

## Première Partie

### DISCUSSION DU MODELE - EXAMEN DES CONDITIONS EXPERIMENTALES

Comme il a été dit dans l'introduction, l'ensemble du travail est construit autour d'une expérience fondamentale.

Ce dispositif principal est constitué par une colonne de sable qui trempe par la base dans une solution de sulfate de calcium. L'évaporation est assurée en irradiant à l'aide d'une lampe infra-rouge fournissant l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau, la partie supérieure du tube. Nous reviendrons plus loin sur les modalités expérimentales (cf. Fig. 1).

Au cours des expériences, nous avons été amenés à utiliser différents sels et matériaux afin de mieux observer certains phénomènes ; tous ces essais sont récapitulés dans le tableau II.

#### I - Les matériaux choisis -

Des matériaux grossiers du type-sable ont été utilisés de préférence à de la terre parce qu'ils constituent un milieu dont le comportement est constant et où l'aération est grande. En effet, le sable présente l'avantage de se saturer en eau, de manière très homogène sur la plus grande partie de sa frange capillaire en raison de la taille peu variable de ses pores. Le sable limite par son caractère inerte, les interactions d'ordre chimique qui pourraient s'établir entre le sel et le support.

Les matériaux utilisés sont les suivants :

##### 1) Les billes de verre,

-----  
 Les billes de verre de 200  $\mu$  et 800  $\mu$  sont employées en tant que type de matériau non cristallisé fournissant un milieu bien connu. Elles ne doivent théoriquement pas donner lieu à des interactions avec le milieu liquide.

.../...

En outre, l'arrangement étant très compact à cause de leur forme sphérique, il peut faciliter l'observation de la disposition des cristaux de gypse par rapport aux particules du support.

## 2) Le quartz de Norvège,

-----

C'est un sable très pur contenant exclusivement du quartz de forme très anguleuse, presque en aiguilles, à arêtes vives. Trois classes de granulométrie ont été employées : 100-200  $\mu$  ; 200-280  $\mu$  ; 630-1000  $\mu$ .

Les trois catégories de sable après leur mise en place, ont des porosités voisines variant entre 11 % et 15 %, mais la taille des pores diffère considérablement entre les deux classes extrêmes.

## 3) Le sable de Fontainebleau,

-----

Utilisé dans les fractions granulométriques de 100-200  $\mu$ , la caractéristique de ce sable réside dans la forme émoussée de ses grains par rapport au quartz de Norvège.

Le but de l'utilisation des deux derniers matériaux est d'introduire des variantes dans la forme des éléments constituant le support du sel qui s'y déposera, variantes susceptibles d'induire des modes de dépôt différents. En outre, seules les fractions relativement grossières ont été utilisées pour des raisons de commodités. Un sable de taille inférieure à 100  $\mu$  aurait eu une ascension capillaire trop grande et aurait nécessité l'utilisation de tubes trop longs.

## 4) Le limon,

-----

A titre comparatif, un horizon A de sol limoneux a été employé, tamisé en agrégats de 2 mm. Sa composition granulométrique est la suivante :

.../...

Tableau I

fractions granulométriques du limon		
matière organique	1,5	%
argile 2 $\mu$	10,65	%
limon fin 2-20 $\mu$	25,0	%
limon grossier 20-50 $\mu$	48,15	%
sable fin 50-200 $\mu$	12,7	%
sable grossier 0,2-2 mm	2,0	%

## II - La solution saline -

La solution employée est une solution binaire composée d'eau et de sel.

Afin d'éliminer les agents étrangers au système considéré, l'eau utilisée est bipermutée préalablement.

Le gypse sous forme de poudre Frolabo est placé au fond du bécher contenant l'eau figurant la nappe d'eau. La mise en solution du gypse se fait par le contact eau-sel.

Nous verrons plus loin quelles concentrations sont atteintes dans la solution.

C'est cette solution saline qui monte par capillarité dans le matériau-support.

## III - Le flux ascendant de la solution -

L'hypothèse de formation de l'encroûtement gypseux fait intervenir un climat sec à fort pouvoir évaporant. Une forte évaporation est nécessaire et permet d'accélérer la marche des expériences. Celle-ci est réalisée par un chauffage.

.../...

Des lampes à infra-rouges de 100 et 250 watts placées au-dessus des tubes élèvent la température respectivement à 44°C et 68°C en moyenne à la surface du sable. Les ampoules sont munies d'abats-jours en aluminium faisant réflecteurs.

#### IV - Les modalités expérimentales -

Les matériaux précédemment décrits sont introduits dans des tubes en plexiglass transparent, sciés longitudinalement en deux parties maintenues jointives par des colliers de serrage en plastique. Le fond des tubes est fermé par une toile en nylon pour retenir le sable.

Ils sont préalablement lavés, afin d'éliminer toutes les impuretés et traces de matière organique qui diminueraient leur mouillabilité.

Le sable est tassé afin d'obtenir une bonne compacité et un matériau disposé de manière homogène sur toute la hauteur de la colonne de sable.

Le tube trempe par la base dans la solution du sulfate de calcium contenue dans un bécher. (cf, Fig. 1)

L'ensemble, bécher et tube, est placé sous la lampe à infra-rouges.

#### V - Les conditions expérimentales -

Ces modèles ne font intervenir qu'un nombre limité de paramètres afin de cerner étroitement le comportement des éléments conditionnant les expériences. La manipulation-type est réalisée de la manière suivante :

1) la hauteur de sable dans les tubes est calculée de manière à ce que la frange capillaire n'atteigne pas la surface du sable puisque l'on désire obtenir un encroûtement et non des efflorescences.

2) Comme nous voulons connaître le débit de l'eau évaporée, l'évaporation ne doit se faire que par la section du tube contenant le sable.

La surface de la solution dans le bécher est donc recouverte d'une couche d'huile de vaseline.

.../...

3) la hauteur du front d'évaporation est maintenue constante par le réajustement quotidien du niveau de la solution du bécher.

La frange capillaire est ainsi soumise à de faibles battements variant entre 5 et 10 mm, suivant la section du bécher, le régime d'évaporation et la fréquence des réajustements. Ils permettent d'obtenir un enrichissement en sel très localisé qui accélère l'expérience. Pour la même raison, le chauffage fonctionne de manière continue.

## VI - Les méthodes d'étude des phénomènes -

L'analyse de la marche des phénomènes s'appuie sur un certain nombre de mesures physiques et chimiques dont on peut contrôler l'évolution au cours du temps puisque les expériences ont des durées qui varient suivant les cas, de quelques jours à un an.

Il y a deux séries de mesures et observations :

1) Mesure et observation quotidiennes,

2) Mesures en fin d'expérience.

### 1) Mesure et observation quotidiennes.

Le débit de l'eau évaporée est mesuré quotidiennement lors du réajustement de la solution du bécher. Il est apprécié au quart de millilitre.

Les encroûtements sont l'objet d'examens quotidiens et de descriptions relatives à leur évolution au cours du temps.

### 2) Mesures en fin d'expérience.

a) - Dissection du tube -  
-----

A l'arrêt de l'expérience, la colonne de sable est sortie du bécher contenant la solution et le tube est ouvert. Aussitôt après, le sable est découpé en tranches horizontales de 2 à 3 mm d'épaisseur à partir du sommet.

Les formations rencontrées au cours de cette opération sont reportées sur un plan représentant la coupe verticale de la colonne de sable.

.../...

b) - Mesure d'humidité -  
-----

L'évaluation de l'humidité des échantillons se fait par passage à l'étuve à 105°C de toutes les fractions de sable mises dans des boîtes en aluminium qui sont pesées avant et après cette opération.

c) - Détermination des concentrations en sel -  
-----

Elle repose sur le dosage des cations  $\text{Ca}^{++}$ , au moyen du photomètre de flamme.

Cette méthode a été choisie après confrontation des résultats donnés par la méthode gravimétrique au  $\text{BaSO}_4$ , dosant le  $\text{SO}_4^-$ , car cette dernière donne une variation de l'erreur plus importante que le photomètre. Il présente de plus l'avantage de pouvoir doser un grand nombre d'échantillons en peu de temps.

d) - Reconnaissance des minéraux analysés -  
-----

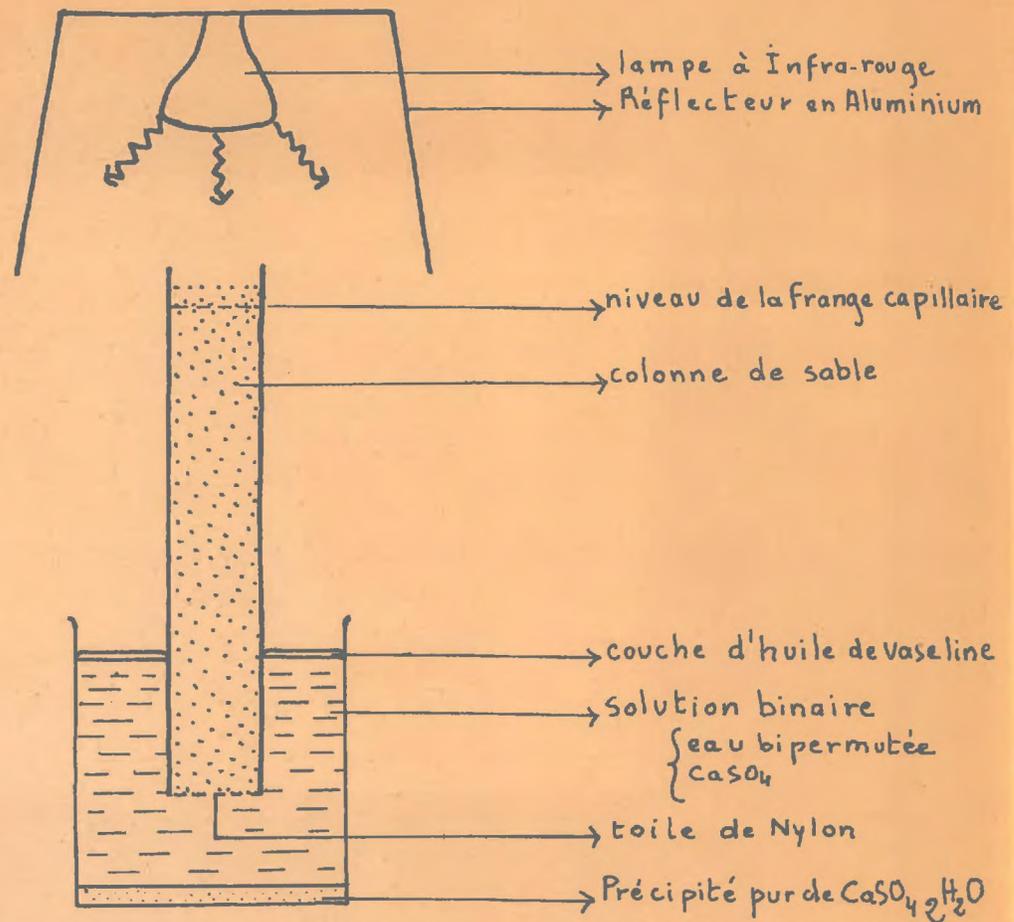
Le passage des échantillons de croûte, aux rayons X et à la thermo-balance permet de déterminer la forme cristalline du sulfate de calcium déposé.

.../...

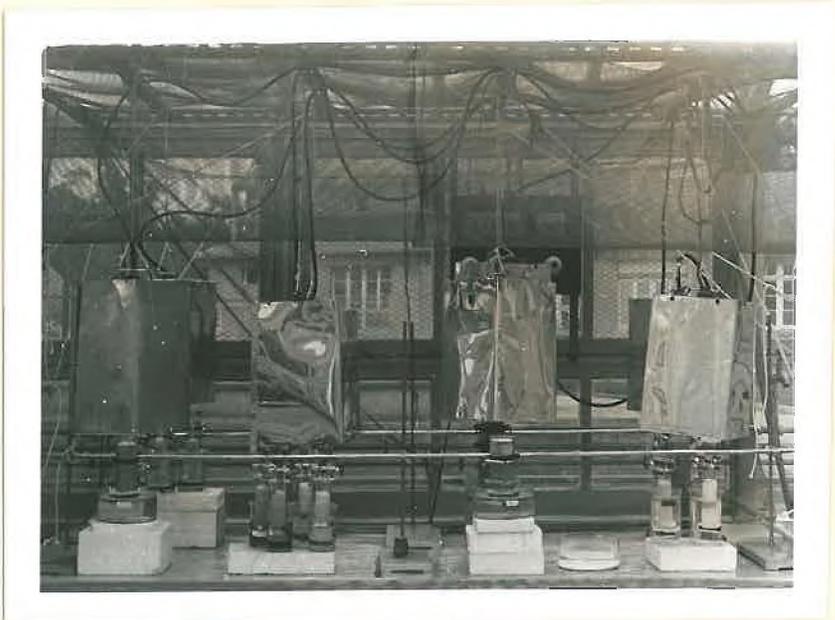
Tableau II

Tableau Récapitulatif des Expériences

Nature du matériau	Granulométrie	Porosité	Nature: du sel	Concentration: de la solution	Durée	Schéma de l'expérience
artz de Norvège	100-200 $\mu$	43 %	: gypse	: 2,270g/1/eau	: 13 j	: frange capillaire constante
"	"	"	"	: CaSO <sub>4</sub>	: 20 j	"
"	200-280 $\mu$	46 %	"	"	: 49 j	"
"	"	"	"	"	: 1 an	"
de Fontainebleau	100-200 $\mu$	42 %	"	"	: 142 j	"
"	"	"	"	"	: 208 j	"
"	200-280 $\mu$	"	"	"	: 208 j	"
artz de Norvège	630-1000 $\mu$	44,8 %	"	"	: 150 j	"
es de verre	800 $\mu$	37,7 %	"	"	: 150 j	"
n	agrégats 2mm	42 %	"	"	: 47 j	"
de Fontainebleau	200-280 $\mu$	42 %	"	: 1,80g/1/eau	: 180 j	: battement de nappe
"	100-200 $\mu$	42 %	"	: 0,5g/1/eau	: 90 j	: frange capillaire constante
"	"	"	: CaCO <sub>3</sub>	: 650mg/bicarb. 1/eau	: 240 j	"
z de Norvège	630-1000 $\mu$	44,8 %	: NaCl	: 50gNaCl/1/eau	: 4 mois	"
de verre	800 $\mu$	37,7 %	: NaCl	"	"	"
"	"	"	: NaCl	: 100g/1/eau	: 28 j	"
"	200 $\mu$ et 2 mm	37 %	: acide citrique	: 500g/1/eau	: 150 j	"
"	"	"	: K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	"	"	"
"	200 $\mu$	"	"	: 125g/1/eau	: 35 j	"
"	800 $\mu$	"	: NaCl	: sol. normale	: 60 j	"
"	"	"	: K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	"	"	"
"	"	"	: citrate de Na	"	"	"



Montage expérimental utilisé  
pour les  
encroûtements gypseux



vue générale  
du montage des expériences

## Deuxième Partie

E TUDE EXPERIMENTALE DES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

Dans cette partie, nous traiterons des expériences effectuées au sujet du gypse particulièrement. Les expériences ayant été conduites suivant le protocole qui vient d'être décrit, nous partons de la description et de la distribution du sulfate de calcium dans le tube où s'est effectuée l'expérience, et à partir de cette description, nous rattachons un ensemble de données et faits expérimentaux obtenus dans des essais complémentaires qui permettront de vérifier les conclusions tirées de l'examen de l'étude expérimentale de base,

I - Description et analyse des encroûtements gypseux expérimentaux -

## 1) Description de l'encroûtement.

-----

Au cours du découpage de la colonne de sable, on rencontre à partir de la surface, (Fig. 3) :

- 1) - le sable sec
- 2) - le sable consolidé
- 3) - le sable meuble humide

- La teneur maximum en gypse se situe dans le sable consolidé.

- Le sable disposé au-dessus du front d'évaporation, non encroûté, en contient de faibles quantités et le sable sous-jacent montre un gradient de concentration au-dessous de l'encroûtement, de la base vers le sommet de la colonne de sable.

- Parallèlement, le sable est saturé en eau à la base de la colonne, puis l'humidité ne commence à diminuer vraiment que dans les 3 cm situés sous l'encroûtement, zone où elle est faible, et s'annule à la surface du sable. La

.../...

présence d'eau est toujours notée dans un encroûtement.

Par exemple, un encroûtement de 19 jours contient 19,4 % de gypse, 17,2 % d'eau, 9 % d'air, exprimés en pourcentages volumiques, dans une porosité de 46 %. Le système n'est pas saturé en eau. La proportion d'air dans la zone encroûtée est importante (Fig. 4).

- Un tableau récapitulatif n°III montre la répartition des dépôts dans les colonnes de sable en 13 jours, 20 jours, 19 jours.

- Le premier dépôt se produit à la limite de la frange capillaire sur tout le plan soumis à l'évaporation.

La baisse de la solution dans le bécher, due à l'évaporation de l'eau au cours des 24 heures, provoque le dépôt du sel sur toute la hauteur de sable affectée par la baisse de la frange capillaire.

- En 13 jours le sel forme une croûte continue de 2 mm d'épaisseur et au bout de 20 jours le dépôt se répartit sur 5 mm de hauteur.

- Un encroûtement de 19 jours présente la même épaisseur en raison de variations d'eau identiques, mais la cohésion du sable est plus importante, l'enrichissement en sel étant plus grand.

## 2) Nature du dépôt.

-----  
Le sulfate de calcium se rencontre sous trois formes :

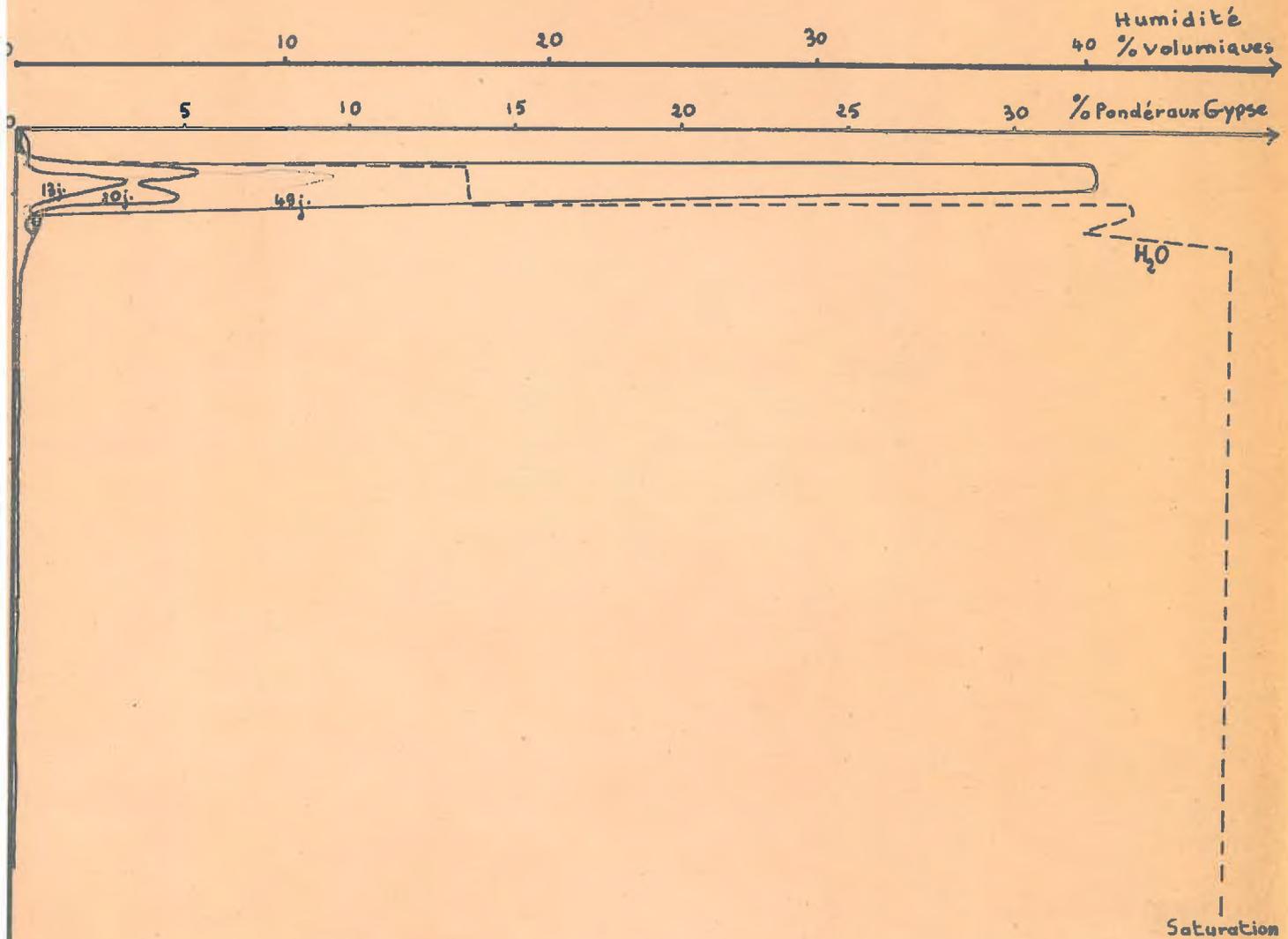
- 1) - la forme hydratée :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  Gypse
- 2) - la forme semi-hydratée :  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  Hémihydrate
- 3) - la forme anhydre :  $\gamma \text{CaSO}_4$  Anhydrite soluble

Ces trois formes de sulfate de calcium peuvent participer à des réactions réversibles de déshydratation et hydratation en fonction des variations de températures.

.../...



# Enrichissement en gypse de l'encroûtement au cours du temps



- Profil des concentrations en gypse dans les expériences de 13 jours.
- 20 jours
- 49 jours
- Profil de l'humidité. (49 jours).

vue d'un encroûtement de sable + hémihydrate

sable de Fontainebleau : 200-280 $\mu$ .

générale



50 $\mu$

ail



6 $\mu$

T a b l e a u III

Profil des concentrations en gypse et humidité

Durée de l'expérience				
13 jours		20 jours		49 jours
Gypse % pondéral		Gypse % pondéral		Eau % volumique
ble non consolidé	( 0,18	0,00	0,03	0,00
	) 0,42	0,02		
	( 0,39			
	) 0,30			
croûtement	( 3,40	( 5,27	(32,43	17,2
	) 1,86	) 3,50	) 3,28	42,1
		( 4,83		
ble humide non consolidé	( 0,45	0,3	0,39	41,7
	) 0,76	0,5	0,19	43,8
	( 0,58	0,34	0,20	40
	) 0,43	0,16	0,46	40,5
	( 0,33	0,09	0,15	46,6
	) 0,24	0,09	0,14	"
	( 0,14	0,08	0,12	"
	) 0,12	0,08	0,12	"
	( 0,11	0,08	0,22	"
	) 0,11	0,09	0,11	"
	( 0,11		0,12	"
	) 0,12		0,13	"
	( 0,11		0,16	"
	) 0,12		0,12	"
( 0,12		0,12	"	
) 0,12				
( 0,11				

Colonne capillaire saturée

se : les % sont exprimés en g. de gypse pour 100 g. de sable.  
 : les % " " en volume d'eau par rapport au volume  
 apparent total du sable encroûté.

.../...

- Conformément aux lois régissant le degré d'hydratation du sulfate de calcium déposé, le sel se dépose sous forme de gypse à partir d'une solution aqueuse quand la température des expériences se situe entre 40 °C et 60 °C.

- Lorsque la température mesurée à la surface du sable est de 60 °C, nous pouvons estimer que la zone encroûtée sous-jacente est à une température inférieure, cela explique la cristallisation du gypse.

