

Centre de Géologie
de l'Ingénieur
E.N.S.M. Paris

Laboratoire de Genie Civil
Minéralogie et Géotechnique
I.N.S.A. Rennes

1982

**ETUDE EXPERIMENTALE de la STABILISATION
des ARENES GRANITIQUES à la CHAUX**

Joseph ABDO

Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées

Docteur Ingénieur

Centre de Géologie
de l'Ingénieur
EN.S.M. Paris

Laboratoire de Genie Civil
Minéralogie et Géotechnique
I.N.S.A. Rennes

1982

**ETUDE EXPERIMENTALE de la STABILISATION
des ARENES GRANITIKUES à la CHAUX**

Joseph ABDO

Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées

Docteur Ingénieur

Ce mémoire, présenté comme thèse de Docteur-Ingénieur le 25 Novembre 1982 à l'Université Pierre et Marie Curie - Paris VI et à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, devant un jury composé de :

MM.	M. ARNOULD	Président
	J. ESTEOULE	Rapporteur
	J. LAMEYRE	Examineur
	R. SIERRA	Examineur
	J. DARRE	Examineur

a été édité dans la série des travaux du Laboratoire de Génie Civil, Minéralogie et Géotechnique de l'I.N.S.A de Rennes. Il a été préparé dans le cadre d'une convention de recherche entre le Syndicat National des Fabricants de Ciments et de Chaux section des chaux grasses et magnésiennes et l'I.N.S.A. de RENNES.

Pour en obtenir un exemplaire, le lecteur intéressé voudra bien en faire la demande au :

Laboratoire de Génie Civil, Minéralogie et Géotechnique
INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE RENNES
20 Avenue des Buttes de Coësmes
35043 RENNES CEDEX

AVANT PROPOS

Le résultat de ce travail n'aurait pas été atteint sans l'aide morale et matérielle d'un certain nombre de personnes auxquelles je suis heureux d'adresser ici mes plus sincères remerciements.

Mes remerciements vont, tout d'abord à Monsieur le Professeur ARNOULD à qui je dois mon orientation vers la Géologie de l'Ingénieur. Il m'a ensuite accueilli avec affabilité au Centre de Géologie de l'Ingénieur dont il assure la direction à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. En plus de son enseignement et de ses conseils, il s'est montré attentif à mon sort en plusieurs circonstances, je l'en remercie vivement et je suis très honoré qu'il ait accepté de présider mon jury.

C'est au Laboratoire de Génie Civil, Minéralogie et Géotechnique de l'INSA de Rennes, que j'ai effectué l'essentiel de ce travail de recherche sous la direction de Monsieur le Professeur ESTEOULE. Il m'a fait bénéficier de son expérience sur les sols, la minéralogie des argiles et la gênèse des silicates hydratés à température ordinaire. Je lui suis très reconnaissant d'avoir su concilier des conseils judicieux et une grande liberté de travail.

Ma gratitude va à Monsieur SIERRA, chargé de mission au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, qui m'a fait bénéficier de sa grande expérience en physico-chimie des liants hydrauliques ; je l'en remercie vivement et je suis heureux qu'il ait accepté d'examiner ce mémoire.

Monsieur le Professeur LAMEYRE de l'Université Pierre et Marie CURIE a bien voulu faire partie de mon jury, je lui suis très reconnaissant de l'intérêt qu'il me témoigne ainsi.

Je remercie également Monsieur DUTREUIL qui m'a guidé sur le terrain, m'a indiqué les bons affleurements et m'a fait profiter de son expérience sur l'altération des granites limousins.

J'adresse ma vive reconnaissance à Monsieur DARRE, Secrétaire Général du Syndicat National des Fabricants de Ciments et de Chaux (section des chaux grasses et magnésiennes) qui a bien voulu examiner ce mémoire.

Je sais gré au syndicat National des Fabricants de Ciments et de Chaux qui a apporté son aide financière à ce travail, ainsi qu'au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées qui m'a accordé une bourse de recherche pour une durée de 31 mois et enfin à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris qui m'a permis d'achever ce travail grâce également à une bourse de recherche.

Je n'oublie pas tous mes collègues et amis, de l'Institut National des Sciences Appliquées à Rennes et du Centre de Géologie de l'Ingénieur à Paris qui ont contribué par leurs conversations et leur sympathie à rendre le déroulement de ce travail à la fois agréable et intéressant, plus particulièrement Jean GUYADER, Raoul JAUBERTHIE, Jean LABOUREAU,

Pierre PERRET qui a su me faire profiter de son expérience de la stabilisation des sols fins à la chaux, Alain JIGOREL pour sa compétence en sédimentologie, RAMANOARISON pour son aide efficace pendant la mise en forme de ce mémoire, je remercie vivement Madame CHOLLET pour sa collaboration technique. Enfin Monsieur JIGOREL qui a été chargé de l'observation morphologique des arènes a trouvé le meilleur accueil au Centre de Microscopie à Balayage de l'Université de Rennes dirigé par Monsieur le Professeur ALLEGRET. Je tiens particulièrement à remercier Monsieur Joseph LE LANNIC responsable technique de ce centre pour sa disponibilité et l'efficacité de sa collaboration technique.

Je tiens à adresser mes remerciements à Mademoiselle Françoise BIHAN, Mesdames MOISON, BAHIER, qui en un temps record ont assuré la frappe du manuscrit de soutenance.

La remise en forme de ce mémoire a été assurée par Messieurs ESTEOULE et JIGOREL et la frappe définitive par Madame BAHIER que je remercie encore très vivement.

S O M M A I R E

	pages
I. INTRODUCTION	1
II. LES ARENES	3
<u>II.0. INTRODUCTION</u>	3
<u>II.1. ARENISATION</u>	4
II.1.1. Généralités	4
II.1.2. Description des différents horizons de la coupe d'altération des roches granitiques	4
II.1.2.1. Arénisation en Boule	4
II.1.2.2. Arénisation homogène	4
<u>II.2. ARENES</u>	5
II.2.1. Caractères sédimentologiques	5
II.2.1.1. Variation de la granularité de l'arène en fonction du stade d'évolution de l'altération	5
II.2.1.2. Variation de la granularité de l'arène en fonction de la nature de la roche mère	5
II.2.2. Caractère minéralogiques	6
II.2.3. Répartition spatiale des formations d'altération en fonction de la morphologie et des indices de surface	6
<u>II.3. CARACTERISATION DES ARENES ETUDIEES</u>	7
II.3.1. Origine	7
II.3.1.1. Arène du SOURN	7
II.3.1.2. Arène du BREUIL	8
II.3.1.3. Arène de BARRAUD	8
II.3.1.4. Arène de CHIRAC	8
II.3.1.5. Arène de La BERTHE	9
II.3.2. Caractères sédimentologiques et minéralogiques	9
II.3.2.1. Granularité - Indices	9
II.3.2.2. Caractères minéralogiques	12
II.3.2.3. Examen au Microscope Electronique à Balayage	13
II.3.3. Caractéristiques géotechniques	16
II.3.3.1. La teneur en eau naturelle	17
II.3.3.2. Limites d'Atterberg	17
II.3.3.3. Equivalent de sable	17
II.3.3.4. Essai au bleu de méthylène	18
II.3.3.5. Essai Proctor Modifié	19

	pages
II.3.4. Classification géotechnique des arènes étudiées	21
II.3.4.1. Granularité des arènes granitiques	21
II.3.4.2. Indice de plasticité des arènes granitiques étudiées	22
II.3.4.3. Equivalent de sable des arènes étudiées	22
II.3.4.4. Classification géotechnique des arènes d'après leur nature	22
II.3.5. Caractères chimiques	24
II.3.5.1. Les composés minéraux amorphes	24
II.3.5.2. Les besoins en chaux	25
III. RESULTATS EXPERIMENTAUX	26
<u>III.0. INTRODUCTION</u>	26
<u>III.1. TECHNIQUE EXPERIMENTALE</u>	27
III.1.1. Bref rappel de la technique utilisée	27
III.1.2. Dimensionnement des éprouvettes et écrêtage du matériau	27
III.1.2.1. Confection des éprouvettes	27
III.1.2.2. Conservation des éprouvettes	28
III.1.3. Mesures physiques	29
III.1.3.1. Mesure des résistances en compression simple	29
III.1.3.2. Mesure de la célérité des ondes longitudinales	29
III.1.4. Dosages chimiques	30
III.1.4.1. Teneur en eau des matériaux comportant de la chaux	30
III.1.4.2. Détermination de la teneur en chaux libre des matériaux traités à la chaux	30
III.1.4.3. Evaluation des oxydes dits "combinés"	31
<u>III.2. PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX</u>	31
III.2.0. Introduction	31
III.2.1. Arène le SOURN	32
III.2.1.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène "Le SOURN"	32
III.2.1.1. Etude détaillée de la série de référence S.C. (W_4 ; C_2 ; T_2)	32
III.2.1.2. Influence du traitement	40
III.2.1.3. Influence de la température	45
III.2.2. Arène Le BREUIL	48
III.2.2.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène "Le BREUIL"	48
III.2.2.1. Etude détaillée de la série de référence Br.C (W_4 ; C_2 ; T_2)	48
III.2.2.2. Influence du traitement	54
III.2.2.3. Influence de la température	57

	pages
III.2.3. Arène de BARRAUD	60
III.2.3.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène de BARRAUD	60
III.2.3.1. Etude détaillée de la série de référence Bd.C (W_4 ; C_2 ; T_2)	60
III.2.4. Arène de CHIRAC	65
III.2.4.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène de CHIRAC	65
III.2.4.1. Etude détaillée de la série de référence C.C. (W_4 ; C_2 ; T_2)	65
III.2.4.2. Influence du traitement	68
III.2.4.3. Influence de la température	72
III.2.5. Arène de la BERTHE	73
III.2.5.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène de la BERTHE	73
III.2.5.1. Etude détaillée de la série de référence B.C. (W_4 ; C_2 ; T_2)	74
III.2.5.2. Influence du traitement	78
III.2.5.3. Influence de la température	82
<u>III.3. RELATION ENTRE LES OXYDES COMBINES ET LES RESISTANCES MECANIQUES</u>	82
III.3.0. Introduction	82
III.3.1. Arène le SOURN	82
III.3.2. Arène le BREUIL	84
III.3.3. Arène de BARRAUD	86
III.3.4. Arène de CHIRAC	88
III.3.5. Arène gneïssique de la BERTHE	89
<u>IV. DISCUSSION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS EXPERIMENTAUX</u>	91
<u>IV.0. INTRODUCTION</u>	91
<u>IV.1. EVOLUTION DES PARAMETRES MECANIQUES EN FONCTION DU TEMPS</u>	91
IV.1.0. Introduction	91
IV.1.1. Application aux arènes du mode de représentation utilisé pour les sols de limons	91
IV.1.2. Autre mode de représentation proposée	94
IV.1.3. Justification du mode de représentation proposé	96
IV.1.4. Comparaison entre les deux modes de représentation	97
<u>IV.2. RELATION ENTRE LE DEVELOPPEMENT DES RESISTANCES MECANIQUES ET LA CONSOMMATION DE CHAUX</u>	99
IV.2.0. Introduction	99
IV.2.1. Relation directe entre la consommation de chaux et les résistances mécaniques	100
IV.2.2. Autre type de relation proposé	100

	pages
IV.3. <u>MODELE PROPOSE POUR L'EVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES EN FONCTION</u>	100
<u>DU TEMPS</u>	100
IV.3.0. Introduction	100
IV.3.1. Modèle proposé	100
IV.3.1.1. Expression générale de la consommation en chaux . .	100
IV.3.1.2. Commentaires	106
IV.3.2. Relation entre le modèle et le mode de représentation proposé	107
IV.4. <u>REACTION DE LA CHAUX SUR LES ARENES</u>	107
IV.4.0. Introduction	107
IV.4.1. Essai d'interprétation des phénomènes	107
IV.4.2. Aptitude du sol à se combiner avec la chaux	109
IV.4.2.1. Dosage des oxydes "libres"	109
IV.4.2.2. Les besoins en chaux	111
IV.4.2.3. Les oxydes combinés	112
IV.4.2.4. Conclusions	112
IV.4.3. Influence du dosage initial	112
IV.4.4. Conclusion	115
IV.5. <u>INFLUENCE DE LA TEMPERATURE</u>	115
IV.5.0. Introduction	115
IV.5.1. Accélération des phénomènes de stabilisation	115
IV.5.2. Examen détaillé des relations entre la température et les	
coefficients expérimentaux	116
IV.5.3. Variation du coefficient "δ" en fonction de la température T	116
IV.5.4. Protocole d'essais accélérés	118
IV.5.5. Conclusion	119
V. CONCLUSION GENERALE	120

I- INTRODUCTION

La construction routière nécessite des quantités énormes de matériaux pour réaliser non seulement le corps de chaussées proprement dit, mais également pour la réalisation des couches de forme et des remblais. Le caractère assez restrictif des spécifications sur les matériaux routiers font que seules certaines catégories de matériaux sont couramment utilisées : ce sont essentiellement des résidus d'activités industrielles (cendres laitiers..), des alluvions (graves plus ou moins polluées) ou des matériaux provenant de roches massives. Les arènes ont été trop longtemps considérées comme des matériaux de caractéristiques médiocres et d'importance secondaire en technique routière.

Actuellement, la tendance est de se tourner vers les matériaux de substitution pour éviter l'utilisation abusive de matériaux nobles, l'emploi de matériaux à contenu énergétique élevé et le recours à des emprunts ou à des décharges importantes qui risquent de dégrader l'environnement. C'est dans cette optique que le traitement des arènes granitiques par la chaux, sujet de ce travail, prend toute sa signification.

Ce travail fait suite à l'étude de la stabilisation des sols de limons par P. PERRET (1977). D'une manière analogue, ce travail a pour but de déterminer dans quelles conditions, un traitement à la chaux permet d'utiliser comme matériaux de substitution, des matériaux localement disponibles que leurs caractéristiques médiocres conduisaient, dans certains cas, à la décharge. D'un point de vue plus fondamental, les sols de limons sont des sols caractérisés par leur homogénéité sur de grandes étendues, la finesse et l'homogénéité de leur texture. Malgré leur mise en place relativement récente, leur nature leur confère une relative stabilité du point de vue chimique. Tout au contraire, les arènes sont caractérisées par leur hétérogénéité en tant que formation géologique, par leur texture grossière et leur mauvais classement. Enfin, de par leur nature même, ces matériaux résiduels en cours d'altération présentent une instabilité chimique relativement importante.

Le but de ce travail est double :

- étudier expérimentalement comment un traitement à la chaux peut améliorer les caractéristiques des arènes en vue de leur utilisation en géotechnique routière.

- parfaire les connaissances acquises par l'étude des sols de limons sur les processus de type pouzzolanique qui se déroulent lors de la stabilisation des sols par la chaux.

II - LES ARENES

II.0 - INTRODUCTION

Les roches granitiques s'altèrent de façon plus ou moins intense suivant l'agressivité des climats. A la surface du globe, deux grands modes d'altération des granites ont été mis en évidence : l'un, dû à une hydrolyse intense qui caractérise les régions intertropicales : c'est l'altération latéritique (LENEUF, 1959 - LELONG, 1969) ; l'autre résulte d'une hydrolyse ménagée et se rencontre principalement dans les régions de la zone tempérée : c'est l'arénisation (SEDDOH, 1973 - DUTREUIL, 1978).

Après quelques rappels sur les phénomènes d'arénisation et sur les arènes, les caractéristiques de celles qui ont été mises en oeuvre pour cette étude seront examinées de façon plus précise.

II.1 - ARENISATION

II.1.1 - Généralités

En région tempérée, les socles granitiques sont altérés sur une épaisseur qui est en moyenne de l'ordre de quelques mètres, mais qui peut aller jusqu'à quelques dizaines de mètres (CHEVASSU, 1976 - DUTREUIL, 1978) ; de ce fait, ils laissent apparaître en surface une formation meuble à texture conservée au sein de laquelle demeurent quelques masses non altérées et plus ou moins arrondies (boules résiduelles) ; c'est ce qu'on appelle une arène.

La coupe-type rencontrée dans les formations granitiques en région tempérée est représentée sur la figure II.1.

Elle peut être schématisée par une coupe simplifiée (figure II.2) montrant la superposition des différents horizons que l'on rencontre régulièrement dans ces formations.

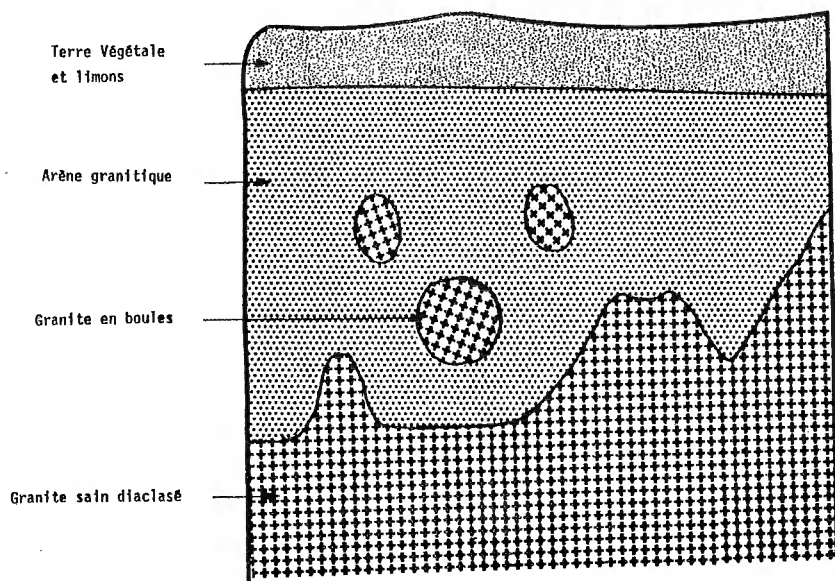


Figure II.1 : Coupe schématique montrant la formation d'arène.

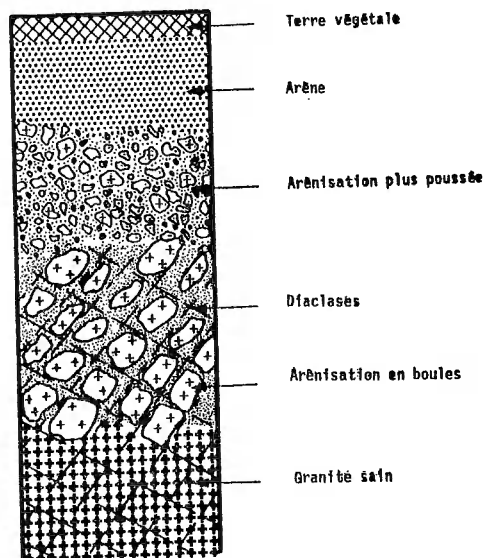


Figure II.2 : Coupe schématique simplifiée dans les formations granitiques (d'après CHEVASSU, 1976)

II.1.2 - Description des différents horizons de la coupe type d'altération des roches granitiques.

II.1.2.1 - Arénisation en Boules.

C'est le type le plus fréquent qui se développe sur tous les types de granite, mais plus particulièrement sur granite à biotite (DUTREUIL, 1978). Le phénomène se propage à partir des joints du granite. Dès les premiers stades, des blocs parallélépipédiques s'isolent entre des joints arénisés, argilisés de quelques centimètres d'épaisseur. L'altération progresse lentement et finit par isoler des blocs de plusieurs mètres cubes plus ou moins arrondis.

II.1.2.2 - Arénisation homogène

Il s'agit d'un type d'altération plus accentuée que dans le cas précédent. Les boules de granite, lorsqu'elles existent encore, sont peu nombreuses et de taille réduite. D'autre part, l'arène est de granulométrie généralement plus fine bien que parfois issue d'un granite à grain gros ou moyen sur une épaisseur de quelques mètres, toute la masse de la roche peut être transformée en arène, c'est-à-dire en un matériau sableux, plus ou moins argileux, dont les grains sont constitués par des minéraux résiduels du granite, sains ou altérés : les biotites mordorées se détachent nettement sur le fond blanc clair de l'arène, les plagioclases sont pulvérulents et blancs, les feldspaths potassiques sont également poudreux et pulvérulents, le quartz et la muscovite ne paraissent pas avoir subi de modification (JP DUTREUIL, 1978). Quant à la phase argileuse (kaolinite essentiellement, illite et plus rarement montmorillonite), elle résulte de la décomposition des feldspaths les plus altérables et des minéraux ferromagnésiens (micas noirs, amphiboles...) (CHEVASSU, 1976).

II.1.2.3 - Le granite altéré

Il représente le stade intermédiaire entre l'arène et le granite sain. Il est plus ou moins développé et peut prendre des formes variées en fonction de la nature du granite, de son stade d'altération, du contexte morphologique (CHEVASSU, 1976).

