

' STABILISATION A LA CHAUX DE SOLS ARGILEUX ET EN PARTICULIER DES TIRS RESULTATS A LONG TERME*

par EDOUARD DERIDDER
C.N.E.R.

Parmi les sols que l'on rencontre au Maroc les sols limoneux et argileux couvrent de grandes surfaces au milieu de ceux-ci se situe un matériau plus particulier dont l'appellation vernaculaire est « tirs ». Ces sols tirs, que nous allons examiner plus en détails dans la suite de cet exposé, sont constitués entre autres, d'une part plus ou moins importante d'argiles gonflantes. Ces sols, au cours de leur évolution ont acquis des caractéristiques particulières qui les distinguent des sols argileux classiques, la genèse de ces sols est encore sujette à discussion.

Du point de vue routier, la traversée de zones tirseuses, entraîne des dégradations généralement rapides. En période de sécheresse, ces sols, sujet à des retraits plus ou moins conséquents, se fissurent de façon parfois spectaculaire et après humidification gonflent. Si en période sèche la portance est bonne, elle devient quasi nulle après imbibition. D'autre part malgré sa teneur en argile parfois élevée, ce matériau laisse percoler l'eau des précipitations, ce qui a pour effet de saturer rapidement la totalité de la couche de tirs. Celle-ci peut atteindre parfois plusieurs mètres, on peut imaginer dans ce cas, ce qui en résulte quant à la tenue du revêtement.

Ajoutons à cela des structures de chaussées parfois vétustes et polluées, ou encore bordées d'arbres dont le système racinaire crée en quelque sorte des pompes localisés.

On comprend aisément dans ce contexte que la tenue d'une chaussée construite ou à construire, ou encore à renforcer est très aléatoire sur ce genre de terrain.

Tirs :

Comme déjà mentionné, la dénomination tirs est spécifique au Maroc, au U.S.A. on le rencontre sous l'appellation de Black cotton soil, maintes personnes établissent la relation suivante :

Tirs = sol noir = sol a teneur élevée en matières organiques.

Si effectivement la couleur noirâtre est le signe d'un tirs en fin d'évolution, il existe des tirs brun ou brun jaune.

En ce qui concerne la teneur en matière organique celle-ci n'est pas liée à la couleur. Cette couleur noirâtre est l'aboutissement d'un processus physico-chimique de longue durée ou interviennent des conditions hydriques particulières. Le fait que les sols tirs ne sont pas obligatoirement associés à une teneur en matière organique élevée est à souligner.

Les agronomes classent le tirs en deux catégories liées au relief. Les tirs des plaines et les tirs des coteaux. Les tirs des plaines représentent la plus grande superficie.

Une carte établie par Willert (1965) donne une bonne idée de leur répartition. Je cite « au Maroc, l'apparition la plus fréquente des tirs correspond à la zone relativement humide de la côte Atlantique. Rases dans le nord pluvieux ils couvrent des surfaces importantes dans le Gharb, dans la chaouia, dans les Doukala ainsi que dans les régions de Meknès, Fès. On les retrouve aussi, sous forme de grande tache, sur les collines marneuse du préif.

Au sud du plateau des Doukala les tirs se cantonnent dans les zones humides correspondant aux bas-fonds et aux dépressions (Tadla, Haouz).

Si nous examinons les tirs du point de vue granulométrique, nous constatons que la fraction argileuse (éléments inférieurs à 2 microns) est très variable en plus, la nature même de l'argile peut différencier en fonction de la roche mère dont elle est issue. L'on peut supposer que l'espèce la plus courante sera de la monmorillonite. La connaissance de la nature même des argiles revêt une grande importance vis à vis de nos préoccupations car selon les espèces, leurs réactions en présence de Ca O se révèle très variable.

Une des caractéristiques de ces sols est aussi la décalcarisation progressive des couches supérieures vers les couches inférieures, avec dans certains cas formation de nodules calcaire à la base de la formation, le degré de décalcarisation des tirs est fonction du stade d'évolution de ceux-ci.

L'on peut envisager plusieurs approches afin de solutionner les problèmes que pose ce matériau du point de vue routier.

La plus simpliste consiste à enlever le tirs et le remplacer par du sol de bonne qualité, dans certains cas ; faible épaisseur de mauvais sol et présence proche de matériaux de bonne qualité. Cette solution peut être envisagée mais ce sera l'exception plutôt que la règle.

L'on peut imaginer des systèmes complexes de drainage maintenant la couche de tirs dans un état hydrique constant ou dans le même but une structure de chaussée complétée par des écrans imperméables, solution délicate et complexe. Une tentative

dans ce sens a d'ailleurs été faite par **M^r Moussaoui** et **Delarue** (C.F.M.) mais des inondations catastrophiques ayant bouleversés le terrain, ont détruit les écrans, supprimant toute possibilité d'observation ultérieure.

Une autre alternative consiste à stabiliser le sol.

La stabilisation au ciment n'est pas envisageable dans le cas de sols argileux.

La stabilisation chimique est encore dans l'enfance, les rares essais de laboratoire entrepris sur ce type de sol n'ont, à ce jour pas été concluant, c'est cependant une voie d'avenir pour autant que les industries chimiques investissent dans ce genre de recherche.

La stabilisation à la chaux, vive ou éteinte, présente par contre dans ce cas précis, un vif intérêt. Le sol en question ne contient généralement pas de matières organiques en quantité incompatible avec une réaction satisfaisante de la chaux.

D'après la bibliographie, les argiles de l'espèce monmorillonite ont une réaction très positive en présence de Ca O , de plus dans le passé, le laboratoire L.P.E.E. a procédé à une étude de laboratoire dont les résultats étaient encourageants.

C'est par conséquent vers une étude de stabilisation avec observation des incidences à long terme que nous nous sommes orientés.

Rappelons de façons sommaire les principes généraux de la stabilisation à la chaux. Ses domaines d'application sont : les sols limoneux, argileux et intermédiaires. Dans la majorité des cas, cette technique est utilisée dans le but de pouvoir employer après traitement en assise de chaussée et en remblais des sols, qui soit à cause d'une teneur en eau trop élevée, soit de par leurs limites d'Atterberg ne répondant pas aux critères de sélection, ou encore aux deux, seraient à évacuer et à remplacer par des matériaux plus nobles.

Le traitement à la chaux et en particulier la chaux vive, à pour effet de faire chuter la teneur en eau et de modifier favorablement les limites d'Atterberg. Parallèlement, du fait de la modification du sol, la teneur optimale en eau du Proctor augmente et la densité diminue. L'effet recherché est généralement immédiat, c'est dans cette optique que l'on a traité en Europe et dans le monde des millions de m^3 avec entière satisfaction.

Il a été constaté que, en plus de l'effet immédiat, se développe un durcissement du matériau traité, et que ce traitement confère au sol une meilleure, et parfois parfaite tenue à l'eau. L'on peut parler en quelque sorte d'un processus de cimentation. Il requiert un apport de chaux plus élevé, il est délicat de donner des pour-

centages de chaux à priori car l'effet de la chaux dépend entre autre de sa **qualité**, de sa **finesse de mouture**, de sa **parfaite dispersion dans le sol** et des **caractéristiques du sol en présence**, chaque stabilisation devra avant exécution sur terrain faire l'objet d'une étude spécifique.

Le but final que le C.N.E.R. poursuit est le suivant :

Nous souhaitons vérifier de façon générale l'aptitude des sols argileux gonflant ou d'une façon plus générale à la stabilisation à la chaux -des sols tirs- répartis au Maroc, et cela avec de la chaux locale, qui ne peut être considérée a priori comme très performante, de suivre l'évolution durant une longue période, 300 jours; parallèlement d'autres observations sont entreprises : mise au point d'essais accélérés, comparaison avec de la chaux de haute qualité etc...