- En revanche, dans l'expérience utilisant du limon, expérience effectuée suivant le même schéma que les expériences utilisant le sable, on a constaté la présence de gypse, hémihydrate, anhydrite. La température de la surface de la terre atteignait 63 °C ; en conséquence, des efflorescences blanches d'anhydrite sont apparues sur la terre décollée des parois du tube, sous forme de petites masses compactes arrondies (voir photo n°7).

En surface, la terre très peu humide est retrouvée en agrégats, puis au niveau du front d'évaporation, se rencontre une zone d'induration brun-noire, qui affecte toute la section du tube (Fig. 6).

Sous ce niveau induré, se trouvent d'importantes concentrations de gypse et d'hémihydrate (Fig. 9).

La terre indurée est composée de limon, de matière organique qui a migré en suivant le flux ascendant de la solution et d'hémihydrate.

Sous cette carapace, se trouve un feutrage d'aiguilles de gypse dont la taille atteint 7 mm pour les plus grandes. Les cristaux de gypse, très bien individualisés et très purs, croissent en ramifications pointues au milieu du limon désagrégé (voir photos n°s 7 et 8).

- On voit donc que le faciès d'individualisation du sel varie en fonction de la température du sol et est conditionné par la nature du matériau. Ce dernier problème sera repris plus loin.

## II - Problème de la mise en place du gypse et des sels en général -

Il est important de savoir quels sont les rapports du sel et du matériau encroûté.

Le gypse dépose-t-il entre les grains de sable sans apporter de modification dans l'arrangement des éléments du squelette entre eux, en formant un réseau continu, ou bien existe-t-il un réseau discontinu de sel déposé aux ménisques laissés aux points de contact des grains de sable, par exemple,

.../...

morphologie d'un dépôt de sulfate de Calcium  
dans un sol limoneux

(vue en coupe verticale)

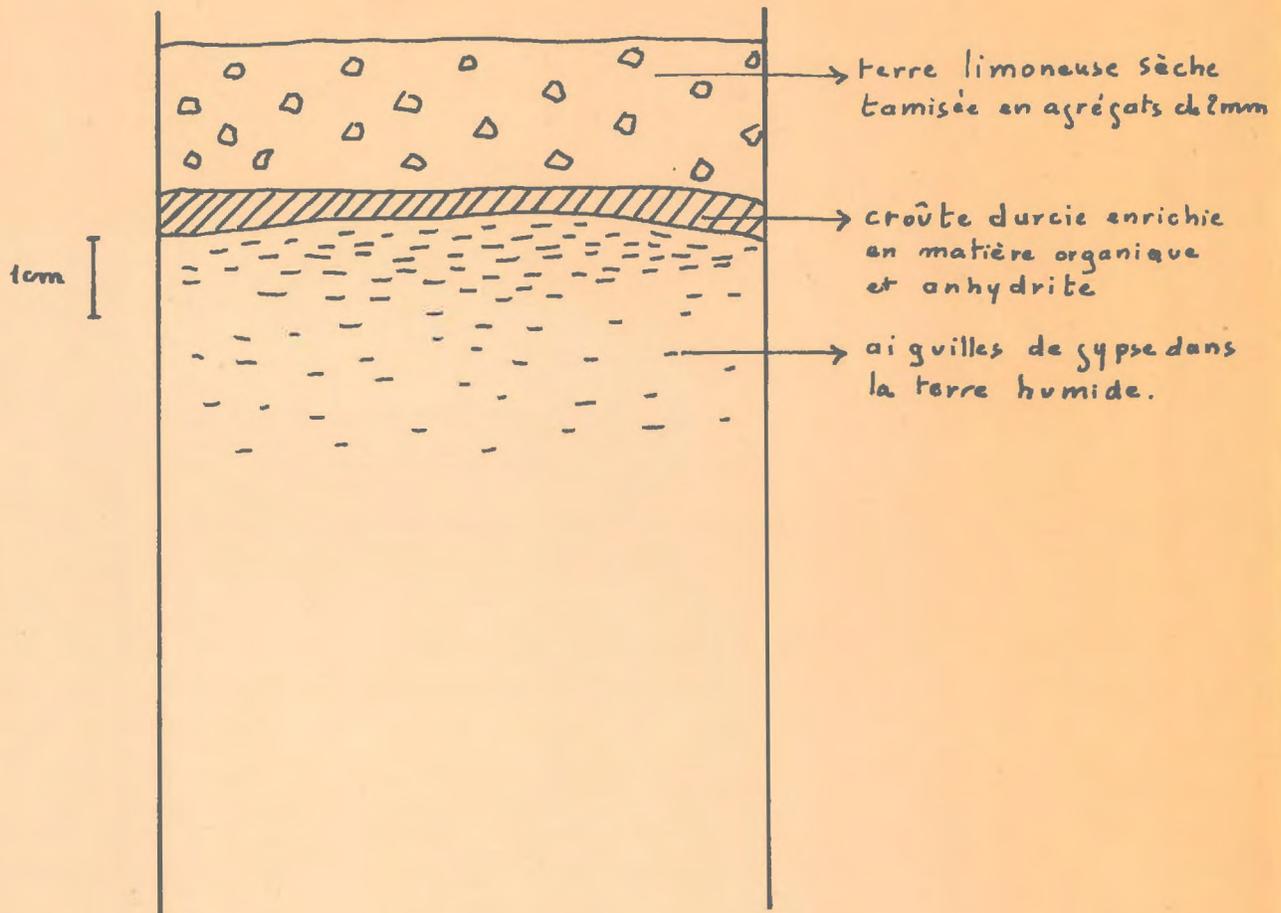


Fig. 6

dépôt de sulfate de Calcium dans un sol de limon.

efflorescences d'anhydrite

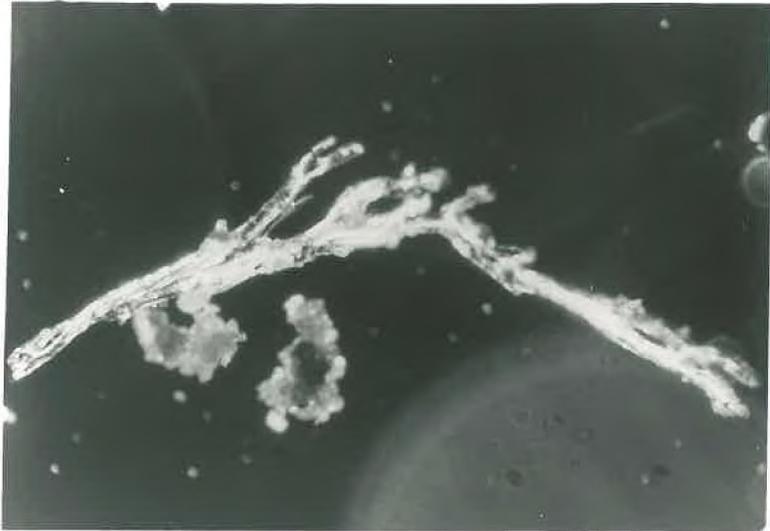


x 10

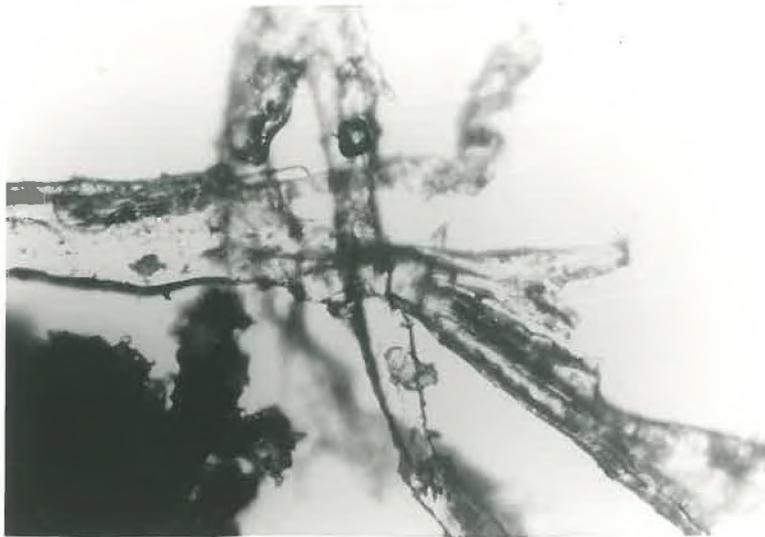
cristaux de gypse au milieu des agrégats de limon



x 3



Cristaux de gypse au milieu du limon. Gross: x14



## Accumulation du Sulfate de Ca dans le limon

en fonction de la profondeur

durée de l'expérience : 47 jours.

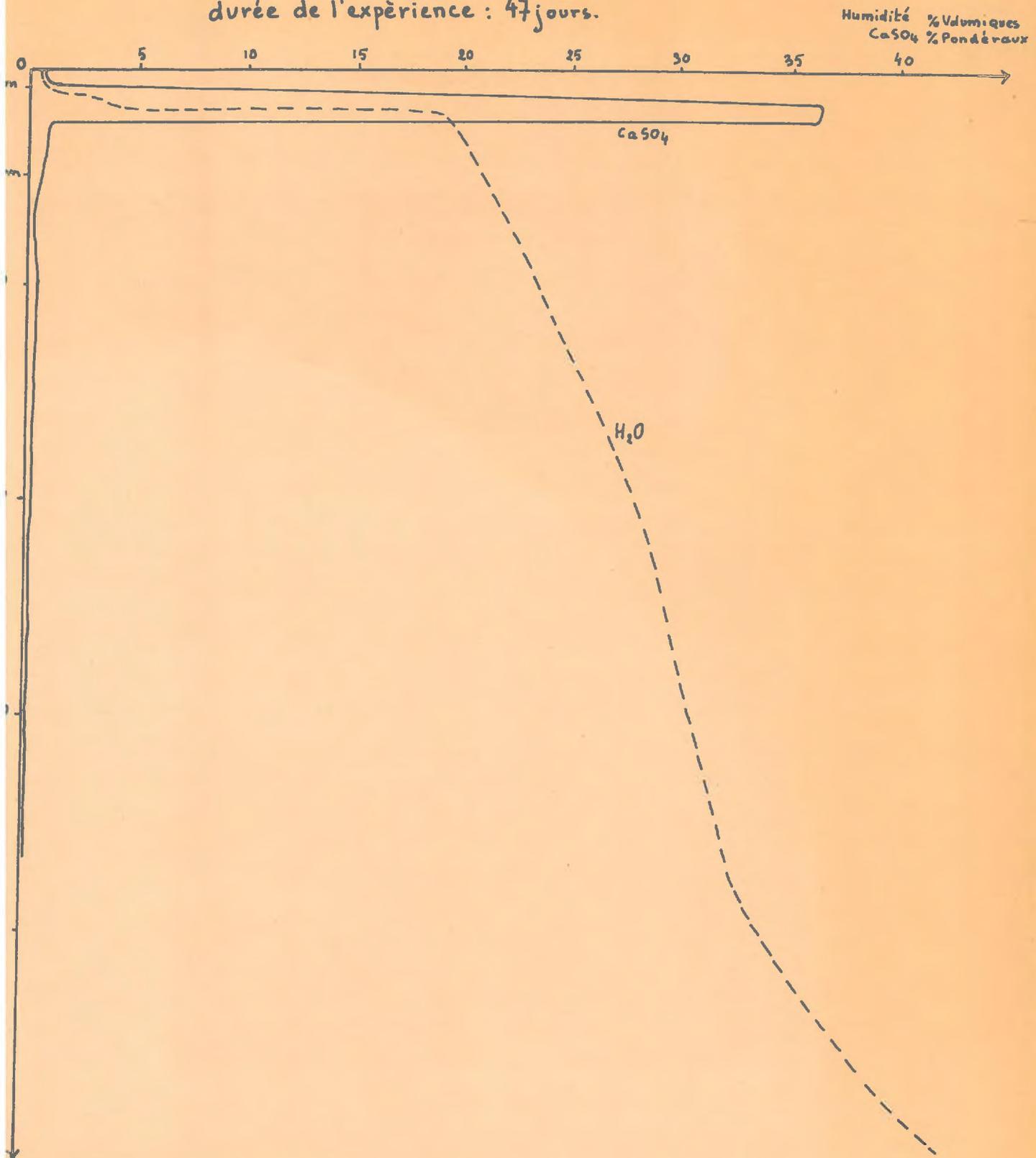


Fig. 9

1) - Expériences utilisant des sels, autres que le sulfate de calcium,  
-----

Pour étudier ce problème, nous avons choisi un autre sel susceptible d'accentuer, de par ses propriétés, les phénomènes présidant à la formation d'un encroûtement gypseux.

Le but de cette expérience est de voir si le dépôt soulève la matrice ou s'il se fait à l'intérieur du matériau, en remplissant progressivement la porosité.

- Le sel choisi à cet effet en remplacement du gypse est l'acide citrique dont les caractéristiques principales sont :

- une très grande solubilité : 1330 g/litre d'eau à froid,
- paramètres de la maille élémentaire très anisométriques.

Cette grande solubilité permet donc d'utiliser une solution très riche en sel (500 g/litre d'eau) ; de plus, l'anisométrie des cristaux est susceptible d'accroître les phénomènes de poussée à l'égard de la matrice.

Une discontinuité dans la taille du matériau au niveau de la frange capillaire à la surface d'évaporation, crée un changement brutal de la dimension des pores qui peut favoriser l'observation du phénomène considéré.

C'est pourquoi, des billes de verre de 200  $\mu$  sont recouvertes par des billes de 2 mm disposées en deux couches.

On constate après une période de un mois et demi, que les grosses billes sont soulevées par les cristaux d'acide citrique (photo 10).

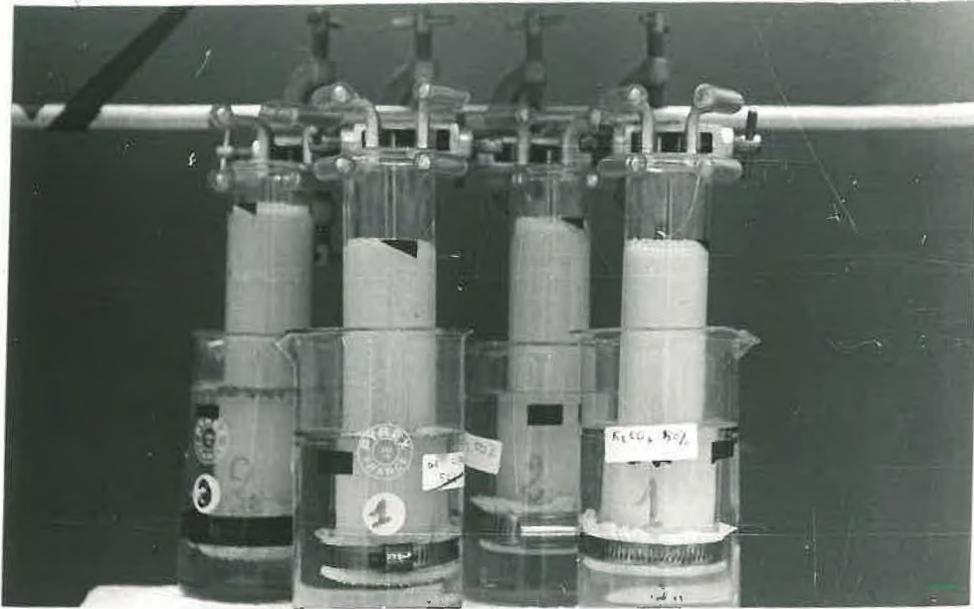
Un résultat est donc acquis : le dépôt d'un sel peut soulever le matériau dans lequel il s'individualise.

- Des expériences analogues ont été faites dans le même temps avec du chlorure de sodium en solution dans des tubes remplis de billes de verre et du sable type-quartz de Norvège.

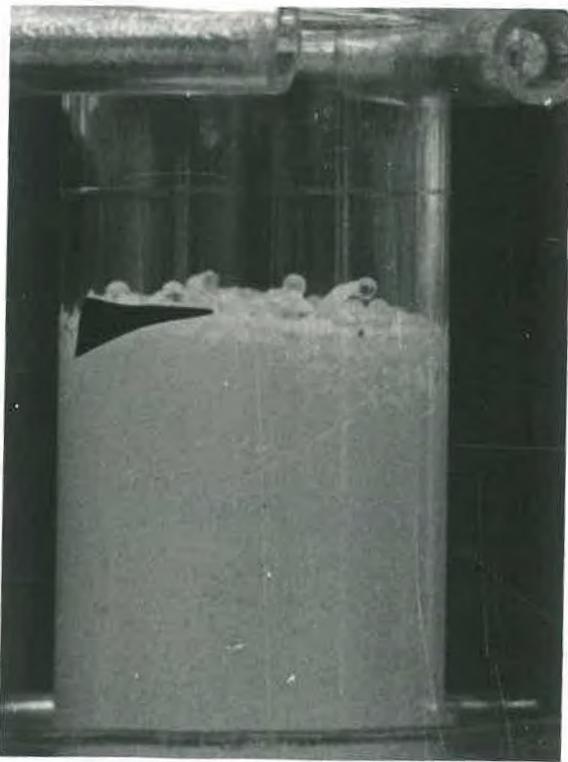
Le chlorure de sodium cristallise généralement sous un faciès cubique ; l'isométrie des cristaux était donc susceptible d'intervenir dans le mode de mise en place du sel qui pouvait, de ce fait, ne pas produire le même effet que l'acide citrique. Or, avec le sable, la cristallisation a lieu et soulève les grains du

.../...

Soulèvement des billes de verre par l'acide citrique  
Stade 1



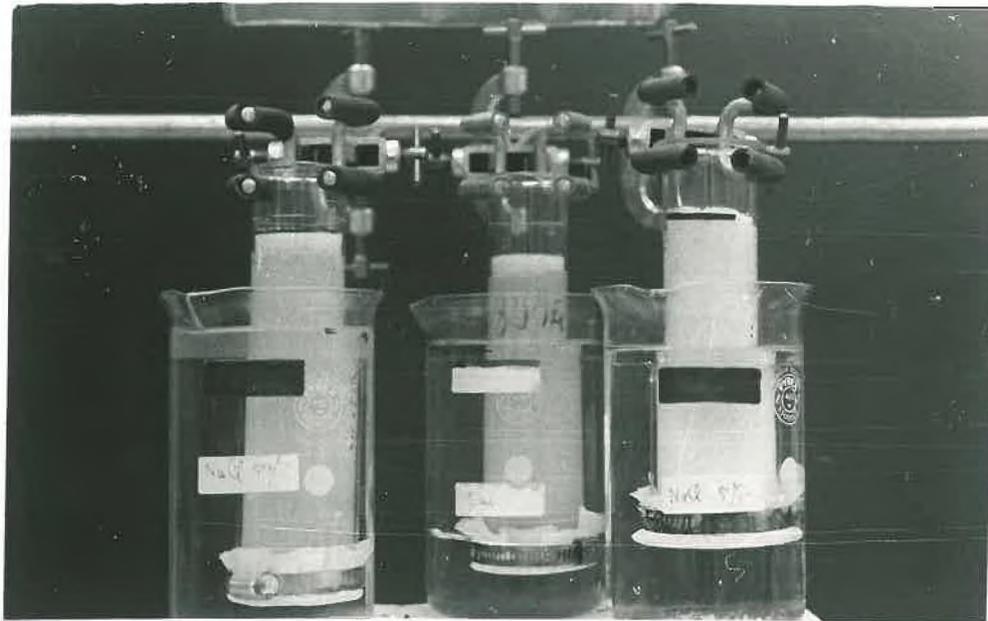
Stade 2



Stade 3

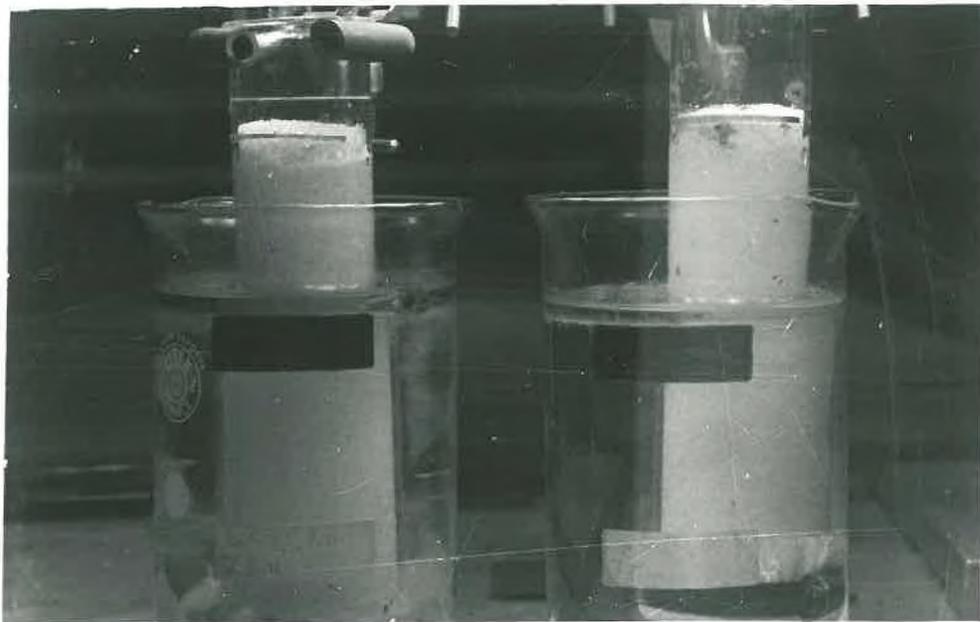


# Soulèvement du matériau lors du dépôt d'un sel



billes de verre: le dépôt de NaCl  
n'a pas lieu.

Sable soulevé par le dépôt du NaCl.



billes de verre et Sable  
soulevés par le dépôt du gypse.

squelette, en revanche, avec les billes de verre, la cristallisation n'a pas lieu ; la cause de ce phénomène sera examinée ultérieurement (photo 11).

On voit ainsi que des sels, comme l'acide citrique et le chlorure de sodium, cristallisant sous des faciès morphologiques différents peuvent produire le même déplacement des éléments du squelette lors de leur dépôt dans un matériau. La forme des cristaux a donc peu d'importance, ce qui montre que le phénomène reste le même.

## 2) Evolution d'un encroûtement gypseux au cours du temps. (Fig. 12)

-----

Si l'on suit la progression d'un encroûtement gypseux par un système de repères placés à la partie supérieure d'une colonne de sable, on constate que la cimentation gagne progressivement vers le haut par suite d'un éclatement, c'est à dire qu'elle se fait dans une zone, qui initialement n'était pas atteinte par la frange capillaire.

Trois génératrices réparties à la périphérie d'un tube en plexiglass transparent ont permis de mesurer les variations du niveau de la croûte par rapport au front d'évaporation initial.

Pendant deux mois, le sel a peu à peu envahi la zone soumise aux fluctuations de la solution, dues à l'évaporation quotidienne. Cette hauteur d'encroûtement est directement liée à la section du bécher contenant la solution et à la fréquence des réajustements du niveau de la solution dans le bécher.

Mais pendant les mois qui suivent, l'encroûtement occupe la porosité du sable qui, au départ, était situé au-dessus du front d'évaporation de la frange capillaire, pour ne plus laisser qu'un film de sable sur l'encroûtement.