II.1.2.4 - Le granite sain

Le granite sain et massif ne se présente à l'affleurement que dans des conditions morphologiques particulières (buttes après érosion de la couche arénisée...).

II.2 - ARENES

II.2.1 - Caractères sédimentologiques

Quelle que soit la nature de la roche-mère et quel que soit son degré d'altération, la répartition granulométrique des arènes granitiques présente des caractères constants : une prédominance des fractions sableuses et une concavité des courbes cumulatives vers les petites dimensions. En outre, ces courbes granulométriques s'inscrivent dans un fuseau très large où les variations des caractéristiques granulométriques des arènes sont intimement liées au contexte géologique, en particulier :

- pour un granite donné, au stade d'évolution de l'altération,
- pour un même stade d'altération, à la nature de la roche mère (PLIHON, 1974 - CHEVASSU, 1976).

II.2.1.1 - Variation de la granularité de l'arène en fonction du stade d'évolution de l'altération

Des études à caractère sédimentologique effectuées sur des arènes échantillonnées le long d'un profil d'altération ont montré que, de la base au sommet du profil, il y a une nette augmentation de la fraction argileuse et en même temps une sensible réduction granulométrique qui s'effectue au niveau des grains de feldspaths et de micas. Toutefois, cette transformation granulométrique n'aboutit pas à un décalage généralisé de la courbe vers les petites dimensions, la fraction sableuse grossière restant toujours prédominante (PLIHON, 1974).

II.2.1.2 - Variation de la granularité de l'arène en fonction de la nature de la roche mère

Pour un stade d'altération donné, la courbe granulométrique de l'arène varie en fonction du grain du granite d'une part, de sa composition minéralogique d'autre part (CHEVASSU, 1976).

- En effet, pour un granite de composition minéralogique donnée, la granularité de l'arène varie en fonction de la taille du grain de la roche.

- Par contre, pour un grain donné de la roche, la composition minéralogique du granite et en particulier la nature des feldspaths et des micas peuvent influencer sur la courbe granulométrique de l'arène.

II.2.2 - Caractères minéralogiques

Comme les arènes granitiques sont le résultat d'une évolution minéralogique sous un climat peu agressif, tous les minéraux du granite se trouvent partiellement altérés. Les plagioclases et les biotites ont quelque peu évolué : les premiers sont devenus friables, poudreux et sont même plus ou moins transformés en minéraux argileux ; quant aux paillettes de biotite, elles présentent un aspect mordoré caractéristique. Les quartz maintiennent leur aspect, mais peuvent se fragmenter, chaque fragment se recouvrant d'une patine argileuse brune (DUTREUIL, 1978) ; les feldspaths potassiques roses se cassent transversalement, mais ne présentent pas de transformations importantes.

II.2.3 - Répartition spatiale des formations d'altération en fonction de la morphologie et des indices de surface

Un point essentiel dans la distribution de l'altération est le caractère extrêmement variable de la forme et de la profondeur de l'altération des formations granitiques, comme le constate CHEVASSU (1976) par l'observation de talus de routes et de coupes sismiques en Bretagne.

Ainsi, sur les plateaux, l'épaisseur de l'altération peut être très variable sans qu'aucun indice morphologique superficiel n'en témoigne. Des observations analogues ont été faites par AUROUSSEAU (1976) en Morvan granitique.

Bien qu'il ne semble pas y avoir de règles générales, nous rappellerons quelques cas relativement fréquents :

- les affleurements rocheux se situent le plus souvent sur les flancs de côteaux abrupts ou encore au sommet d'une butte saillante ou bien encore aux deux extrémités d'un déblai dans le cas d'un plateau.

- l'épaisseur du recouvrement (altération et dépôts superficiels) peut croître du sommet vers le pied de la butte, mais aussi dans le sens inverse.

- la distribution de l'altération sur les plateaux est le plus souvent imprévisible. La présence de poches d'arènes entre deux verrous rocheux détermine assez fréquemment la présence de nappes perchées.

Il faut toutefois se garder de généraliser ces schémas qui, bien que fréquents, n'en demeurent pas moins des cas particuliers correspondant à un stade d'évolution précis des phénomènes d'altération et d'érosion.

D'autres coupes, en effet, mettent en évidence l'indépendance entre la morphologie et la distribution de l'altération et le fait qu'il peut même arriver que les points hauts dans la morphologie correspondent aux plus fortes épaisseurs d'altération.

Pour les flancs de côteaux, il semble cependant qu'une relation entre le modelé et l'importance de l'arénisation puisse exister :

- les pentes très fortes, supérieures à 10%, ont en général, un amont armé par le granite diaclasé et un versant légèrement arénisé.

- les pentes moins accentuées sont en général, couvertes de matériaux altérés plus ou moins remaniés ou de dépôts de recouvrement d'épaisseur variable.

En résumé, les produits d'altération des granites du Massif Armoricaïn et du Massif Central sont le résultat d'une évolution minéralogique sous un climat peu agressif car aucun minéral n'a été entièrement détruit. Les aspects différents et variables des matériaux proviennent, d'une part, de la nature de la roche mère et de la taille de ses grains, d'autre part, de la position morphologique des profils. La grande diversité des arènes granitiques se traduit par la diversité de leurs caractéristiques granulométriques, minéralogiques et géotechniques. A cette hétérogénéité du matériau, s'ajoute une grande hétérogénéité des formations d'altération aussi bien en ce qui concerne leur extension qu'en ce qui concerne leur puissance. Le trait caractéristique des arènes granitiques est leur hétérogénéité dans tous les domaines.

II.3 - CARACTERISATION DES ARENES ETUDIEES.

II.3.1 - Origine

Les arènes étudiées ont été choisies de façon à donner un éventail aussi représentatif que possible des différentes formations susceptibles d'être rencontrées en France :

- trois arènes de granite à deux micas :
 - Le Sourn près de Pontivy (Morbihan)
 - Le Breuil dans la forêt des Cars à 10 km à l'Ouest de Nexon (H^{te}Vienne)
 - Barraud à 10 km au Nord de Nontron (Dordogne).
- Une arène de granodiorite :
 - Chirac à 7 km au Nord-Ouest de Chabanais (Charente)
- Et une arène gneissique
 - La Berthe à 10 km à l'Est de Rochechouart (H^{te}Vienne)

II.3.1.1 - Arène du Sourn

L'arène du Sourn provient d'une carrière située sur le bord oriental du Massif de Pontivy. Elle résulte de l'altération du granite à grain grossier qui forme un vaste croissant à concavité tournée vers le Sud-Ouest et dont la partie convexe présente parfois des accidents à grain fin. Cette roche, de teinte claire dont les grains ont 2 à 5 mm est un granite à 2 micas franchement alcalin, très pauvre en calcium et plus ou moins hyperalumineux (HAMEURT, 1961).

La composition chimique de l'arène est voisine de celle de la roche mère (Tableau I).

	granite frais		Arènes				
	G1	G2	A1	A2	A3	A4	A5
SiO ₂	71,00	70,20	70,34	67,82	68,80	70,84	67,24
Al ₂ O ₃	15,57	15,19	16,68	17,49	16,61	15,26	17,01
Fe ₂ O ₃	0,18	0,90	0,66	0,53	0,65	0,46	0,92
Fe 0	1,50	1,57	1,14	1,29	1,07	1,07	1,15
Mn 0	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	-	0,02
Mg 0	0,69	0,59	0,58	0,55	0,41	0,54	0,34
Ca 0	0,40	0,50	-	0,56	0,43	0,11	0,41
Na ₂ O	2,61	3,17	2,61	2,54	2,28	3,03	2,97
K ₂ O	4,86	4,56	4,94	4,56	4,62	4,98	4,86
TiO ₂	0,21	0,23	0,20	0,25	0,22	0,20	0,21
P ₂ O ₅	0,36	0,35	0,34	0,36	0,32	0,33	0,33
P F	0,85	1,15	1,12	2,68	1,69	1,51	1,77
Total	98,24	98,43	98,63	98,65	97,12	98,33	97,23

Tableau I : Analyses chimiques de l'arène du SOURN et de la roche mère correspondante (d'après J. HAMEURT, 1961).

II.3.1.2 - Arène du Breuil

L'arène du Breuil provient de l'altération du granitoïde à deux micas de la forêt des Cars. Elle a été prélevée près du contact avec le gneiss. La composition chimique de l'arène est voisine de celle de la roche-mère (Tableau II).

II.3.1.3 - Arène de Barraud

L'arène de Barraud provient de l'altération d'un granite à deux micas relativement pauvre en chaux et riche en alumine. Cette roche à muscovite abondante est un faciès de bordure du massif de granite de PIEGUT. La composition chimique de l'arène et celle de la roche-mère sont consignées dans le tableau II.

II.3.1.4 - Arène de Chirac

L'arène de Chirac provient de l'altération d'un granite calco-alcalin à gros grain de la série granitique de Chirac. La composition chimique de l'arène et celle de la roche-mère sont rassemblées dans le tableau II.

II.3.1.5 - Arène de la Berthe

Cette arène provient de l'altération des gneiss à deux micas du massif Saint-Brice, Saint-Martin où la muscovite est relativement abondante. (Feuille de Rochechouart, carte géologique de FRANCE au 1/80.000 - 2ème édition 1967).

Nos	Le Breuil		Chirac		Barraud	
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	73,96	70,20	73,80	70,63	69,96	74,76
Al ₂ O ₃	14,89	16,80	14,20	16,00	15,37	12,76
Fe ₂ O ₃	0,89	1,91	0,99	2,05	2,27	1,70
Mg O	0,50	0,37	0,44	0,52	1,23	0,56
Ca O	1,14	0,47	0,39	0,19	2,17	0,33
Na ₂ O	3,37	2,62	3,62	1,65	3,80	2,65
K ₂ O	4,58	3,49	4,41	4,44	3,74	4,39
TiO ₂	0,12	0,18	0,10	0,22	0,28	0,33
Mn O	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
H ₂ O ⁺	0,73	3,82	0,82	4,22	1,47	2,08
Total	100,21	99,90	98,81	99,96	100,34	99,61

Tableau II : Analyses chimiques des arènes étudiées et des roches correspondantes (d'après DUTREUIL, 1978).

- 1 - granite frais des Cars (granite intermédiaire)
- 2 - arène du profil de Vieillecour sur granite intermédiaire
- 3 - granite frais à gros grain de Chirac
- 4 - arène du profil de POPERDU sur granodiorite à gros grains de PIEGI
- 5 - granite frais alcalin à grain fin à deux micas de Barraud
- 6 - arène du profil de Barraud sur granite à deux micas à grain fin.

II.3.2 - Caractères sédimentométriques et minéralogiques

II.3.2.1 - Granularité - Indices

Dans le cas des arènes, l'importance de la fraction sableuse oblige à préciser, par un tamisage, les résultats de l'analyse granulométrique effectuée par la méthode internationale (tableau III).

La granulométrie globale du matériau écrêté à 2 mm est effectuée sur 20 g d'arène après dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium (DUCHAUFOR, 1960). Les fractions fin correspondant à des diamètres équivalents de 2_μ - 5_μ - 10_μ et 20_μ sont prélevées à la pipette

de Robinson. Les fractions grossières sont obtenues par tamisage à 50 μ - 100 μ et 200 μ . Pour préciser les résultats entre 50 μ et 2 mm, un échantillon d'environ 200 grammes d'arène est tamisé mécaniquement sur une série de tamis A.F.N.O.R.. Ce tamisage est effectué après destruction des oxydes de fer et élimination des enduits argileux par ébullition pendant 20 mn dans l'acide chlorhydrique au demi.

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés sous forme de courbes cumulatives tracées sur papier semi-logarithmique. Pour tracer les courbes, les valeurs obtenues par sédimentométrie et tamisage sont prises en compte jusqu'à 50 μ dimension à laquelle sont raccordés les résultats du tamisage mécanique. Comme il apparaît une légère différence (inférieure à 3%) dans les valeurs des fractions inférieures à 50 μ observées lors de l'analyse par sédimentométrie et tamisage manuel de celles obtenues par tamisage mécanique, les résultats de l'analyse par tamisage mécanique sont calculés de telle manière que ces erreurs d'analyse soient réparties uniformément entre 50 μ et 2 mm.

Nature des arènes granitiques					
	Le Sourn	Le Breuil (3 bis)	Barraud	Chirac	La Berthe
Inf. 2 μ	1,23	5,32	10,25	3,54	18,97
2-5 μ	4,29	7,64	12,58	4,99	24,54
5-10 μ	8,30	9,51	15,54	6,26	29,79
10-20 μ	12,34	12,09	19,20	8,51	36,57
20-50 μ	20,68	16,12	26,25	12,59	44,72
50-80 μ	25,78	19,81	30,22	16,23	51,40
80-125 μ	32,02	25,98	35,51	20,41	60,17
125- 200 μ	38,82	34,47	42,17	25,47	69,83
200-315 μ	47,03	45,67	51,10	32,02	78,37
315-500 μ	58,26	59,81	64,99	42,55	85,52
500-800 μ	70,28	74,31	79,87	56,90	90,79
800-1250 μ	84,60	91,68	93,09	78,17	95,60
1250-1600 μ	93,40	98,71	97,71	94,13	98,37
1600-2000 μ	99,97	100	100	99,94	100

Tableau III : Granularité des arènes granitiques étudiées après écrépage à 2 mm.

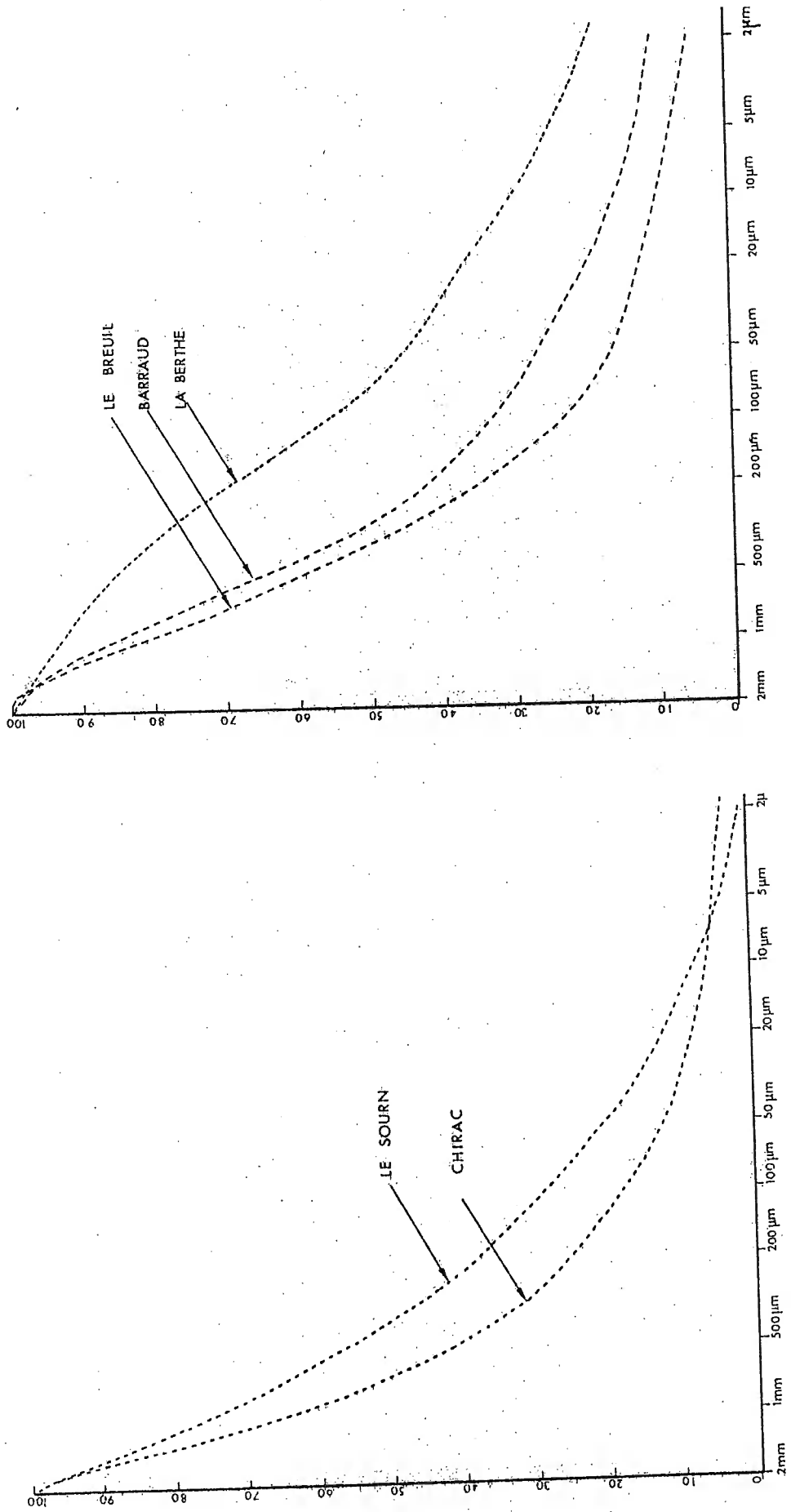


Figure II.3 : Courbes granulométriques de la fraction inférieure à 2 mm. d'arènes étudiées.

Les courbes relatives aux arènes étudiées sont représentées sur la figure II. 3. Ces diagrammes permettent de constater que ces arènes varient par l'importance de la fraction inférieure à 2μ qui va de 1% pour le SOURN jusqu'à 20% pour la Berthe. Toutes ces courbes présentent une concavité plus ou moins marquée : très nette dans le cas de l'arène du granite à gros grain de Chirac, la courbe est presque rectiligne dans le cas de l'arène gneissique de la Berthe.

Les indices granulométriques calculés à partir de ces courbes sont les indices de Trask car ils sont largement utilisés et l'on possède de nombreuses références. Les quartiles relevés sur ces courbes et les indices de Trask qu'ils permettent de calculer sont consignés dans le tableau IV, où il sera rappelé les pourcentages des fractions inférieures à 2μ et à 50μ .

Nature des échantillons	Pourcentage		Quartiles			Indices de Trask	
	inf. à 2μ	inf. à 50μ	Q_1	Q_2	Q_3	Classement S_0	Asymétrie S_k
Le Sourn	1,23	20,68	75	360	950	3,56	0,55
Le Breuil	5,32	16,12	120	360	800	2,58	0,74
Barraud	10,25	26,25	42	300	680	4,02	0,32
Chirac	3,54	12,59	190	650	1200	2,51	0,54
La Berthe	18,97	44,72	5,5	75	260	6,88	0,25

Tableau IV : Indices granulométriques des arènes granitiques étudiées

Les arènes de Barraud, du Breuil et du Sourn présentent une granularité moyenne avec un grain moyen aux environs de 350μ , l'arène de la Berthe est très fine ($Q_2 = 75\mu$) tandis que Chirac présente le grain le plus grossier ($Q_2 = 650\mu$).

Le tableau IV montre que l'indice de classement S_0 est médiocre pour l'arène gneissique de la Berthe, assez bon pour les arènes du Sourn et de Barraud et bon pour les arènes de Chirac et du Breuil. En outre, ce tableau montre aussi que l'indice d'asymétrie est, pour toutes les arènes étudiées, bien évidemment inférieur à l'unité ($A_s < 1$) : le classement est donc maximal du côté grossier.

II.3.2.2. - Caractères minéralogiques.

Les minéraux argileux ne présentent qu'une faible partie de la fraction granulométrique inférieure à 2μ . La kaolinite est présente dans toutes les arènes et elle est associée à

des proportions variables d'argile micacée et à d'autres minéraux de dégradation. L'examen aux rayons X a permis de préciser la nature des minéraux des argiles (fig.II.4).

II.3.2.2.1 - Arène du Sourn

La kaolinite bien cristallisée est prépondérante, elle est associée à une argile micacée en quantité moindre accompagnée d'une faible proportion de vermiculite et d'un interstratifié irrégulier vermiculite-mica (fig.II.4a).

II.3.2.2.2 - Arène du Breuil

On retrouve les mêmes minéraux argileux que pour le Sourn. Mais, à côté de la kaolinite et de l'argile micacée en proportions à peu près égales, la quantité des minéraux associés augmente (vermiculite et interstratifiés). La kaolinite présente un pic élargi vers les petits angles, ceci est peut-être l'indice de la présence de la métahalloysite ou de feuillets interstratifiés dans la kaolinite (fig.II.4b).

II.3.2.2.3 - Arène de Barraud

La tendance du Breuil se trouve confirmée : la kaolinite est toutefois plus abondante et mieux cristallisée. La proportion de vermiculite associée à une faible quantité d'interstratifiés mica-vermiculite et vermiculite-chlorite est à peu près équivalente à celle de la kaolinite et nettement supérieure à celle de l'argile micacée (fig.II.4c).

II.3.2.2.4 - Arène de Chirac

La kaolinite et l'argile micacée sont associées en proportions à peu près équivalentes. On trouve également en quantité importante un édifice interstratifié très mal défini formé de feuillets mica, de feuillets vermiculite et de feuillets gonflants. Le pic de la kaolinite est également très élargi (fig.II.4d).