PROGRAMME GENERAL DES ESSAIS

ESSAIS DEJA REALISES

ORIGINE DES SOIS	TYPES D'ESSAIS
Sidi Slimane RS. 229	Analyse granulométrique Limites d'Atterberg. Analyse chimique du sol. Analyse chimique de la chaux et granulométrie Influence de la chaux sur les L. Atterberg. Proctor Modifié à 0-2-4-6-8 % chaux Gonflement 0-2-4-6-8 % chaux Indices C.B.R - 0-2-4-6-8 % chaux.
	<u>Sur éprouvettes Anglaises :</u> A 1'O.P.M - à 2 4 6 8 % de chaux et 7-28-56 90-150 et 300 jours. - Compression simple - Bresilien. - Tenue à l'eau.
	A P.V.S et teneur en eau constant/- 2-4-6-8 % de chaux et compression simple à 7-28 et 56 jours.
	A P.V.S et O.P.M mais, 6% de chaux et varia- tion de la teneur en eau - 3% /OPM/+3%/ W à 7/28/56 jours. Compression simple.
	A 6% de chaux mais et respectivement 95/100/105% de l'OPM à 7/28/56 jours. Compression simple.
	Essais accélérés à 40° - Compression simple.

PROGRAMME GENERAL DES ESSAIS ESSAIS A ENTREPRENDRE

10 sols sélectionnés représentatifs de régions types.	Classification et caractéristiques chimiques, sols.
	Analyse chaux.
	Gonflement.
	C. B. R.
	Sur 2 teneurs en chaux 4 et 6% 7-28-56- 90-150-300 jours.
	Essais sur éprouvettes Anglaises.
	Compression simple et tenue à l'eau.
	Essais accélérés.

Actuellement nous travaillons avec des moyens limités et du personnel en formation, ceci afin d'expliquer certaines lacunes que ne manquerons pas de déceler nos confrères qui ont la chance de bénéficier d'une avance, parfois de plusieurs décennies en matière d'équipement.

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX EN PRESENCES

Chaux :

Chaux éteinte d'origine locale Rabat-Salé production artisanale.

Analyse chimique : (méthode institut agronomique)

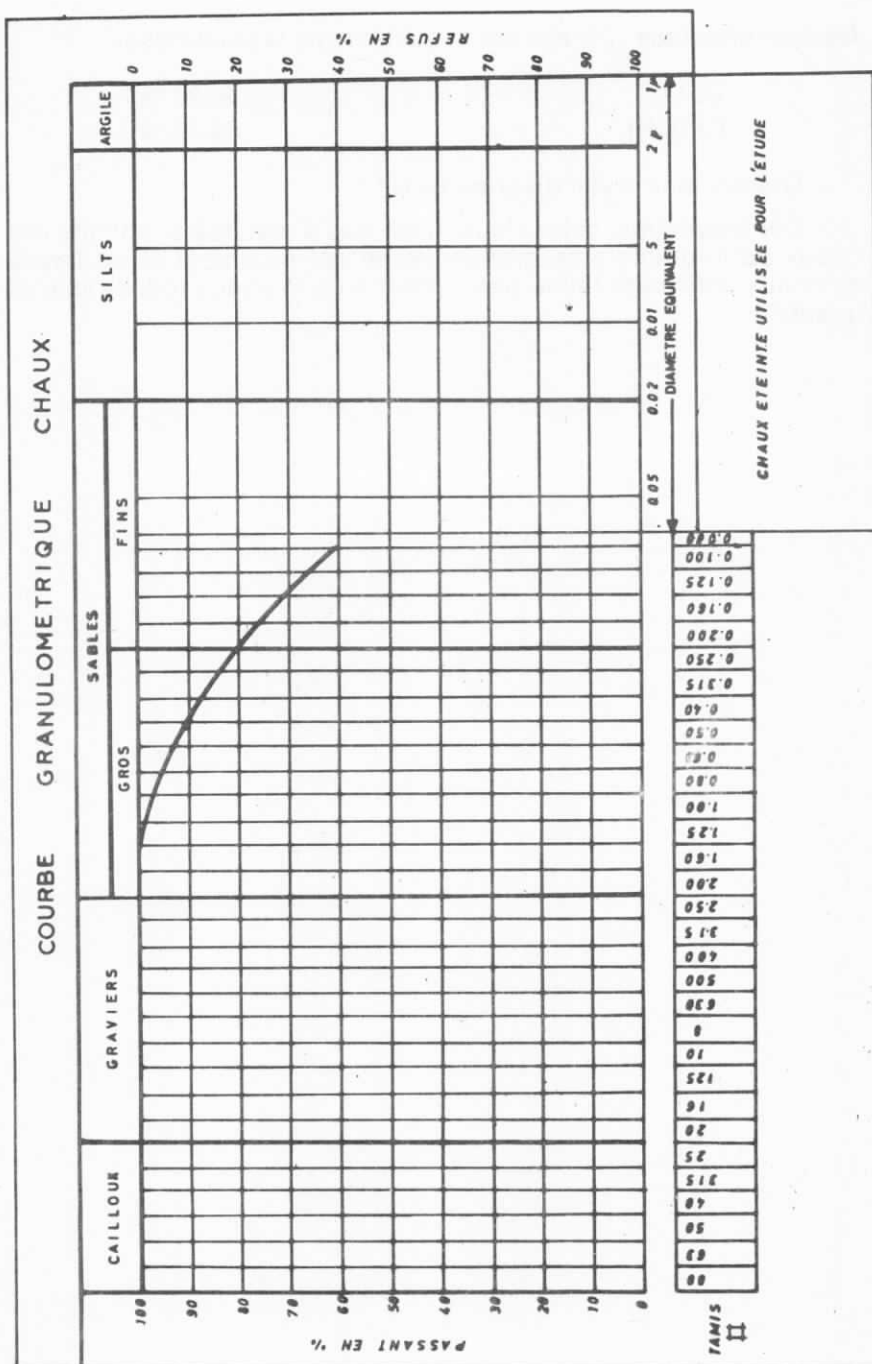
H ₂ O	1,07 %
Perte au feu	14,75 %
Calcium total Ca CO ₂	17,46 %
Calcium total	49,40 %
Calcium lié à la chaux Ca	42,42 %
Chaux Ca (OH) ₂	78,49 %
Fer Fe O ₃	0,43 %
Magnesium Mg (OH) ₂	3,40 %

Analyse chimique : (titrage par la méthode de la saccharose).

Ca O	50,26 %
Ca (OH) ₂	66,35 %

Granulometrie voir diagramme N° 1

Commentaires, cette chaux n'est pas à considérer comme une chaux performante : sa granulométrie est grossière et sa teneur en chaux active est faible par rapport à de la chaux industrielle de qualité.



Sol :

Le sol utilisé dans l'étude, a ce jour, provient de la R.S. 229 ou est prévu un tronçon expérimental de stabilisation à la chaux situé dans la région de sidi Slimane, dans une des zones tirseuses. La granulométrie est la suivante (figure N° 2).

Notons en particulier la teneur en éléments inférieurs à 2 microns et une teneur en CaCO_3 de 14,59 %.

Les limites d'Atterberg sont les suivantes :

— Limite de liquidité	58
— Limite de plasticité	26
— Indice de plasticité	32
— Classification unifiée C.M.	