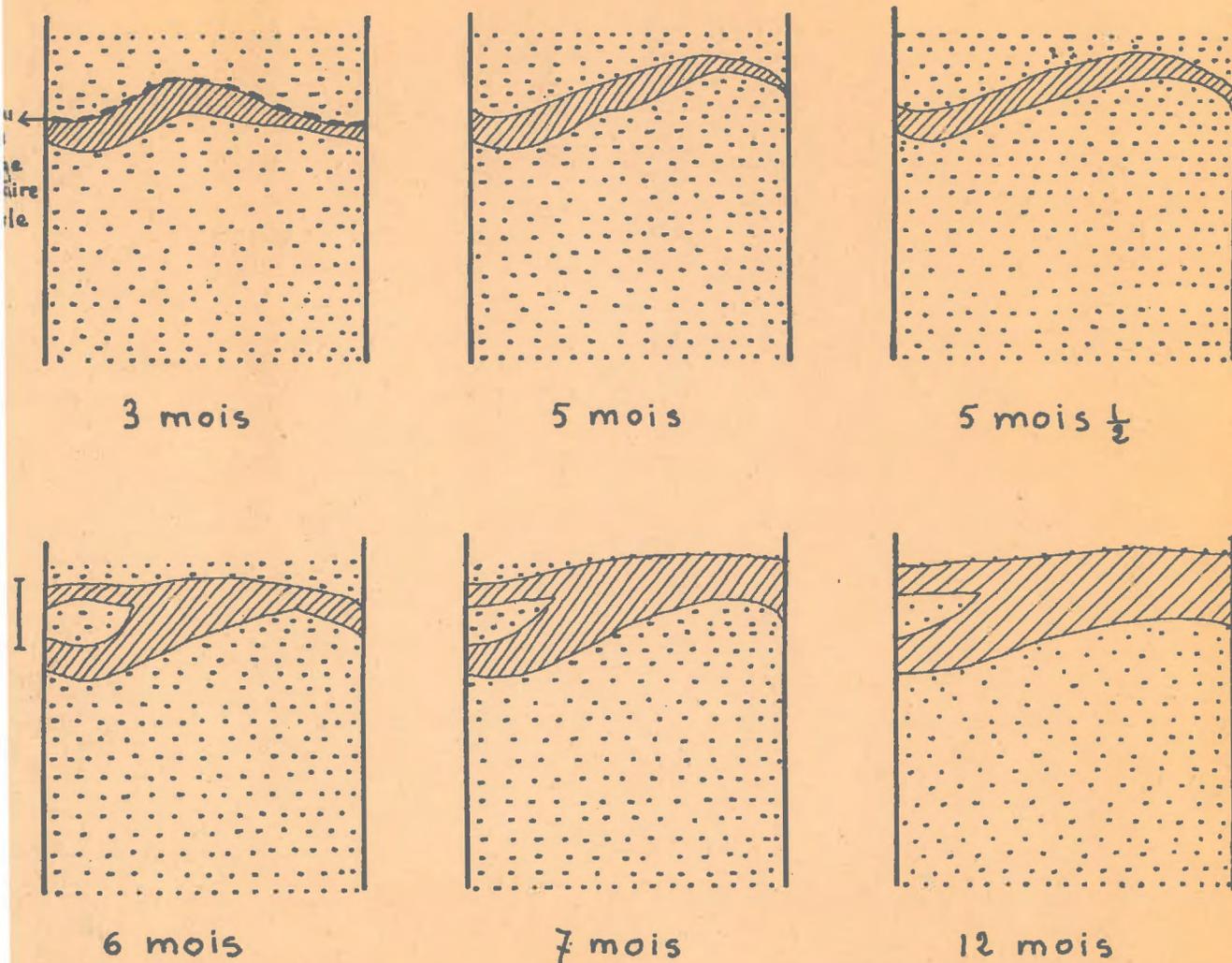
Quel processus devons-nous invoquer dans ce cas ?

Le dépôt a-t-il progressé vers le haut par une montée de la frange capillaire produite par un rétrécissement des pores de la matrice, dû à l'enrichissement en sel, ou bien l'éclatement de la croûte en provoquant des changements dans les positions relatives du sable, amène-t-il un remaniement des structures ? C'est ce que nous allons essayer de voir en nous basant sur les mesures de porosité.

.../...

# Evolution de l'encroûtement au cours du temps

par rapport { au niveau initial de la frange capillaire  
à la surface du sable



 encroûtement

 sable

— encroûtement vu en coupe verticale.

3 mois				5 mois				5 mois $\frac{1}{2}$			
1,5 cm	1	1,5	1,33	1,5	1	0,7	1,07	1,5	1	0,7	1,07
2	1,4	1,7	1,70	2	1,4	0,9	1,43	1,9	1,4	1,1	1,47
6 mois				7 mois				12 mois			
0,7	0,6	0,7	0,7	0,65	0,35	0,3	0,43	0,5	0,35	0,3	0,33
2	1,5	1	1,50	2,1	1,5	1,1	1,60	2	1,5	1,3	1,43

valeurs numériques (cm) correspondant aux variations de niveau de l'encroûtement, le long de trois génératrices, par rapport à la surface du tube.

Fig. 12

## 3) Incidences du dépôt sur le squelette initial.

-----

Puisque le dépôt du sel modifie l'arrangement des grains du squelette entre eux, nous pouvons regarder quelles en sont les incidences sur sa porosité. Des mesures de porosité sont effectuées sur des échantillons de "croûte" de gypse transformé en hémihydrate par suite du passage à l'étuve à 105°C, ce qui s'avèrait nécessaire pour des raisons de mesure d'humidité dans l'encroûtement (Tableau IV). Ces mesures sont faites sur des échantillons de 3 à 4 cm<sup>3</sup>.

Cette façon de faire a d'ailleurs été testée sur un échantillon de "croûte" en déterminant la porosité avant (sèchage à l'air libre) et après passage à l'étuve. (Tableau V) Les mesures de porosité sont faites de la manière suivante : un échantillon de "croûte" dont la teneur en sulfate de calcium est connue, est plongé après avoir été pesé, dans un vernis composé d'un mélange de trichloréthylène et 20 % de polystyrène. Le vernis le recouvre d'une fine pellicule qui permet de peser sous l'eau la quantité d'eau déplacée par l'échantillon. Nous connaissons ainsi son volume apparent, duquel nous déduisons la densité apparente, soit du sable pur, soit de l'encroûtement, sable + hémihydrate.

Les densités réelles du sable et de l'hémihydrate dans l'encroûtement sont connues, nous pouvons donc calculer la porosité qui est égale à

$$\left( \frac{d \text{ réelle} - d \text{ app.}}{d \text{ réelle}} \right) 100$$

.../...

Tableau IV

Porosités des encroûtements de sable et hémihydrate

Granulométrie du sable	Porosité initiale du sable	en fin d'expérience		
		Porosité de l'en- croûtement (sable + hémihydrate)	Porosité correspondant au sable pur	Teneur en héli- hydrate ( % pondéral )
100 - 200 $\mu$	42 %	48,2 %	52,4 %	+18% * 8,5 %
200 - 280 $\mu$	42 %	40,0 %	46,2 %	+4.2 10,6 %
100 - 200 $\mu$	42 %	40,9 %	47,3 %	+5.3 * 11,1 %
200 - 280 $\mu$	42 %	37,5 %	45,2 %	+3.2 12,7 %
100 - 200 $\mu$	42 %	37,8 %	51,7 %	+13.7% * 20,6 %
630 - 1000 $\mu$	45 %	38,3 %	54 %	+9.6 26,2 %

T a b l e a u V

Porosité d'un échantillon de "croûte" de gypse avant et après passage à l'étuve

Granulométrie du sable	Porosité initiale du sable	en fin d'expérience		
		Porosité de l'en- croûtement (sable + gypse)	Porosité correspondant au sable pur	Teneur en gypse ( % pondéral )
200 - 280 $\mu$	46 %	36,9 %	58 %	30 %
		Porosité de l'en- croûtement (sable + hémihydrate)	Porosité sable pur	Teneur en héli- hydrate ( % pondéral )
		48,3 %	55,2 %	25,3 %

D'après ce tableau, on voit que la porosité de l'encroûtement (sable + sel) est légèrement diminuée, mais que le squelette subit de grandes déformations qui sont mesurées par la comparaison de la porosité du sable pur encroûté et de la porosité initiale du sable dans le tube,

La porosité du squelette a augmenté de 20 % à 25 % en valeur relative. Un échantillon d'encroûtement, conservé à l'état gypseux, montre dans quelles proportions la porosité du matériau encroûté est réduite par le dépôt, tandis que le squelette initial voit sa densité apparente diminuer de manière importante,

Le gypse se transforme en hémihydrate lors de son séjour à l'étuve. On voit ainsi que malgré la déshydratation partielle du dépôt, la cohésion de l'ensemble ne varie pas. Donc, du fait de cette contraction, la porosité du sable en fin d'expérience est sous-estimée,

.../...

Une expérience réalisée dans du sable grossier de 330-1000  $\mu$ , donc se situant dans un domaine de granulométries très supérieures aux cas précédents, montre que la dilatation du squelette pour une quantité égale de sel, est identique à celle des sables plus fins.

Ce fait montre que le sel déposé dans de grands pores ou de petits pores amène les mêmes transformations du squelette.

Le sel doit donc se répartir en des points particuliers, par exemple, points de contact entre les grains de sable, là où la croissance des cristaux est susceptible non de colmater le réseau de capillaires, mais de produire un écartement des grains de sable.

Cette dilatation du squelette initial explique la relativement faible diminution de porosité de l'encroûtement lui-même, puisque, plus il est riche en sel, plus l'écartement des éléments de la matrice est grand.

#### 4) Examen de lames minces effectuées dans un encroûtement gypseux

-----  
de 49 jours.  
-----

Le gypse est observé dans des lames minces effectuées en coupe verticale au travers du plan de l'encroûtement.

Il se présente sous forme de plages cristallines composées de un, généralement plusieurs cristaux dont les clivages montrent leurs orientations différentes. Parfois deux, trois, quatre cristaux sont accolés suivant la direction de l'allongement, leurs clivages sont parallèles (Fig. 13 - photo 14).

Nous savons que ce sont les conditions de saturation, sursaturation, température, vitesse d'évaporation, imposées à la solution qui déterminent le faciès du dépôt, sa nature et sa stabilité.

Les cristaux prennent naissance lorsque dans la solution le seuil de sursaturation est atteint et se répartissent à la surface des grains de sable, aux endroits où ceux-ci se rapprochent. Puis ils repoussent les grains, car on peut observer que ces derniers n'ont plus de contact entre eux. L'enrichissement en sel les amène à s'éloigner davantage les uns des autres (Fig. 16, 17).

.../...

L'ordre de grandeur de la dimension de ces cristaux est de  $200\ \mu$  pour les plus importants, leur juxtaposition forme des ensembles atteignant  $400\ \mu$ . Les cristaux de gypse se sont individualisés sous un autre faciès en un point particulier de l'encroûtement à la faveur de l'expérience suivante : lors d'un arrêt d'évaporation par obstruction de pores en début d'expérience, un trou de  $0,4\ \text{mm}$  de diamètre avait été pratiqué au travers de la croûte, à la suite de quoi, le débit avait repris.

L'examen de cette cheminée montre que l'évaporation a été si rapide, que la solution a laissé à la surface des grains de sable un grand nombre de petits cristaux automorphes qui les tapissent (photo 15).

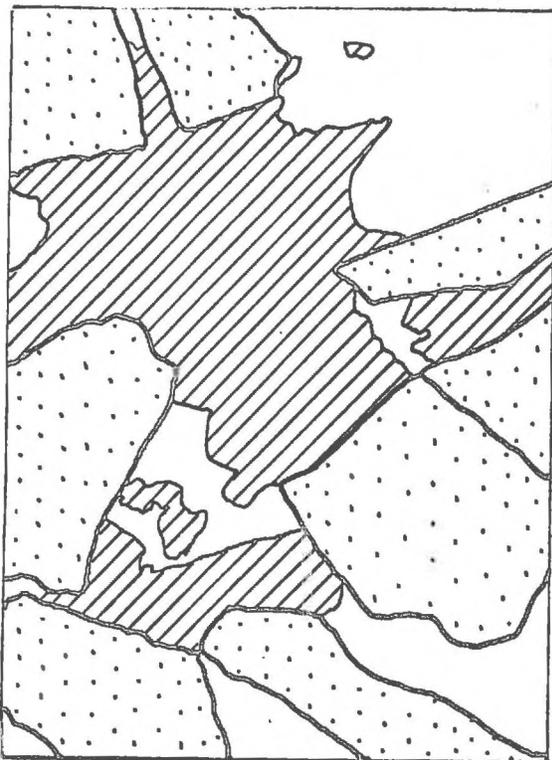
L'évaporation sur place de la solution est due au fait que la solution s'est concentrée très rapidement par sa mise en contact brusque avec l'air. De nombreux germes ont pris naissance en raison de la forte concentration et l'évaporation a été si rapide, que ces différents germes n'ont pu donner que des petits cristaux, ce qui est en accord avec la conception de VON WEIMARN. D'ailleurs, R. KERN (1953) a depuis réalisé des expériences sur les variations des faciès de cristallisation et a constaté en outre que les formes cristallines obtenues varient avec la concentration de la solution.

La zone de l'encroûtement protégée par une couche de sable de l'évaporation directe montre de grands cristaux, car la concentration de la solution s'est faite plus lentement, produisant moins de germes. Ces cristaux continuent à croître par un apport continu d'ions qui vont se fixer sur eux.

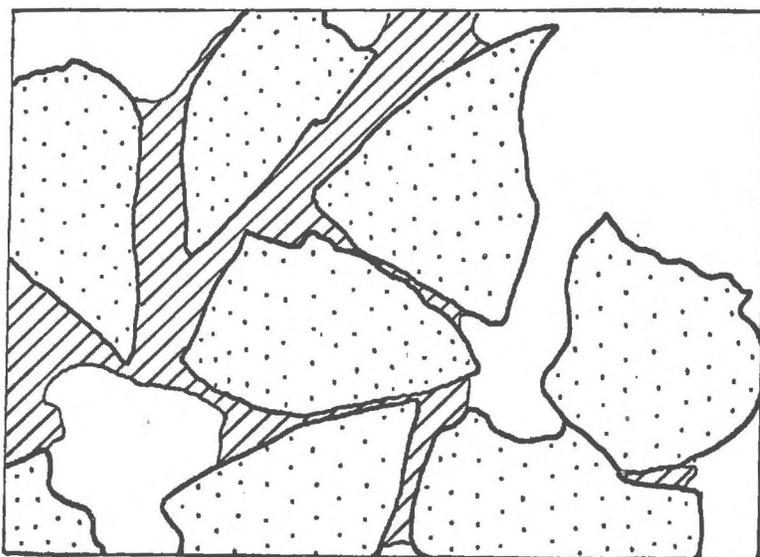
La sursaturation de la solution conduit à un dépôt qui, s'il est brutal, donne lieu à la cristallisation d'une grande quantité de petits cristaux.

Au contraire, quand de grands cristaux sont déjà formés, les ions vont se fixer sur eux. "Il y a une action désaturante des gros grains basée sur leur croissance plus rapide et leur solubilité plus faible" (GAY 47), ce qui résulte de la relation de KELVIN-OSTWALD (cf. G. EMSCHWILLER, Chimie Physique, p. 789). Les petits cristaux peuvent donc passer en solution au profit des grands cristaux. Dans un cristal, les surfaces les plus stables correspondent aux faces planes, tandis que les arêtes et les sommets représentent des points de fixation plus actifs pour les ions ; il est donc normal que les faces planes continuent à croître, mais en milieu très sursaturé, les forces qui tendent à fixer des ions ne sont pas très différentes d'un endroit à un autre du cristal en raison de la forte concentration des ions de la solution (DEICHA 1945).

.../...



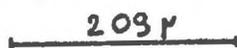
Interprétation des photos  
Répartition du Quartz, du sel, des vides



legende:  quartz  
de  
Norvège

 Gypse

 vide

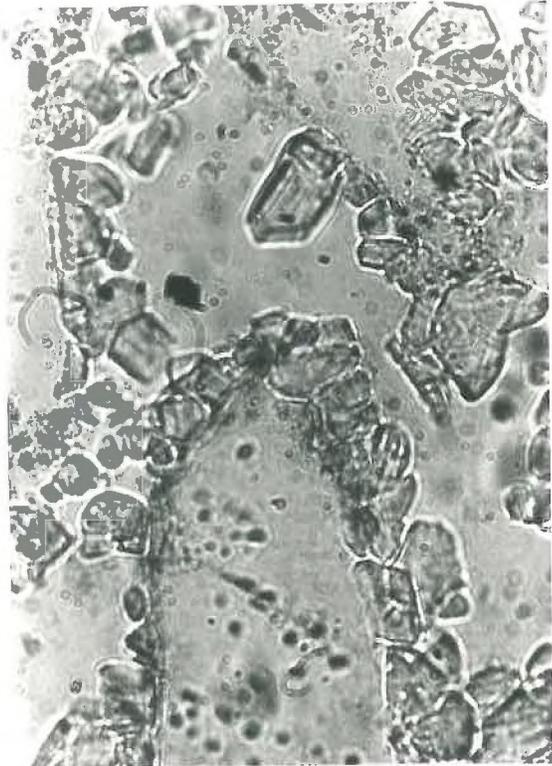
 203  $\mu$

vue de lames minces effectuées dans un encroûtement gypseux

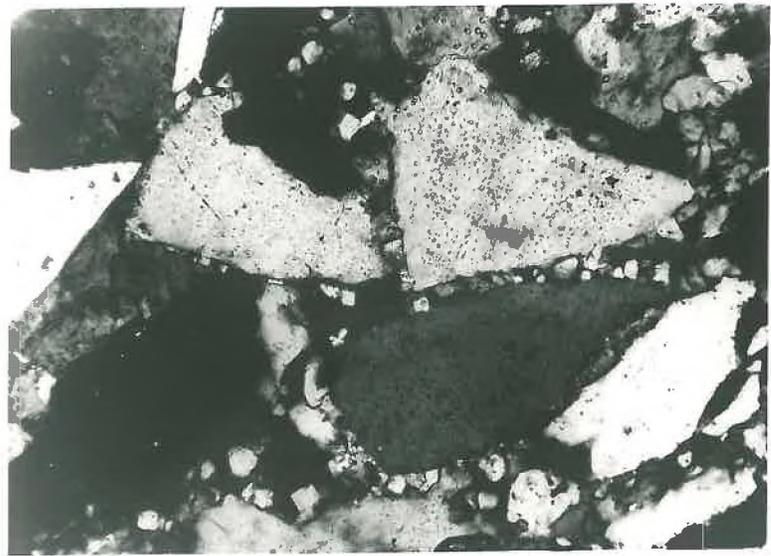
lum. polarisée



lum. polarisée - (détail de la vue précédente)



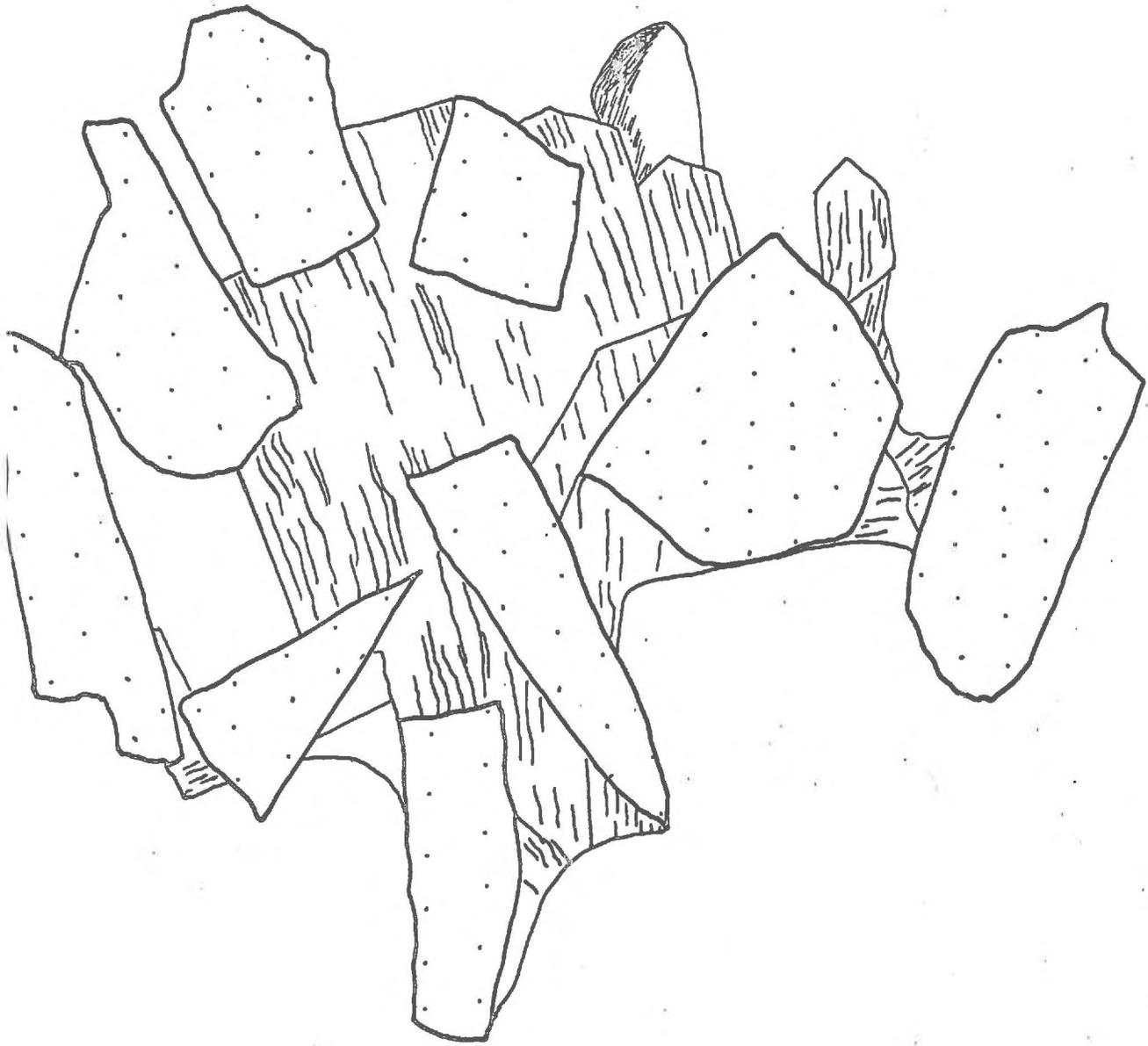
Zone d'évaporation brusque, petits cristaux tapissant la surface des grains de sable.



Vue en lumière polarisée, analysée, de cristaux écartant les grains de sable.

# encroûtement gypseux

(dessin de lame mince.)