II.3.2.2.5 - Arène de la Berthe

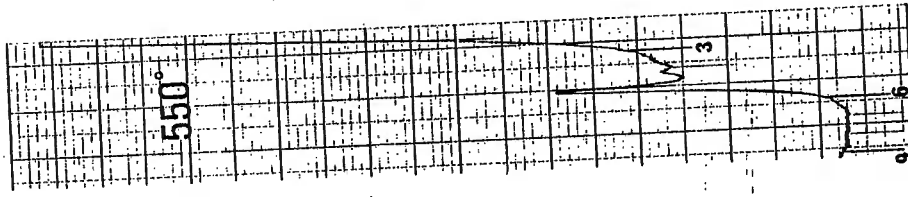
La proportion des minéraux argileux est nettement plus importante que dans les autres arènes. Leur cortège est composé d'une proportion importante de kaolinite relativement bien cristallisée, l'argile micacée et d'un mélange de feuillets smectite associés à un interstratifié irrégulier mica-vermiculite, avec quelques feuillets de chlorite (fig.II.4e).

En résumé à côté de la kaolinite et de l'argile micacée présentes dans toutes les arènes, le cortège des minéraux argileux se compose de minéraux de dégradation de nature diverse et en quantité variable d'un échantillon à l'autre. Le trait dominant de ce cortège est qu'il est caractéristique des pédogénèses acides qui libèrent des quantités notables de composés alumineux. Dans les échantillons, celui de l'arène du Breuil en particulier, le pic élargi de la kaolinite est peut-être l'indice de la présence de la métahalloysite.

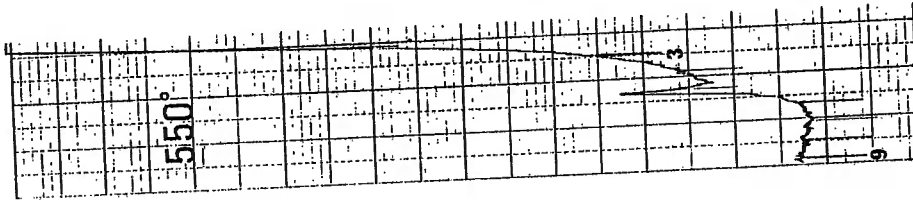
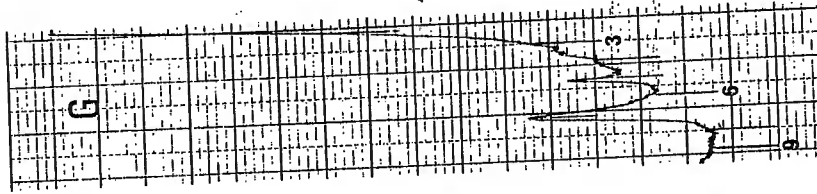
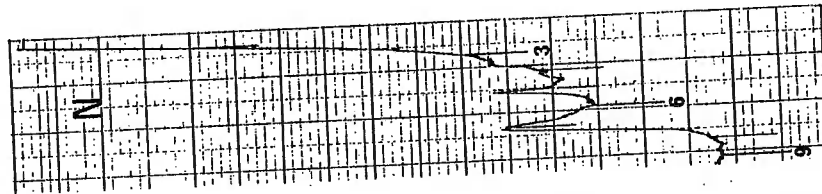
II.3.2.3 - Examen au Microscope Electronique à Balayage

La microscopie électronique à balayage permet d'examiner les autres minéraux des arènes et d'apprécier leur degré d'altération.

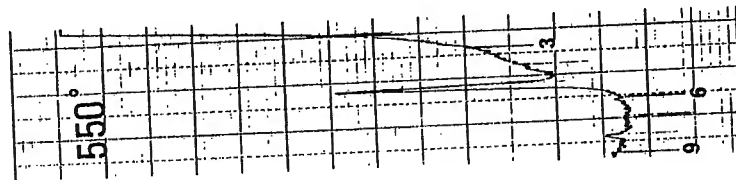
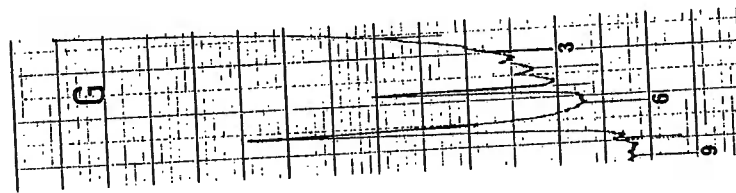
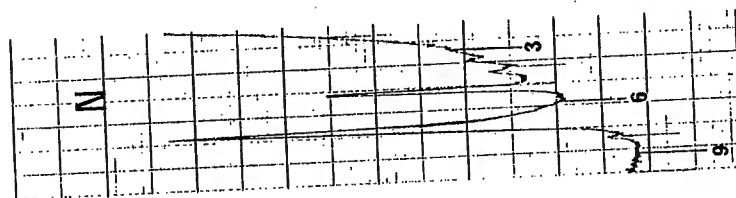
BARRAUD



Le BREUIL



Le SOURN



La. BERTHE

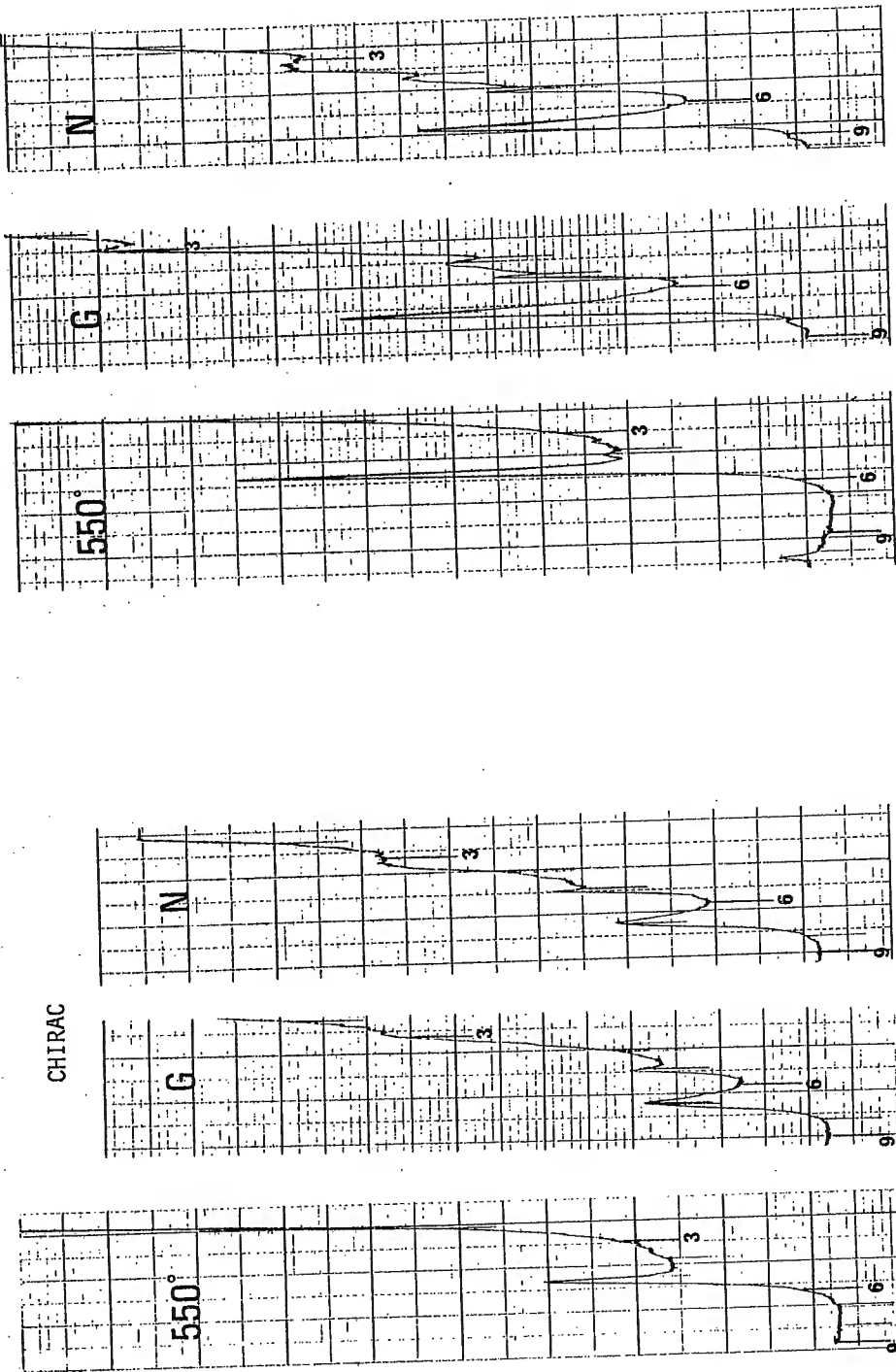


Figure II.4 : Diagrammes d'agrégats orientés de la fraction fine des arènes étudiées, (Rayonnement K_{α} du Cobalt, graduation en degrés θ) N - échantillon naturel G - après gonflement à l'éthylène-glycol, 550°C - après chauffage à 550°C.

II.3.2.3.1 - Le quartz

Présent dans toutes les fractions granulométriques, il est en général peu altéré. D'aspect anguleux, il présente de grandes cassures conchoïdales et porte l'empreinte de minéraux automorphes. Discrètes dans le cas des quartz granitiques, ces empreintes deviennent plus fréquentes et plus importantes pour les quartz gneissiques. La surface des grains porte des amas de silice vraisemblablement amorphe. Au cours de l'arénisation, les minéraux au contact des grains de quartz ont souvent laissé à la surface de contact leur produit de dégradation en enduit (Planche I).

II.3.2.3.2 - Les feldspaths

Les feldspaths présentent des degrés variables d'altération. Cette altération, cause de l'arénisation du granite, outre qu'elle libère des quantités appréciables d'oxydes et d'hydroxydes, développe des surfaces importantes. Ce phénomène peut être apprécié sur la planche II qui présente trois degrés d'altération de feldspaths de l'arène du Sourn.

La planche III, relative à un grain de feldspath peu altéré de l'arène de Chirac, permet d'apprécier l'aspect de surface, les cavités de dissolution et la présence de produits d'altération dans celles-ci.

La planche IV montre également la vue d'ensemble de deux grains de feldspath de l'arène du Breuil.

II.3.2.3.3 - Les biotites

Dans l'arène du Sourn, les biotites se présentent sous forme de paillettes qui permettent d'observer des cavités, des empreintes d'inclusions minérales, des empilements de feuillets et sur les faces basales, des enduits de produits d'altération (Planche V).

- l'altération débute généralement par les bords du feuillet pour se propager dans la masse. La planche IV montre une paillette de biotite de l'arène du Breuil en voie d'altération par la bordure des feuillets et met en évidence les produits d'altération formés : les aiguilles que l'on peut observer sont vraisemblablement des tubes d'halloysite.

- la planche VI montre des paillettes de biotite de l'arène de la Berthe déjà très altérées. L'une d'elle est en cours de vermiculitisation.

II.3.3 - Caractéristiques géotechniques

La classification des sols est obtenue à partir des résultats de l'analyse granulométrique complétée par divers essais géotechniques. Ces derniers qui ont été mis en oeuvre pour obtenir l'identification des arènes étudiées sont :

- la teneur en eau naturelle
- les limites d'Atterberg
- équivalent de sable
- essai au bleu de méthylène
- essai Proctor Modifié

II.3.3.1 - La teneur en eau naturelle

La teneur en eau est le pourcentage d'eau rapporté au poids du sol sec obtenu par étuvage à 105°C jusqu'à obtention d'un poids constant :

$$w_N = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids du sol sec}} \times 100$$

Les teneurs en eau naturelle des arènes granitiques sont comprises entre 8% et 14%, exception faite pour l'arène fine "La Berthe" dont la valeur de la teneur en eau atteint 19,44%. Elles sont consignées dans le tableau V.

II.3.3.2 - Limites d'Atterberg

La méthode employée pour déterminer les limites d'Atterberg est celle du pénétromètre de consistance. Les valeurs de la limite de liquidité w_L , de la limite de plasticité de Casagrande permet de situer les différentes arènes étudiées. Les points sont très groupés et les arènes se classent à la limite des argiles peu plastiques (AP) des limons peu plastiques (LP) (figure II.5).

Arène	w_N	w_L	w_p	I_p
Le Sourn	10,40	41,25	28,70	12,55
Le Breuil	13,13	40,00	25,60	14,40
La Berthe	13,78	42,00	29,80	12,20
Chirac	8,97	37,50	24,80	12,70
Barraud	19,44	41,00	27,80	13,20

Tableau V : Valeurs des teneurs en eau naturelle , limites d'Atterberg et indice de plasticité des arènes étudiées.

II.3.3.3 - Équivalent de sable

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont consignés dans le tableau VI, où pour chaque arène, figurent les valeurs de l'essai visuel et de l'essai piston.

L'arène "La Berthe" comportant un taux élevé de fraction fine, il n'a pas été possible de donner des résultats. Les propriétés géotechniques de cette arène seront définies par les limites d'Atterberg et par l'essai au bleu de méthylène.

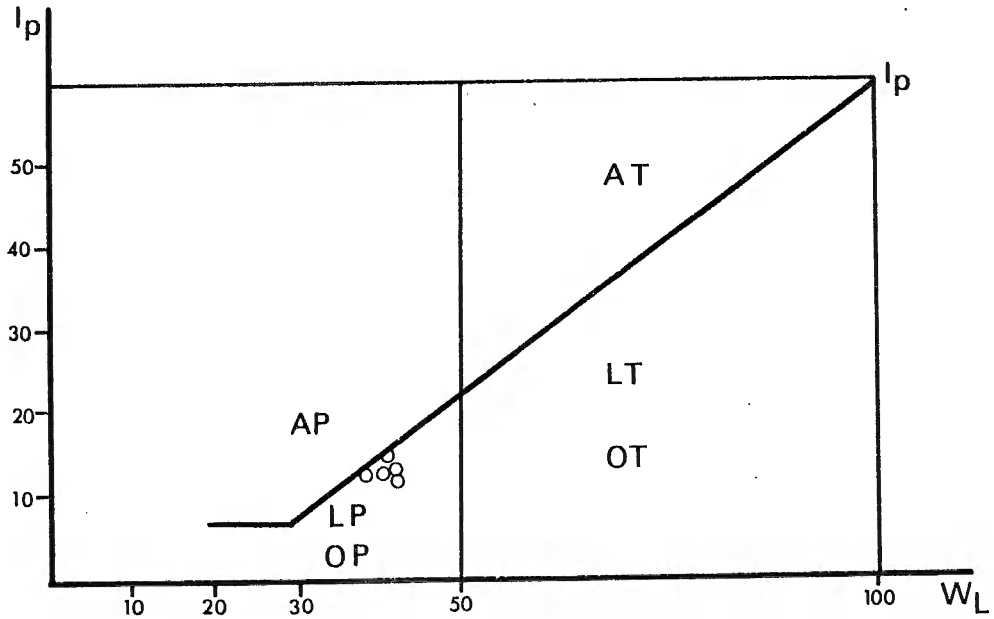


Figure II.5 : Diagramme de plasticité de Casagrande, modifié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, indiquant la plasticité des arènes étudiées.

AP : Argile peu plastique LT : Limon très plastique
 AT : Argile très plastique OP : Sol organique peu plastique
 LP : Limon peu plastique OT : Sol organique très plastique

II.3.3.4 - Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la surface spécifique d'un sol ou d'une roche. Sans s'étendre sur le principe et la technique de cette mesure qui fait l'objet d'un mode opératoire du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (AFNOR 1980), il convient de remarquer que de cet essai au bleu, complète l'analyse granulométrique et peut remplacer l'essai d'équivalent de sable, ce qui est précieux lorsqu'il est impossible de mesurer l'équivalent de sable comme, par exemple, dans le cas de l'arène de la Berthe.

Arène	Essai visuel	Essai piston	Surface spécifique $S(m^2/g)$
Le Sourn	55,50	51,20	1,75
Le Breuil	51,85	43,73	5,07
Chirac	50,20	46,50	15,05
Barraud	38,85	35,25	14,80
La Berthe	-	-	32,53

Tableau VI : Valeurs d'équivalent de sable et surfaces spécifiques des arènes étudiées déterminées par l'essai au bleu de méthylène.

II.3.3.5 - Essai Proctor Modifié.

Pour chaque arène étudiée, quatre courbes Proctor Modifié sont tracées : une courbe correspondant à l'arène naturelle, les trois autres à l'arène traitée à différentes teneurs en chaux : $C_1 = 3\%$; $C_2 = 5\%$; $C_3 = 7\%$). Chaque courbe passant par les points expérimentaux traduit la variation de la densité sèche (γ_d) en fonction de la teneur en eau $W\%$. C'est une courbe en cloche avec un maximum qui caractérise le compactage optimal : ($W_{opt.}$; $(\gamma_d)_{max.}$). Les coordonnées des points optimaux de toutes les arènes naturelles et traitées sont consignées dans le tableau VII. D'autre part, le traitement à la chaux d'un sol modifie la courbe Proctor : généralement, la teneur en eau optimale $W_{opt.}$ augmente et la densité sèche correspondante diminue (fig. II.7).

Pour ne pas revenir sur cette question, les résultats concernant les sols traités à différentes teneurs en chaux sont consignés dans le même tableau VII que ceux des arènes naturelles. Ces résultats serviront, comme on le verra au chapitre III, paragraphe III.1, à déterminer la teneur en eau W_i ainsi que la densité sèche maximale $(\gamma_d)_{max.}$ utilisées dans les essais expérimentaux.

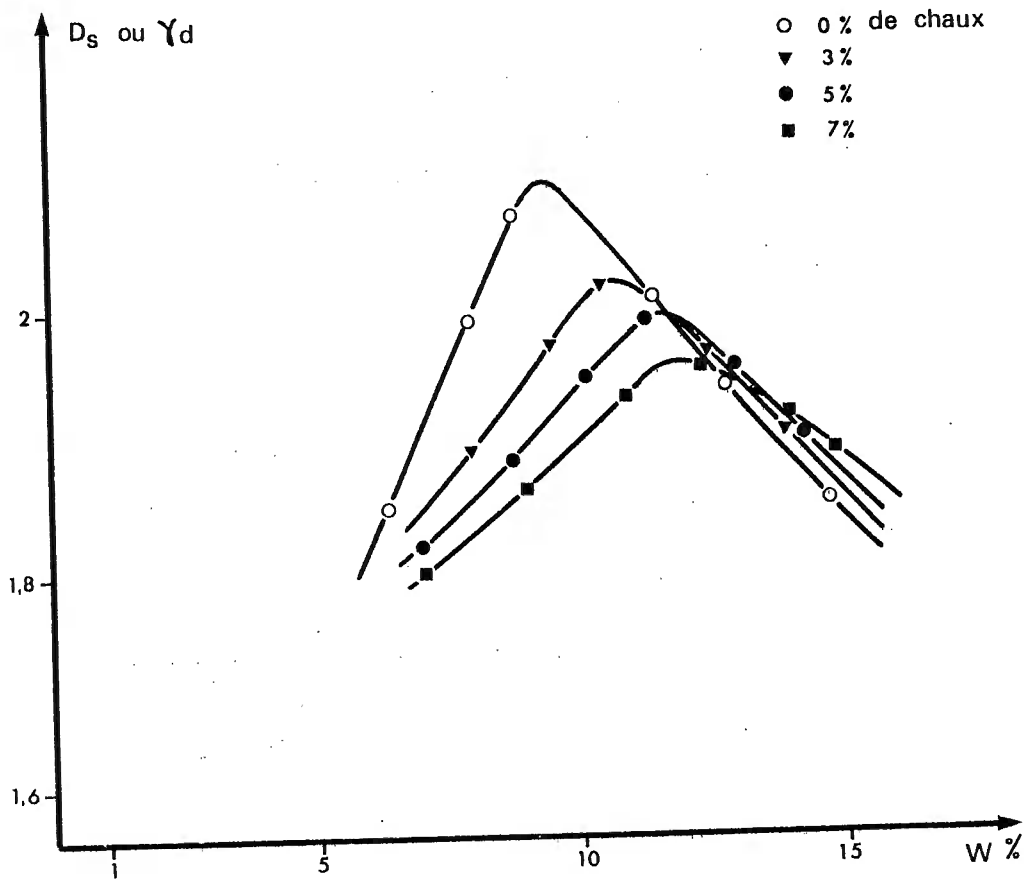


Figure II.6 : Courbes "Proctor Modifié" de l'arène Chirac, traitée à différentes teneurs en chaux, données à titre d'exemple.