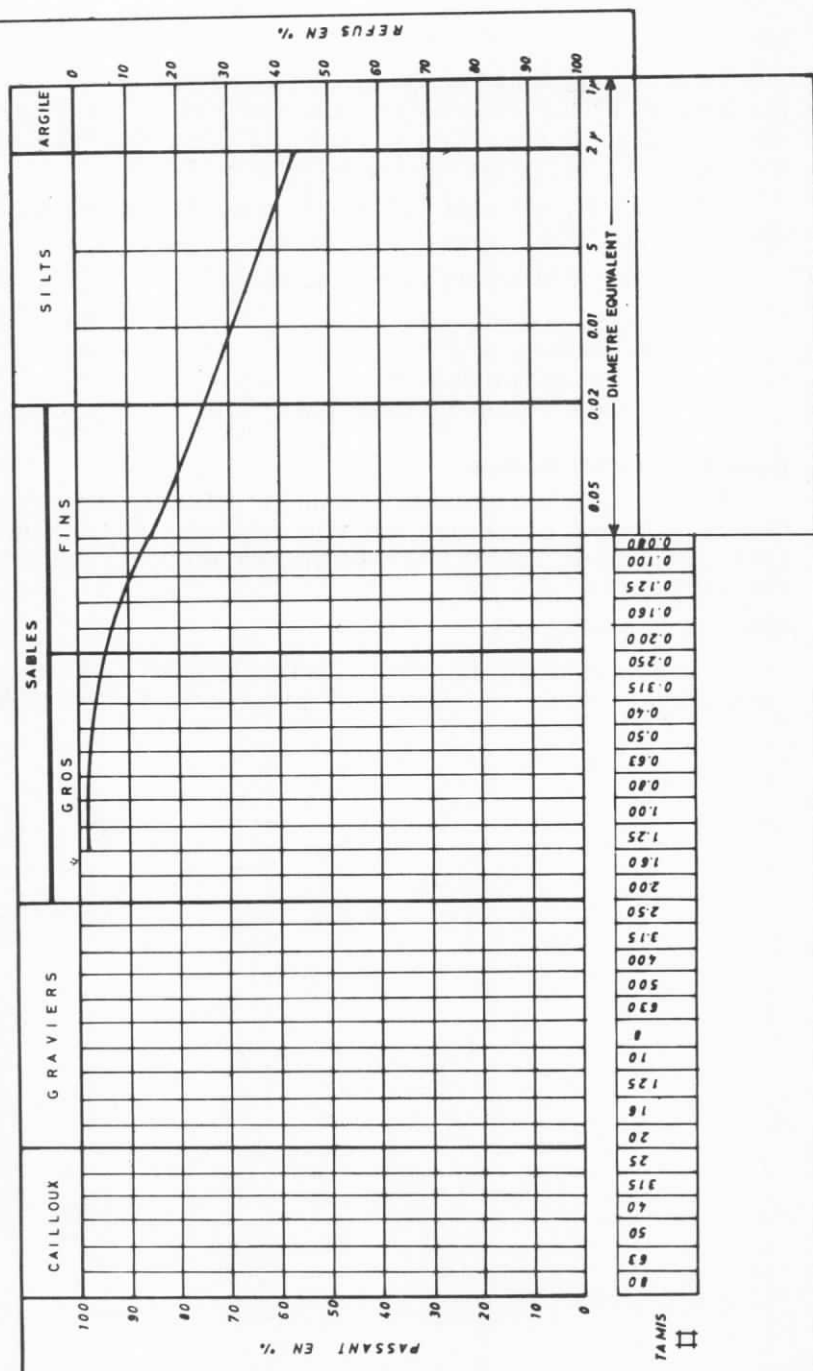
Courbes - Proctor modifié :

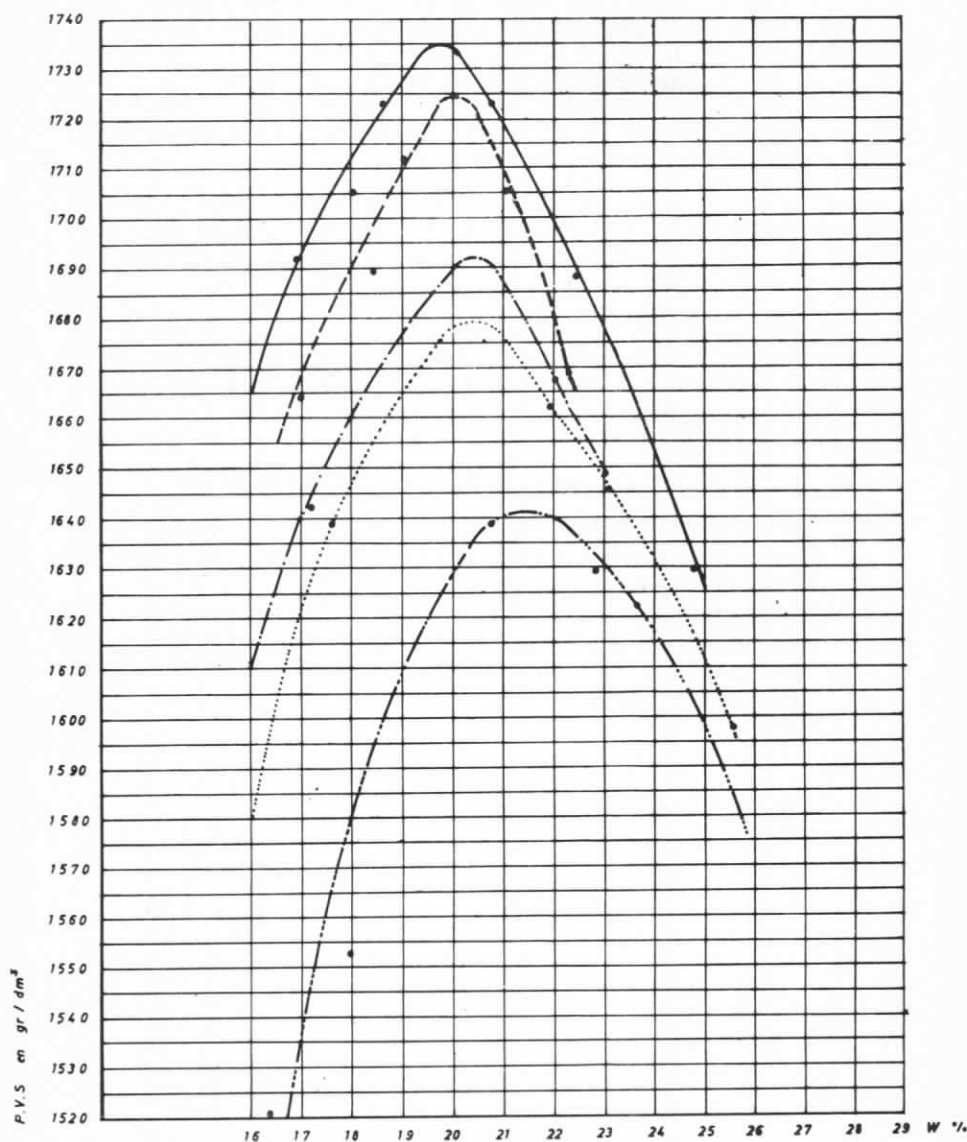
Selon un phénomène bien connu, l'on observe une augmentation de la teneur en eau en fonction de l'acroissement du pourcentage de chaux, assorti d'une diminution du poids volumétrique sec (voir figure N° 3).

Mesures de gonflement :

Gonflement sous eau d'éprouvettes C.B.R. à pourcentages croissants de chaux, et ayant subi un cycle de 4 jours sous eau,

COURBE GRANULOMETRIQUE DU SOL PAR VOIE HUMIDE ET SEDIMENTOMETRIE





CHAUZ	W %	P.V.S	P.V.H
0	19.7	1735	2077
2	20	1725	2070
4	20.3	1692	2035
6	20.7	1679	2026
8	21.3	1640	1989

— 0 CHAUZ
 - - - 2 % "
 - . - . 4 % "
 6 % "
 - - - - 8 % "

immédiatement après la fabrication et après 28 jours de conservation à température ambiante. (figures 4 et 5).

L'observation des deux diagrammes relatif à ces essais, nous prouvent l'influence nette de la chaux sur ce sol, qui a l'état naturel fait l'objet d'un gonflement très marqué.

Dans le cas du sol chaux, placé dès sa fabrication, sous eau, l'on peut constater que la valeur du gonflement total est atteinte pratiquement dès les premières 24 heures.