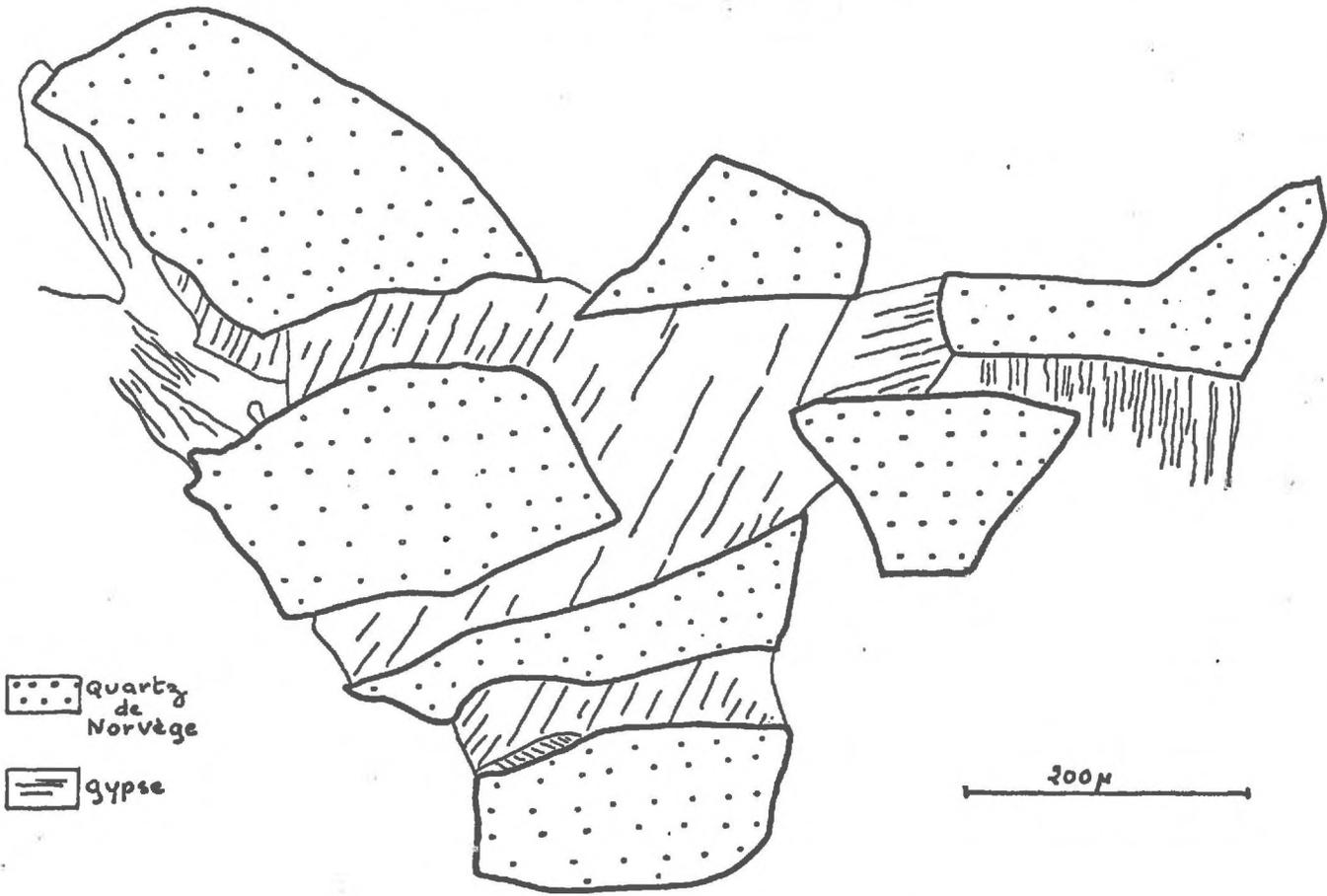
de :  Quartz de Norvège  Gypse

échelle :  200μ

Fig. 16

comparaison de deux types de dépôt de gypse  
dans du sable : quartz de Norvège .

27



dans un sol de limon .



Fig. 17

Certains assemblages de cristaux, situés entre les grains de sable, ont la forme du ménisque de la solution, tel qu'il existait lors de l'expérience. D'où nous pouvons penser que les faibles teneurs en eau dans les encroûtements laissent la majeure partie de la porosité aérée et l'eau s'étend en film à la surface du sable et du gypse déjà déposé.

La cristallisation du gypse dans le limon se fait d'une manière différente de celle qui existe dans le sable (Fig. 17). Cela est dû au fait que lors de sa cristallisation, le gypse ne rencontre pas de résistance dans le limon comme il en rencontre au milieu des grains de sable, les cristaux sont beaucoup plus grands, leur croissance fait éclater les agrégats de limon.

Le processus est donc le même, mais il n'y a pas de consolidation de l'ensemble car les cristaux n'ont pas la possibilité de s'accrocher dans plusieurs directions aux agrégats de limon comme cela se passe dans le sable, en raison de leur fragilité.

On voit donc que si l'utilisation du limon avait été généralisée à toutes les expériences, les mécanismes de dépôt du sel mis en évidence par l'emploi de matériaux grossiers, n'auraient pu être décelés de manière si frappante.

### C o n c l u s i o n -

En ce qui concerne la description et l'évolution de l'encroûtement, les données précédentes permettent de reconstituer les mécanismes donnant naissance aux encroûtements.

Deux mouvements se superposent à partir de la frange capillaire initiale :

- 1) - La dilatation du squelette.
- 2) - Envahissement du sable par le sel lors de la montée de la frange capillaire, conséquence du mouvement précédent.

Ceci étant valable uniquement, lorsque le niveau de la nappe d'eau est constant,

.../...

### III - Signification du débit de l'eau évaporée -

A la lumière des renseignements obtenus concernant le dépôt du sel et son mode de mise en place dans le matériau, on peut étudier l'évolution du débit de l'eau évaporée au cours du temps.

L'évaporation d'une solution saline à travers un matériau poreux est soumise à l'action de différents facteurs.

Les agents modificateurs du débit sont liés au pouvoir évaporant de l'atmosphère, à la solution plus ou moins riche en sel, et au devenir du matériau encroûté.

#### 1) Evolution du débit avec le temps.

-----

Le débit est maximum le premier jour de l'expérience. Au cours des dix jours suivants, il diminue de moitié, ce régime persiste pendant un mois à un mois et demi (Fig. 18).

Après cette période, il devient sujet à des variations assez brusques, pouvant aller jusqu'à son annulation. Toutefois, son arrêt ne semble jamais définitif.

Dans les premières expériences, un blocage de l'évaporation avait été observé au bout de 20 jours. Une perforation pratiquée au travers de la zone encroûtée avait eu pour effet, dès le lendemain, une reprise du débit. La courbe établie sur les débits moyens de 10 jours en 10 jours exprimés en mm, montre que l'évaporation des 20 premiers jours est 3 fois plus forte que par la suite (Fig. 19).

#### 2) Interprétation des courbes de débit.

-----

Il faut examiner successivement les facteurs qui les conditionnent.

##### a) La température des expériences.

Plus la température du milieu sera élevée, plus l'évaporation sera forte. Le système employé n'est pas strictement isotherme et l'évaporation d'eau pure au travers d'une colonne de sable, dans des conditions identiques aux autres expériences, montre que les fluctuations de la température extérieure influent sur le débit. Le chauffage, à 40°C ou à 60°C, n'amortit pas tout à fait les variations du climat ambiant.

.../...

b) La richesse en sel de la solution.

Des expériences ont été réalisées avec des solutions de sulfate de calcium à des concentrations différentes,

- 2260 mg  $\text{CaSO}_4$  / 1000 ml eau (Fig. 18)

- 500 mg  $\text{CaSO}_4$  / 1000 ml eau (Fig. 20)

Une solution très enrichie en sel amène un blocage de l'évaporation à plus ou moins brève échéance, tandis qu'une solution loin de la saturation ne provoque pas de diminution brusque du débit.

Ceci pourrait être dû au fait que dans le second cas, le dépôt se faisant plus lentement, l'arrangement des grains de sable entre eux se modifie à une vitesse telle que le sel ne cristallise pas plus vite que le matériau ne se modifie et ne colmate pas la porosité.

Il semble donc exister une sorte d'équilibre entre l'état de la porosité du matériau et le dépôt du sel. La taille des pores doit donc rester sensiblement la même.

Un sable, au travers duquel s'évapore une solution très riche en sel, voit sa porosité colmatée dans les premiers temps de l'expérience, ce qui produit une chute rapide du débit.

Il n'y a pas équilibre entre le dépôt du sel et son effet sur le support. La quantité de sel qui se dépose est suffisante pour boucher localement et temporairement une partie des capillaires, quand le sel, arrivant en masse importante, précipite avant que l'écartement des grains de sable soit suffisant pour permettre aux capillaires de conserver, voire même augmenter leur taille. Mais, dans tous les cas, le débit reprend avec une intensité plus ou moins importante.

- Les augmentations de débit sont interprétées comme des conséquences des déformations du squelette sableux. En effet, on a constaté la concordance du soulèvement d'une croûte avec une amplification de l'évaporation (photo 21).

- Une expérience a été réalisée en employant un sel très soluble, le chlorure de sodium à 100 g  $\text{NaCl}$  / 1000 ml d'eau.

.../...

On fait évaporer cette solution au travers de billes de verre de  $800\ \mu$  de diamètre. En 28 jours, il y a eu trois arrêts d'évaporation dont la durée pour chacun ne dépassait pas 24 heures.

Au cours du découpage du tube de billes, on a constaté qu'il n'y avait eu aucun dépôt de NaCl dans la zone soumise à l'évaporation.

Pourquoi le débit a-t-il été stoppé puisque la porosité était libre de tout encroûtement ?

Il faut rechercher des causes dans les propriétés de la solution de chlorure de sodium et sa solubilité. La figure 22 indique la valeur des concentrations en NaCl atteintes dans la frange capillaire. Il y a un gradient de concentration du bas vers le haut de la colonne. Néanmoins l'enrichissement maximum en NaCl qui atteint une valeur de  $180\text{‰}$  se situe très loin de la saturation ( $350\text{‰}$ ).

### Conclusion -

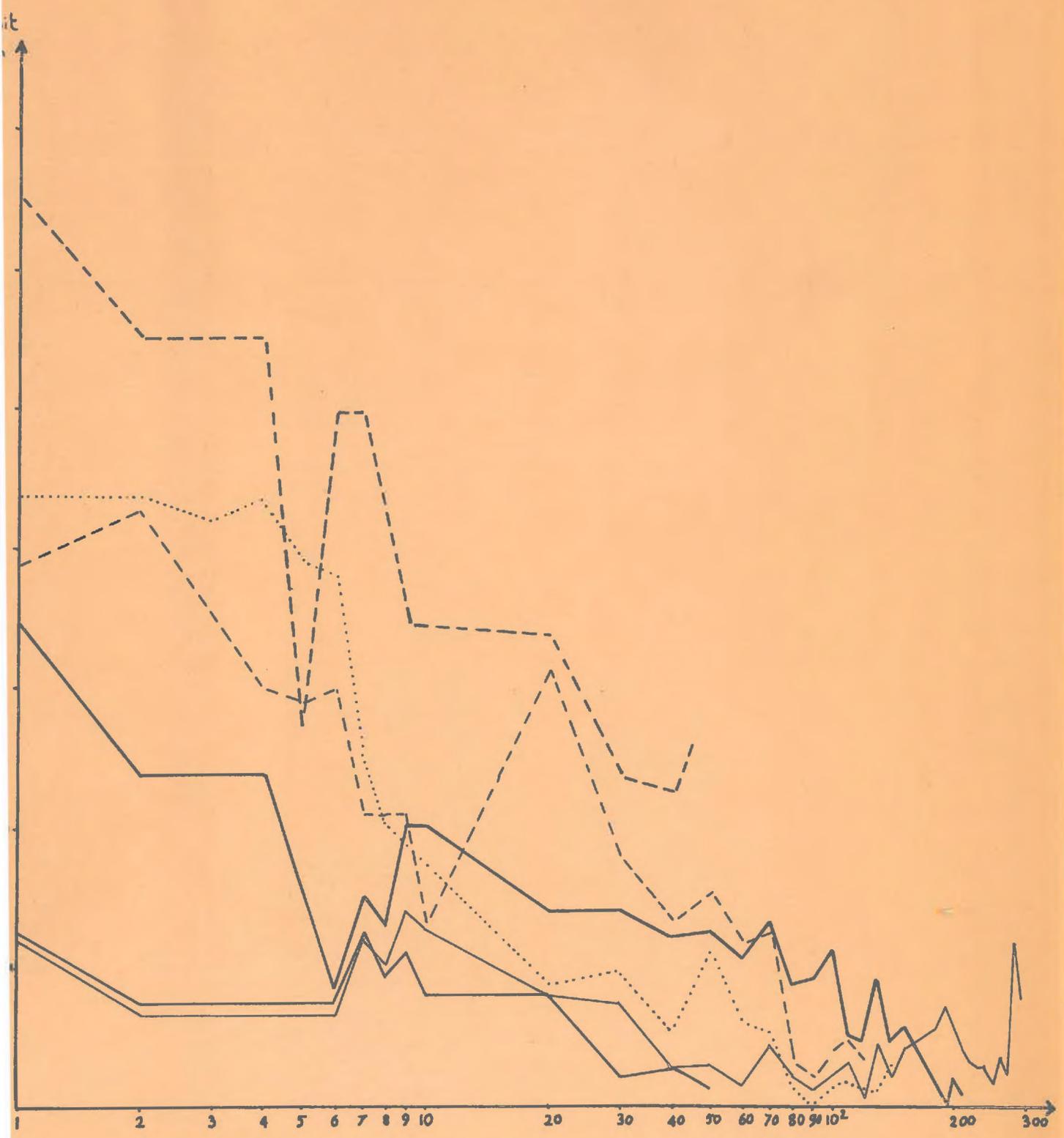
L'étude du débit de l'eau qui s'évapore montre que des facteurs comme la température du milieu, la richesse en sel de la solution, ont pour effet d'accélérer ou de ralentir l'évaporation.

Le maintien du débit qui est la condition fondamentale de la croissance de l'encroûtement, n'est possible que dans la mesure où le dépôt du sel ne colmate pas la porosité du sable. Seule la dilatation du squelette, au cours de l'encroûtement permet à l'eau de s'évaporer.

Un autre mécanisme sur lequel on reviendra, produit le même effet sur le débit ; c'est la diffusion. Le sel attiré vers les régions moins concentrées, désature la zone d'évaporation et rend possible la reprise du débit comme l'a montré l'expérience avec le chlorure de sodium. Au cours de cet essai, il semble que la simple concentration de la solution en surface amène une diminution de la vitesse d'évaporation attribuable à la diminution de la tension de vapeur de la solution. Nos expériences ne permettent pas de préciser cette vue.

.../...

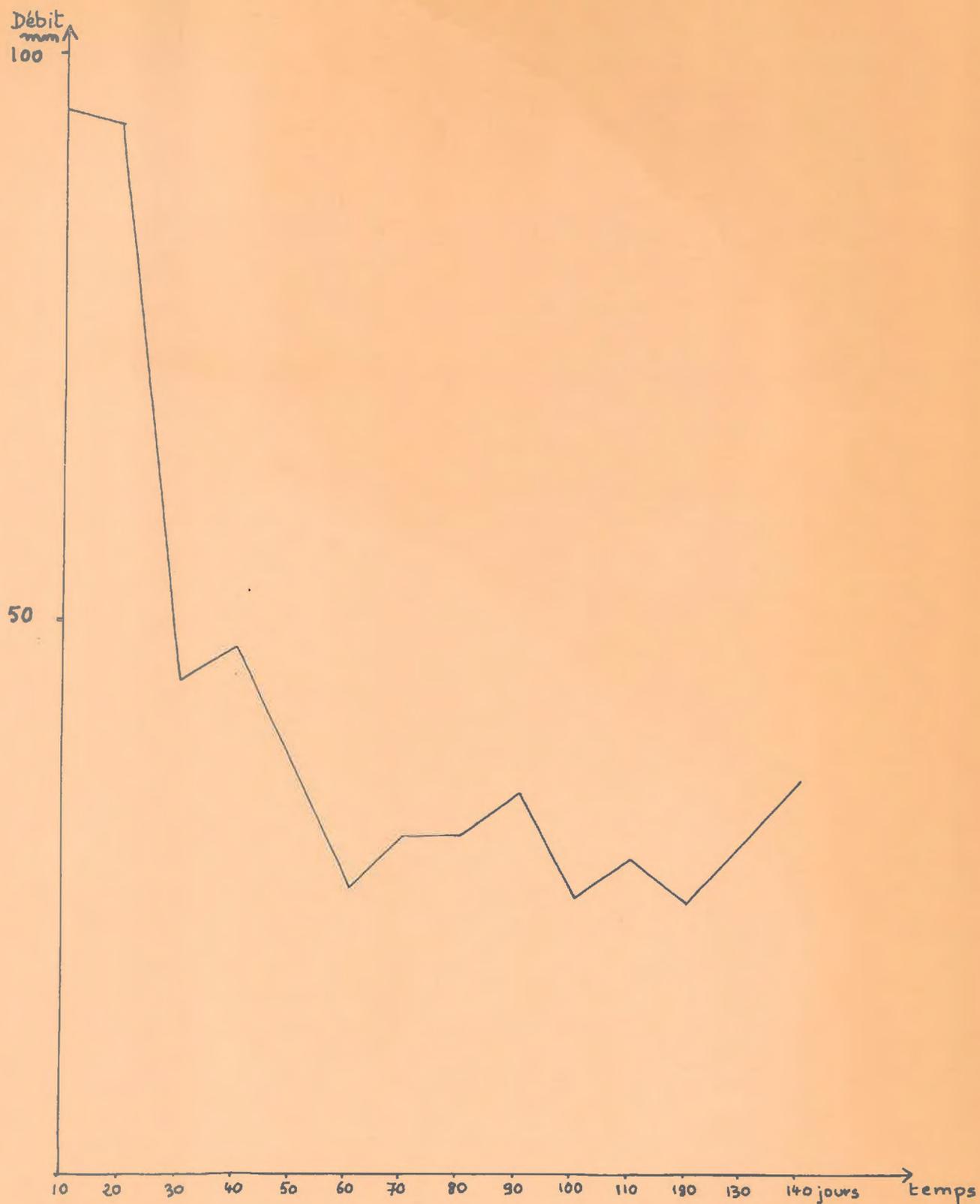
# Evaporation de l'eau en fonction du temps



Temps :  
en jours.

Fig. 18

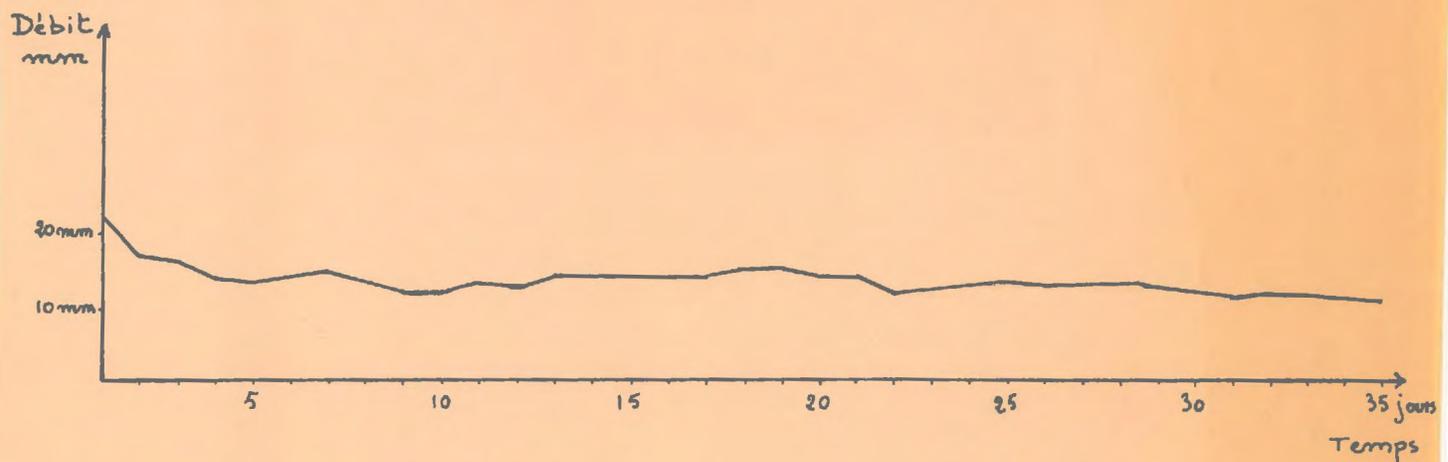
courbe établie sur les débits moyens de 10 jours.



évaporation de la solution autravers d'un sable (quartz de Norvège)  
200-280 $\mu$

courbe de moyennes mobiles du débit/jour  
de l'évaporation d'une solution de  $\text{CaSO}_4$   
contenant  $500 \text{ mg CaSO}_4 / \text{litre d'eau}$ .

expérience utilisant le sable de Fontainebleau (100-200 $\mu$ )

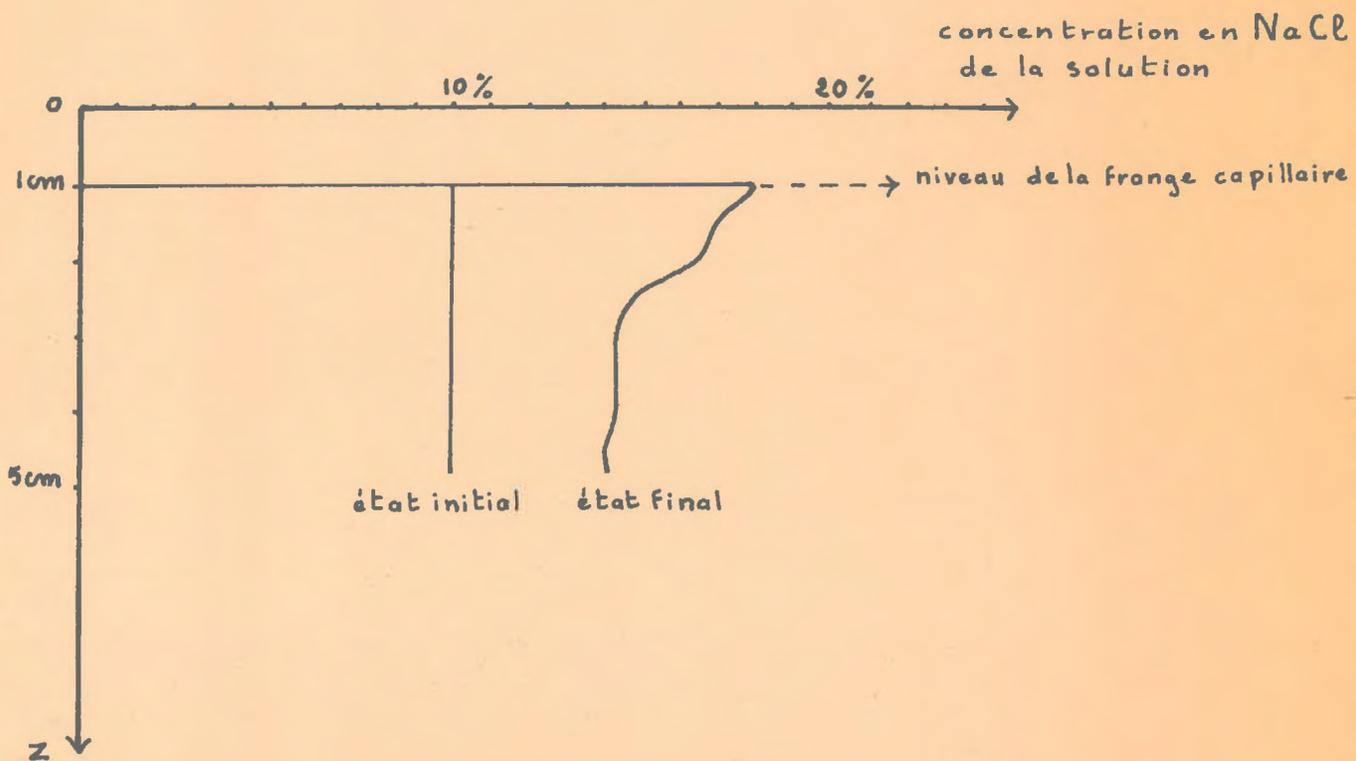
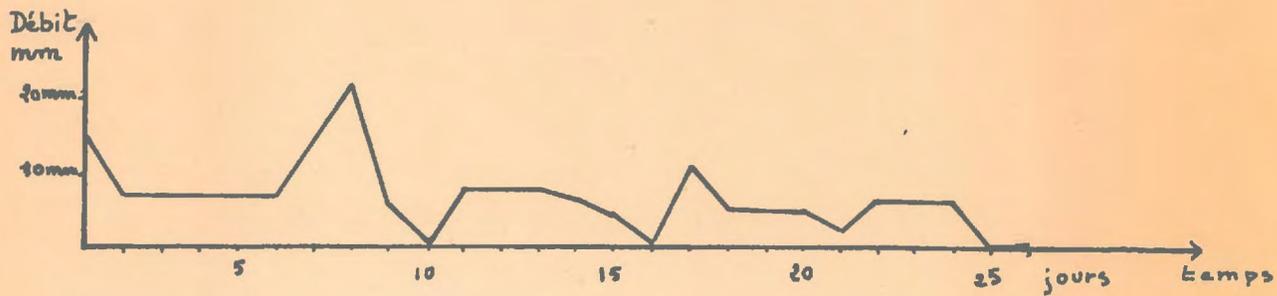


Expérience utilisant une solution  
peu enrichie en  $\text{CaSO}_4$



éclatement et soulèvement  
de l'encroûtement à la surface du sable.  
le débit augmente en même temps.