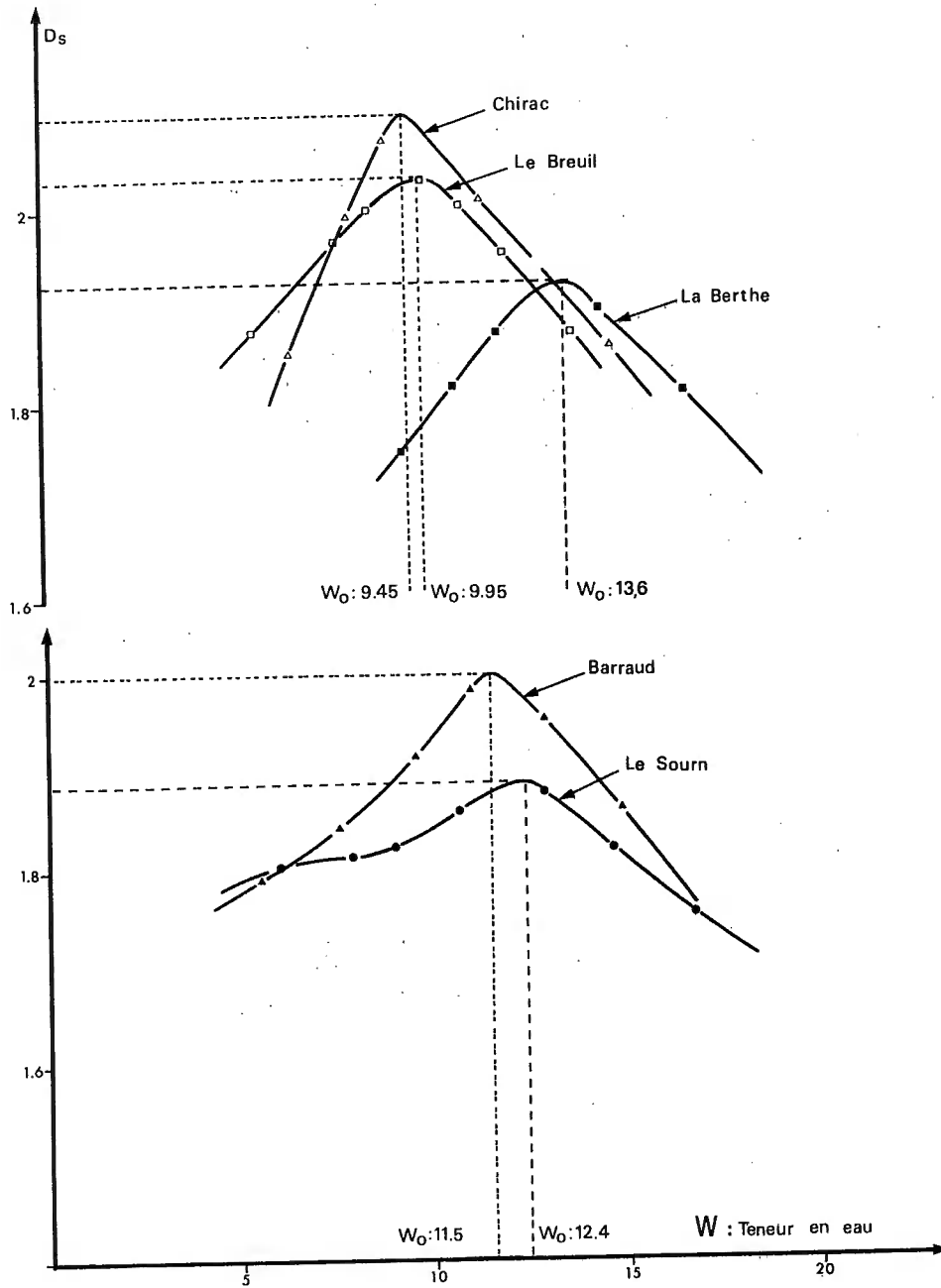


Figure II.7 : Courbes "Proctor Modifié" des arènes étudiées non traitées.

Teneur en chaux	0 %		3 %		5 %		7 %	
	W _{opt.}	(γ_d) _{max.}	W _{opt.}	(γ_d) _{max.}	W _{opt.}	(γ_d) _{max.}	W _{opt.}	(γ_d) _{max.}
Arène granitique								
Le Sourn	12,40	1,89	13,20	1,89	13,70	1,89	14,20	1,88
Le Breuil	9,95	2,03	11,60	1,96	12,45	1,95	12,70	1,92
Chirac	9,45	2,09	10,80	2,02	11,60	1,99	11,90	1,95
La Berthe	13,60	1,92	15,50	1,86	16,60	1,81	17,30	1,78
Barraud	11,50	2,00	-	-	12,90	1,95	-	-

Tableau VII : Résultats de l'essai Proctor Modifié effectué sur les arènes naturelles et traitées avec différents dosages en chaux.

II.2.4 - Classification géotechnique des arènes étudiées

Les trois caractéristiques intrinsèques prises en compte dans la classification géotechnique servant de base à la "Recommandation pour les terrassements routiers" - Fascicule 2, LCPC - SETRA, sont :

- la granularité
- l'indice de plasticité
- l'équivalent de sable.

A partir de ces trois paramètres, les arènes granitiques pourront être situées dans le cadre de la classification géotechnique.

II.3.4.1 - Granularité des arènes granitiques

La granularité est une des caractéristiques intrinsèques qui influe le plus sur le comportement d'un sol à la mise en oeuvre. Elle intervient donc en premier lieu dans la classification des sols en fonction de leurs conditions d'utilisation en remblai et en couches de forme.

Les courbes granulométriques des arènes étudiées s'inscrivent dans un fuseau très large (fig. II.3), correspondant aux classes de sols A et B.

Classe A : $\left\{ \begin{array}{l} D < 50 \text{ mm (D : diamètre du plus gros grain)} \\ \text{passant à } 80\mu > 35\% \end{array} \right.$

où se range l'arène de la Berthe.

Classe B : $\left\{ \begin{array}{l} D < 50 \text{ mm} \\ \text{passant à } 80\mu \text{ entre } 5 \text{ et } 35\% \end{array} \right.$

où se rangent les arènes du Sourn, de Chirac, du Breuil et de Barraud.

Remarque : L'arène de Barraud, très altérée et contenant environ 10,5% de particules inférieures à 2μ , peut évoluer au cours du compactage vers la classe A par suite de la fragmentation des grains altérés augmentant la partie fine du matériau au détriment des gros éléments.

II.3.4.2 - Indice de plasticité des arènes granitiques étudiées.

L'indice de plasticité (IP) est une des caractéristiques intrinsèques la plus importante pour déterminer les conditions d'emploi des arènes granitiques en construction routière. Il intervient dans la classification des sols, dans la définition des sous-classes des sols fins (classe A) et en partie des sols sableux avec fines (sous-classes B_5 et B_6).

Les valeurs des limites d'Atterberg (W_L et W_p) et de l'indice de plasticité I_p figurent dans le tableau VI.

L'arène fine "La Berthe" (classe A du point de vue granulométrique) rentre dans la sous-classe A_2 car son indice de plasticité est de 12,20 ($10 < I_p < 20$).

Les arènes du Sourn, de Chirac, du Breuil et de Barraud (classe B du point de vue granulométrique) se rangent dans la sous-classe B_6 car leur indice de plasticité est supérieur à 10.

II.3.4.3 - Equivalent de sable des arènes étudiées

L'équivalent de sable entre dans la classification des sols de la classe B pour la définition des sous-classes B_1 à B_4 caractérisées par un passant à 80μ variant de 5 à 12%. Cette dernière condition n'a été remplie par aucune arène retenue pour cette étude. Il s'ensuit que le paramètre "Equivalent de sable" n'intervient pas pour classer les différentes arènes étudiées dans le cadre de la classification géotechnique.

II.3.4.4 - Classification géotechnique des arènes d'après leur nature.

La granulométrie et la plasticité nous ont permis de situer les différents types d'arènes d'après leur nature dans la classification servant de base à la Recommandation pour les terrassements routiers - Fascicule 2 - LCPC - SETRA. (Tableau VIII)

- L'arène de la Berthe se situe dans la sous-classe A_2
- Les autres arènes se situent dans la sous-classe B_6 .

Classe	Sous-classe	Pourcentage sur 640 échantillons	Principaux types d'arènes rencontrés		
A D < 50 mm Passant à 80 μ > 35%	A1 (IP < 10)	8%	— Arène limoneuse de surface. — Arène de micaschiste et gneiss à grain fin.		
	A2 (10 < IP < 20)	18%	— Arènes de micaschistes à grain fin. — Arènes de roches basiques. — Arènes limoneuses de surface. — Arènes de granite à grain moyen (plus rarement)		
	A3 (20 < IP < 55)	2%	— Arènes de micaschistes et gneiss à grain fin. — Arènes très argileuses de roches basiques ou de granite dans le cas de mauvaises conditions de drainage ou d'hydrothermalisme.		
B D < 50 mm Passant à 80 μ compris entre 5 et 35%	Passant à 80 μ entre 5 et 12% Refus à 2 mm < 30%	B1 (ES > 35)	1%	— Arènes de granites et granodiorites à gros grain en site bien drainé — Horizon arène plus blocailles (stade peu évolué de l'altération), en site bien drainé — Arènes remaniées (lessivage) (* A noter les risques d'évolution granulométrique en cours de mise en œuvre vers les sous-classes B5 ou B6)	
		B2 (ES < 35)	1%		
		B3 (ES > 25)	2%		
		B4 (ES < 25)	1%		
	Passant à 80 μ entre 12 et 35%	B5 (IP < 10)	34%	— Arènes de granites et granodiorites • A gros grain • Plus rarement à grain moyen	En site bien drainé (buttes et flancs de coteau)
		B6 (IP > 10)	30%	— Arènes de granites et granodiorites A grain moyen Plus rarement à grain grossier — Arènes de roches basiques à gros grain (plus rarement)	Mauvaises conditions de drainage (plateau, dépressions)
C D > 50 mm Passant à 80 μ > 5%	C1 (Passant à 80 μ > 10 à 20%)	2%	Horizon arène plus blocailles Arène de granite porphyroïde		
	C2 (Passant à 80 μ < 10 à 20%) D < 250mm	1%			

TABLEAU VIII : Classification géotechnique des arènes étudiées d'après leur nature.

II.3.5 - Caractères chimiques

En plus des caractères sédimentologiques, minéralogiques et des caractéristiques géotechniques, il est nécessaire de caractériser les arènes étudiées par quelques paramètres chimiques. Les deux paramètres retenus pour ce travail sont les taux d'oxydes dits libres et la capacité d'absorption de la chaux.

II.3.5.1 - Les composés minéraux amorphes

A côté des argiles, la fraction fine des sols comporte des composés minéraux amorphes qui se trouvent sous forme de ciment entre les grains, ou d'enduits à leur surface. Ces composés du fait de leur grande surface spécifique et de leur nature non cristalline sont très réactifs : ils sont susceptibles de jouer un rôle déterminant dans les processus pouzzolaniques qui sont à la base de la stabilisation par la chaux. Leur étude du fait même de leur nature amorphe n'est pas praticable par la diffraction des rayons X. Leur examen en microscopie à balayage est possible, mais les renseignements que l'on peut en retirer restent subjectifs, parfois même incertains et demeurent uniquement qualificatifs. L'observation d'enduits à la surface des grains laissent bien supposer la présence de silice colloïdale, mais elle doit être étayée par des méthodes plus objectives.

Le dosage des oxydes dits libres des sols tels qu'il est pratiqué en agronomie peut apporter une réponse à cette question. Parmi les diverses méthodes analytiques mises au point pour doser les oxydes minéraux libérés par pédogénèse (DEB 1950, JACKSON 1956, SEGALEN 1968), la méthode de Ségalen proposée pour le dosage de la silice, de l'alumine et des oxydes de fer dits libres des sols tropicaux a été retenue parce qu'elle est couramment pratiquée au laboratoire. Son principe et la technique analytique ont été exposés en détail par l'auteur (SEGALEN, 1968). Toutefois, son application aux arènes qui sont très différentes des sols tropicaux n'est pas toujours possible : c'est le cas de l'arène gneissique de la Berthe.

- Les résultats obtenus pour les autres arènes sont consignés dans le tableau IX.

Arène	Silice libre %	Alumine libre %	Oxydes de fer libres %
Le Sourn	0,713	0,916	0,500
Le Breuil	3,021	3,090	0,939
Barraud	3,372	3,448	1,008
Chirac	1,789	1,041	1,543
La Berthe	_____	non déterminables	_____

Tableau IX : Taux des oxydes dits libres des arènes naturelles étudiées

II.3.5.2. Les besoins en chaux

Si la détermination des oxydes dits libres permet de connaître la quantité de composés minéraux très réactifs susceptibles de réagir avec la chaux au cours de la stabilisation, l'essai dit des besoins en chaux permet d'évaluer directement les quantités de chaux susceptibles de réagir rapidement avec un sol. La méthode proposée est voisine des méthodes jadis utilisées en agronomie pour déterminer le tonnage maximal d'amendements calciques qu'un sol est capable de recevoir. Le principe de la méthode utilisée consiste à satisfaire la capacité d'un sol à réagir avec la chaux par de l'eau de chaux à saturation.

La technique opératoire est la suivante :

- un gramme de sol, placé dans un récipient en téflon fermé hermétiquement en présence de 200 ml d'eau de chaux, est mis à l'étuve à 60°C.
- l'eau de chaux est renouvelée toutes les 24 heures.
- la liqueur extraite est dosée pour déterminer la quantité de chaux libre restante.
- les quantités de chaux consommée, cumulées en fonction du temps, sont portées sur un graphique.
- l'extrapolation de la partie linéaire de la courbe permet de déterminer l'ordonnée à l'origine.

La figure II.8 représente les diagrammes obtenus et indique les valeurs des ordonnées à l'origine déterminées pour les différentes arènes étudiées. Ces valeurs sont appelées indices de chaux pour la commodité de l'exposé.

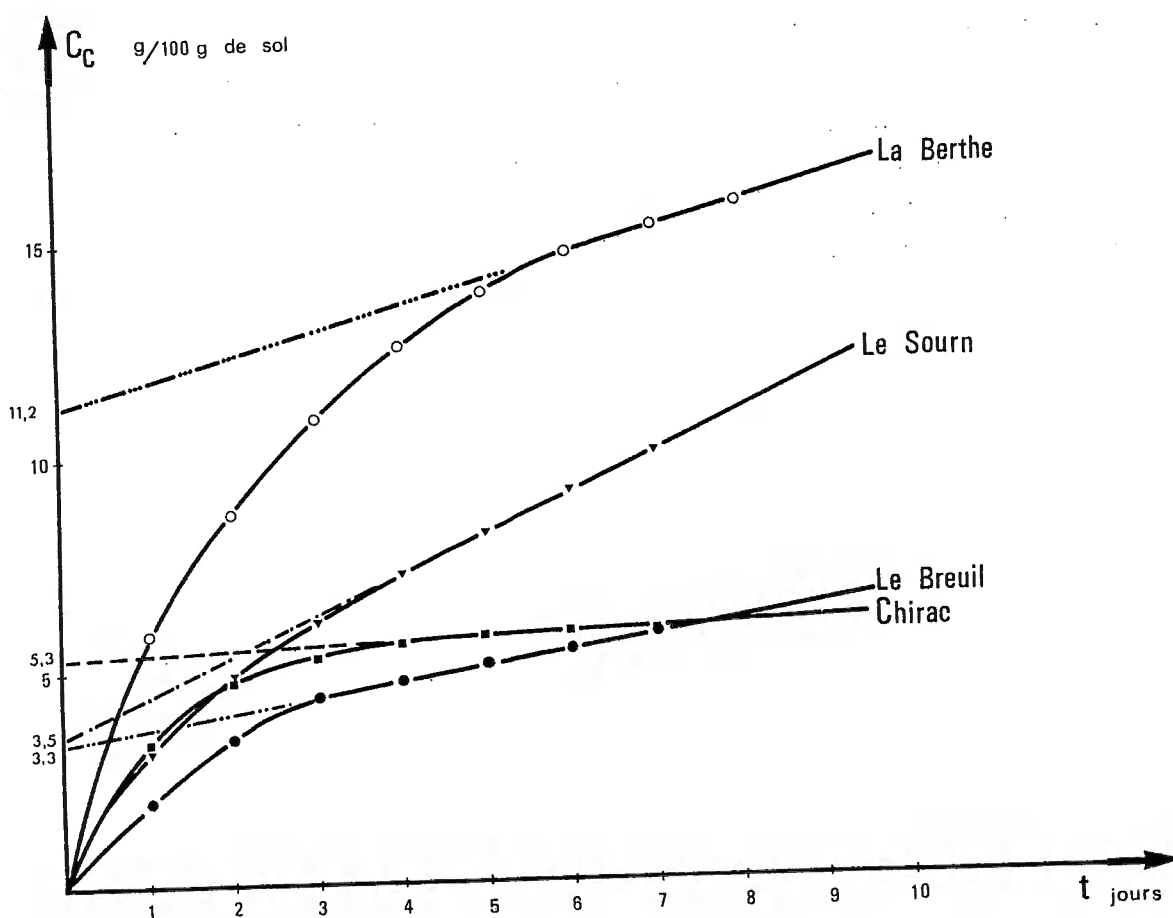


Figure II.8 : Besoins en chaux à 60°C pour les différentes arènes.

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.0 - INTRODUCTION

L'étude de la stabilisation des arènes granitiques à la chaux en vue de leur emploi en géotechnique routière, est abordée délibérément par la méthode expérimentale. Pour cela, les paramètres choisis pour suivre son évolution sont simples et en relation aussi directe que possible avec les processus fondamentaux de la stabilisation. L'analyse des résultats obtenus permettra de dégager quelques principes qui pourront servir de guides aux recherches ultérieures destinées à développer le procédé.

La voie empirique qui consiste à tester un sol ou un traitement et à constater son influence sur telle ou telle caractéristique du sol traité a déjà été abondamment pratiquée (Transportation Research Board 1976,), si pour un cas précis, l'efficacité immédiate de cette façon de faire n'est pas à démontrer elle ne permet pas, en revanche, d'aborder de façon rationnelle l'étude globale du problème.

III.1 - TECHNIQUE EXPERIMENTALE

III.1.1 - Bref rappel de la technique utilisée

La technique utilisée est à peu près semblable à celle qui a été employée pour l'étude de la stabilisation des sols de limons à la chaux (PERRET, 1977). Elle consiste à réaliser des éprouvettes cylindriques d'élanement égal à 2 de façon à atteindre une densité sèche voisine de celle de l'Optimum Proctor Modifié. Le sol naturel est traité à différentes humidités pour plusieurs dosages en chaux. A la suite d'une période de maturation, plus ou moins longue, à diverses températures, les éprouvettes sont testées au moyen d'un ausculteur dynamique, puis rompues en compression monoaxiale et enfin analysées pour connaître la quantité de chaux ayant réagi et pour vérifier la teneur en eau effective au moment de la rupture.

Cette technique expérimentale permet de connaître pour une durée de maturation donnée, à température fixée, les différentes caractéristiques d'un sol traité :

- la célérité des ondes longitudinales V_D et V_L
- la résistance à la compression simple R_C et la consommation en chaux C_C en fonction des différents paramètres du traitement :
 - humidité du sol $W\%$
 - et dosage en chaux C en g pour 100 g de sol.

III.1.2 - Dimensionnement des éprouvettes et écretage du matériau

Les arènes étant de texture sableuse, il est naturel de penser à utiliser les dimensions couramment employées pour l'étude de la résistance des éprouvettes de matériau sableux. De telles éprouvettes de dimensions : $\phi = 16$ cm (diamètre) et $L = 32$ cm (hauteur), consomment des quantités trop élevées de matériau (13 Kg environ par éprouvette) pour permettre de mener à bien une étude expérimentale avec un stock raisonnable de matériau homogène. Ceci conduit à réduire leur taille de façon à limiter la quantité de matériau homogène nécessaire (200 Kg environ) et corrélativement à procéder à un écretage de l'arène de façon que la dimension du plus grand grain soit compatible avec les dimensions de l'éprouvette. Le compromis, choisi dans le cas présent, implique un écretage des arènes à 2 mm, pour une taille d'éprouvettes ($\phi = 5$ cm ; $L = 10$ cm) ne nécessitant que 400 g. de matériau.

III.1.2.1 - Confection des éprouvettes

Le compactage des éprouvettes se fait dans une matrice en laiton ayant un diamètre intérieur de 5,1 cm ; il est assuré par la poussée d'un piston cylindrique coulissant dans la matrice.