Après 4 jours d'immersion le sol non traité développe un gonflement maximum de 1.100 centièmes de millimètre, traité avec 2 % de chaux ce gonflement n'est plus que de 200 centièmes de millimètre, et avec 8 % 75 centièmes. (figures N° 4)

Ces dernières valeurs sont ramenées à 75 centièmes et 20 centièmes après une conservation au préalable sous parafine de 28 jours, plus le cycle de 4 jours sous eau. Il est à supposer que ces valeurs déjà basses auront tendance encore à décroître dans le temps, (figure N° 5).

L'on peut conclure ce paragraphe en constatant que :

- Dès l'apport d'un faible pourcentage de chaux, les caractéristiques de sol en matière de gonflement sont modifiées très favorablement,
- Cette amélioration est fonction de la teneur en chaux, s'il s'agit simplement de juguler le gonflement, un pourcentage de l'ordre de 2 à 3 % serait suffisant, mais sans garantie de de tenue dans le temps.

GONFLEMENT SOUS EAU D'ÉPROUVETTES CBR EN FONCTION
DU % DE CHAUX IMMERSION APRES FABRICATION

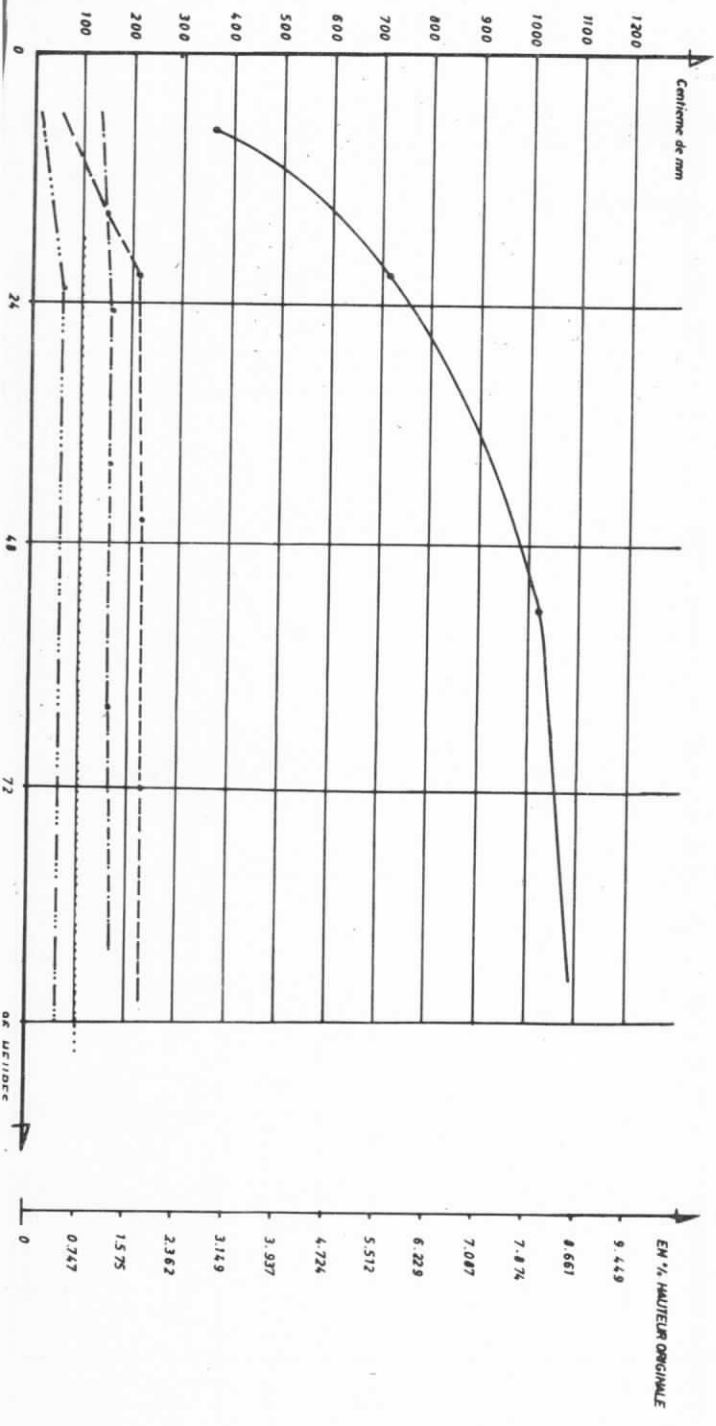
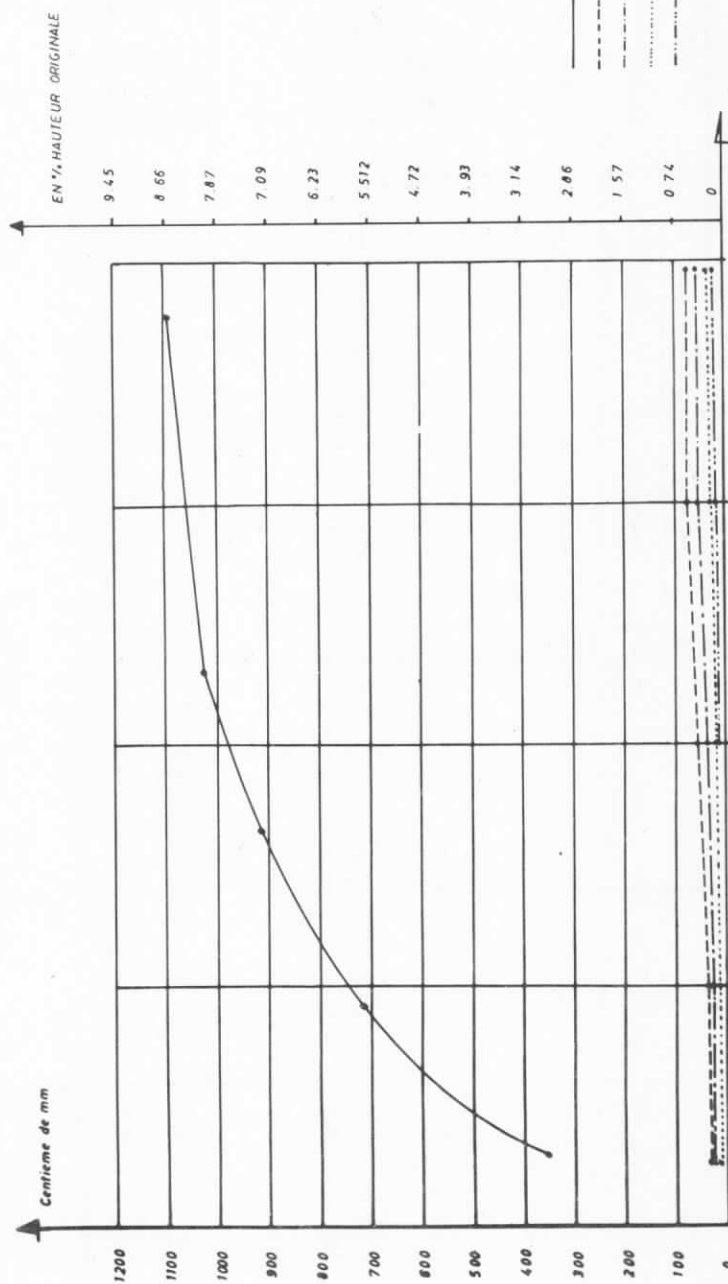


Figure - 4

Figure - 5

GONFLEMENT SOUS EAU D'ÉPROUVETTES CBR
IMMERSION APRES 28 JOURS DE CONSERVATION



Variation des indices C.B.R. : essais immédiats, essais après 4 jours d'imbibition, essais après 28 jours de conservation, essais après 28 jours de conservation plus 4 jours imbibition à 0, 2, 4, 6, 8 % de chaux (figure N° 5 bis).

Avant tout commentaire, il faut signaler que des valeurs C.B.R. de l'ordre de 200, n'ont qu'une signification très relative, mais lors de la programmation des essais, il était difficile de prévoir que les teneurs en chaux supérieure à 4 % aurait un effet aussi prononcé sur les résultats.