Expérience utilisant le Chlorure de Na  
 en solution contenant 100g NaCl/litre d'eau  
 matériau : Billes de verre de 800 $\mu$ .



solubilité du Chlorure de Sodium : 357° à 352<sup>100</sup>g / litre d'eau

IV - Etablissement du bilan général : dépôt et redistribution du sel. -

Le bilan a été calculé pour différents essais concernant le gypse. Il est donné dans le tableau VI.

T a b l e a u VIBilan du sel déposé

Teneur en CaSO <sub>4</sub> de la solution servant au réajustement du niveau des solutions dans les béchers : 2270 mg/1000 ml d'eau						
Titrimétrie du matériau	Durée de l'expérience	CaSO <sub>4</sub> théorique- ment déposé mg	CaSO <sub>4</sub> dosé mg	CaSO <sub>4</sub> - théorique mg	CaSO <sub>4</sub> dosé	Différence %
200 μ	13 jours	591	188,4	- 402,6		- 68 %
200 μ	20 "	384,2	414,4	+ 30,2		+ 7,8 %
280 μ	49 "	1370,6	2135,6	+ 765,0		(1) +55,8 %
	47 "	7948,4	3852,3	-4096,1		-51,5 %
						arrêt de chauffe
200 μ	142 "	5298,5	3661,2	-1637,3		- 30,9 %
	150 "	1084,8	770,5	- 314,4		- 28,9 %
1000 μ de verre	150 "	1177,5	664,1	- 513,4		- 43,6 %
200 μ	208 "	10452,5	9246,7	-1205,8		- 11,5 %
280 μ	208 "	8997,1	6880,3	-2116,8		- 23,5 %
280 μ	battement de nappe	8189	5635	-2553		- 31,2 %

Surestimation de cette valeur à cause de l'extrapolation de la quantité dosée sur un échantillon, à toute la croûte.

.../...

Le volume d'eau évaporée doit correspondre à une quantité équivalente de sel déposé. En réalité, si l'on compare le dépôt que l'on doit obtenir théoriquement, compte tenu de la teneur en sel de la solution, au dépôt dosé, on s'aperçoit qu'il existe un déficit du dépôt réel, visible surtout dans les expériences ayant subi un arrêt du chauffage.

Dans le premier cas concernant l'expérience de 13 jours, le déficit observé est dû au fait que la solution n'était pas saturée au cours des premiers jours. Les échanges entre le précipité de gypse et l'eau n'ont pas eu le temps de porter la concentration à un taux élevé.

Pour des périodes relativement courtes de 20 jours à 50 jours, le bilan du sulfate de calcium est bouclé et les chiffres sont conformes aux résultats attendus, sauf dans le cas du limon.

En revanche, pour des durées plus importantes, on note un déficit dans le dépôt par rapport au volume d'eau évaporé qui a laissé dans le sable une quantité de sel proportionnelle à la teneur en  $\text{CaSO}_4$  de la solution, théoriquement.

Ces dernières expériences ont subi un arrêt de chauffage pendant 45 jours. Cette interruption a supprimé le courant ascendant de la solution. Une grande concentration de sel en un point n'est pas en équilibre avec la solution et le système tend toujours vers une uniformisation de la répartition des ions par diffusion vers les zones moins concentrées.

°  
° °

Le mouvement d'un sel en solution dans un système soumis à l'évaporation se schématise de la manière suivante : (voir la figure 23) (DOERING, REEVE, STOCKINGER 1964).

L'accumulation de sel durant un temps  $dt$  est :

$$\Delta F = \int_{t_1}^{t_2} dF = \int_{t_1}^{t_2} q_i dt.$$

Avec :  $\Delta F$  = variation de quantité de sel entre les temps  $t_1$  et  $t_2$ .

.../...

# Accumulation et diffusion du sel

sous l'influence de l'évaporation

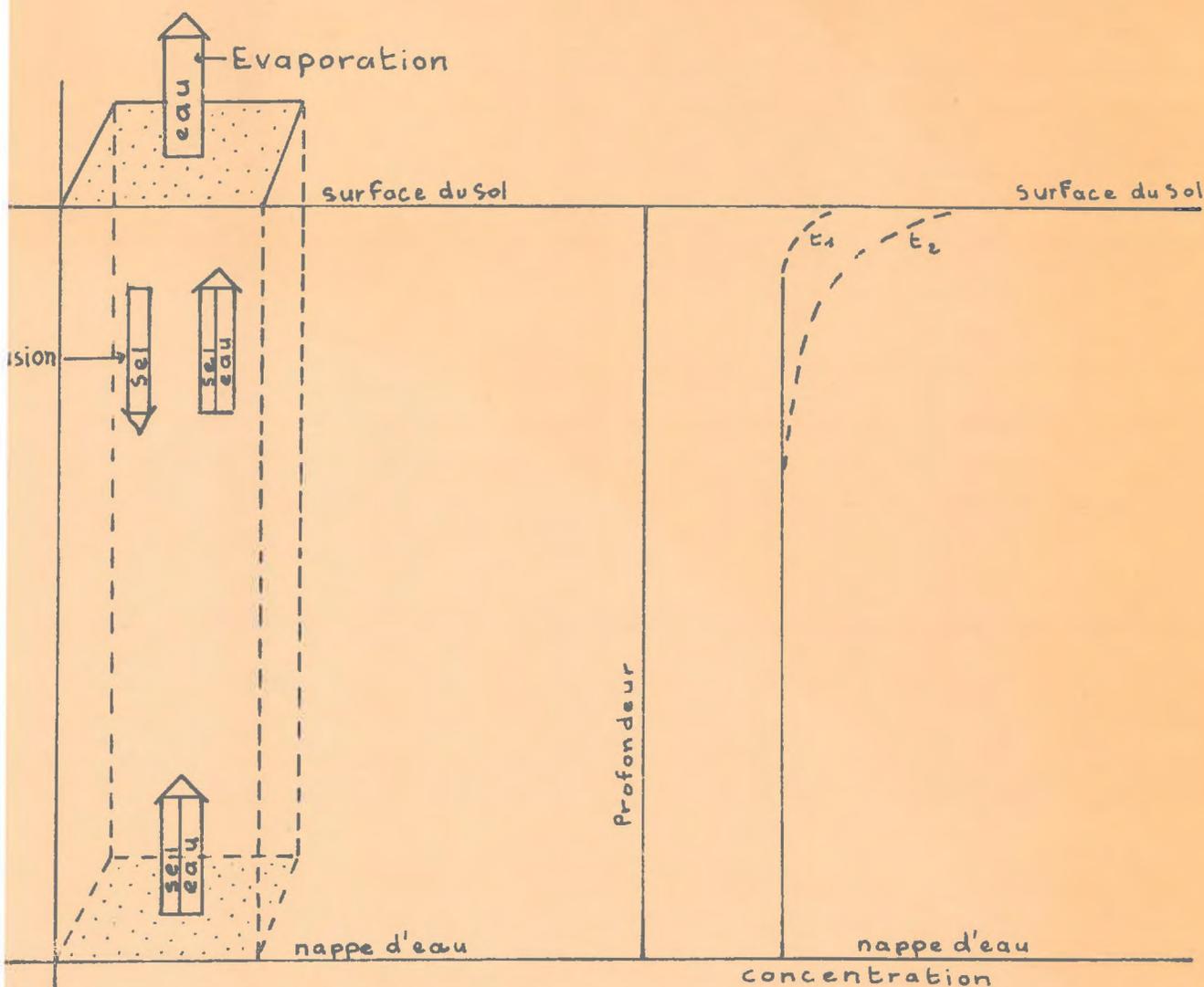


Diagramme du mouvement de l'eau et du sel dans un sol au-dessus d'une nappe d'eau. Quand l'eau s'évapore, le sel s'accumule à la surface, et diffuse vers le bas en réponse aux gradients de concentration qu'il développe.

Evolution dans le temps des concentrations de la solution du sol en fonction de la profondeur. Elle résulte de l'évaporation régulière de l'eau du sol, en présence d'une nappe d'eau salée et de la diffusion du sel vers le bas.

d'après E.J. Doering, A.C. Reeve, et K.R. Stockinger (1963)

$q_i$  = volume d'eau montant dans la colonne de sable en provenance de la nappe d'eau,

$C$  = concentration en sel de la nappe d'eau,

La concentration en sel augmente en profondeur avec le temps,

Dans le système utilisé, la concentration élevée du sel dans une zone est la conséquence de l'évaporation. Le déséquilibre dans les proportions des ions entre la zone d'évaporation et la solution du reste de la frange capillaire, tend par le phénomène de la diffusion à se compenser par un mouvement des ions vers les régions moins concentrées. La diffusion croît avec la température car l'agitation thermique des ions tend à leur faire occuper le plus grand volume liquide disponible. La vitesse de la diffusion est fonction de trois variables, elle est inversement proportionnelle à la masse moléculaire, à la taille des molécules et à la viscosité du sel en solution,

1) Une série d'expériences comparées relatives à l'étude de la diffusion en conditions évaporantes a été effectuée en utilisant trois sels : NaCl,  $K_2CO_3$  et le citrate de sodium.

Les trois sels choisis présentent des caractéristiques différentes entrant en jeu dans le mécanisme de la diffusion. Nous savons que la vitesse de la diffusion est une fonction inverse de la masse moléculaire et de la dimension des molécules et des ions, elle est reliée de plus à la solubilité par la relation de Nernst selon laquelle :

$$\frac{dx}{dt} = K (C_{sol} - C_{sat})$$

$\frac{dx}{dt}$  = vitesse de la diffusion

$C_{sol}$  = concentration de la solution

$C_{sat}$  = concentration de la solution saturée

$K$  = coefficient lié à la diffusion

.../...

T a b l e a u VII

Caractéristiques des sels choisis

sels	Poids moléculaire g	Solubilité (g/l)		Concentration de la solution normale (g/l)	système cristallin
		20°	100°		
NaCl	58,9	360	391,2	58,9	cubique
CaCO <sub>3</sub>	132	1200	1560	69	monoclinique
Nitrate de sodium	294,2	720	1670	98,06	cristaux blancs en grains ou en poudre

Les conditions sont identiques pour les trois expériences.

- l'ascension de la solution a lieu au travers de billes de verre de 800  $\mu$ .
- les solutions salines sont normales,
- le chauffage I-R élève la température à 60°C.

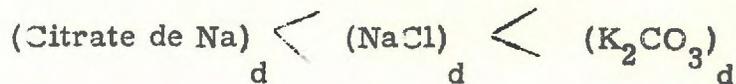
Les sels ont été sélectionnés pour leur grande solubilité qui accélère les phénomènes, pour leurs masses moléculaires croissantes, ainsi que pour leurs tailles.

La diffusion a été mise en évidence en étudiant la concentration de la solution-mère. Si celle-ci augmente, c'est qu'il y a diffusion.

Des dosages ont été effectués tous les 3 jours par prélèvement d'une quantité de liquide dans chacun des béchers contenant la solution-mère. Le volume est remplacé par une même quantité de solution normale. Le réajustement de la solution-mère au niveau initial, se fait avec la solution normale également. Il s'en suit que la diffusion sera sous-estimée.

.../...

Un premier examen des courbes établies en fonction du temps et de la concentration exprimée en normalité des solutions des trois sels, montre que la plus forte diffusion affecte la solution de  $K_2CO_3$ , tandis que pour NaCl et le citrate de sodium le phénomène est moins marqué (Fig. 24).



Plusieurs caractéristiques de ces sels peuvent aider à l'explication du phénomène : en effet, le sel le plus soluble est le citrate de sodium, mais celui-ci est un électrolyte faible, donc peu dissocié, de telle sorte qu'il se présente sous la forme de grosses molécules à poids élevé. Il en résulte d'une part, que le cheminement de celles-ci est malaisé quand elles se trouvent concentrées dans la zone d'évaporation, et d'autre part, que leur descente à contre courant par suite du flux ascendant de la solution présente des difficultés (Fig. 25).

- NaCl se situe dans un domaine intermédiaire entre  $K_2CO_3$  et le citrate de sodium pour des raisons différentes, bien qu'il soit doté de petites molécules et que sa viscosité en solution concentrée soit négligeable. Comme NaCl ne cristallise pas au sein des billes de verre, c'est donc qu'il n'engendre pas de gradients de concentration suffisamment grands pour déclencher une diffusion massive du sel. La saturation de la solution n'est pas atteinte à la surface d'évaporation (Fig. 26).

-  $K_2CO_3$  pour sa part, cristallise sur les billes, il y a donc une partie de la frange capillaire, sursaturée. La grande solubilité du  $K_2CO_3$  permet sa remise en solution rapidement. Cela explique la grande diffusion qui affecte ce sel (Fig. 27).

Alors que dans une expérience utilisant NaCl, un arrêt d'évaporation de 45 jours, a provoqué la disparition totale du dépôt, le même traitement appliqué au gypse ne provoque pas d'effets aussi nets. On peut attribuer la différence de comportement à la solubilité même du gypse et à la teneur élevée en sel de la solution au niveau du dépôt. Cette diffusion n'affecte pas la porosité de l'ensemble sable + gypse, car le gypse est dissous à la surface de contact de l'eau, capillaire et pelliculaire, avec celui-ci.

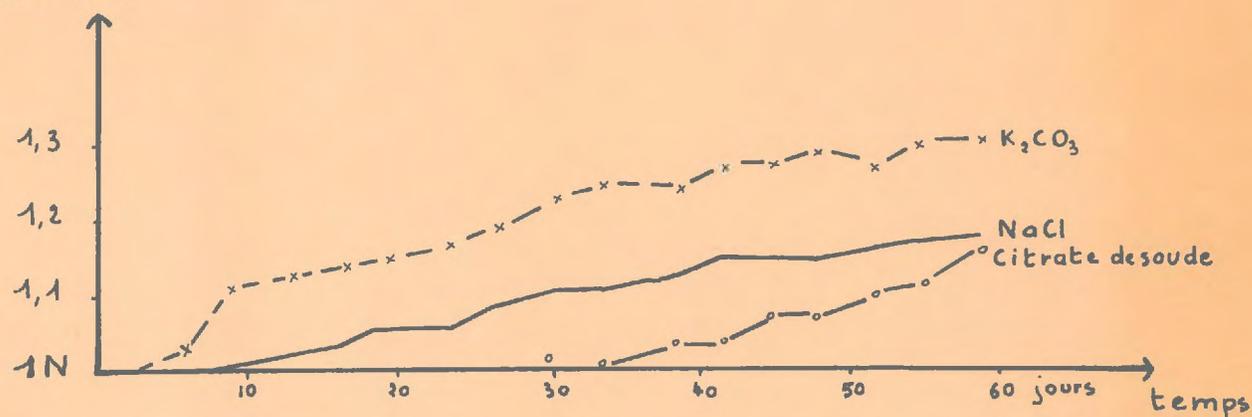
.../...

Expériences comparées relatives à la diffusion

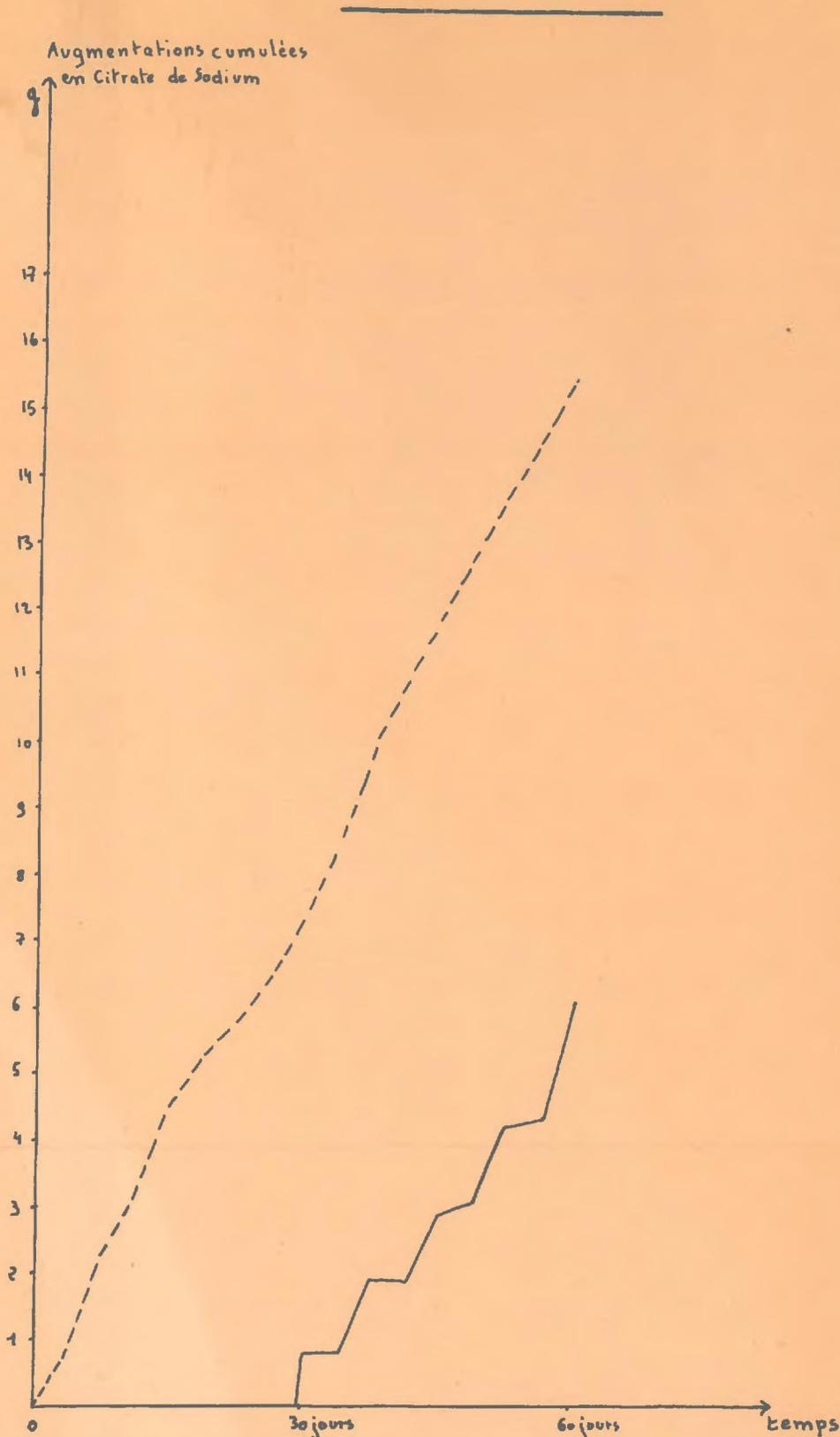
de trois sels  $K_2CO_3$   
 $NaCl$   
 Citrate de Soude

Augmentation de concentration des solutions-mères  
 en fonction du temps.

Augmentations cumulées  
 sel des solutions-mères  
 Normalité

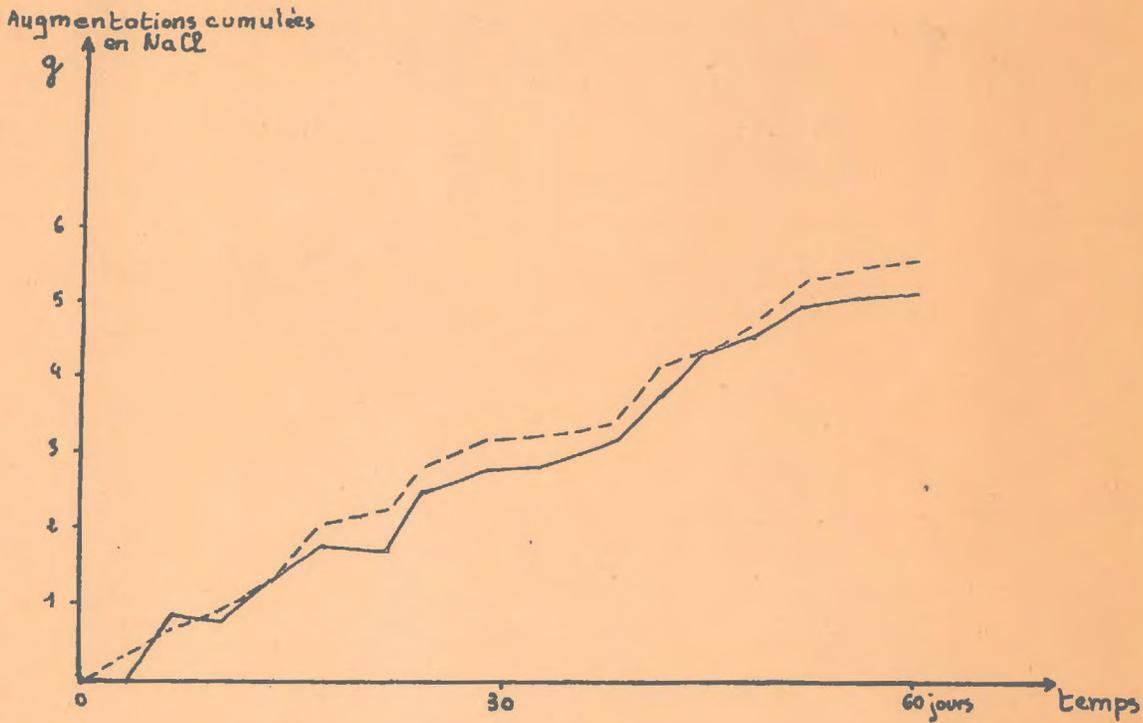


# Diffusion du Citrate de sodium



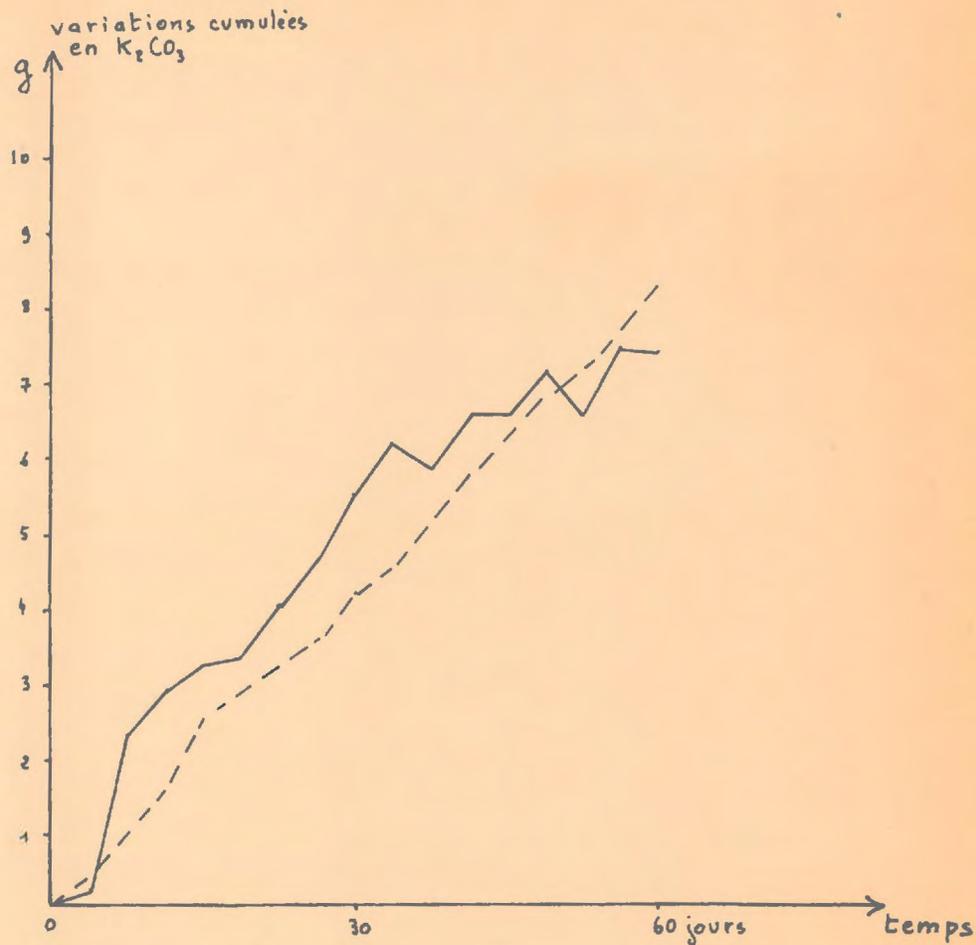
----- dépôt théorique (valeurs absolues cumulées) calculé en fonction de l'évaporation d'une solution normale.  
——— valeurs cumulées des augmentations de Citrate de sodium dans la solution-mère au cours du temps. = Diffusion.