Le mélange arène-chaux est réalisé à sec, dans les proportions voulues. Les quantités de sol et de chaux à utiliser pour confectionner un échantillon sont déterminées à partir de la courbe Proctor Modifié (arène + chaux) de la manière suivante :

Soit " W_i " la teneur en eau et " a_i " le pourcentage de chaux (par rapport à 100 g. de sol sec) prévus pour l'échantillon ; la courbe Proctor Modifié permet de calculer

La densité sèche $(\gamma_d)_i$ correspondant à " W_i ". Alors, la masse du mélange (arène + chaux) nécessaire pour fabriquer l'échantillon est :

$$A_{(g)} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H \cdot (\gamma_d)_i$$

avec D = diamètre de l'échantillon et H = hauteur de l'échantillon

or,

$$A = A_0 + C_i$$

où A_0 est la masse de l'arène naturelle nécessaire pour confectionner l'échantillon, et $C_i = a_i \times A_0/100$: c'est la masse de chaux nécessaire pour confectionner l'échantillon d'où : $A = A_0 + a_i \times A_0/100$.

$$A_0 = \frac{25 \cdot \pi}{100 + a_i} \times D^2 \times H (\gamma_d)_i$$

La valeur de " A_0 " est connue, il est aisé de calculer celle de C_i par l'intermédiaire de l'équation :

$$C_i = a_i \cdot A_0/100$$

Le matériau sec (A_0 g d'arène et C_i g de chaux) est ensuite humidifié à la teneur en eau désirée W_i . Le mélange humide ainsi obtenu est laissé au repos durant un certain temps. La signification et la détermination de ce temps de repos seront examinées au paragraphe IV.4.1. Après repos, l'arène traitée à l'humidité désirée est versée en trois couches successives, dans la matrice reposant sur un disque en laiton. Après chaque couche, on procède à un piquetage au moyen d'une tige métallique, puis à un damage léger à l'aide du piston de la presse pour s'assurer d'une répartition du compactage homogène sur toute la hauteur de l'éprouvette. Ensuite, la surface est piquetée avec la tige métallique précédemment employée afin de bien engrener les couches successives et d'éviter la formation de plans de séparation nuisibles pour la bonne tenue mécanique de l'échantillon. Enfin, l'ensemble est placé sur le plateau d'une presse hydraulique "Labotest" à anneau : le mouvement ascendant du plateau permet de compacter l'échantillon. Ce mouvement est effectué à la vitesse constante C.B.R. (1,27 mm/mn) maintenue grâce à un comparateur.

Le compactage est arrêté lorsque la distance indiquée par le comparateur est exactement de 10 cm. L'anneau indique la force nécessaire F_i . La presse est alors déchargée, la matrice retournée : le compactage de l'échantillon par l'autre bout est repris et poursuivi jusqu'à ce que l'anneau indique la force F_i . Le démoulage de l'éprouvette est effectué à la presse.

III.1.2.2 - Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes sont conservées dans des étuis cylindriques de dimensions légèrement supérieures à celles des éprouvettes et bouchées hermétiquement. Cette étanchéité est assurée par un joint torique légèrement écrasé entre l'étui et son couvercle : elle peut être complétée par un ruban adhésif.

Conservation à 20°C : la conservation des éprouvettes à 20°C se fait dans une salle à température constante réglée à 20°C.

Conservation à 40°C : les étuis sont immergés dans un bain à température constante par suite de la difficulté de réguler convenablement une étuve ordinaire à 40°C. Pour empêcher toute rentrée d'eau à l'intérieur des tubes, ces derniers sont placés dans des presses à vis qui permettent d'écraser légèrement les joints toriques et assurent une étanchéité convenable.

Conservation à 60°C : pour la conservation à 60°C, les mêmes presses sont utilisées elles sont placées dans une étuve à 60°C, la conservation en étuve étant plus pratique que dans un bain à température constante.

III.1.3 - Mesures physiques

III.1.3.1 - Mesure des résistances en compression simple

Cette mesure est effectuée sur une presse hydraulique capable de développer un effort de 60 KN. Elle est équipée d'un anneau dynamométrique comportant une aiguille de maximum permettant une lecture précise de l'effort maximal obtenu au moment de la rupture. La vitesse choisie pour l'essai est la vitesse C.B.R. (1,27 mm/mn). L'élanement égal à 2 des éprouvettes et le positionnement précis de celles-ci sur la presse, obtenu par un repérage préalable assure une rupture convenable des éprouvettes : rupture en tonneau aux jeunes âges et rupture à 45° aux âges élevés.

III.1.3.2 - Mesure de la célérité des ondes longitudinales

La mesure de la célérité des ondes longitudinales est effectuée à l'aide d'un appareillage qui comprend :

- un générateur d'ondes conçu et réalisé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- un oscilloscope.
- un compteur de temps.
- un émetteur et un capteur.

Pour assurer une bonne transmission des vibrations entre l'appareil de mesure et le matériau, les surfaces de l'échantillon sont enduites d'une graisse aux silicones n'apportant pas de modifications au matériau. La célérité des ondes longitudinales dans les éprouvettes a été systématiquement mesurée immédiatement avant leur écrasement suivant deux directions :

- l'axe de l'éprouvette à laquelle correspond la vitesse axiale V_L .
- le diamètre de l'éprouvette auquel correspond la vitesse diamétrale V_D .

Selon que le diamètre considéré est situé au milieu ou à l'extrémité de l'éprouvette, la vitesse diamétrale est notée V_{Dm} ou V_{De} .

La vitesse est obtenue en divisant la longueur axiale ou diamétrale de l'éprouvette mesurée avec précision au pied à coulisse par le temps de transit correspondant indiqué par le compteur :

$$V_L = \frac{L}{t_L} \quad \text{et} \quad V_D = \frac{D}{t_D}$$

Parmi les trois types de vitesses mesurées : vitesse axiale V_L , vitesse diamétrale au milieu de l'éprouvette V_{Dm} et vitesse diamétrale à l'extrémité de l'éprouvette V_{De} ; les vitesses diamétrales médianes V_{Dm} ont été systématiquement utilisées, car :

- l'expérience a montré qu'elles étaient les premières à pouvoir être mesurées aux jeunes âges.
- elles intéressent effectivement la région de l'éprouvette où se produit la rupture.

Dans la suite de ce mémoire, en l'absence de précisions, il s'agira bien évidemment des vitesses diamétrales médianes V_{Dm} .

III.1.4 - Dosages chimiques

Les mesures chimiques sont :

- teneur en eau des matériaux comportant de la chaux,
- détermination de la teneur en chaux libre des matériaux traités à la chaux,
- évaluation des oxydes dits "combinés" c'est-à-dire des oxydes qui sont considérés comme combinés à la chaux.

III.1.4.1 - Teneur en eau des matériaux comportant de la chaux.

Lorsqu'un échantillon est traité à la chaux, celui-ci peut se carbonater au contact de l'air au cours de la dessiccation. Cet accroissement de poids parasite vient perturber la mesure de la perte de poids due à l'évaporation de l'eau. Pour éviter cette cause d'erreur, la mesure de la teneur en eau est effectuée en plongeant l'échantillon dans du toluène et en effectuant une distillation dans un appareil à reflux semblable à celui utilisé pour la détermination de la teneur en eau des émulsions de bitume (Norme AFNOR T 60.113, 1960).

Les vapeurs de l'azéotrope eau-toluène, (ébullition à 84,1°C), chassées par la distillation, se condensent dans un réfrigérant en se séparant sous forme d'eau et de toluène recueillis dans une éprouvette graduée au fond de laquelle l'eau plus dense se rassemble. La distillation est arrêtée après 1 H 30 à 2 H. Un ménisque de séparation très net entre eau et toluène, dû à leur grosse différence d'indice de réfraction permet une lecture aisée de la quantité d'eau recueillie.

III.1.4.2 - Détermination de la teneur en chaux libre des matériaux traités à la chaux

La méthode utilisée pour déterminer la teneur en chaux libre d'un échantillon consiste à solubiliser la chaux libre par agitation dans l'eau sucrée, puis à titrer

l'alcalinité de cette solution par l'acide sulfurique en présence d'un indicateur à base de phénolphthaléine (méthode LEDUC décrite dans la Norme AFNOR 15.301 de 1946). Cette méthode ne fait intervenir qu'une durée d'agitation de 15 minutes et une concentration en sucre faible : 10%. Elle donne une valeur approximative de la chaux libre.

Des études, effectuées au Laboratoire de Génie Civil, Minéralogie et Géotechnique de Rennes par P. PERRET (1977), ont montré que pour obtenir une meilleure précision, il est nécessaire d'augmenter la concentration en sucre et le temps d'agitation. Le mode opératoire retenu et appliqué systématiquement tout le long de ce travail est le suivant : un échantillon, de 15 à 20 grammes environ de matériau traité, mais pesé avec précision, est soumis à une première agitation d'une demie heure dans 200 ml d'eau sucrée à 20% ; après décantation, un premier filtrat est recueilli. Il est ensuite soumis à une deuxième agitation d'une demie heure dans 200 ml d'eau sucrée à 20% ; après décantation, le deuxième filtrat est ajouté au premier. La solution recueillie est complétée à 500 ml par rinçage à l'eau distillée des matériaux retenus sur le filtre.

Une aliquote est dosée par l'acide sulfurique décimormal grâce à un réactif mixte constitué de 1/3 de vert de Bromocrésol à 0,1% et 2/3 de phénolphthaléine à 0,5% dilués dans l'alcool, virant du violet au bleu franc.

III.1.4.3 - Evaluation des oxydes dits "combinés"

Indépendamment de ce travail, une étude qui sera exposée par ailleurs, a conduit à la mise au point d'une technique de dosage des oxydes dits "combinés" (J. ESTEOULE, communication orale). Cette méthode a été appliquée à quelques éprouvettes d'arènes traitées à la chaux alors disponibles. Ces résultats bien que partiels, se révèlent intéressants : ils sont exposés au paragraphe III.4.

III.2 - PRESENTATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX.

III.2.0 - Introduction

La présentation des résultats expérimentaux se fera en exposant d'une manière systématique toutes les séries d'essais dont une arène a fait l'objet .

Pour chacune d'elles, les résultats seront exposés de la manière suivante :

- a - Résultats obtenus pour une série d'essais à la température de 40°C avec un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) et une humidité W_4 correspondant à l'optimum Proctor du matériau traité à la chaux. Cette série est choisie comme série de référence.
- b - Résultats obtenus à la température de 40°C lorsque le traitement varie (variation de la teneur en chaux, variation de la teneur en eau).
- c - Résultats obtenus pour le traitement type de la série de référence ($W_4 ; C_2$) pour trois températures (20°C - 40°C - 60°C).

III.2.1 - Arène Le SOURN

III.2.1.0 - Séries d'essais effectuées avec l'arène "Le Sourn"

Le tableau ci-dessous indique l'ensemble des séries d'essais effectuées sur l'arène "Le Sourn".

Arène Le Sourn		teneur en eau			
		W_1	W_2	W_4	W_5
teneur en chaux	C_1			S.C. ($W_4; C_1; T_2$)	
	C_2	S.C. ($W_1; C_2; T_2$)	S.C. ($W_2; C_2; T_2$)	S.C. ($W_4; C_2; T_1$)	S.C. ($W_5; C_2; T_2$)
				S.C. ($W_4; C_2; T_2$)	
				S.C. ($W_4; C_2; T_3$)	
C_3			S.C. ($W_4; C_3; T_2$)		

Tableau XI : Séries d'essais effectuées sur l'arène "Le Sourn", la série de référence correspondant au dosage en chaux C_2 , à l'humidité W_4 et à la température 40°C notée S.C. ($W_4; C_2; T_2$) est encadrée.

III.2.1.1 - Etude détaillée de la série de référence S.C. ($W_4; C_2; T_2$)

III.2.1.1.1 - Variation de la résistance à la compression simple R_c en fonction du temps t

La valeur de la résistance R_c d'un échantillon de matériau naturel non traité, moulé dans les mêmes conditions de compactage et d'humidité que les échantillons de la série de référence, rompu immédiatement après compactage, est de 0,16 MPa. La résistance initiale R_{c0} d'un échantillon de matériau traité (conformément aux conditions de la série de référence) atteint 0,58 MPa. A partir de cette valeur, la résistance R_c croît de manière continue en fonction du temps pour atteindre 4 MPa environ au bout de 4 mois (fig.III.1).

La croissance de la résistance n'est pas régulière, mais se fait en plusieurs phases : en effet, on peut distinguer une succession d'arcs de courbes distincts, d'allure hyperbolique. Ceci sera montré et discuté dans le chapitre suivant.

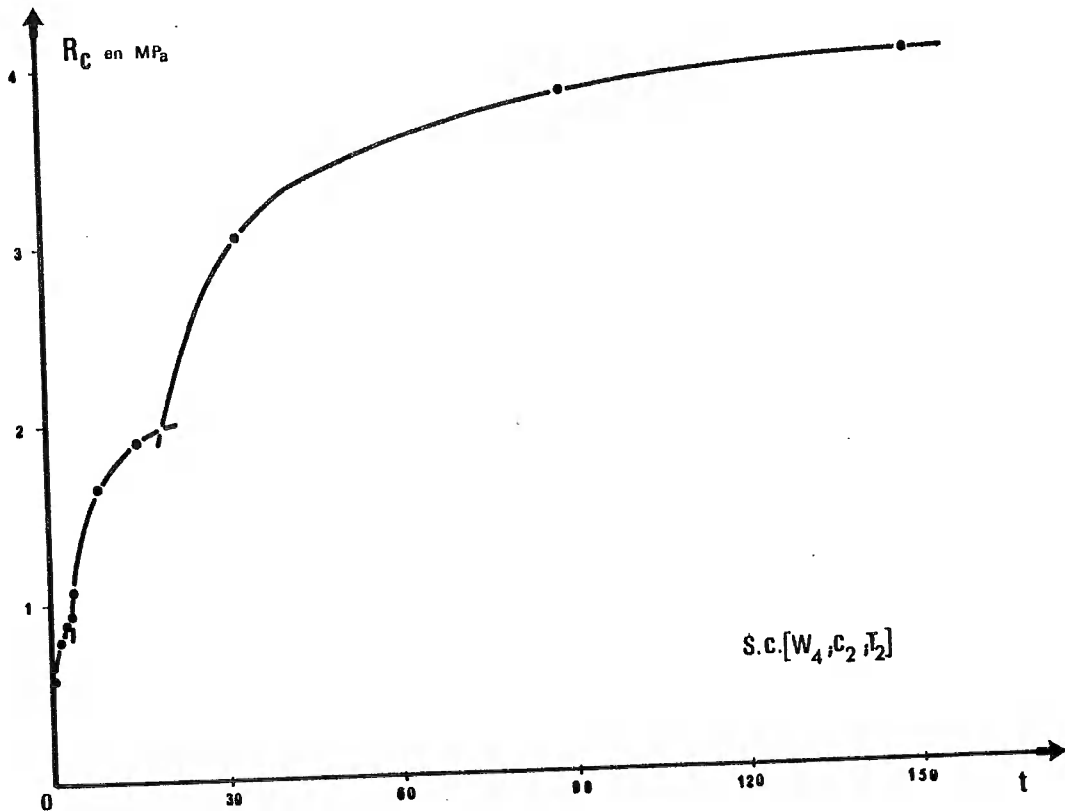


Figure III.1. Variations de la résistance mécanique en fonction du temps

De plus, un mode de représentation adéquat sera présenté et justifié. Mais, il est bon de l'utiliser dès maintenant pour exposer commodément les résultats obtenus et les analyser. Il consiste à représenter les valeurs de la variable en fonction de l'inverse du temps : les arcs hyperboliques se trouvent alors matérialisés par des droites.

La droite de régression, ajustée par la méthode des moindres carrés sur les points expérimentaux, permet d'apprécier leur bon alignement et d'obtenir aisément l'ordonnée de l'asymptote horizontale de l'hyperbole.

La figure III.2 qui correspond à la série d'essais S.C. (W₄; C₂; T₂) indique clairement que les trois arcs de courbe correspondent, après transformation de la variable t en $1/t$, à trois segments de droites. Chacun aura une expression analytique de la forme :

$$R_c = -a_i \times \frac{1}{t} + b_i$$

(a_i et b_i sont obtenus par la droite de régression).

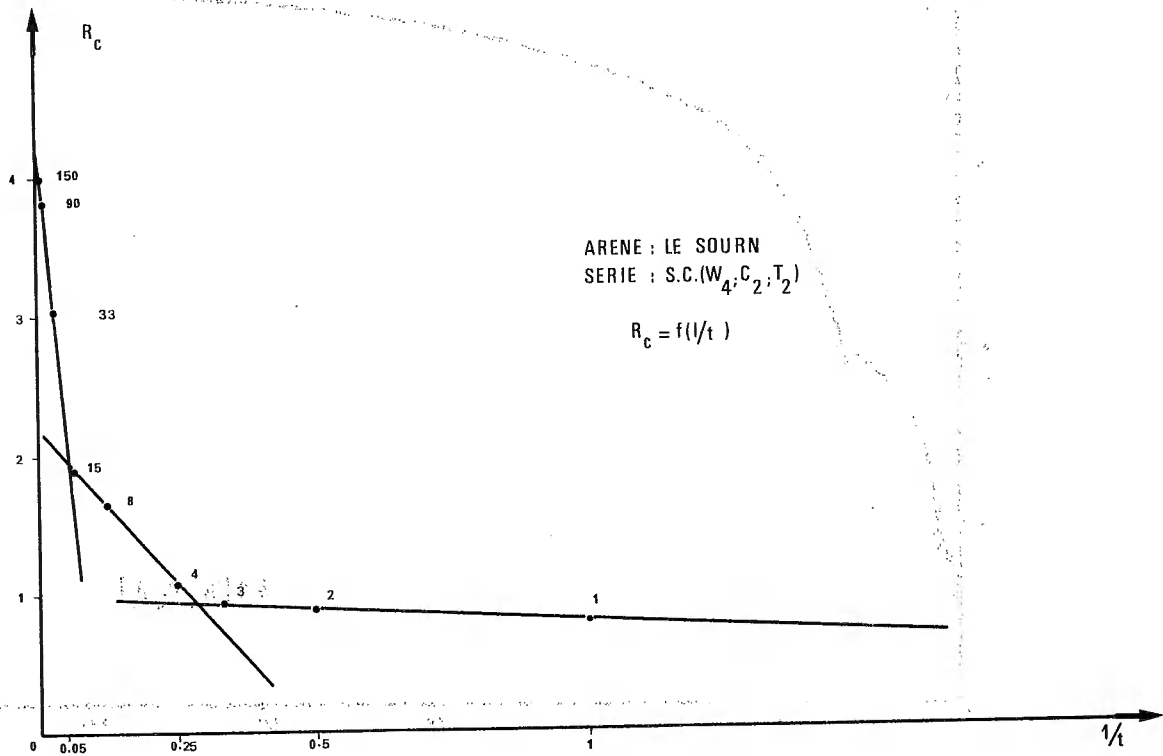


Figure III.2 : Variations de la résistance à la compression simple en fonction de l'inverse du temps.

Ainsi, dans le cas de la série de référence, les expressions analytiques s'écrivent sous la forme suivante :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_c = 0,20 \frac{1}{t} + 0,99$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c = -4,48 \frac{1}{t} + 2,20$$

$$3^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c = -40,27 \frac{1}{t} + 4,26$$

Ces expressions permettent de déterminer, de façon précise, les coordonnées $(t ; R_c)$ des points de transition qui marquent le passage d'une phase de consolidation à la suivante, on obtient :

$$\text{1er point de transition : } t_1 = 3,5 \text{ jours}$$

$$(R_c)_1 = 0,94 \text{ MPa}$$

$$\text{2ème point de transition : } t_2 = 17,36 \text{ jours}$$

$$(R_c)_2 = 1,94 \text{ MPa}$$

III.2.1.1.2 - Variation du pourcentage de chaux consommée C_c en fonction du temps

Le pourcentage de chaux consommée d'un échantillon, moulé dans les mêmes conditions de compactage et de traitement que les échantillons de la série de référence, dosé immédiatement après rupture, est de 28,43%.

A partir de cette valeur, le pourcentage de chaux consommée augmente de façon continue en fonction du temps pour atteindre 90% environ au bout de cinq mois.

Comme pour la résistance à la compression simple, la consommation en chaux en fonction du temps permet aussi d'observer des arcs de courbes, d'allure hyperbolique, qui montrent que la consommation en chaux se fait en plusieurs étapes (fig.III.3).