Cependant, l'examen du diagramme se révèle très riche en enseignement :

- l'amélioration immédiate due à l'apport de chaux est inexistence,
- les chutes des valeurs C.B.R., par ailleurs faibles, pour les teneurs en chaux de 4, 6, 8 % s'expliquent par la diminution du P.V.S.

Dans le cas des essais après 4 jours d'imbibition après fabrication, l'on constate qu'à partir d'un certain pourcentage de chaux, (dans ce cas aux alentours de 5 %) l'effet de **durcissement** se fait déjà sentir de façon indiscutable. Cet effet est probablement accentué par le séjour en milieux aqueux.

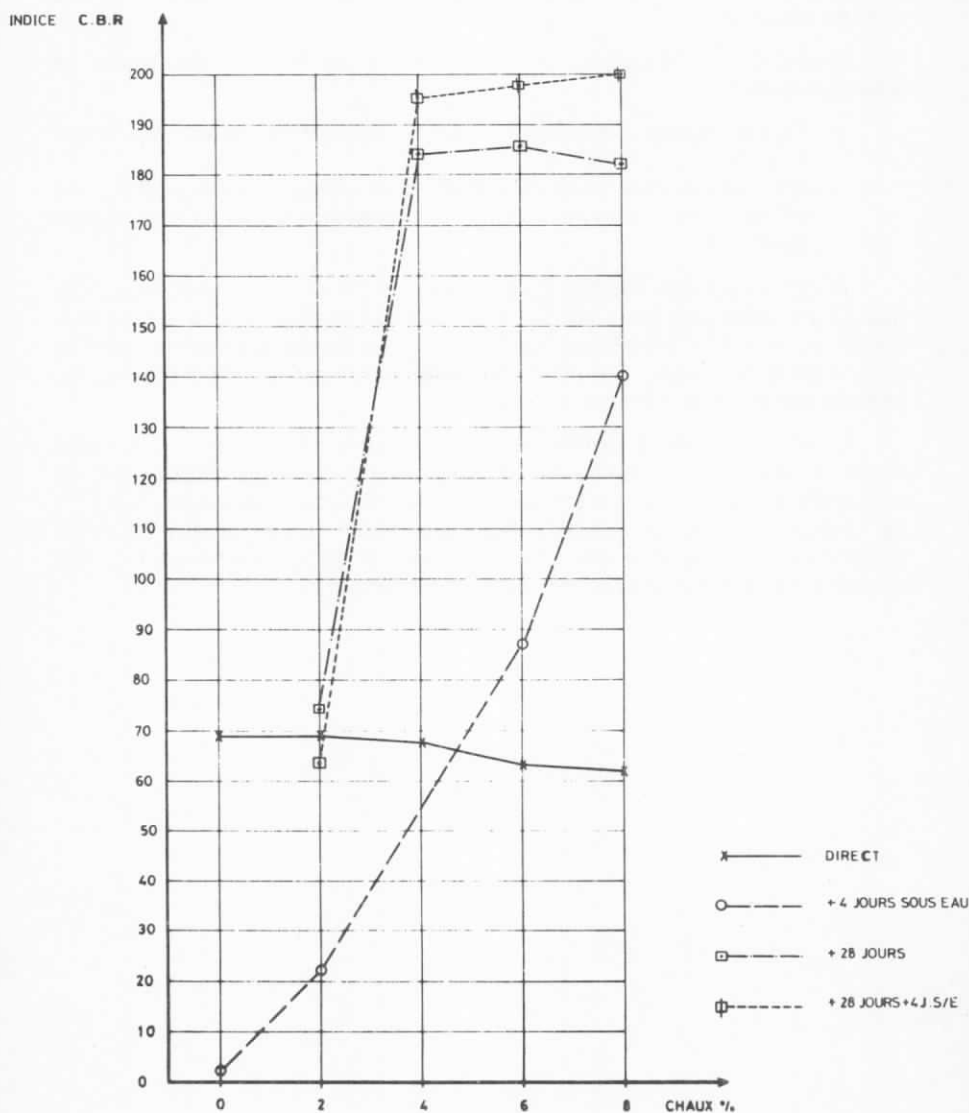
L'influence de la durée de conservation est encore plus nette dans le cas d'une attente de 28 jours avec ou sans imbibition lui succédant. La position inversée pour les résultats des essais à 2 % de chaux s'expliquant par le fait, que bien qu'apportant un effet bénéfique la quantité de chaux présenté ne permet pas un réel processus de durcissement même après 28 jours.

VARIATION DES INDICES C.B.R. EN FONCTION

DE LA TENEUR EN CHAUX

DE L'AGE DIRECT ET 28 JOURS

ET APRES 4 JOURS EN PLUS D'IMMERSION



Eprouvettes Anglaises :

Evolution des résistances en compression simple sur éprouvettes fabriquées à la teneur en eau et la densité maximale du Proctor modifié. (Figure N° 6).

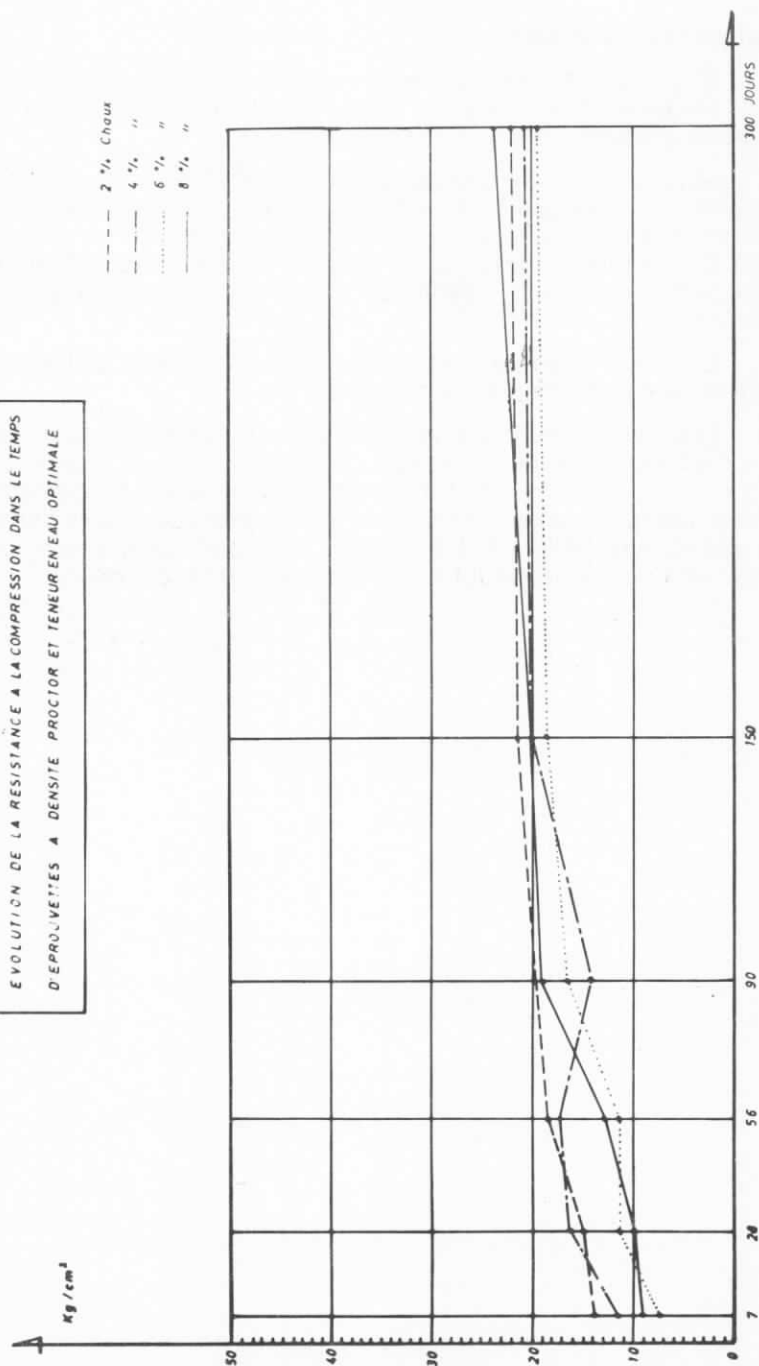
Abstraction faite des anomalies dues à des incidents de laboratoire, l'on constate qu'à partir de 150 jours, les résultats sont très serrés, quelque soit les pourcentages de chaux, et se situent dans une fourchette comprise entre 18 et 21 kg/cm² à 150 jours et 19 et 23 kg/cm² à 300 jours, l'évolution majeure se manifestant entre 0 et 90 jours.