# Diffusion du NaCl



----- dépôt théorique (valeurs cumulées) calculé en fonction de l'évaporation d'une solution normale.  
——— valeurs cumulées des augmentations de NaCl dans la solution-mère au cours du temps. = Diffusion.

# Diffusion de $K_2CO_3$



----- dépôt théorique calculé en fonction de l'évaporation d'une solution normale. (valeurs cumulées).

————— valeurs absolues cumulées des variations de poids de  $K_2CO_3$  dans la solution-mère au cours du temps.

= Diffusion.

2) Conséquence d'un arrêt de chauffage sur un dépôt de chlorure de sodium ; l'expérience a été réalisée dans du sable et des billes de verre.

### T a b l e a u VIII

#### Expérience NaCl dans billes de verre et sable

	Granulométrie:	Porosité	Débit eau évaporée	concentration: solution- mère t = 0	concentration: solution-mère t = 96 j	Dépôt
de verre	800 u	37,7 %	211 ml	50 g/l	152,5 g/l	0
sable de Norvège	630 - 1000 u	44,8 %	240 ml	50 g/l	167,5 g/l	+ efflorescence en 20 jours

La cristallisation du chlorure de Na n'a pas lieu dans les billes, alors qu'elle se manifeste dans le sable sous la forme de gros cristaux faisant plus ou moins des efflorescences.

L'évaporation a été plus importante à partir du moment où il y a eu des efflorescences dans le sable, car le dépôt du sel, tout en n'obstruant pas la porosité, permet la déconcentration de la solution; les ions transportés par le flux de la solution allant se fixer sur les cristaux préexistants.

Cependant, l'interruption du chauffage pendant 45 jours a eu pour conséquence, la disparition des efflorescences qui avaient soulevé le sable.

La plus forte concentration de la solution-mère du sable en fin d'expérience, s'explique par le fait que le débit a été plus grand.

Si dans les billes, la diffusion est très importante. puisqu'il n'y a pas de dépôt ; dans le sable, le sel est soumis à un double phénomène de dépôt et de diffusion.

.../...

En l'absence d'évaporation par arrêt de chauffage, la diffusion est totale, car il n'y a plus appel de sel vers le haut et la solution tend à s'homogénéiser sur toute la hauteur de la colonne capillaire, ce qui explique la disparition du dépôt.

3) Comparaison entre sels provoquant un soulèvement des matériaux et sel cristallisant entre les grains sans augmentation de volume apparent du squelette.

- Acide citrique

-  $K_2 CO_3$

L'incidence sur le débit a été étudiée ainsi que les mécanismes mis en jeu pour la reprise d'évaporation.

Le cas de l'acide citrique a montré qu'un sel ayant des difficultés à diffuser de par ses caractéristiques, comme il a été démontré dans un paragraphe précédent, se déposant dans un système poreux par évaporation d'une solution, n'a de recours pour que le système puisse évoluer que dans l'augmentation de porosité de la matrice et le soulèvement des billes de verre.

Le carbonate de potassium se fixe en petits cristaux à la surface des billes de verre et les dites billes sont soudées entre elles par le sel déposé à leur point de contact. Ceci est visible à la loupe binoculaire.

Pourtant au cours de l'expérience, le débit est très irrégulier. Parfois, l'évaporation est stoppée durant 8 à 10 jours. Il n'y a pas soulèvement des billes, pour des raisons non élucidées. La porosité considérablement colmatée d'une part et la forte concentration de la solution d'autre part ne permettant plus à l'eau de s'échapper, seule la diffusion intervient donc ici, et la dissolution du dépôt entraîne la reprise périodique de l'évaporation.

Seules deux possibilités s'offrent aux sels déposés dans un système poreux; soit provoquer l'augmentation de porosité du squelette, soit la diffusion vers le bas quand le dépôt ayant colmaté la porosité, ne permet plus l'évaporation de l'eau, la combinaison des deux phénomènes conditionne la genèse d'un encroûtement.

.../...

Toutefois, dans le cas d'un sel très soluble comme l'acide citrique où il y a dualité entre diffusion et soulèvement des billes, on peut constater que le soulèvement tend vers une limite ; il semble qu'on atteigne un stade ultime par le colmatage de la porosité entraînant un arrêt d'évaporation qui ne peut disparaître que par la mise en oeuvre d'une diffusion suffisante qui déconcentre la solution.

On constate donc que la diffusion qui a tendance à agir de façon cyclique en conditions évaporantes, devient très importante et continue dès que l'évaporation est stoppée par arrêt de chauffage ; l'exemple en est fourni par le cas d'un sel très soluble comme NaCl.

Toutes les expériences précédentes ont été effectuées en maintenant le plan d'eau à un niveau constant.

#### 4) Expérience avec battement de nappe.

Puisque l'on sait que la diffusion joue parallèlement au dépôt dans les encroûtements gypseux obtenus à partir d'un front d'évaporation fixe, on peut se demander quel sera l'effet d'un battement de nappe affectant une colonne de sable provoquant l'évaporation de la solution tout au long du tube de sable.

Pour cette manipulation, un sable de Fontainebleau de 200 à 280  $\mu$  a été utilisé.

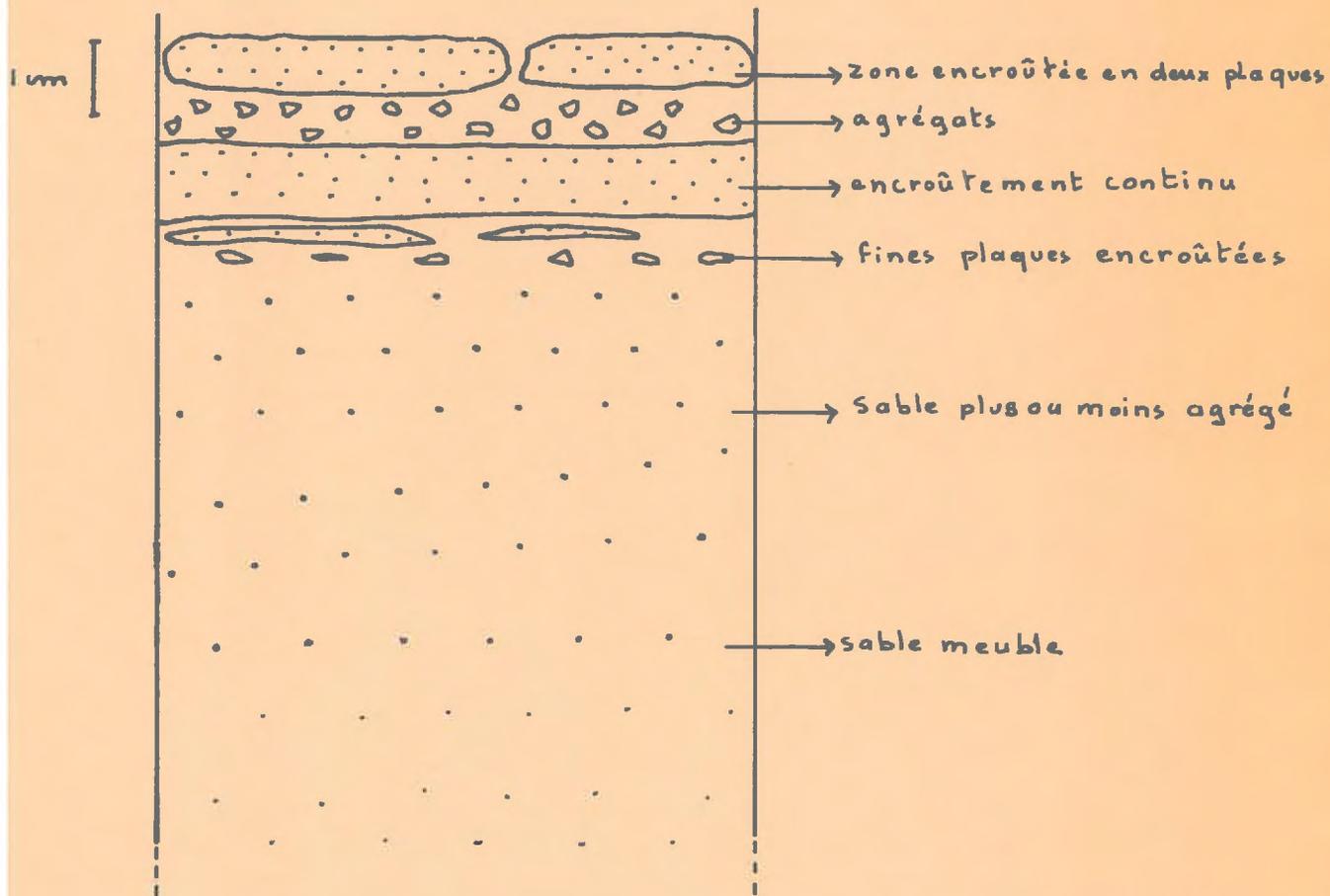
On trempe le tube de sable dans une solution de sulfate de calcium contenant 1,8 g  $\text{CaSO}_4$ /litre d'eau. Quand l'ascension capillaire atteint le sommet du sable, le tube est mis à évaporer sous une lampe à I-R.

La quantité d'eau évaporée est connue par une pesée avant et après la mise à dessiccation sous le chauffage.

Le découpage de la colonne de sable a révélé que la partie superficielle du sable est consolidée sur 1 cm d'épaisseur. Puis sur 5 cm de hauteur, il y a alternativement des agrégats de 2 à 5 mm et des encroûtements occupant toute la surface d'évaporation. Le reste de la colonne de sable est tout à fait meuble (Fig 28). Les concentrations en  $\text{CaSO}_4$  sont reportées sur la figure 29. Les différents niveaux d'encroûtement peuvent s'interpréter comme les niveaux successifs du front d'évaporation. En effet, le niveau de la frange capillaire a baissé durant

.../...

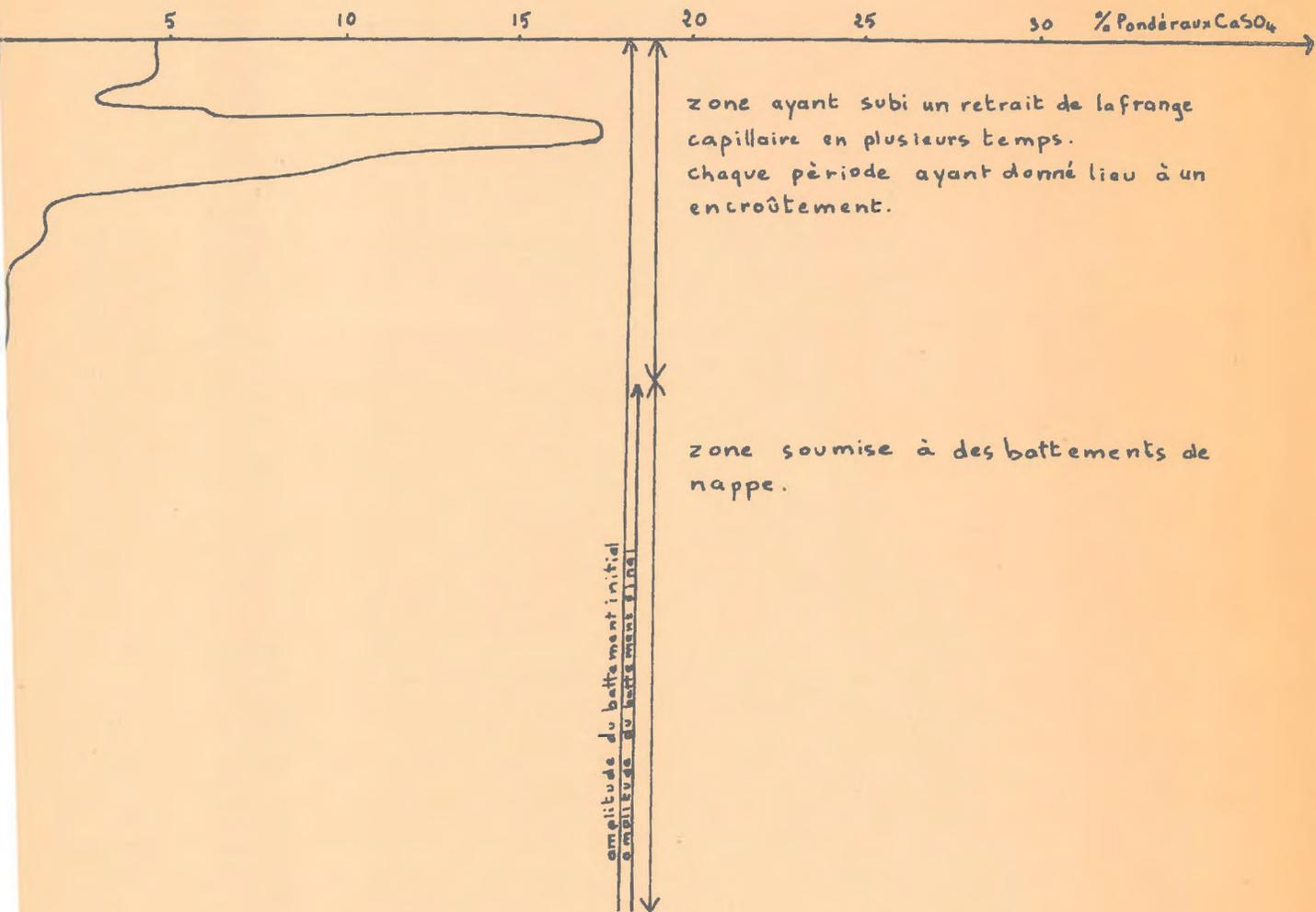
Description morphologique  
d'une  
coupe verticale d'une colonne de sable  
ayant subi des battements de nappe



Expérience effectuée avec du sable de Fontainebleau 200 $\mu$ -280 $\mu$

# Enrichissement en sel en fonction de la profondeur

d'une colonne de sable soumise à des battements de nappe



les six mois de l'expérience et sur toute cette zone le gypse s'est déposé, mais le reste de la colonne de sable ayant subi la montée et la descente par séchage de la solution, ne contient pas plus de sulfate de calcium que les zones inférieures aux encroûtements dans les expériences sans battement de nappe. Théoriquement, le dépôt devrait être uniforme sur toute la hauteur de sable soumise aux variations de la frange capillaire. Le sulfate devrait s'accumuler au fur et à mesure du retrait par évaporation de la solution.

Le gypse déposé obligatoirement lors de la phase de dessiccation est remis en solution avec l'ascension capillaire,

Le dépôt ne semble donc pas stable dans les matériaux constamment affectés par des variations d'eau, quand la solution n'est pas saturée en sel.

On voit que s'il y a encroûtement sur toute la hauteur de sable d'où la solution s'est retirée, il n'y a pas encroûtement dans la zone soumise aux battements de nappe. Le gypse déposé diffuse dans la solution qui réhumecte la colonne de sable,

#### 5) Particularités de dépôt.

Trois expériences ont donné lieu à des dépôts dont la particularité réside dans le nombre de niveaux encroûtés. Ce sont des encroûtements accidentels dus à la rupture de la colonne de sable par tassement de celle-ci (Fig. 29, 30, 31, 32).

Le sommet de la frange capillaire se situe à 1 cm de la surface du sable, il se dépose donc du gypse à ce premier niveau. La rupture du sable crée une nouvelle zone d'évaporation par retrait de la frange capillaire. Ce phénomène peut se répéter plusieurs fois.

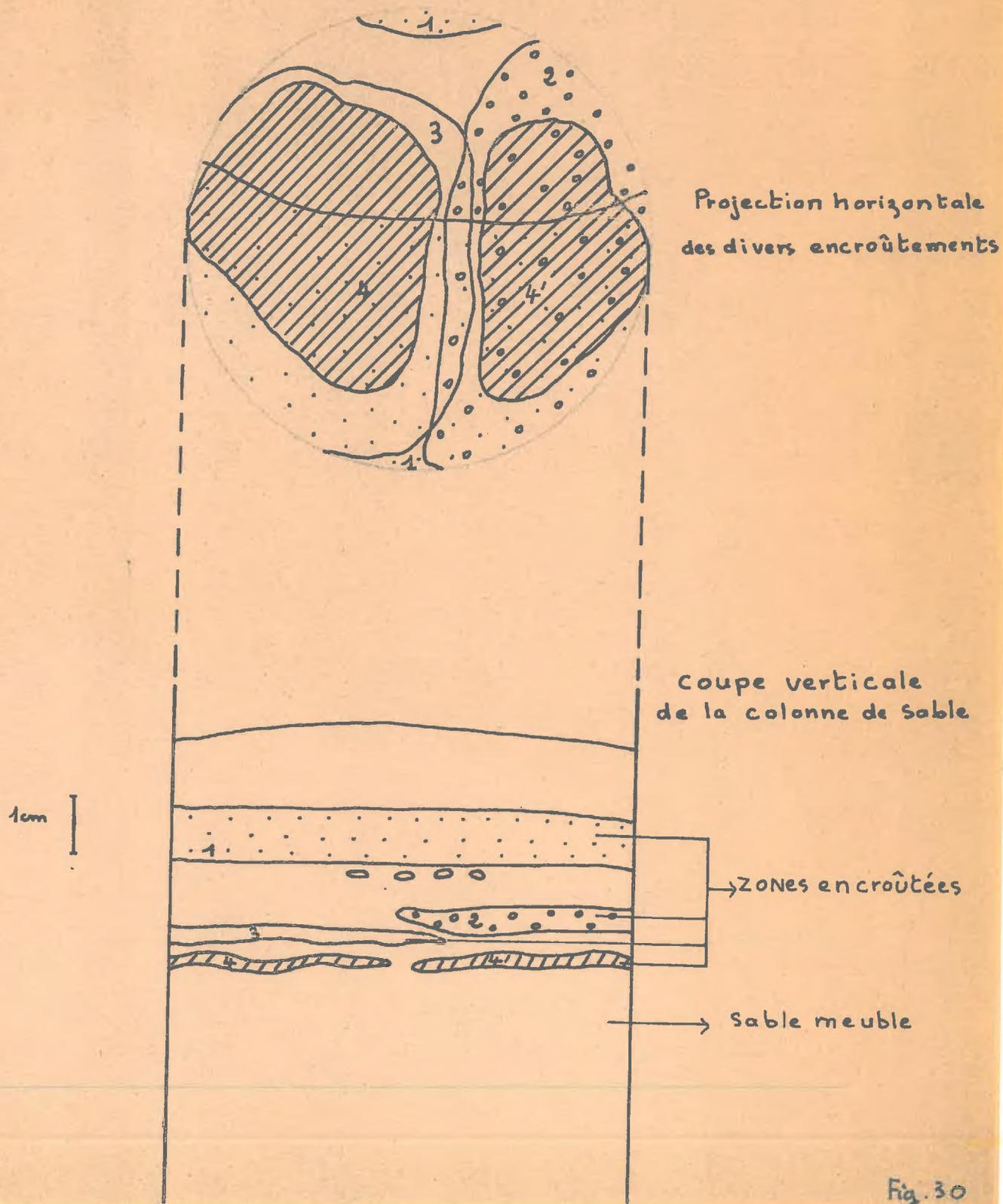
La superposition des dépôts ne gêne pas l'évaporation si ce n'est que l'épaisseur du sable supérieur à la frange capillaire ayant augmenté de façon sensible, crée un mulch qui ralentit l'évaporation.

Ces accidents de dépôt complètent l'expérience précédente et montrent qu'une baisse de la nappe permet aux encroûtements de se produire du haut vers le bas, sans pour autant que la porosité soit colmatée, l'encroûtement le plus ancien étant situé au niveau le plus haut dans la colonne de sable.

.../...

# localisation des encroûtements

formés successivement par rupture de la frange capillaire



# Enrichissement en sel en fonction de la profondeur

ruptures successives par tassement du sable, de la frange capillaire donnant lieu à différents niveaux d'encroûtement.