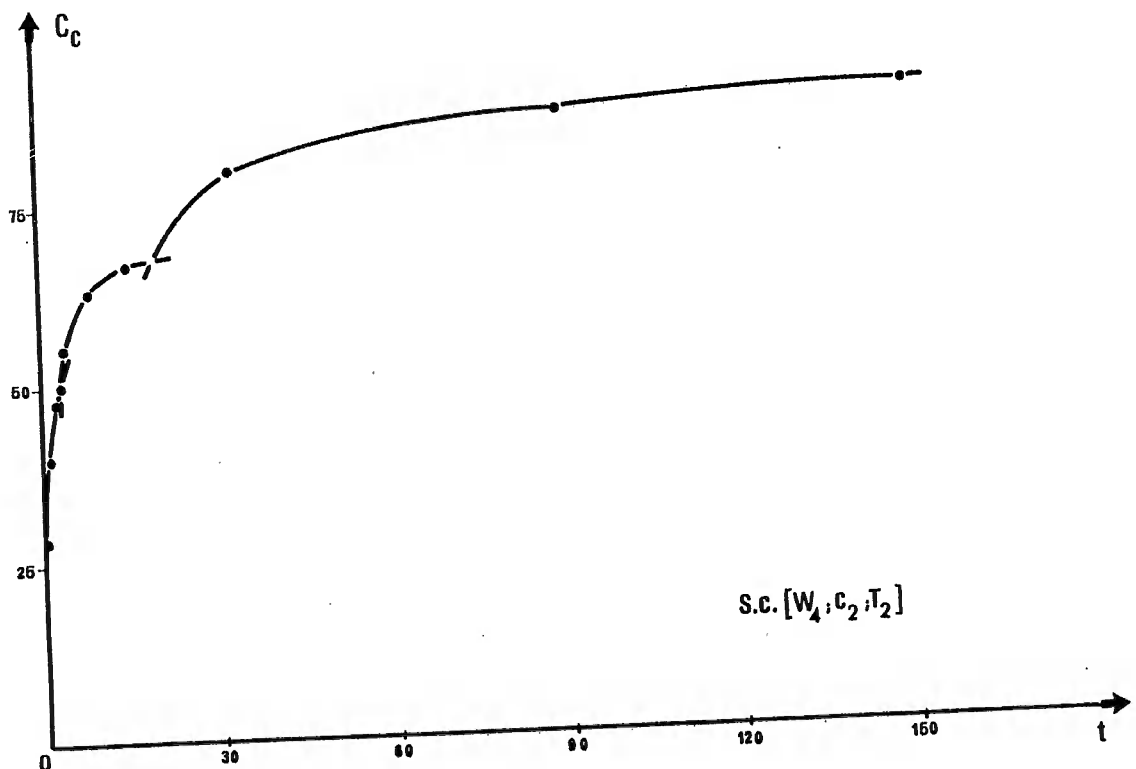


Figure III.3 : Variations de la consommation de chaux en fonction du temps.

Comme dans le cas de la résistance à la compression, on peut constater sur le diagramme transformé ($1/t ; C_c$) de la série de référence (fig.III.4) que les points expérimentaux s'alignent de façon précise : les trois arcs de courbes figurant sur le diagramme direct se transforment en trois segments de droite d'expression :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } C_c = - 15,9 \frac{1}{t} + 55,74$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } C_c = - 63,04 \frac{1}{t} + 71,25$$

$$3^{\text{ème}} \text{ phase : } C_c = - 403,38 \frac{1}{t} + 92,11$$

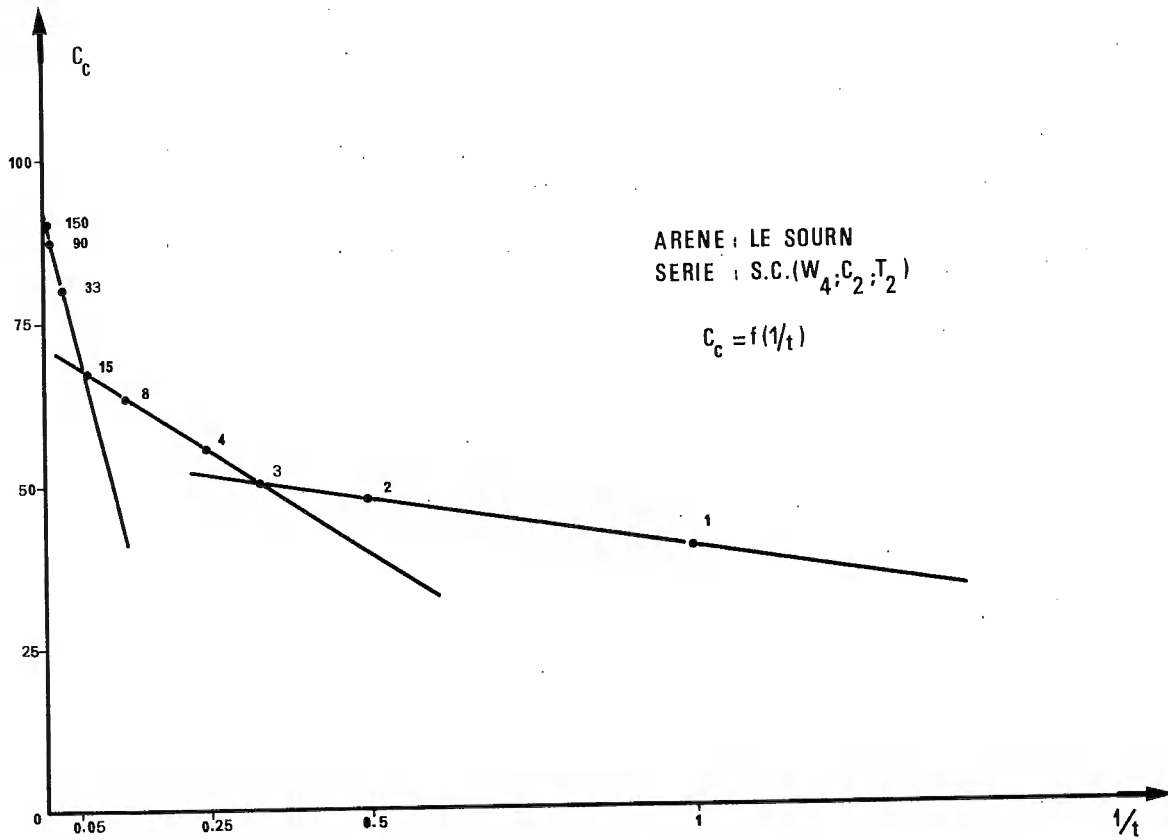


Figure III.4 : Variations de la consommation de chaux en fonction de l'inverse du temps.

On peut déterminer de façon précise, grâce à ces expressions analytiques, les coordonnées des points de transition entre les phases successives. On trouve :

1er point de transition $t_1 = 3,04$ jours
 $(C_c)_1 = 50,51\%$

2ème point de transition $t_1 = 16,67$ jours
 $(C_c)_2 = 67,60\%$

III.2.1.1.3. Variation de la célérité des ondes longitudinales en fonction du temps t

L'évolution de la célérité des ondes longitudinales en fonction du temps a été étudiée suivant deux directions :

- suivant l'axe de l'échantillon, elle est notée V_L
- suivant le diamètre médian, elle est notée V_D .

Les valeurs V_L et V_D d'un échantillon de matériau naturel non traité, moulé dans les mêmes conditions de compactage et de traitement que les échantillons de la série de référence, ainsi que les valeurs initiales V_{L0} et V_{D0} d'un échantillon de matériau traité (selon les conditions de la série de référence) n'ont pu être déterminées par suite de la fragilité et de la friabilité des surfaces externes de l'échantillon aux jeunes âges. Ces mesures sont devenues possibles après huit jours de consolidation ($V_L = 573$ m/s et $V_D = 1220$ m/s). A partir de cet âge, la croissance de V_L et de V_D en fonction du temps est continue et, au bout de cinq mois, elle atteint les valeurs de 1912 m/s pour V_L et de 1913 m/s pour V_D (fig.III.5)

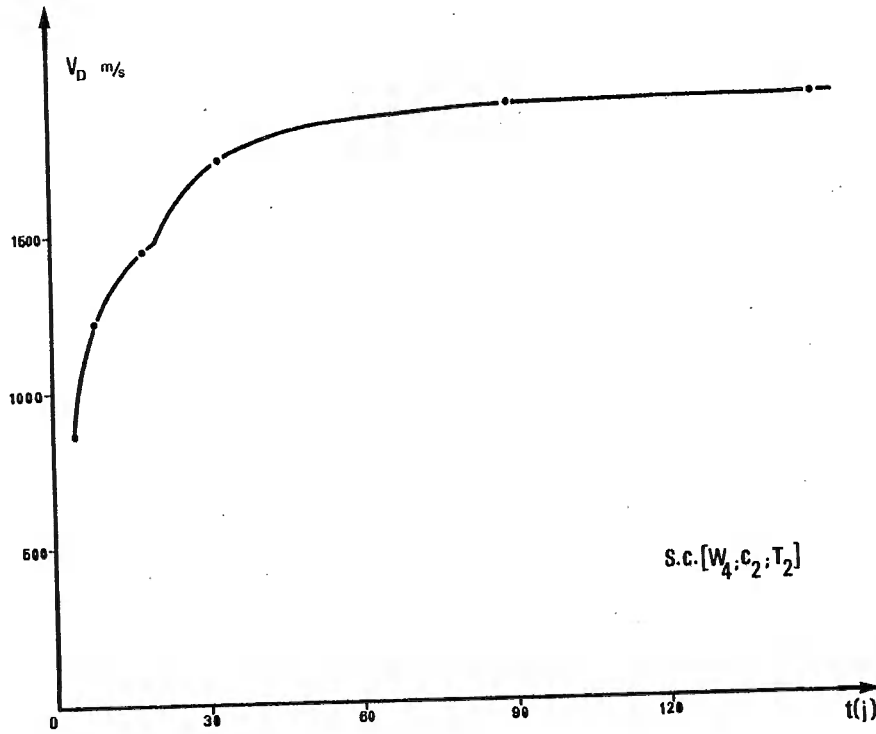


Figure III.5 : Variations de la célérité des ondes longitudinales V_D en fonction du temps.

Si l'on considère les vitesses diamétrales plus représentatives de l'état du matériau dans la zone de rupture, on constate que la courbe de V_D , en fonction du temps, est formée de deux arcs de courbes, d'allure hyperbolique, dont les expressions analytiques obtenues par ajustement des segments de droite dans le diagramme $(V_D, 1/t)$ figurent ci-dessous :

première phase : non observée

$$\text{deuxième phase : } V_D = - 3527,66 \frac{1}{t} + 1727,68$$

$$\text{troisième phase : } V_D = - 7714,87 \frac{1}{t} + 1973,97$$

Ces expressions permettent de calculer les coordonnées $(t$ et $V_D)$ du point de transition, on obtient :

$$t = 17 \text{ jours}$$

$$V_D = 1520,18 \text{ m/s}$$

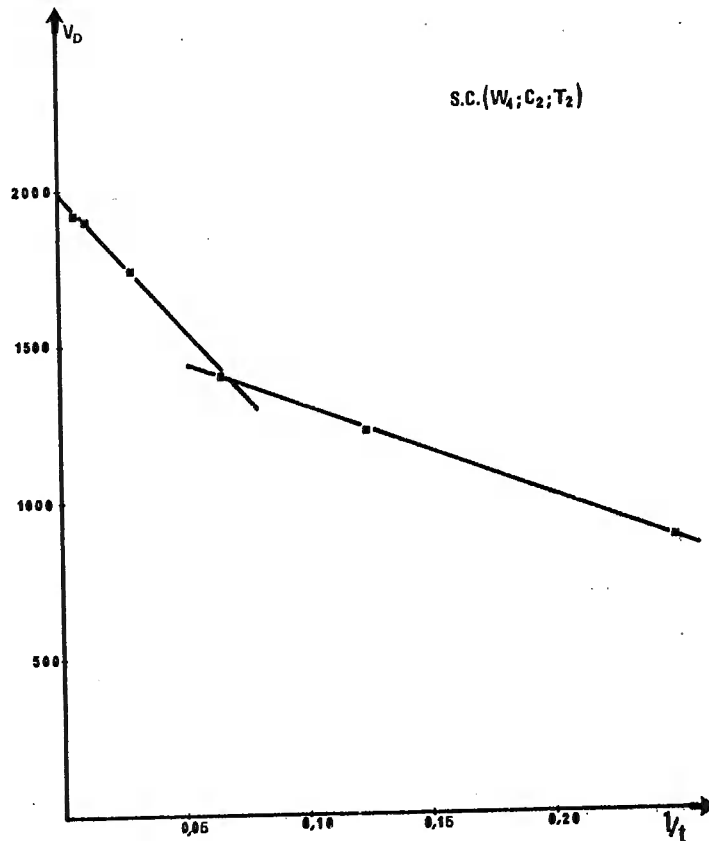


Figure III.6 : Variations de la célérité des ondes longitudinales en fonction de l'inverse du temps.

III.2.1.1.4 - Variation du rapport R_c/C_c en fonction du temps t

Le rapport R_c/C_c est calculé à partir des valeurs correspondantes de la résistance à la compression simple R_c et du pourcentage de chaux consommé C_c .

Dans la série de référence, la valeur à l'origine du rapport R_c/C_c est de 0,02, Après une phase initiale de deux jours durant laquelle le rapport R_c/C_c reste voisin de 0,02, la courbe représentative de R_c/C_c en fonction du temps est formée de deux arcs, d'allure hyperbolique, d'expressions analytiques :

1ère phase : $R_c/C_c = \text{constante} = 0,02$

2ème phase : $R_c/C_c = 0,05 \frac{1}{t} + 0,03$

3ème phase : $R_c/C_c = 0,28 \frac{1}{t} + 0,05$

qui permettent de calculer les points de transition, on trouve :

1er point de transition : $t_1 = 4$ jours

$$(R_c/C_c)_1 = 0,02$$

2ème point de transition : $t_2 = 15,62$ jours

$$(R_c/C_c)_2 = 0,03$$

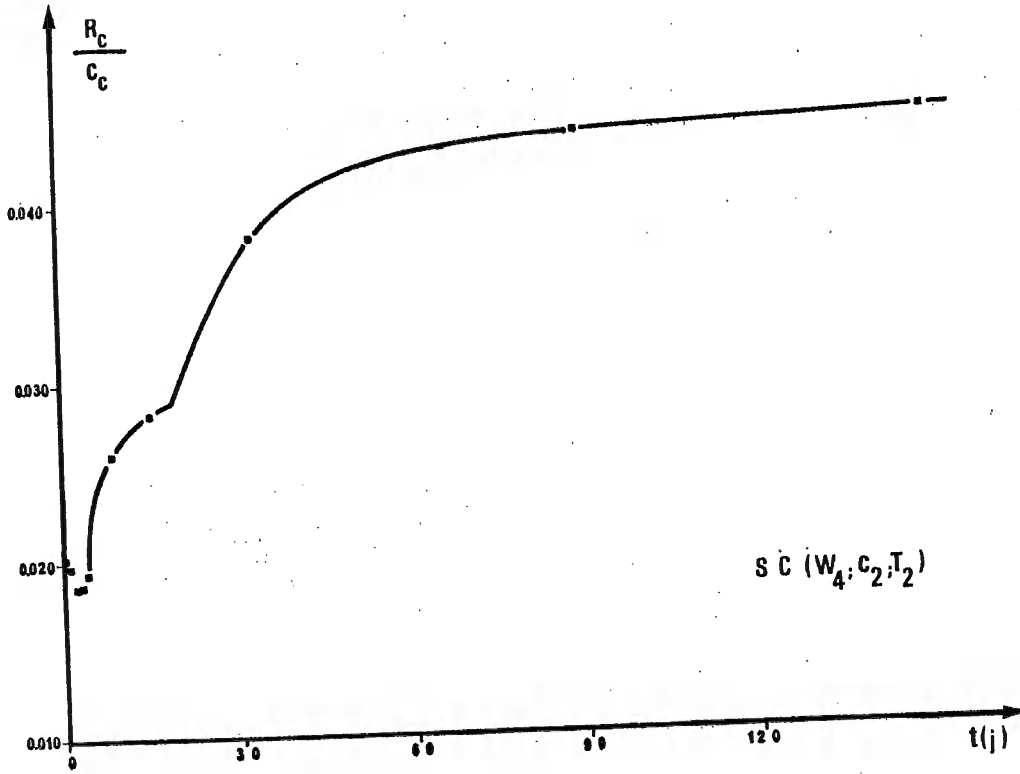


Figure III.7 : Variations du rapport R_C/C_C en fonction du temps.

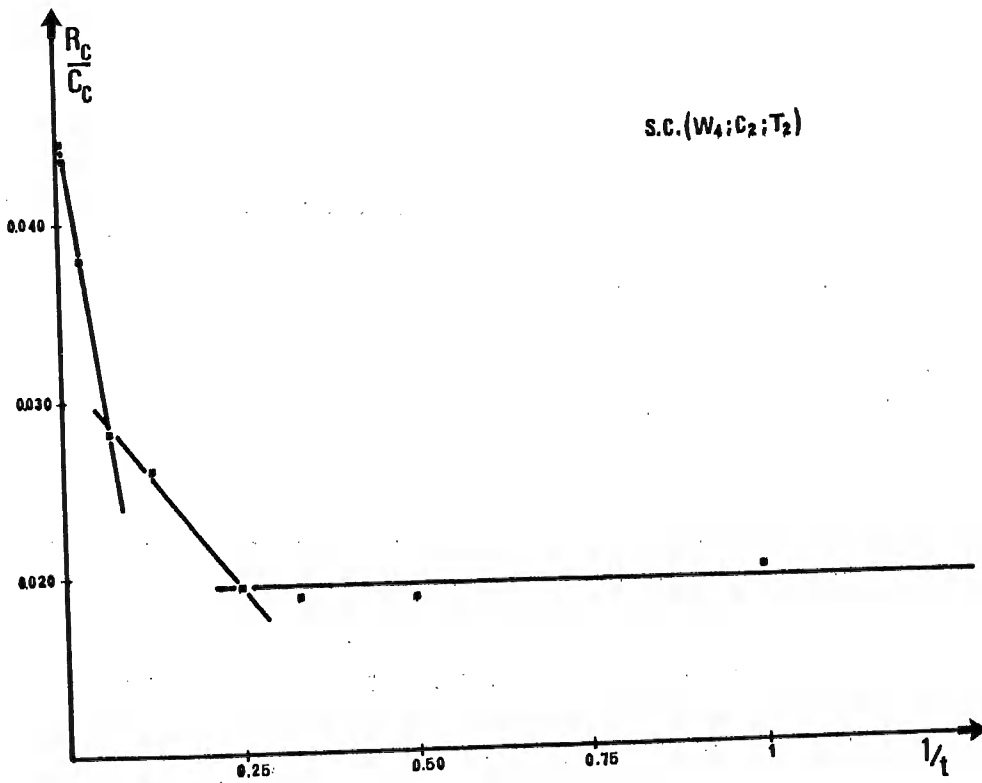


Figure III.8 : Variations du rapport R_C/C_C en fonction de l'inverse du temps.

En résumé, cette série d'essais permet de constater que les paramètres mécaniques (R_c, V_D) évoluent de pair avec la consommation de chaux. On peut observer trois phases dont les points de transition se situent respectivement à 3 jours et à 17 jours. Le bon alignement des points expérimentaux sur les diagrammes transformés indique, comme cela sera démontré dans le chapitre suivant que les phénomènes se déroulent par une succession d'arcs de courbes d'allure hyperbolique, et qu'on peut les exprimer sous la forme générale :

$$X = - \frac{a}{t} + b$$

III.2.1.2. Influence du traitement

L'influence des deux facteurs principaux qui contrôlent la stabilisation d'un sol par la chaux va être examinée successivement en commençant par celle du dosage en chaux qui est le facteur déterminant, en particulier du point de vue économique. L'influence de la teneur en eau au moment du traitement sera examinée ensuite.

III.2.1.2.1. Influence du dosage en chaux

Pour apprécier l'influence du dosage en chaux, trois séries d'essais ont été réalisées. La série de référence (dosage en chaux : $C_2 = 5\%$) qui constitue la série médiane, est encadrée par une première série comportant un dosage en chaux inférieur : $C_1 = 3\%$ et par une seconde série comportant un dosage en chaux supérieur : $C_3 = 7\%$, les autres facteurs demeurant constants. Il convient toutefois de rappeler que W_4 , qui correspond à l'Optimum Proctor Modifié du matériau traité, n'est pas rigoureusement constant, mais varie légèrement avec le dosage en chaux.