En valeur absolue, une résistance de l'ordre de 20 kg/cm² peut être considérée comme très positive.

Formulons toutefois la remarque suivante : la bibliographie nous apprend que le processus de la réaction de la chaux vis à vis d'un sol peut être freiné et même inhibé dans le cas de conservation à des températures en dessous de 15° centigrade. Ceci a parfois été le cas durant les 90 premiers jours. Il est par conséquent possible que certaines perturbations soient dues à ce phénomène.

Figure . 6

EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DANS LE TEMPS
D'EPROUVETTES A DENSITE PROCTOR ET TENEUR EN EAU OPTIMALE



Evolution de la résistance à la traction (Brésiliën) sur éprouvettes fabriquées à la teneur en eau et à la densité maximale Proctor modifié. (figure N° 7).

L'interprétation est malaisée, elle paraît obeïr à une certaine logique dans la première phase de 7 à 90 jours, au delà les résultats semblent avoir été perturbés. Ne perdons cependant pas de vue que l'échelle choisie met en évidence des variations très minimes.

Evolution de la résistance à la compression simple sur éprouvettes fabriquées à teneur en eau et densité maximale Proctor modifié, à différents âges plus 4 jours sous eau. (figure N° 8).

En premier lieu l'on remarque que, quelque soit l'âge, les éprouvettes dosées à 2 % de chaux se sont délitées dès la mise sous eau. L'on remarque également que les éprouvettes contenant 4 % de chaux ne résistent pas à l'immersion aux âges jeunes 7 et 28 jours; elles se délitent, l'effet de « cimentation » ne jouant qu'à partir de 56 jours.

Concernant les éprouvettes à 4, 6, 8 % de chaux les résultats sont positionnés en fonction des teneurs croissantes de chaux.

Nous attribuons les chutes de résistance à 300 jours à l'apparition de micro-fissures dont l'origine est soit causée par une dessiccation anormale (conservation douteuse) ou encore à une réaction sol-chaux. Ce point devant être approfondi, ces micro fissures ayant pour effet de diminuer les résistances mécaniques.

Figure - 7

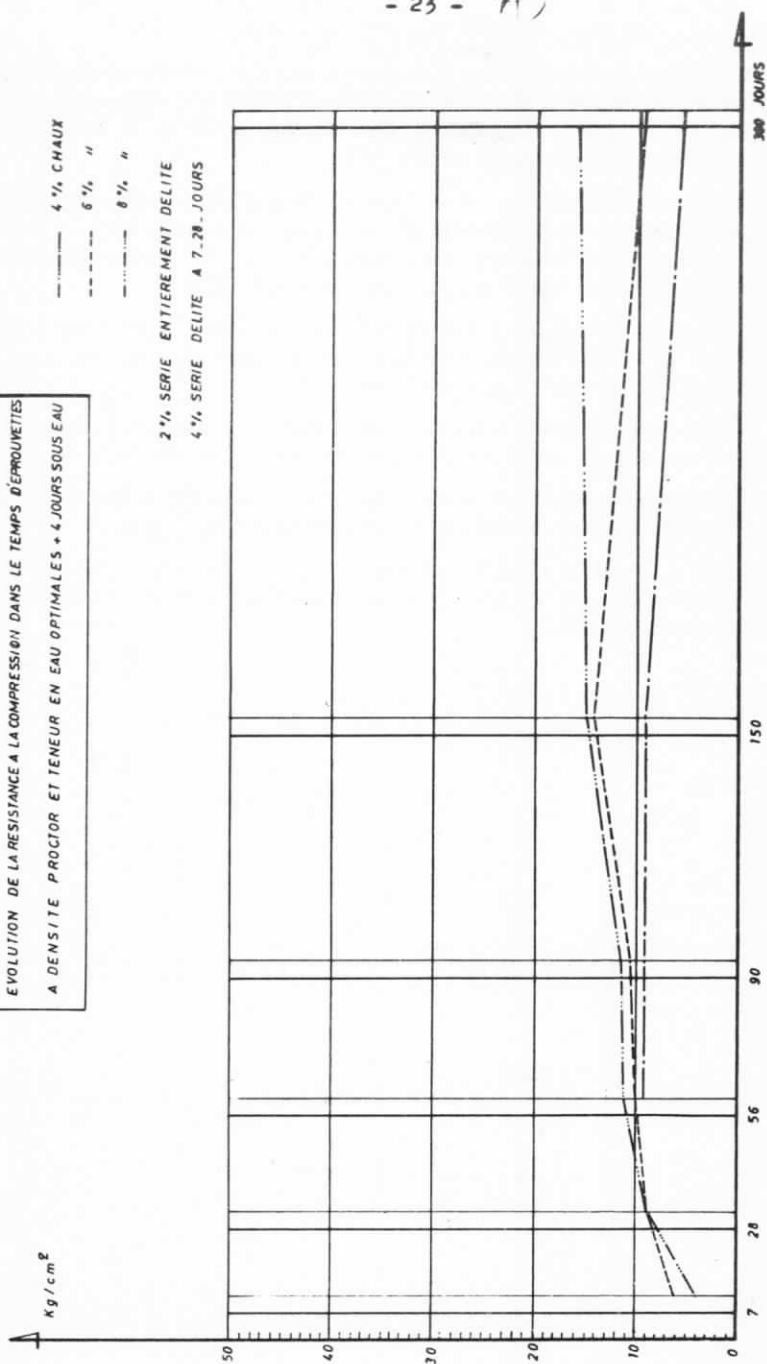
EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA TRACTION DANS LE TEMPS
D'EPROUVETTES A DENSITE PROCTOR ET TENEUR EN EAU OPTIMALE

--- 2 % Chaux
— 4 % " "
... 6 % " "
— 8 % " "



Figure . 8

EVOLUTION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DANS LE TEMPS D'EPROUVETTES
A DENSITE PROCTOR ET TENEUR EN EAU OPTIMALES + 4 JOURS SOUS EAU



Dans l'ensemble et par rapport aux résistances obtenues sans immersion les résistances chutent de moitié.

Evolution de la résistance à la compression simple et Bresilien sur éprouvettes dosées à 6 % de chaux, mais à compacité variable, respectivement 95, 100, 105 % du Proctor modifié, la teneur en eau restant constante (figure N° 9 et 10).

Les variations de résistances aussi bien en compression simple que sur essai Bresilien, à respectivement 95 %, 100 % et 105 % de la densité sèche maximale Proctor, démontre à suffisance l'importance à attribuer au paramètre compacité.