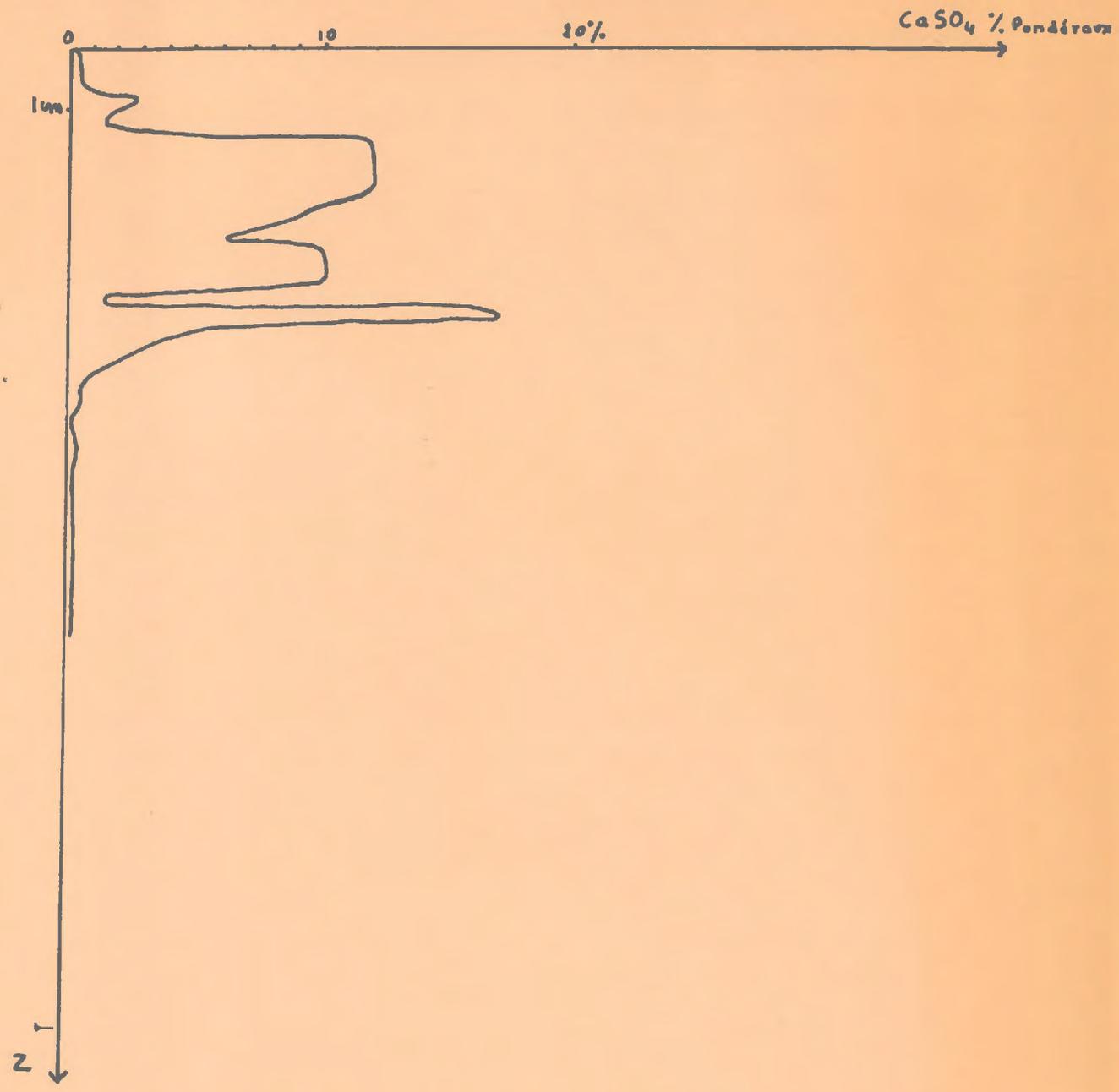
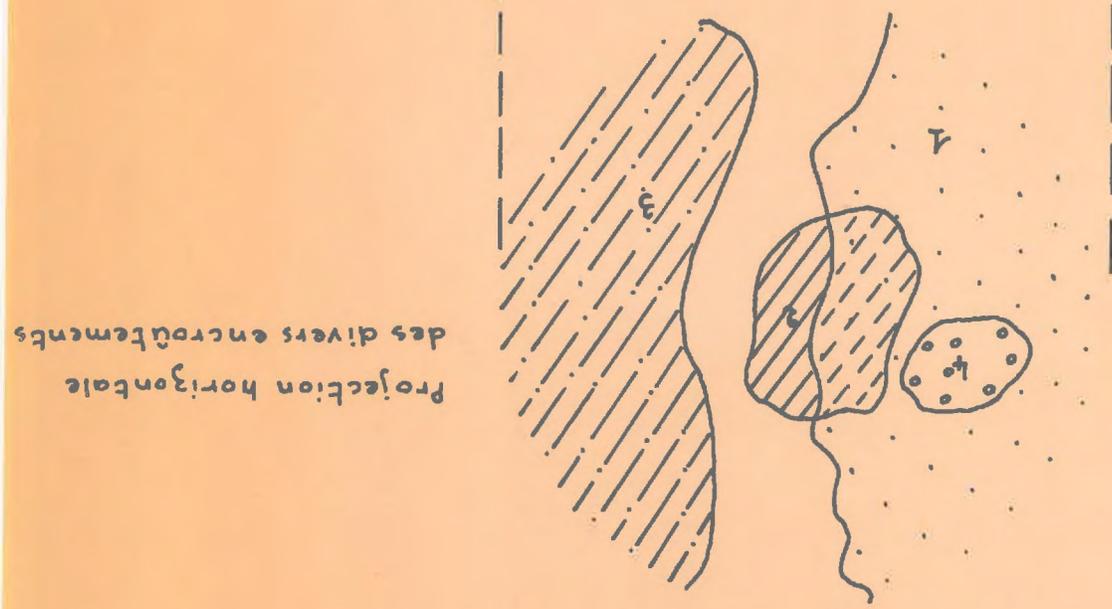


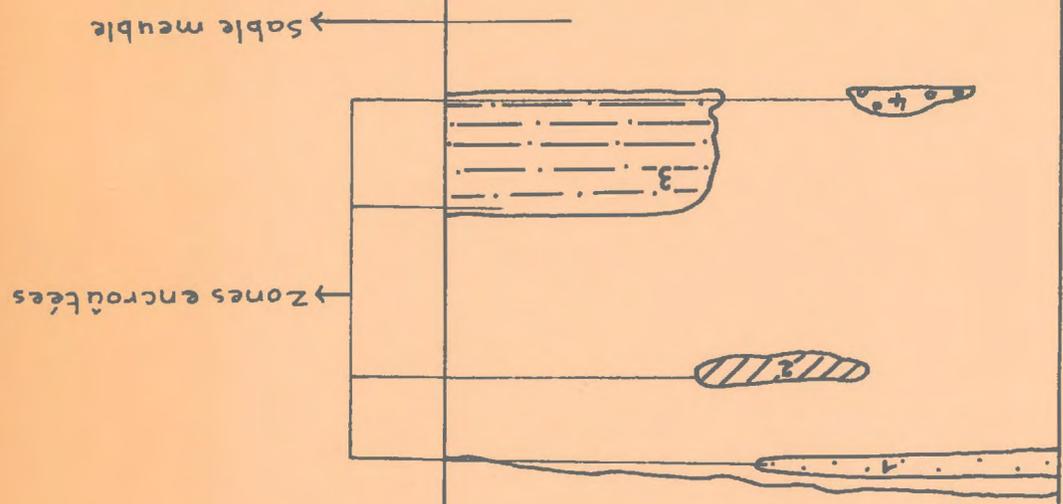
Fig. 31

localisation des encroûtements  
formés successivement par rupture de la frange capillaire



Projection horizontale  
des divers encroûtements

coupe verticale  
de la colonne de sable



Zones encroûtées

sable meuble

Fig. 32

# Enrichissement en sel en fonction de la profondeur

ruptures successives par tassement du sable, de la frange capillaire donnant lieu à différents niveaux d'encroûtement.

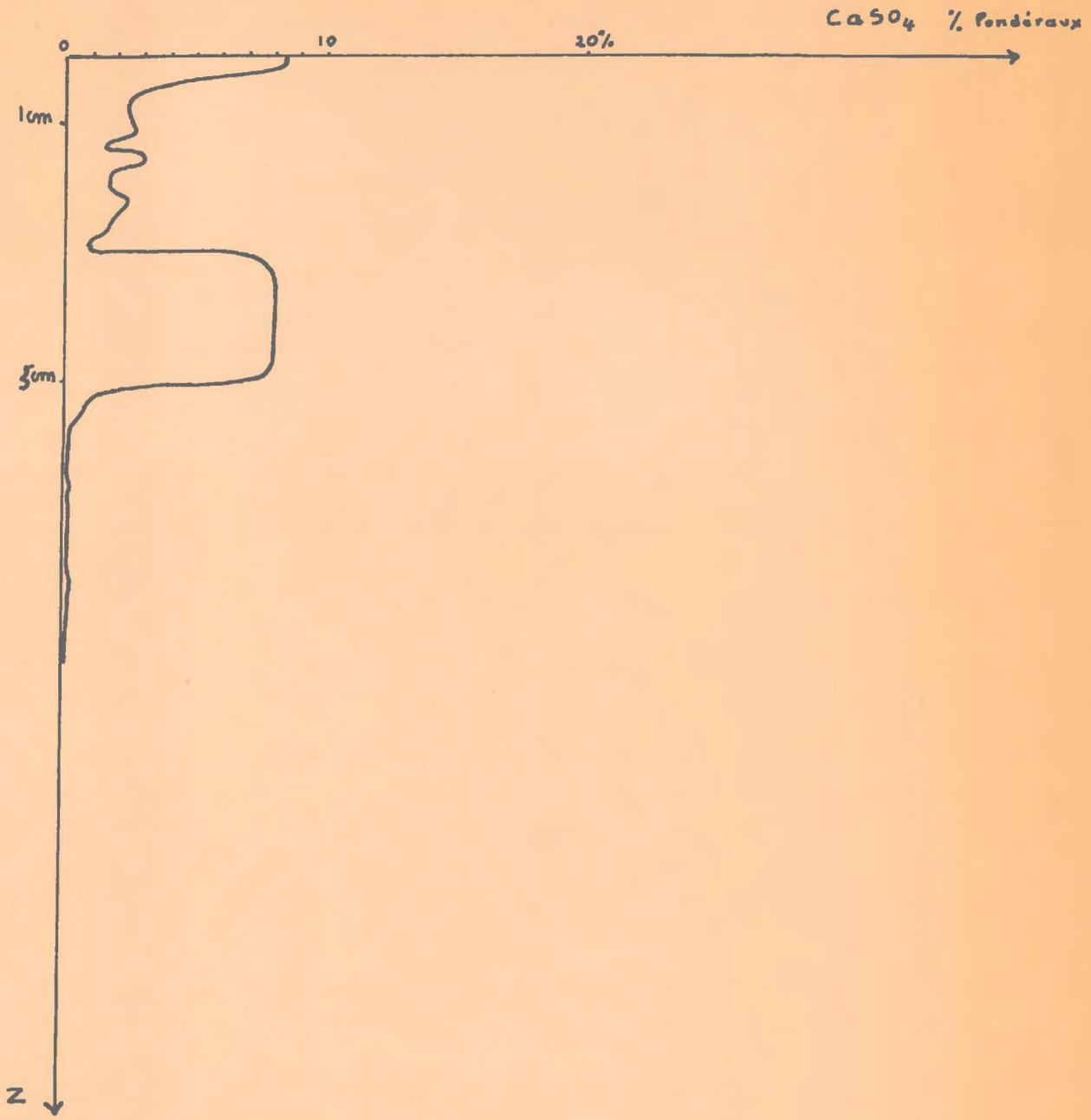


Fig. 33

## Troisième Partie

ENCROÛTEMENTS EXPERIMENTAUX DE CARBONATE DE CALCIUM

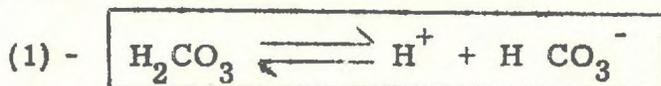
Les problèmes posés par la formation des encroûtements de carbonate de calcium sont du même ordre que ceux énumérés dans l'introduction au sujet des encroûtements gypseux,

Toutefois, les lois régissant la solubilité du  $\text{CO}_3\text{Ca}$  étant différentes de celles du gypse, quelques modifications ont été apportées au modèle expérimental de base,

$\text{CaCO}_3$  est très peu soluble dans l'eau et il s'hydrolyse faiblement, mais sa solubilité s'accroît en présence de  $\text{CO}_2$  dans l'eau :



$\text{CO}_2$  forme avec l'eau un diacide,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , qui s'ionise en deux stades (B. KRÁUSKOPF - 1967).



La quantité d'ions  $\text{CO}_3^{=}$  est négligeable en comparaison des concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{H}_2\text{CO}_3$  libérés au cours de ces réactions. Aussi la réaction (1) intervient-elle principalement dans la formation du bicarbonate de calcium,

- Les facteurs favorisant la dissociation du  $\text{CaCO}_3$  sont la concentration en  $\text{H}^+$ , la concentration en  $\text{CO}_2$  et la température de l'eau,

.../...

Le pH de la solution que nous avons utilisé est de 6,6, ceci nous permet donc d'écartier l'hypothèse d'une dissociation du  $\text{CaCO}_3$  par une forte concentration en  $(\text{H}^+)$ .

La concentration du  $\text{CO}_2$  revêt donc la plus grande importance pour orienter le sens de la réaction donnant naissance au bicarbonate de calcium.

Parmi les facteurs conditionnant la solubilité du  $\text{CO}_2$ , la température joue un rôle très important.

En effet, la solubilité du  $\text{CO}_2$  est maximum à  $0^\circ\text{C}$  et décroît rapidement vers les températures supérieures, ce qui provoque la précipitation du  $\text{CaCO}_3$ .

Ce sont ces propriétés que nous avons voulu utiliser dans cette expérience.

#### I - Modalités expérimentales -

Le modèle expérimental se propose de jouer sur deux mécanismes physico-chimiques donnant naissance au précipité de  $\text{CaCO}_3$ .

1) l'évaporation d'une solution bicarbonatée au travers d'une colonne de sable.

2) l'intervention d'une différence de température affectant les deux extrémités de la colonne de sable et provoquant la décomposition du bicarbonate de calcium.

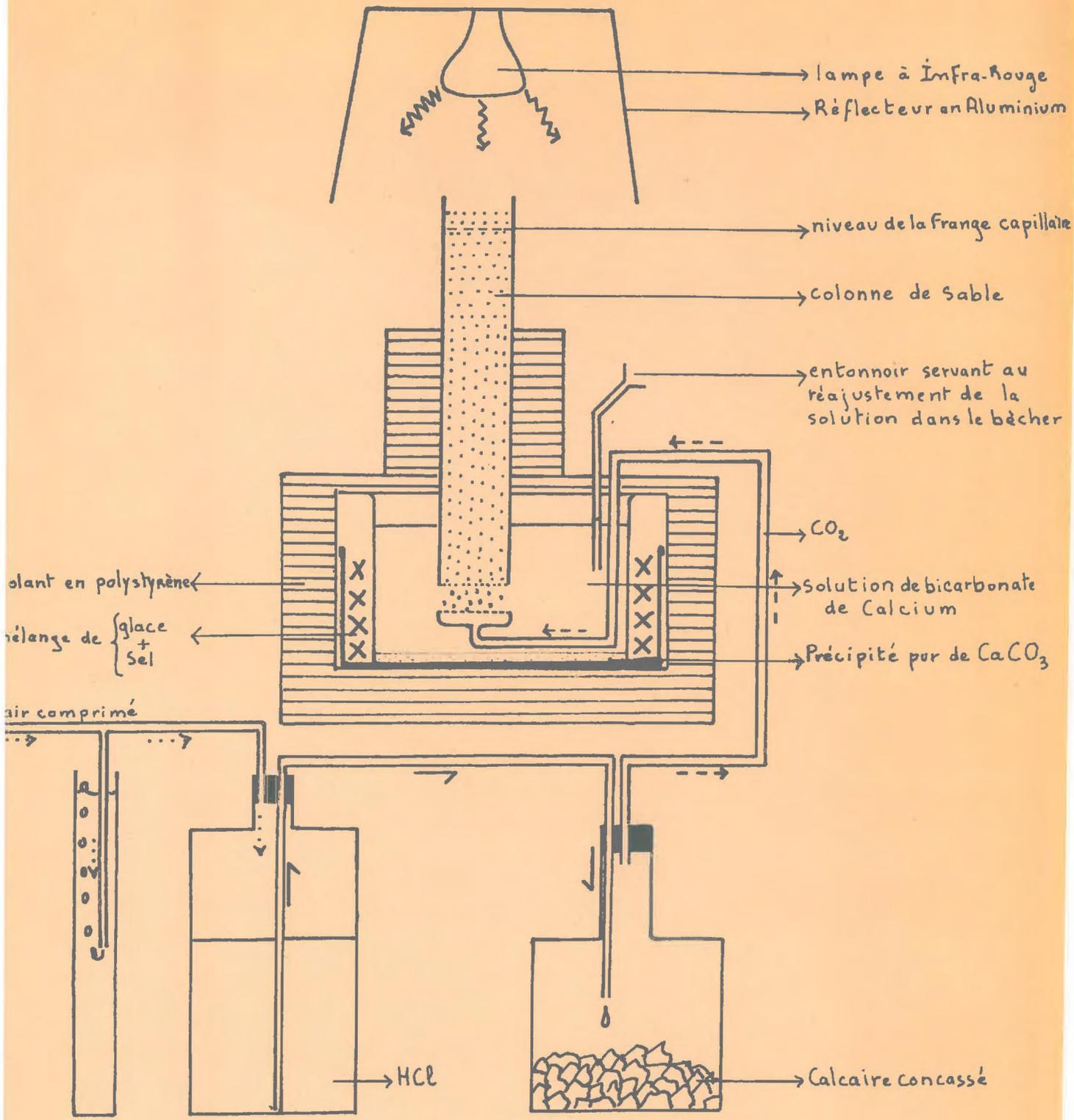
- l'évaporation n'agit que sur le front d'évaporation de la colonne capillaire.

- le gradient de température, pour sa part, affecte toute la hauteur de sable et varie de  $12^\circ\text{C}$  à  $44^\circ\text{C}$  en moyenne du bas jusqu'en haut de la colonne.

Pour réaliser simultanément ces deux objectifs, le modèle a été construit de la manière suivante :

Un tube rempli de sable de Fontainebleau de  $100\text{-}200\ \mu$  trempe dans un béccher contenant une solution de bicarbonate de calcium.

.../...



Montage expérimental utilisé pour les encroûtements de CaCO<sub>3</sub>

Cette solution est obtenue par l'arrivée du  $\text{CO}_2$  dans le bécher contenant de l'eau bipermutée et du  $\text{CO}_3\text{Ca}$  en poudre Prolabo. Modalités de l'addition du  $\text{CO}_2$  (Fig. 34).

De faibles quantités de gaz carbonique suffisent pour saturer l'eau. Afin d'obtenir un débit régulier et réduit,  $\text{CO}_2$  est produit par l'attaque à HCl de blocs de calcaire,  $\text{CO}_2$  est dirigé vers une plaque poreuse de verre fritté placée sous la colonne de sable, la surface de contact entre l'eau et  $\text{CO}_2$  étant augmentée par la petite taille des billes.

La teneur obtenue en bicarbonate de calcium à une température qui varie entre  $1^\circ\text{C}$  et  $15^\circ\text{C}$  au cours de la journée, est de 653 mg/1000 ml eau en moyenne, la solubilité maximum étant de 1660 mg/1000 ml eau.

La durée de l'expérience est de 8 mois.

## II - Résultats -

### 1) Localisation des dépôts (Fig. 35).

En fin d'expérience, nous avons constaté la présence de deux zones d'accumulation de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Il y a eu accumulation :

- sur le front d'évaporation de la colonne capillaire dans une zone très éloignée de la saturation en eau, et dans une zone saturée en eau située 2,5 cm au-dessus du niveau de la solution du bécher.

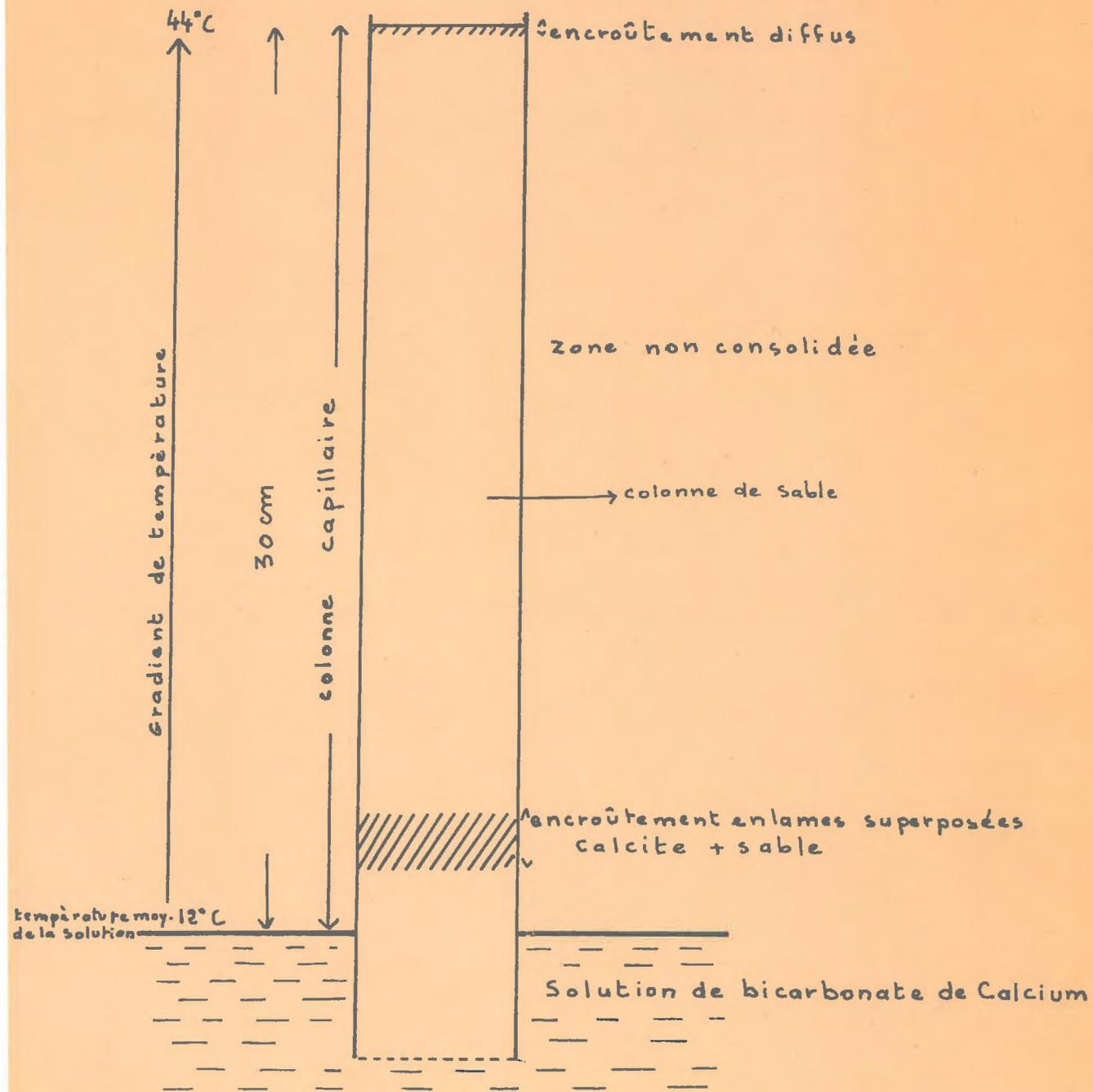
### 2) Morphologie des dépôts (Fig. 36).

- Le dépôt supérieur ne consolide pas le sable. Le sable est imprégné d'une manière assez diffuse par  $\text{CaCO}_3$ , ce qui donne à l'ensemble une faible cohésion, sa teneur en  $\text{CaCO}_3$  n'excédant pas 3 % en poids.

- La partie médiane de la colonne de sable n'offre pas de particularités. Le carbonate de calcium s'est déposé d'une manière homogène tout le long de la colonne de sable, ses concentrations varient de 0,1 à 1 % en poids et ne donnent pas lieu à une cimentation du sable.

.../...