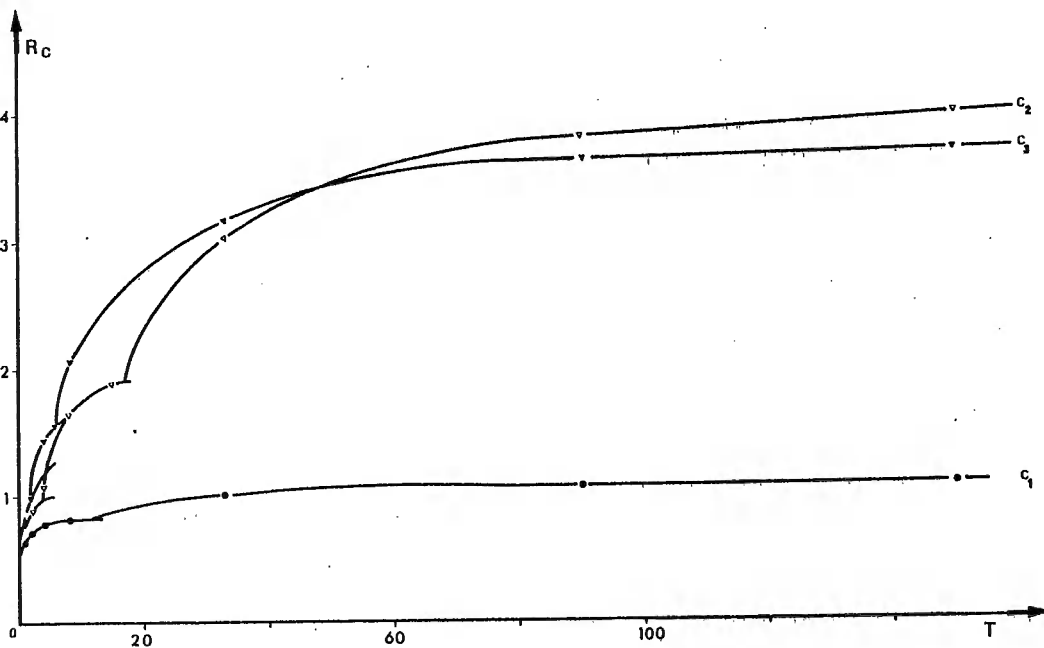


Fig. III.9 : Variations de la résistance mécanique en fonction du temps pour différents teneurs en chaux ; (Arène du Sourn)

La figure III.9 montre l'accroissement des résistances obtenues par augmentation du dosage en chaux. Il apparaît que le gain de résistance à tout instant lorsqu'on passe du dosage $C_1 = 3\%$ au dosage $C_2 = 5\%$, ne se poursuit pas lorsque l'on passe du dosage $C_2 = 5\%$ à $C_3 = 7\%$. Dans ce cas, aux âges ultimes, les résistances obtenues pour le dosage C_2 avec l'humidité correspondant au Proctor Modifié relatif au dosage C_2 deviennent même supérieures à celles obtenues avec le traitement C_3 . Le diagramme transformé permet de faire les mêmes constatations : s'il est de lecture moins immédiate, il a cependant l'avantage d'indiquer directement les résistances maximales susceptibles d'être atteintes pour chacune des différentes phases des trois séries d'essais. (fig. III.10).

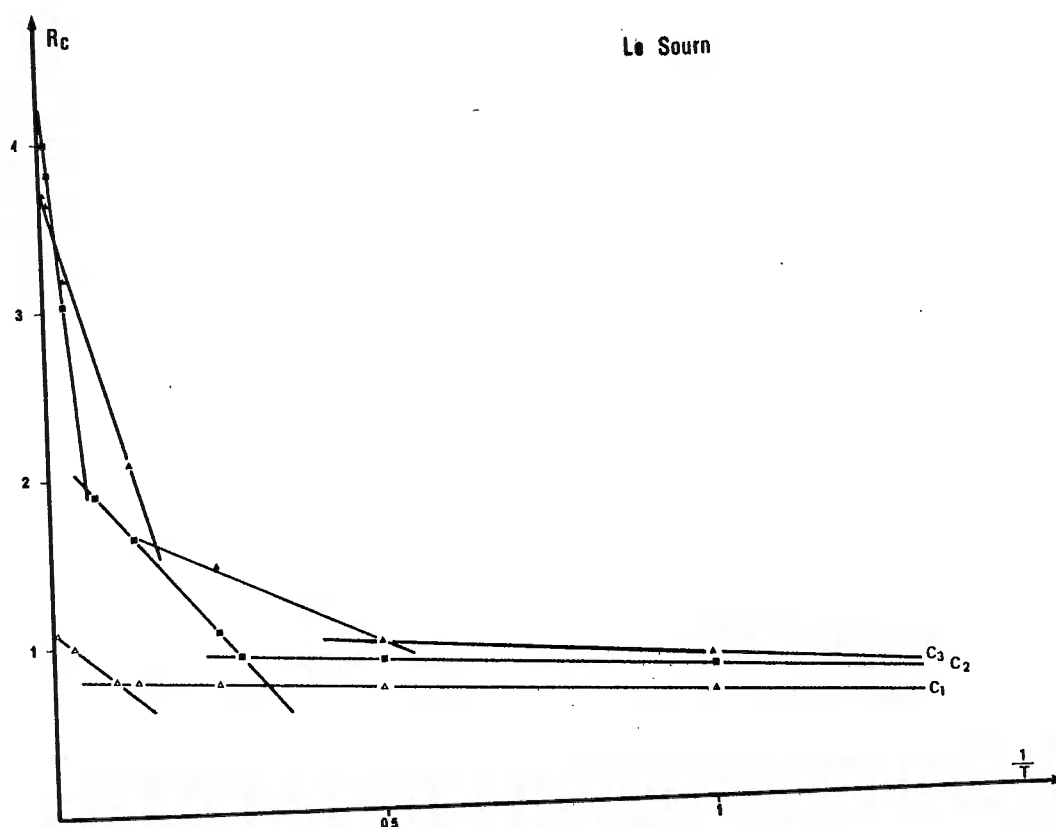


Fig. III.10 : Variations de la résistance mécanique en fonction de l'inverse du temps, pour différentes teneurs en chaux.

- Lorsqu'on examine des séries d'essais à teneur en chaux constante, il est indifférent d'exprimer celle-ci de façon relative en pourcentage de la quantité de chaux mise en oeuvre ou de façon absolue en grammes de chaux par 100 grammes de sol sec, il n'en va plus de même lorsque la variable est la teneur en chaux.

- Si l'on considère les consommations absolues en chaux, on constate évidemment que les consommations ultimes sont d'autant plus élevées que le dosage initial est important. De même, si l'on considère les consommations relatives, on constate que dans le premier temps de la stabilisation elles sont d'autant plus élevées que le dosage en chaux initial est faible

puis elles tendent vers des valeurs voisines. Si l'on examine plus précisément les consommations maximales théoriques pour chacune des phases, $C_{C\infty}$, on constate comme l'indique le tableau XII qu'il existe une corrélation entre celles-ci et le dosage initial C . Si cela constitue une évidence pour la dernière phase de stabilisation, comme cela a été constaté plus haut, il est toutefois utile de noter que cette corrélation subsiste pour les quantités de chaux consommées dans les premières et les deuxième phases de la stabilisation. Ces corrélations peuvent s'exprimer par les équations des droites ajustées sur les points expérimentaux :

pour la première phase, $C_C = 0,13 C + 1,65$
 pour la deuxième phase, $C_C = 0,36 C + 1,43$
 pour la troisième phase, $C_C = 0,96 C - 0,71$.

Dosage initial en chaux	1ère phase	2ème phase	3ème phase
$C_1 = 3\%$	1,96	2,53	-
$C_2 = 5\%$	2,47	3,16	4,09
$C_3 = 7\%$	2,48	3,96	6,01

Tableau XII. Valeurs des consommations ultimes de chacune des phases en fonction du dosage initial exprimés en g de chaux pour 100 g de sol sec.

- Les célérités des ondes longitudinales n'ont pu être mesurées que sur les deux séries : S.C. ($W_4 ; C_2 ; T_2$) et S.C. ($W_4 ; C_3 ; T_2$) correspondant aux dosages les plus élevés en chaux (5% et 7%). Toutefois, leur étude graphique ne permet pas d'observer différentes phases dans l'augmentation des vitesses soniques au cours du vieillissement. De plus, les points figuratifs de l'une et de l'autre phase ne constituent pas deux ensembles nettement distincts, mais peuvent être confondus en une seule population.

Si l'on compare les valeurs des résistances mécaniques R_C à celles de la consommation de chaux C_C en fonction du dosage initial en chaux, on obtient le diagramme de la figure III.11. Il permet de constater que durant la première phase, quel que soit le dosage en chaux le rendement R_C/C_C est sensiblement constant. Il montre, en outre, que les points représentatifs relatifs à la 2ème phase s'alignent également avec une bonne corrélation. Le rapport R_C/C_C pour le dosage $C_2 = 5\%$ est légèrement supérieur à celui de $C_3 = 7\%$ comme cela apparaissait sur le diagramme de la figure III.9 ($R_C = f(t) ; C_1 ; C_2 ; C_3$). Il est également important de remarquer qu'un dosage en chaux faible ne permet pas à la deuxième phase de stabilisation dont le rendement est beaucoup plus important que celui de la première, de se développer par suite du manque

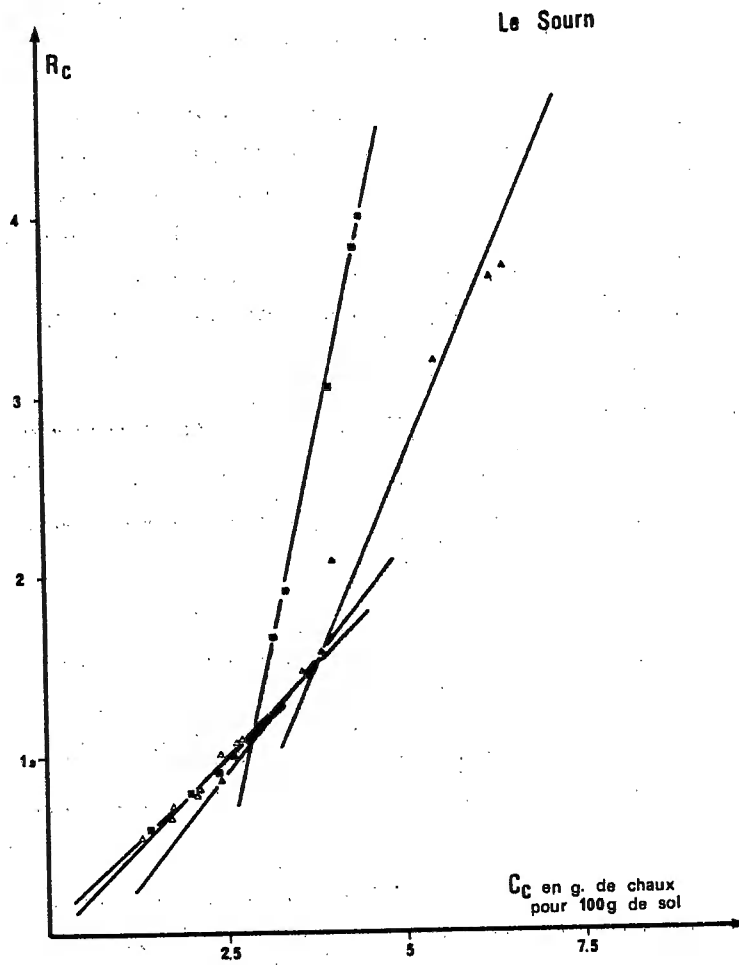


Fig.III.11 : Variations de la résistance à la compression simple R_C en fonction de la consommation de chaux C_C , pour différents dosages en chaux.

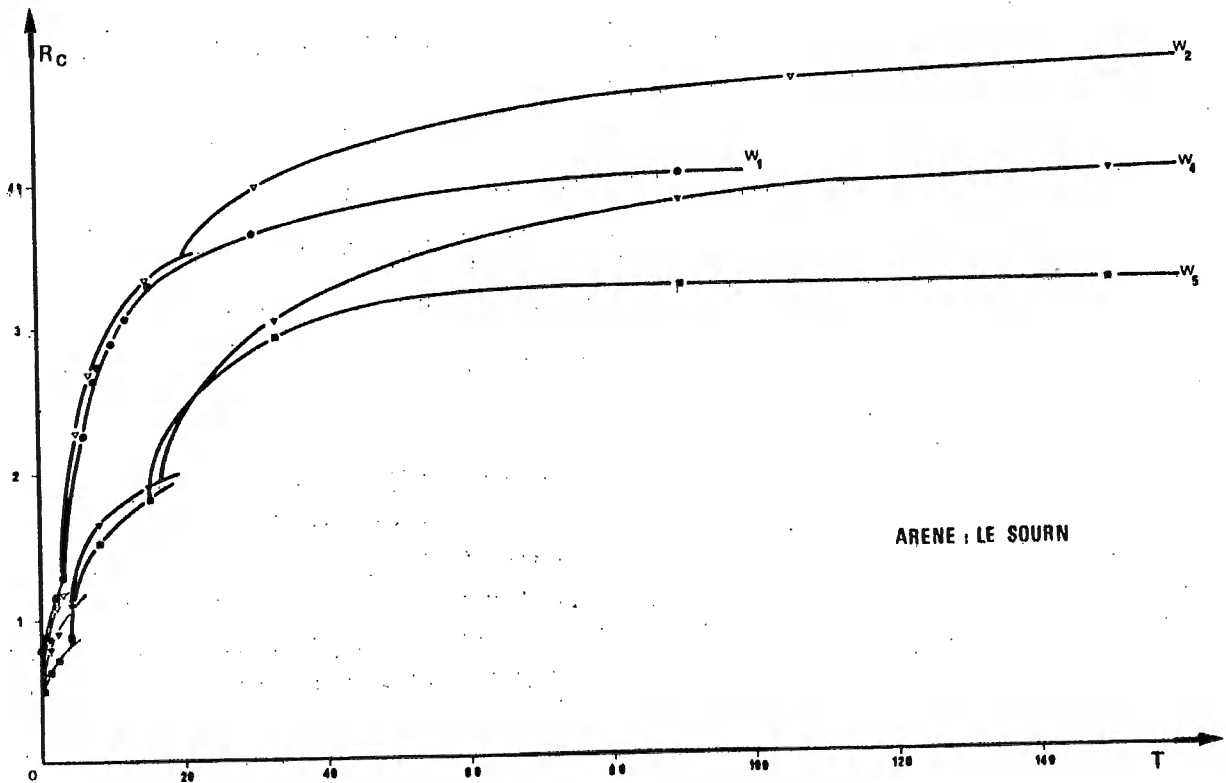


Fig. III.12 : Variations de la résistance à la compression simple en fonction du temps, pour différentes humidités.

de chaux. Cette question sera réexaminée dans le chapitre IV. L'expression analytique des droites de régression ajustées sur les points expérimentaux se trouve résumée dans le tableau XIII.

En résumé, on observe que, pour tous les dosages en chaux, aussi bien du point de vue des résistances mécaniques que du point de vue des consommations en chaux, la stabilisation s'effectue par étapes. L'accroissement des résistances mécaniques en fonction du dosage en chaux se stabilise à partir de $C_2 = 5\%$. Par contre, les célérités des ondes longitudinales mesurées seulement aux dosages élevés en chaux ne permettent ni d'observer des phases distinctes, ni un effet sensible du dosage sur les célérités des ondes longitudinales mesurées.

Dosage initial	1ère phase	2ème phase
$C_1 = 3\%$	$R_c = 2,01 C_c - 1,66$	-
$C_2 = 5\%$	$R_c = 1,80 C_c - 6,17$	$R_c = 9,08 C_c - 415,6$
$C_3 = 7\%$	$R_c = 2,55 C_c - 39,89$	$R_c = 4,60 C_c + 190,3$

Tableau XIII. Influence du dosage initial en chaux sur l'accroissement des résistances R_c en fonction de la consommation en chaux C_c .

III.2.1.2.2. Influence de l'humidité

L'influence de l'humidité du sol traité a été étudiée avec un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) pour quatre humidités différentes :

- W_1 : humidité inférieure de 1% à celle de l'O.P.M. du sol non traité
- W_2 : humidité de l'Optimum Proctor Modifié du sol non traité
- W_4 : humidité de l'Optimum Proctor Modifié du sol traité
- W_5 : humidité supérieure de 1,4% à celle de l'O.P.M. du sol traité.

Aucune série n'a été réalisée avec l'humidité W_3 comprise entre celles des Optimums Proctor Modifié des sols non traité et traité.

L'influence de l'humidité sur les résistances mécaniques est illustrée sur le diagramme de la figure III.12. Toutes ces séries d'essais confirment l'existence des trois phases déjà observées. D'autre part, on constate que les résistances sont d'autant plus élevées que l'humidité du sol est faible. De façon plus précise, si l'on considère les résistances maximales susceptibles d'être atteintes par chacune des phases on constate que, à partir d'une teneur en eau avoisinant l'Optimum Proctor Modifié, les résistances mécaniques décroissent en fonction de la teneur en eau, d'une façon quasi-linéaire.

- Si d'une manière analogue, on représente les consommations en chaux, l'existence des trois phases de stabilisation est confirmée pour toutes les séries. Par contre, on constate que des variations de l'humidité n'ont pas d'influence nette sur la consommation en chaux (fig. III.13).

- La mesure des célérités des ondes longitudinales V_D n'a pas été effectuée de façon systématique sur les séries à humidité variable,

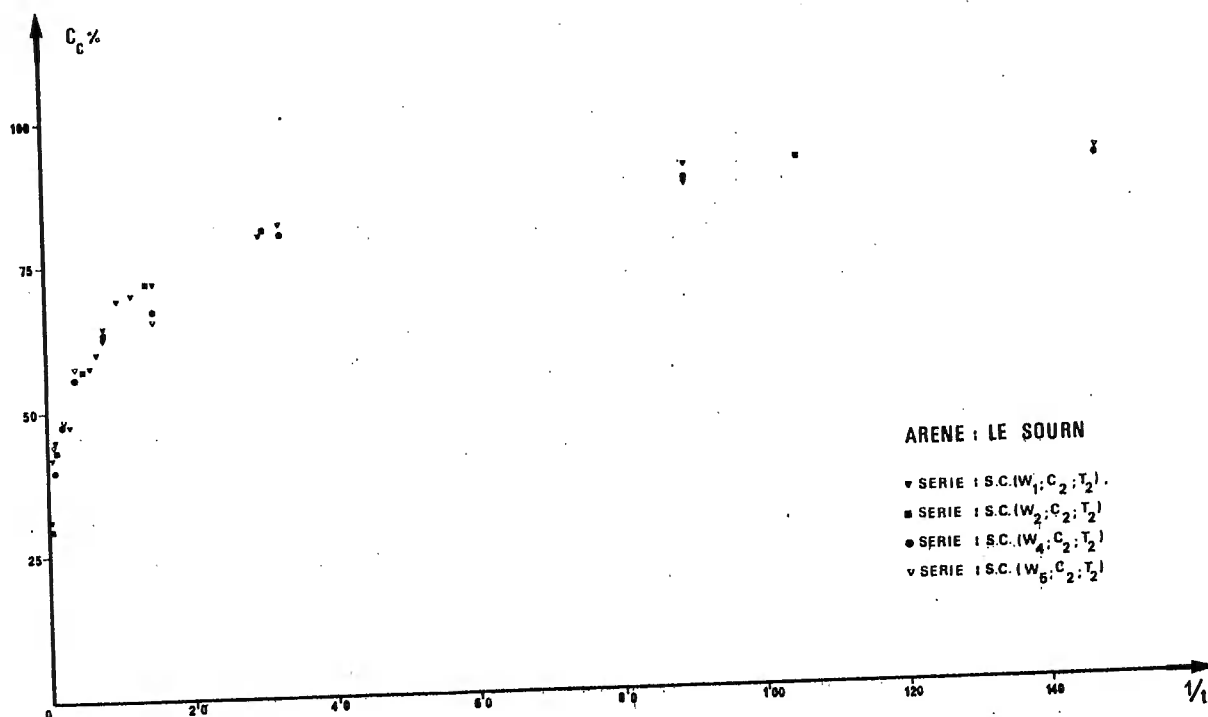


Fig. III.13 : Variations de la consommation de chaux en fonction du temps pour différentes humidités,

III.2.1.3. Influence de la température

L'influence de la température a été étudiée sur trois séries d'essais effectuées sur un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) à l'humidité correspondant à l'Optimum Proctor Modifié du sol traité à trois températures différentes 20°C, 40°C et 60°C.

- Comme pour la série de référence effectuée à 40°C, on constate que l'accroissement des résistances mécaniques se fait par étapes. L'élévation de température accélère fortement les progrès de la stabilisation. C'est ainsi que les résistances atteintes à 7 jours à 60°C correspondent à celles qui seraient atteintes en 30 jours à 40°C et 275 jours à 20°C. (Fig.III.14).