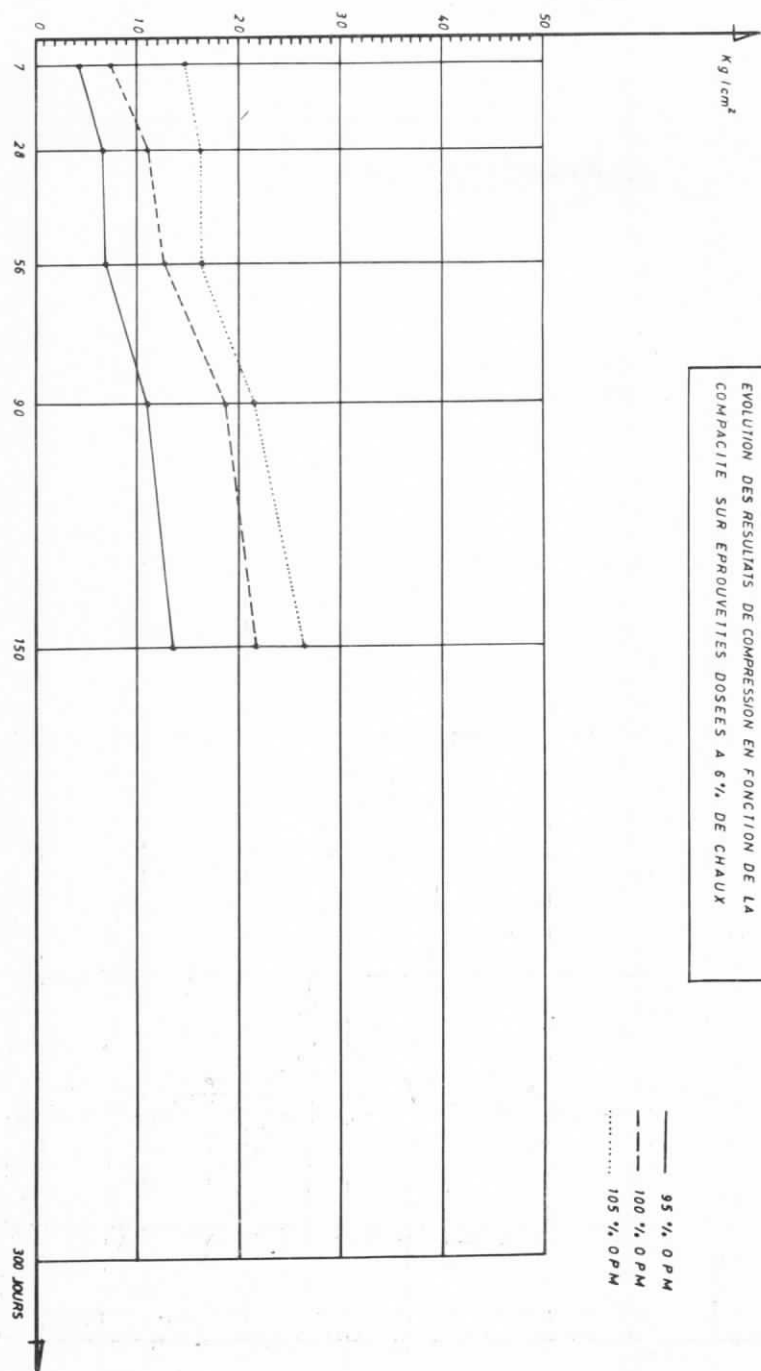
En pratique cette constatation démontre l'intérêt qu'il y a, sur chantier à viser l'obtention de densités élevées, et par corollaire à soigner le compactage et son contrôle.

L'on peut noter à titre indicatif, que lors d'études sur des sols-ciment, ce même fait avait également été mis en évidence.

Evolution de la résistance à la compression simple sur éprouvettes de densités sèche et teneurs en eau constante (figure N° 10 bis).

Dans le cas présent l'on peut vérifier, en dehors de l'influence des paramètres de compacités, et en partie de teneurs en eau, l'effet propre de la chaux.

Figure - 8



EVOLUTION DES RESULTATS DE TRACTION BRÉSILIEN SUR ÉPROUVETTES
DE DENSITÉS VARIABLE DOSÉS À 6 % DE CHAUX

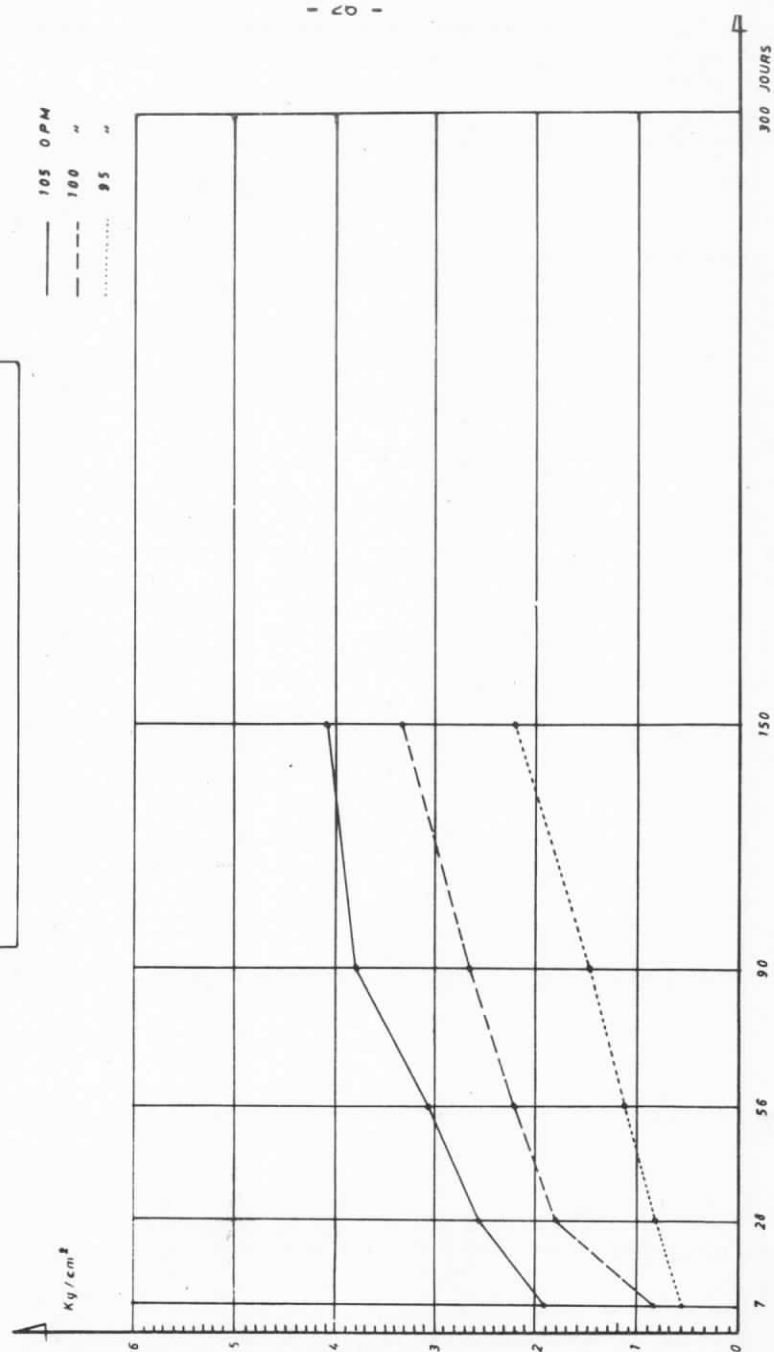
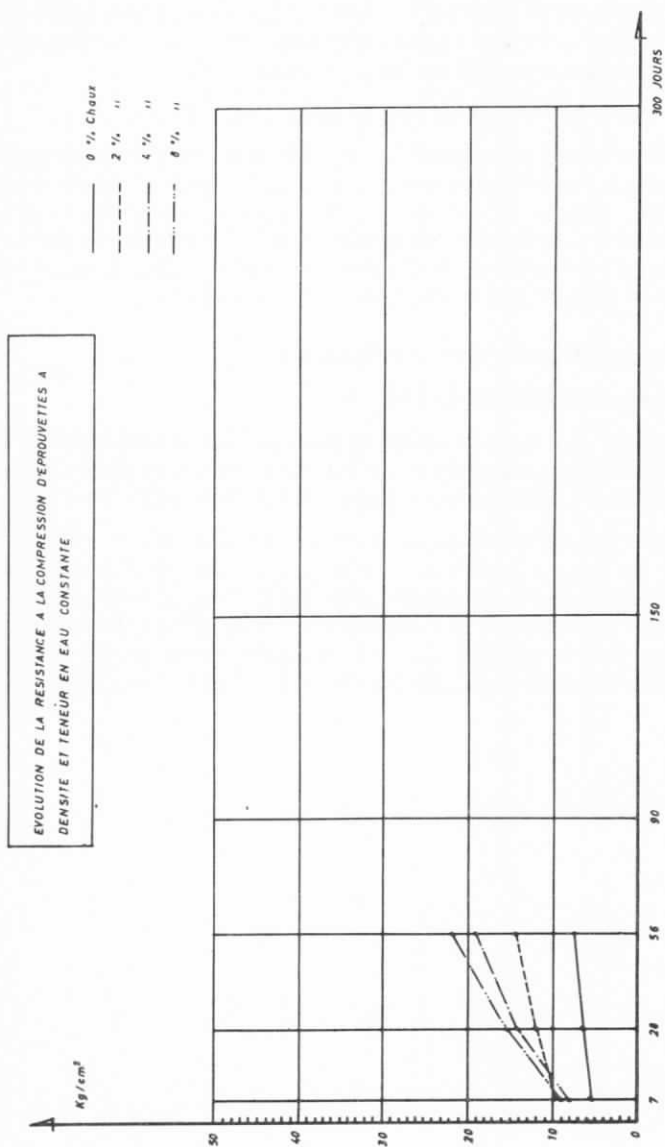