# localisation des zones encroûtées par la calcite.



# encroûtement de Calcite

Profil { des concentrations en  $\text{CaCO}_3$   
de l'humidité

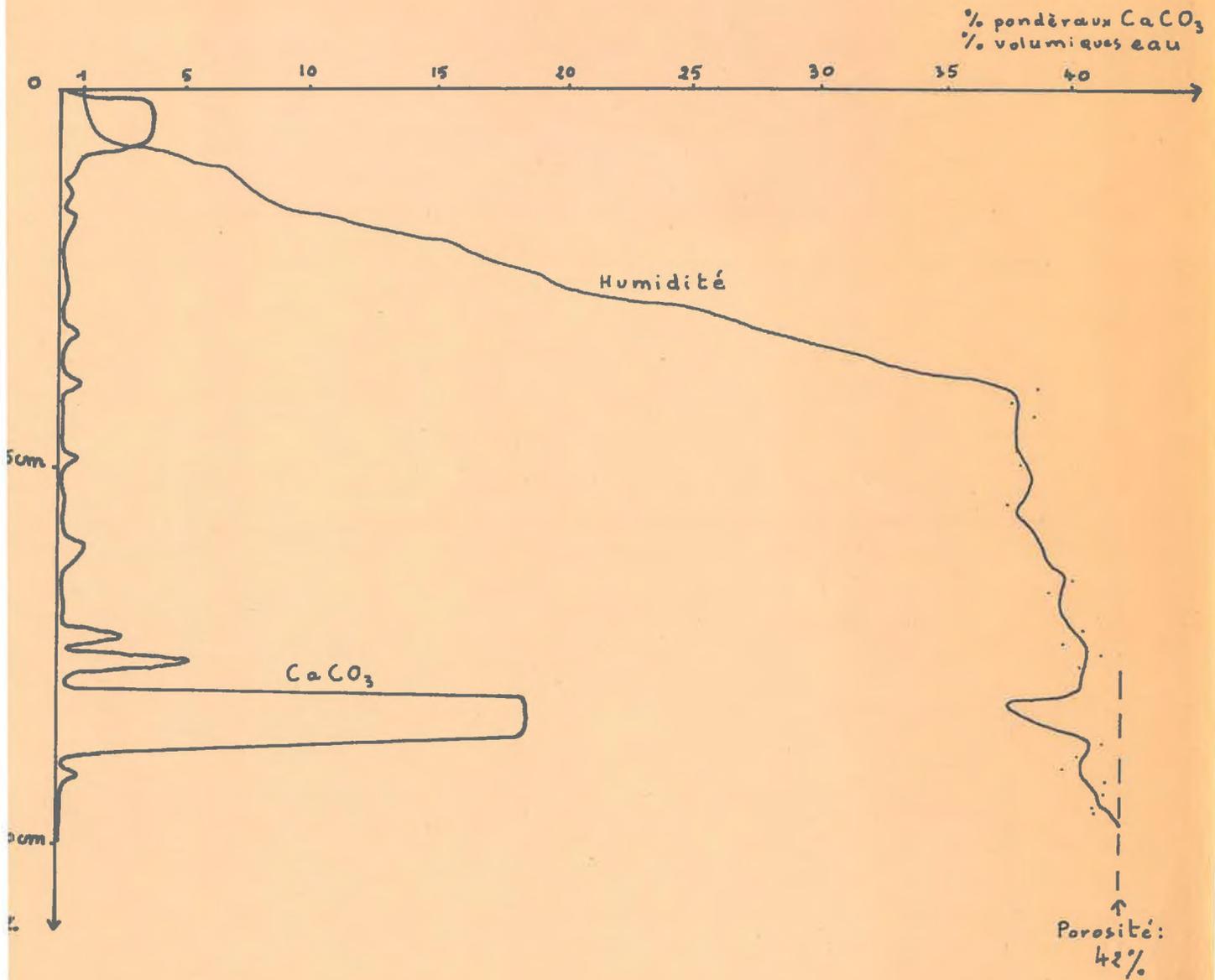


Fig. 36



encroûtement situé à la base de la colonne  
capillaire : Grossis.  $\times 3,6$ .

encroûtement  $\left\{ \begin{array}{l} 13,3\% \text{ CaCO}_3 \text{ (calcite)} \\ \text{sable de Fontainebleau : } 100-200\mu \end{array} \right.$

L'examen de la répartition du  $\text{CaCO}_3$  déposé tout le long de la colonne de sable montre que 44 % du dépôt se situe au niveau des encroûtements inférieurs. (Cette proportion correspond assez bien au fait qu'à ce niveau la solubilité du  $\text{CO}_2$  a diminué de moitié environ, compte tenu du gradient moyen de température observé). La conclusion la plus importante de cette observation se rattache au fait que des encroûtements importants de carbonate de calcium formés à partir des eaux d'une nappe phréatique ne nécessitent pas de phases de dessiccation. Ils peuvent intervenir et se consolider en milieu saturé en eau à la base de la colonne capillaire, sous la seule influence d'une élévation de température.

Cette étude expérimentale conduit donc à penser que des encroûtements calcaires peuvent se former en milieu naturel, dans des situations beaucoup plus variées que celles qui autorisent des encroûtements gypseux.



## CONCLUSIONS GÉNÉRALES

°  
° °

Il nous faut maintenant essayer de confronter les résultats expérimentaux aux données et descriptions extraites des études de terrain. Mais auparavant, il convient de rappeler succinctement l'ensemble des résultats obtenus :

Au cours des premiers jours de l'expérience, nous avons constaté que le dépôt du gypse obtenu lors de l'évaporation d'une solution séléniteuse au travers d'un matériau meuble, sableux, est situé au niveau du front d'évaporation. Par contre, si nous suivons l'évolution d'un encroûtement au cours du temps, nous observons que celui-ci progresse vers le haut au-delà du niveau initial de ce front d'évaporation, ce qui implique une nouvelle distribution capillaire de la solution vers le haut, consécutive au dépôt, puisque la présence d'eau est toujours constatée dans un encroûtement en formation.

Cette montée de la frange capillaire peut être la conséquence d'une certaine réduction de la taille des pores due au dépôt de  $\text{CaSO}_4$ . A cet égard, les mesures de porosité effectuées sur divers échantillons de "croûte" ont montré une légère diminution de celle-ci dans le sable encroûté. Ces mesures ont également révélé par la comparaison de la porosité du sable pur du début de l'expérience à celle du sable encroûté de la fin de l'expérience, que les éléments du squelette subissent lors de l'encroûtement une augmentation de volume apparent importante, se traduisant par un accroissement de sa porosité propre de 20 à 25 % par rapport à la porosité initiale du sable pur non encroûté.

Le problème de la mise en place du sel dans le matériau est donc posé. Nous avons d'ailleurs pu montrer que d'une manière générale, le dépôt soulève le matériau dans lequel il a lieu, quelles que soient semble-t-il, les caractéristiques cristallines du sel en question.

D'une part, l'encroûtement se développe vers le haut ; d'autre part, le squelette se répartit dans un volume apparent croissant, ce qui explique la diminution de la densité apparente partielle des éléments clastiques.

.../...

Ce dernier fait est confirmé par l'examen de lames minces effectuées dans un encroûtement gypseux : nous avons pu voir en effet, que les grains de sable ne sont plus en contact et qu'ils ont été écartés les uns des autres lors de la croissance des cristaux.

Ainsi la superposition de ces deux mouvements peut conduire au développement d'un encroûtement.

Les mesures de porosité des encroûtements jointes à ces observations, amènent à considérer la raison pour laquelle l'évaporation de la solution saline à travers un matériau sableux semble ne jamais s'annuler définitivement : la porosité du sable n'est pas colmatée lors de l'accumulation du sel.

Si la solution employée est riche en sulfate de calcium, la déformation subie par la matrice aura tendance à se faire d'une manière discontinue, à la faveur d'éclatements affectant l'encroûtement ; si, au contraire, la solution est plus diluée, un équilibre est susceptible de s'établir, le dépôt du sel étant compensé par l'augmentation de porosité des éléments du squelette dans lequel il se fait. Ceci peut être dû au fait que dans le cas d'une solution riche en sulfate de calcium, une forte évaporation provoque le dépôt d'une quantité importante de sel qui a tendance à colmater les pores du sable mais, par voie de conséquence, ce sel qui colmate la porosité dans une certaine mesure, forme avec les éléments de la matrice un ensemble consolidé qui se fracture lors de la cristallisation du gypse, permettant ainsi à l'eau de s'évaporer à nouveau.

Nous avons pu remarquer l'importance que doit avoir la texture du matériau encroûté sur la morphologie d'un encroûtement. Il apparaît qu'un matériau composé d'éléments fins agrégés (sol de limon utilisé dans l'expérience) principalement, n'est pas favorable à la formation d'encroûtements consolidés.

Cette constatation semble pouvoir être attribuée au fait que le limon agrégé favorise la naissance de nombreux germes entre les agrégats ; de ce fait, la cohésion que l'on peut attendre d'un ensemble sable-gypse où les cristaux de gypse constituent des ponts entre les grains de sable, n'est pas possible au milieu des agrégats de limon, car des cristaux de gypse ne peuvent les relier de manière cohérente en raison de leur fragilité.

Les bilans effectués à l'issue des expériences ont permis de déceler un déficit de sel déposé par rapport à la quantité de solution évaporée. Des expériences utilisant des sels plus solubles ont mis en évidence l'intervention de la diffusion en tant que mécanisme agissant parallèlement et en sens contraire au dépôt en conditions évaporantes, et l'action d'une diffusion massive en conditions non évaporantes ou faiblement évaporantes, provoquant la disparition du dépôt dans le cas d'un sel très soluble comme le chlorure de sodium et la redistribution partielle du sel dans le cas du gypse.

Une expérience faisant agir un battement de nappe dans une colonne de sable montre que si la solution utilisée n'est pas saturée, le dépôt du gypse n'est pas stable puisque nous avons constaté la remise en solution du sel déposé lors des ascensions capillaires.

Dans les conditions expérimentales où nous avons opéré, les ascensions capillaires répétées ne permettent pas une distribution du sel différente de celle qui est observée quand il n'y a pas de mouvement d'eau ; en revanche, des dépôts superposés ont été obtenus dans certaines colonnes de sable et sont dus au retrait accidentel de la frange capillaire, le tassement du sable ayant produit la rupture de celle-ci, créant ainsi de nouveaux fronts d'évaporation situés sous l'encroûtement primitif.

Ces divers résultats précisent donc certaines conditions de genèse des encroûtements gypseux.

Enfin, en ce qui concerne les encroûtements de carbonate de calcium, une seule expérience a été effectuée.

Les dosages de carbonate de calcium ont mis en évidence la présence de deux zones d'enrichissement en sel : tout d'abord, à la surface d'évaporation de la solution bicarbonatée et une deuxième zone en profondeur résultant d'une variation de la solubilité du  $\text{CO}_2$  consécutive à une élévation assez brutale de la température.

Cette expérience nous permet de constater que le gradient thermique auquel la colonne de sable est soumise, provoque la précipitation de la calcite en milieu saturé d'eau à la base de la colonne capillaire, cimentant ainsi le sable dans lequel le dépôt se fait.

Nous allons confronter ces faits expérimentaux aux informations fournies par les études conduites sur le terrain.

.../...

Le problème du dépôt des évaporites entre dans le cycle géochimique des éléments mis en solution par le ruissellement et l'infiltration des eaux qui sont collectées par des nappes d'eau souterraines,

Ces eaux chargées en chlorures, sulfates, bicarbonates, etc., se dirigent soit vers la mer, soit vers des bassins fermés à caractère endoréique.

Dans ce dernier cas, suivant les conditions climatiques, géologiques, hydrologiques et géomorphologiques, nous observons sur de vastes surfaces, la présence de formations détritiques encroûtées par des sels, comme le carbonate de calcium et le sulfate de calcium.

Avant d'évoquer les conditions de genèse de ces encroûtements, il faut remarquer l'importance que semble avoir la texture du matériau pour la formation d'horizons cimentés offrant une grande cohésion. A ce sujet, J. H. DURAND (1949) décrit des encroûtements gypseux formant un grès dont la taille des éléments clastiques varie de celle du sable fin à celle du cailloutis. R. COQUE (1955) cite des dépôts gypseux ayant pris naissance dans des alluvions quaternaires, sur des assises sablo-argileuses. De son côté, A. RUELLAN (1967) signale que les encroûtements calcaires existent préférentiellement dans des horizons conglomératiques et caillouteux. A propos d'une étude sur les alios ferrugineux, R. BETREMIEUX (1951) observe que seuls les niveaux constitués de matériaux grossiers sont cimentés de manière homogène.

Nous voyons donc dans tous ces cas d'encroûtements ayant des origines très différentes, un phénomène de convergence qui montre que les divers ciments réagissent de la même manière vis à vis de la texture du matériau.

Seuls des éléments dont la taille atteint celle du sable peuvent permettre au ciment de se déposer à leur surface et de croître jusqu'à la rencontre d'un autre grain de sable ou d'un autre cristal, comme nous l'avons vu dans les lames minces effectuées dans les encroûtements sable-gypse ; ainsi, les liaisons sable-sel sont assurées et forment un ensemble rigide.

Les dépôts dans les sols sont plus diffus et ne forment pas de carapace continue (A. RUELLAN 1967).

.../...

Toutes ces observations peuvent donc être rapprochées des résultats obtenus au cours de nos expériences concernant les conditions de formation des encroûtements dans du sable et du limon. Nous avons constaté que le comportement du gypse diffère selon qu'il s'agit de sable ou de limon, ce dernier n'ayant donné lieu à aucune consolidation attribuable au gypse en particulier. L'absence de cohésion du système limon-gypse peut être due au fait que les microcristaux qui naissent dans ou entre les agrégats de limon deviennent beaucoup plus gros que les particules constituant la matrice ; aussi finissent-ils par dissocier les agrégats du limon sans pouvoir les consolider entre eux.

Il est reconnu que les nappes sont à l'origine des encroûtements calcaires et gypseux. Les conditions hydrologiques qui président à leur formation dans les deux cas sont différentes si nous considérons les résultats de nos expériences. De leur côté, R. COQUE, J. H. DURAND, M. POUGET entre autres auteurs, ont décrit des encroûtements gypseux situés au contact de nappes phréatiques. Certaines formations sont localisées au-dessus des nappes phréatiques actuelles et parfois leur aire d'extension déborde les limites actuelles de la nappe, ce dernier fait est interprété comme étant une conséquence de la baisse de celle-ci (M. POUGET 1968). Les encroûtements en position haute dans la topographie qui ne sont plus atteints par les mouvements d'eau sont des formations fossiles vouées à la destruction par l'érosion hydrique et éolienne. Mais les nappes superficielles dont les franges capillaires sont situées au contact des encroûtements, témoignent de la formation actuelle de ceux-ci ; la présence d'eau séléniteuse dans l'encroûtement lui-même en étant la preuve dans la mesure où nous pouvons être sûrs que cette eau provient de la nappe, ou bien que cette eau ne s'est pas enrichie en sel au contact de la croûte,

Les mouvements d'eau susceptibles de donner naissance à un encroûtement gypseux peuvent être prévus à partir de quelques résultats expérimentaux,

L'expérience a montré que les mouvements d'eau par battements de nappe n'enrichissent pas plus le sable en sel, que le sable humecté par la frange capillaire ne l'est quand elle est maintenue à un niveau constant dans le matériau. Le sable soumis à ce traitement n'est pas consolidé, car le sel déposé lors de la phase de dessiccation est remis en solution lors de la montée de la frange capillaire, à condition que la solution employée soit loin de la saturation en  $\text{CaSO}_4$ . Seule une nappe d'eau très riche en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  peut limiter la diffusion du sel déposé d'où l'intérêt qu'il y a de connaître la composition de l'eau de la nappe.

.../...

Nous avons vu, à propos du paragraphe intitulé "particularités de dépôts", que le retrait lent de la nappe permettait le dépôt du sel sur de grandes épaisseurs. En effet, l'évaporation est toujours possible, même si elle est ralentie par le mulch créé par les encroûtements supérieurs, tandis qu'il est difficile d'imaginer un dépôt par montée de la nappe à cause de la remise en solution du gypse, sauf dans le cas où la nappe serait saturée en sulfate de calcium.

Ceci conduit à évoquer les conditions climatiques favorables à la formation des encroûtements gypseux.

Le facteur sècheresse conditionne la stabilité de tels dépôts, non pas tant parce que des précipitations fréquentes auraient pour effet la redissolution des sels déposés avec disparition des encroûtements, mais par suite du pouvoir évaporant.

En effet, pour amener les solutions salines au seuil de précipitation, le pouvoir évaporant doit être très élevé au niveau du dépôt dans le profil ; ce qui explique que les encroûtements gypseux sont superficiels. L'accumulation du carbonate de calcium pose des problèmes différents, puisqu'elle résulte d'un déséquilibre physico-chimique soumis aux conditions de température de l'eau et pression en gaz carbonique.

La redistribution par diffusion est certainement très faible pour le carbonate de calcium, mais il peut y avoir dissolution du précipité par remise en solution du  $\text{Ca}^{++}$ , sous forme de bicarbonate de calcium. Nous avons vu que l'élévation de température déplace l'équilibre du  $\text{CO}_2$  dans l'eau et favorise ainsi la précipitation du carbonate de calcium en profondeur dans un milieu saturé d'eau et que la consolidation du sable s'effectue sans qu'une phase de dessiccation soit nécessaire.

Les conditions de précipitation du carbonate de calcium permettent d'envisager la formation des encroûtements à partir de solutions venant de directions très diverses, latérales, per descensum, per ascensum... de là, leur plus grande stabilité et leur plus grande extension sous des climats plus humides et la possibilité pour ces encroûtements de se former non plus essentiellement en surface comme dans le cas du gypse, mais aussi en profondeur.

Nous avons pu mettre en évidence le déplacement des éléments constituant le matériau au sein duquel s'effectue le dépôt du sel. Il en résulte que la densité apparente partielle des éléments détritiques diminue au cours de l'en-

.../...

croûtement. Cette pauvreté des encroûtements en éléments clastiques est soulignée par plusieurs auteurs dont J. H. DURAND (1949), R. COQUE (1955). Nous voyons donc l'importance que revêt ce phénomène puisqu'il peut permettre d'expliquer la formation d'encroûtements de 1 à 2 mètres d'épaisseur, la porosité propre du matériau originel étant considérablement augmentée et la cristallisation du gypse sur les éléments de la matrice en consolidant le tout, ménage une certaine porosité à l'ensemble qui permet à l'évaporation, moteur du système, de se poursuivre.

Mais il convient d'adjoindre à l'évaporation qui transporte le sel vers l'encroûtement, le phénomène de la diffusion intervenant surtout en conditions non évaporantes qui provoque une redistribution du sel et permet un remaniement des dépôts.

Toutefois, ces résultats ne peuvent avoir que la valeur de modèles pouvant inspirer des hypothèses explicatives, ou la recherche d'informations complémentaires. Il est bien évident, en effet, que la simplification imposée à ces modèles expérimentaux ne nous fait pas prendre en considération la présence des autres ions en solution dans les nappes, qui ont une importance certaine sur les conditions de précipitation du gypse en particulier (M. POUGET 1968), et la présence de la végétation qui, dans le cas du carbonate de calcium, par ses actions de dissolution ou précipitation doit jouer un rôle important dans la genèse de ce type d'encroûtements (J. BOULAINÉ, 1957).

Mais, malgré les restrictions que nous pouvons faire, il n'en reste pas moins que cette méthode expérimentale, du fait même de la simplification très poussée des modèles utilisés, nous a permis de mettre en évidence certains des processus intervenant dans les phénomènes d'encroûtement que l'on rencontre habituellement dans le milieu naturel.

°  
° °  
°

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

°  
° °

- R. BETREMIEUX (1951) - Etude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. Annales Agronomiques - T 21 - p. 193.
- R. COQUE (1955) - Les croûtes gypseuses du Sud Tunisien. B. Soc. Sci. Nat. Tunisie t. 8 - 3/4, 217-229.
- R. COQUE (1962) - La Tunisie présaharienne - Etude géomorphologique - Edi. Collin - Paris - p. 477.
- W. A. DEER, R. A. HOWIE, J. ZUSSMAN (1962) - Rock forming minerals non-silicates - vol. V, Longmans, Green and Coltd. London - p. 363.
- G. DEICHA (1945) - Faciès cristallographiques de sursaturation et surfusion, Bull. Soc. F. Min. p. 198-202.
- E. J. DOERING, R. C. REEVE, K. R. STOCKINGER (1964) - Salt accumulation and salt distribution as an indicator of evaporation of fallow soils, Soil Science, Vol. 97 - n° 5 - 312.
- J. H. DURAND (1949) - Etude géologique, hydrologique et pédologique des croûtes en Algérie. Gouvernement général de l'Algérie, Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique. Service des Etudes scientifiques, Pédologie n° 1 - p. 205.
- J. H. DURAND (1967) - La croûte gypseuse du Souf (Algérie) (rôle hydrologique, utilisation, inconvénients), L'Agronomie tropicale n° 12 - déc. 67 - p. 1221.
- P. GAUBERT (1933) - Sur l'hémihydrate de  $\text{CaSO}_4$  et ses produits de déshydratation. C.R. Ac. Sc. Paris, vol. 197 - p. 72.

.../...

- M. R. GAY (1947) - Contribution à l'étude de la précipitation périodique, Bull. Soc. F. Miné. 70 - p. 251.
- L. KERN (1953) - Etude du faciès de quelques cristaux ioniques à structure simple. Bull. Soc. F. Miné. LXXVI - p. 325-64.
- C. B. KRAUSKOPF (1967) - Introduction to geochemistry, International series in the earth and planetary sciences, Mac Graw Hill Book Company - p. 721.
- P. PASCAL (1949) - Traité de chimie minérale - T. 6 - Masson édi., Paris.
- M. POUGET (1968) - Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud Tunisien. Cah. O. R. S. T. O. M. sér. Péd. Vol. V - n° 3-4.
- M. RUELLAN (1967) - Individualisation et accumulation du calcaire dans le sol et les dépôts quaternaires du Maroc. Cah. O. R. S. T. O. M., sér. Péd. Vol. V, n° 4 p. 421.
- W. WEIMARN - sans référence, cité par J. ALEXANDER (1929) - Colloid Chemistry : Principles and Applications third edition - D. Van Nostrand Company, Inc, New-York, p. 187.



## TABLE DES MATIERES

°  
° °

	Pages
avant-propos	
Introduction	1
<u>1<sup>ère</sup> Partie</u>	
Discussion du modèle - Examen des conditions expérimentales	3
I - Les matériaux choisis	3
1) Les billes de verre	
2) Le quartz de Norvège	
3) Le sable de Fontainebleau	
4) Le limon	
II - La solution saline	5
III - Le flux ascendant de la solution	5
IV - Les modalités expérimentales	6
V - Les conditions expérimentales	6
VI - Les méthodes d'étude des phénomènes	7
1) Mesure et observation quotidiennes	
2) Mesure en fin d'expérience	
a) Dissection du tube	
b) Mesure d'humidité	
c) Détermination des concentrations en sel	
d) Reconnaissance des minéraux analysés	

.../...

	Pages
<u>Deuxième Partie</u>	
Etude expérimentale des encroûtements gypseux	10
I - Description et analyse des encroûtements gypseux expérimentaux	10
1) Description de l'encroûtement	
2) Nature du dépôt	
II - Problème de la mise en place du gypse et des sels en général	15
1) Expériences utilisant des sels autres que le sulfate de calcium	
2) Evolution d'un encroûtement gypseux au cours du temps	
3) Incidences du dépôt sur le squelette initial	
4) Examen de lames minces effectuées dans un encroûtement gypseux de 49 jours	
Conclusion	
III - Signification du débit de l'eau évaporée	29
1) Evolution du débit avec le temps	
2) Interprétation des courbes de débit	
a) La température des expériences	
b) La richesse en sel de la solution	
Conclusion	
IV - Etablissement du bilan général : dépôt et redistribution du sel	36
1) Expériences comparatives appliquées à la diffusion, utilisant NaCl, $K_2CO_3$ , citrate de sodium	
2) Conséquence d'un arrêt de chauffage sur un dépôt de NaCl	
3) Comparaison entre sels provoquant un soulèvement des matériaux et sel cristallisant entre les grains sans augmentation de volume apparent du squelette	

- 4) Expérience avec battement de nappe
- 5) Particularités de dépôt

### Troisième Partie

Encroûtements expérimentaux de carbonate de calcium	55
I - Modalités expérimentales	56
II - Résultats	58
1) Localisation des dépôts	
2) Morphologie des dépôts	
III - Interprétation de ces phénomènes	61

<u>Conclusions Générales</u>	63
------------------------------	----

Références Bibliographiques	70
-----------------------------	----

Table des Matières	72
--------------------	----