Figure - 10 bis



On constate nettement à partir de 7 jours d'âge que l'augmentation des résistances est directement dépendante du pourcentage de chaux mis en œuvre.

L'allure de la courbe à 7 jours d'âge peut entre autre s'expliquer par la teneur en eau relative, par rapport à la quantité de chaux, et dont l'incidence se fait sentir aux âges jeunes.

Influence de la teneur en eau et essais accélérés :

Cette expérimentation limitée est considérée comme une approche conjointe de l'influence de la variation de la teneur en eau, le P.V.S. restant constant, et du recourt à des essais accélérés. Ce recourt permettant éventuellement l'obtention, dans un délai restreint et défini, des résistances finales, acquises en fin d'évolution dans conditions normales de conservations.

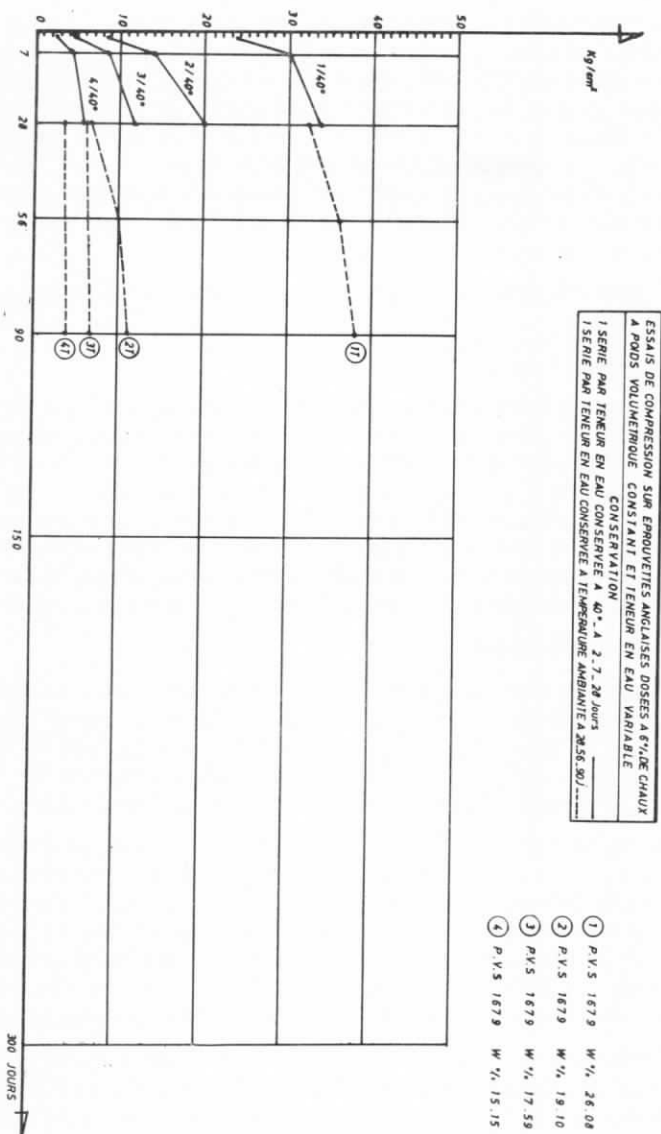
Examen des résultats et conclusions :

Influence de la teneur en eau :

Essais sur éprouvettes anglaises, en compression simple de densité sèche constante et de teneurs en eau variable, conservation a température ambiante, dosées à 6 % de chaux (figure N° 11).

Les résultats obtenus mettent en lumière le fait, que plus la teneur en eau augmente (dans les limites de l'expérimentation) plus la résistance est élevée. Par rapport à la teneur en eau O.P.M. les éprouvettes dont les teneurs en eau sont inférieures à celui-ci ont une résistance qui chute très rapidement, et les teneurs supérieurs provoquent un accroissement considérable de la résistance.

Figure - 88



En pratique cette expérimentation démontre d'ores et déjà, dans ce cas précis, l'intérêt sur chantier, à travailler à une teneur en eau supérieure à celle de l'O.P.M., dans les limites d'une exécution de qualité. Nous avons pu constater précédemment que le facteur « compacité élevée » est également à rechercher, c'est par conséquent dans la fourchette de compatibilité entre densité élevée et teneur en eau haute qu'un compromis devra être recherché, celui-ci sera en grande partie tributaire de la capacité des moyens de compactage mis en œuvre.

Cette série restreinte d'essais doit être systématiquement développée.

Essais accélérés (figure N° 11) :

En ce qui concerne les essais accélérés les résultats sont à ce stade d'expérimentation, relativement décevants, ils laissent tout au plus entrevoir la potentialité à long terme du mélange sol-chaux et confirme l'influence positive d'une teneur en eau initiale élevée, il n'est malheureusement pas possible d'établir de corrélations probantes. IL est évident que les investigations dans ce sens doivent être également poursuivies, sur un échantillonnage plus diversifié et avec l'introduction de températures et modes de conservation différents.

Conclusions et remarques :

Ces premiers résultats sont dans l'ensemble encourageants, mais nous avons conscience qu'ils doivent être développés et approfondis, l'on peut cependant dès maintenant passer à l'exécution d'une section expérimentale dans une région du Maroc où les problèmes soulevés par la présence de zones tirseuses sont aigus.

Malheureusement une objection fondamentale se présente, si l'on envisage des traitements à grande échelle c'est le manque de chaux industrielle au Maroc, en fait sauf dans la région de Tétouan où il existe une production semi-industrielle très limitée, l'ensemble de la production Marocaine se présente sous la forme d'une mosaïque de petit fours à chaux artisanaux couvrant les besoins locaux, leurs capacités individuelles sont faibles et les qualités inégales.

Actuellement les besoins en chaux de haute qualité et en quantité, se situent principalement au niveau de l'industrie papetière et sucrière, dans le futur d'autres industries appelées à se développer, telles que sidérurgie et complexes chimiques viendront compléter cet éventail.

Pour le moment les industries précitées sont , ou leur propre producteur de chaux (sucreries) ou font appel à la production semi industrielle de Tétouan complétée par des importations de provenance européenne.

Il peut être considéré comme acquis que dans le futur, le Maroc sera amené à développer sa production de chaux en passant au stade industriel. Il convient, à ce moment de disposer de suffisamment d'informations dans notre domaine, y compris l'exécution de sections expérimentales de telle manière à être prêt à passer au stade de l'exécution systématique.