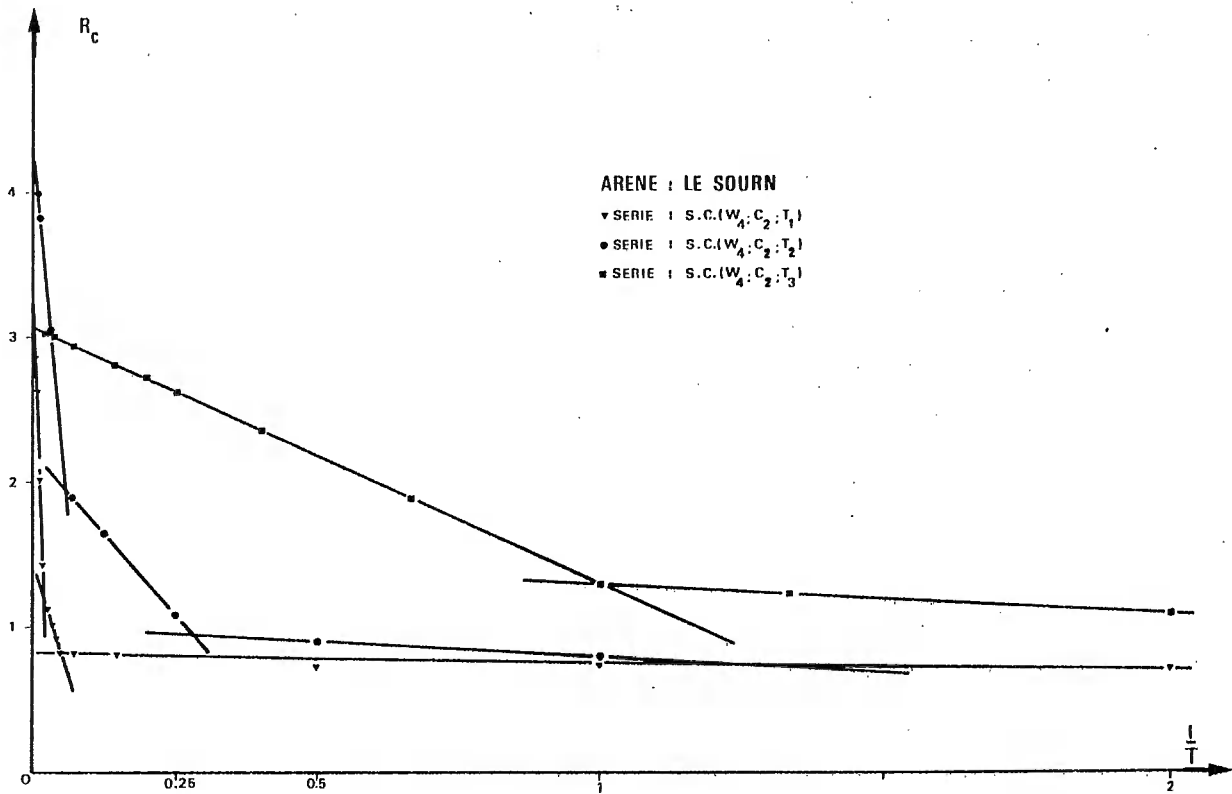


Fig. III.14 : Influence de la température sur les résistances R_C en fonction de l'inverse du temps.

Il est également très instructif de comparer les valeurs des résistances mécaniques R_C à celles de la consommation de chaux C_C pour les trois températures étudiées, on obtient le diagramme représenté sur la figure III.15. Ce diagramme permet de constater que durant la première phase, le rapport R_C/C_C est constant quelle que soit la température.

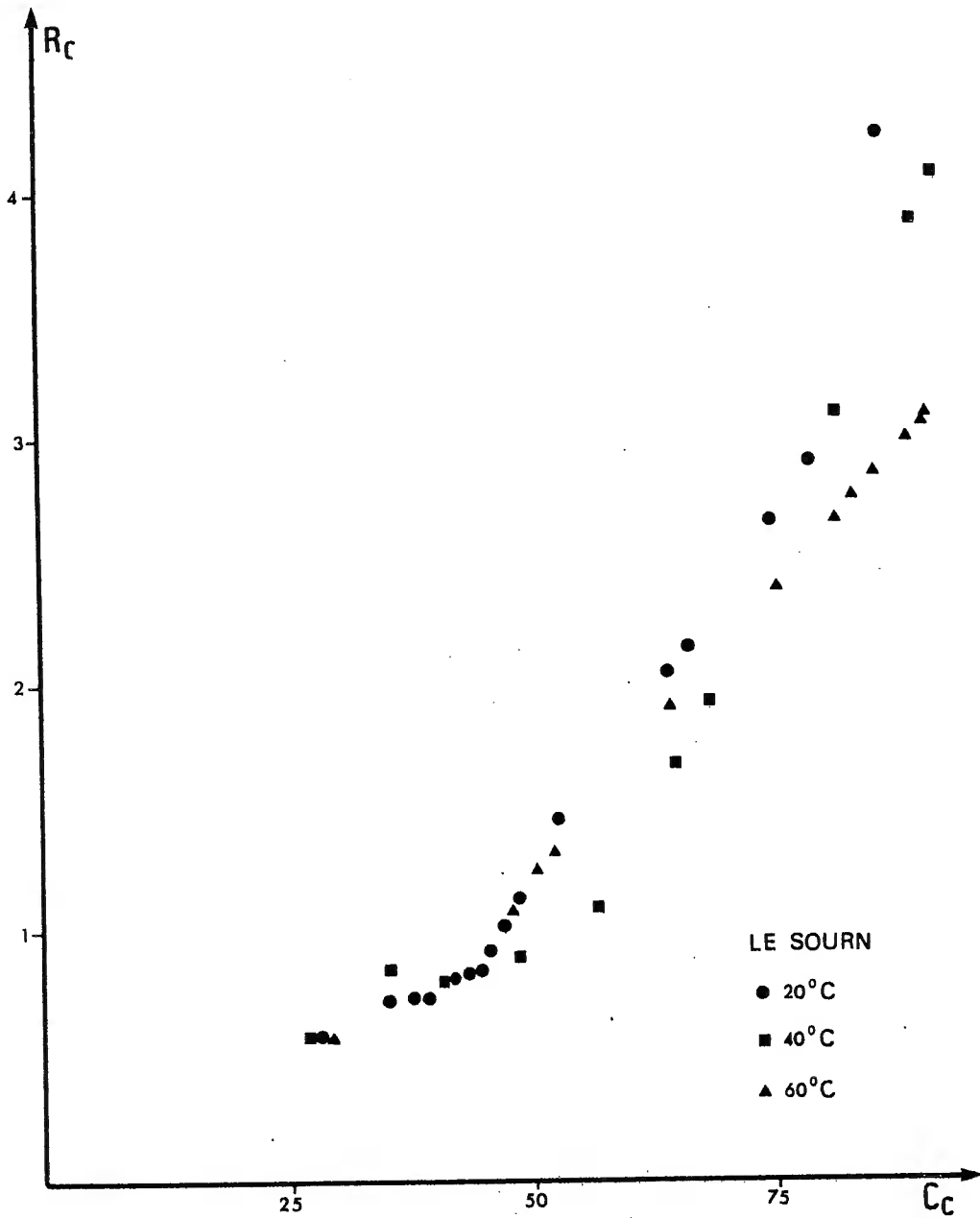


Fig. III.15 : Variations de R_c en fonction de C_c pour différentes températures.

Au cours de la deuxième phase, la constance du rapport R_c/C_c se vérifie pour 20°C et 40°C, tandis que pour la température de 60°C, on obtient un rendement légèrement plus faible. Ce diagramme met, en outre, en évidence une troisième phase observée à la température de 20°C pour des essais de très longues durées (de 1 à 2 ans). Cette troisième phase a été également observée par des essais de longues durées à 40°C. Il est à remarquer que chacune des phases mises en évidence est caractérisée par un rapport R_c/C_c comparable et pratiquement indépendant de la température.

III.2.2. Arène Le Breuil

III.2.2.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène "Le Breuil".

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des séries d'essais effectuées sur l'arène "Le Breuil".

Arène Le Breuil		teneur en eau	
		W_2	W_4
Teneur en chaux	C_0		Br.C. ($W_4; C_0; T_2$)
	C_1		Br.C. ($W_4; C_1; T_2$)
	C_2	Br.C. ($W_2; C_2; T_2$)	Br.C. ($W_4; C_2; T_1$)
			Br.C. ($W_4; C_2; T_2$)
			Br.C. ($W_4; C_2; T_3$)
	C_3		Br.C. ($W_4; C_3; T_2$)
C_4		Br.C. ($W_4; C_4; T_2$)	

Tableau XIV : Séries d'essais effectuées sur l'arène "Le Breuil".

La série de référence correspond au dosage en chaux C_2 , à l'humidité W_4 et à la température 40°C (notée Br.C. ($W_4; C_2; T_2$)) est encadrée.

III.2.2.1. Etude détaillée de la série de référence Br.C. ($W_4; C_2; T_2$)

III.2.2.1.1. Variation de la résistance à la compression simple R_c en fonction du temps t.

La valeur de la résistance R_c d'un échantillon de matériau naturel non traité est de 0,2 MPa. Celle d'un échantillon de matériau traité (conformément aux conditions de la série de référence) rompu immédiatement après compactage, est de 0,41 MPa. A partir de cette valeur, la résistance R_c croît de manière continue en fonction du temps pour atteindre 12,5MPa environ au bout de trois mois. (Fig.III.16).

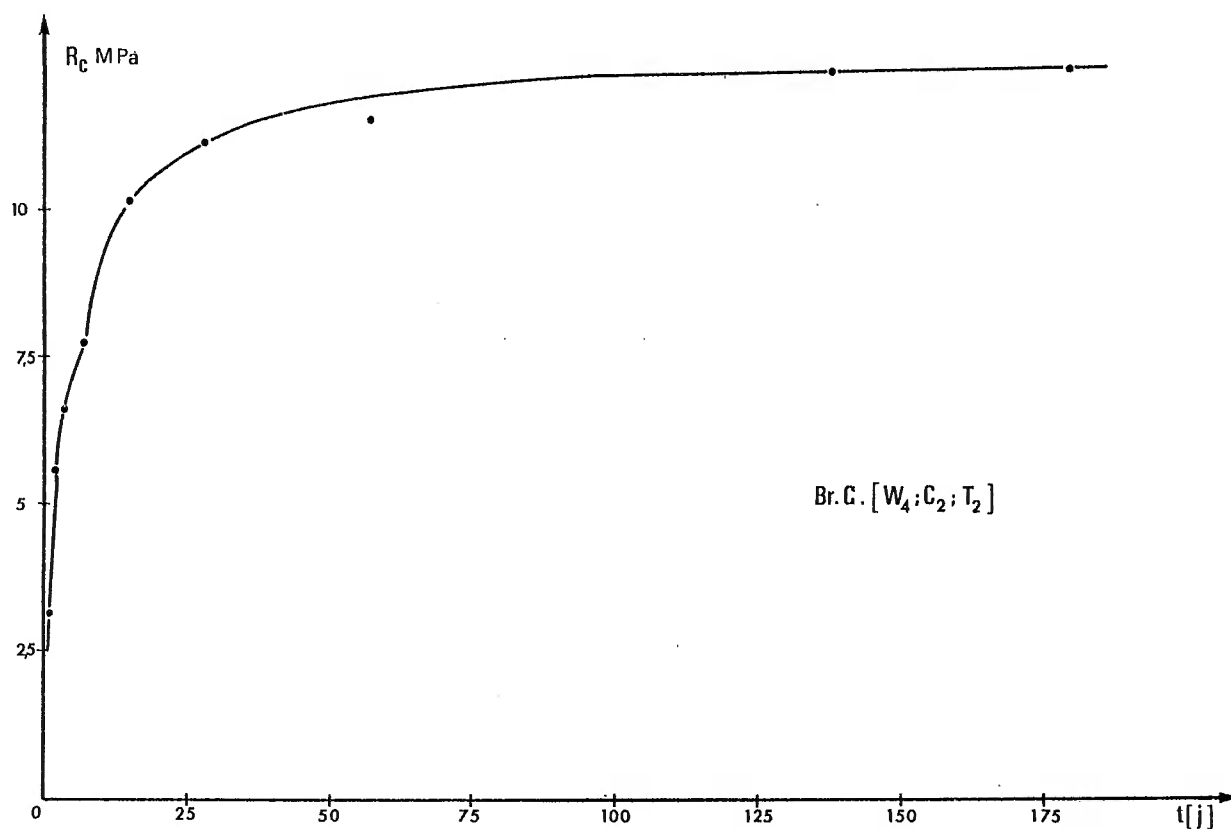


Fig. III.16 : Variations de la résistance R_c en fonction du temps.

L'accroissement des résistances se fait en deux étapes. La figure III.17 qui correspond à la série de référence indique que les deux arcs de courbes correspondent, après transformation de la variable t , à deux segments de droites dont les expressions analytiques s'écrivent sous la forme suivante :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_c = - 5,24 \frac{1}{t} + 8,32$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c = - 33,20 \frac{1}{t} + 12,46$$

Ces expressions permettent de calculer les coordonnées du point de transition entre les deux phases, on trouve :

$$t = 6,76 \text{ jours}$$

$$R_c = 7,55 \text{ MPa}$$

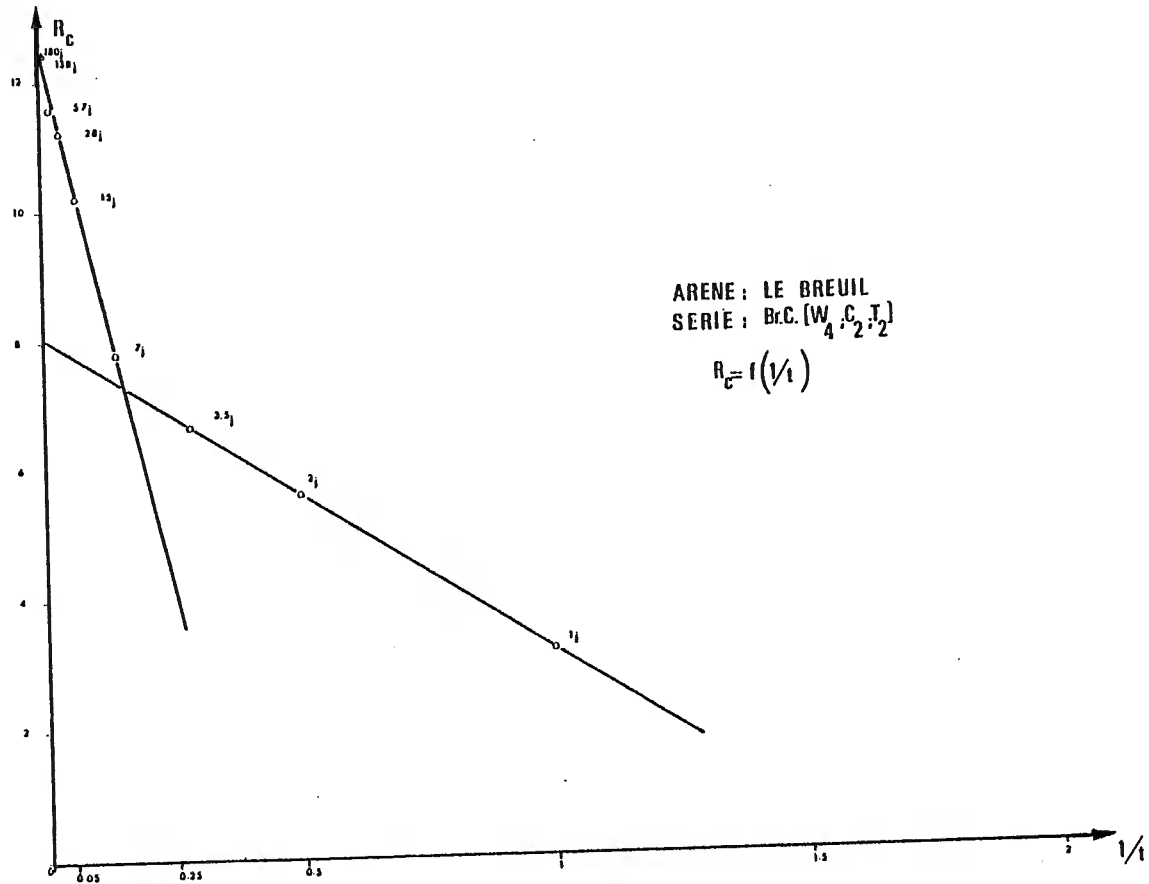


Fig. III.17: Variations de la résistance R_C en fonction de l'inverse du temps.

III.2.2.1.2. Variation du pourcentage de chaux consommée $C_C\%$ en fonction du temps t

Le pourcentage de chaux consommée par un échantillon à l'instant qui suit son compactage est de 16,88%.

Comme pour la résistance à la compression R_C , la consommation de chaux en fonction du temps permet aussi d'observer deux arcs de courbes, d'allure hyperbolique qui montrent que la consommation de chaux se fait en deux étapes pour atteindre la valeur de 95% au bout de quatre mois.

Sur le diagramme transformé ($1/t ; C_C$), ces deux arcs se trouvent matérialisés par deux segments de droite d'expression analytique : (fig.III.18).

1ère phase : $C_c = - 39,5884 \frac{1}{t} + 85,6596$

2ème phase : $C_c = - 98,6838 \frac{1}{t} + 93,9926$

Ces expressions donnent les coordonnées du point de transition :

$t = 7,09$ jours

$C_c = 80,08\%$

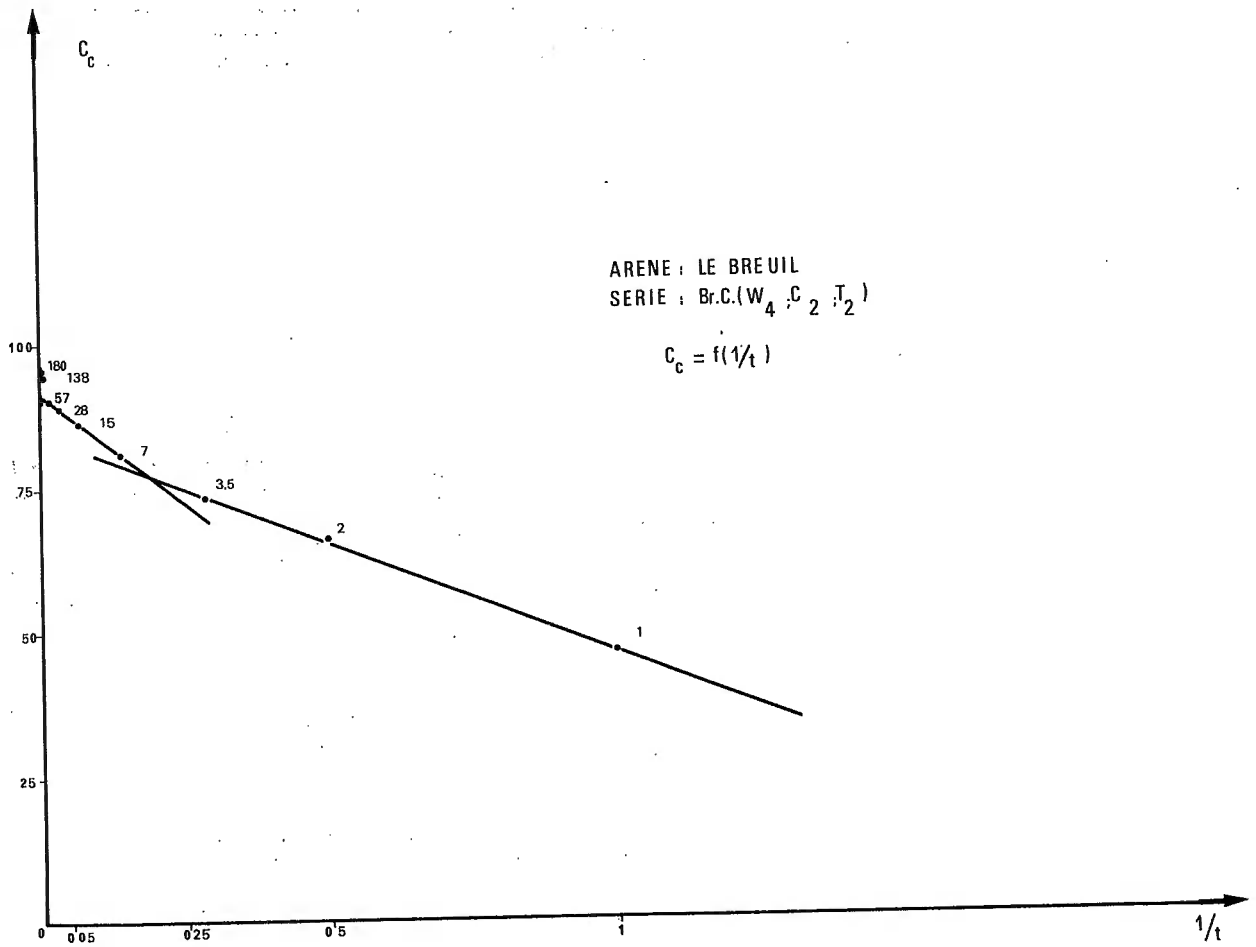


Fig.III.18 : Variation de la consommation de chaux C_c en fonction de l'inverse du temps.

III.2.2.1.3. Variation de la célérité des ondes longitudinales en fonction du temps t.

C'est à partir de l'âge d'un jour que les mesures de la célérité, des ondes longitudinales sont devenues possibles pour la série de référence Br.C. ($w_4; c_2; T_2$). A cet âge, V_L est déjà égal à 1752 m/s et V_D atteint la valeur de 1835 m/s. A partir de là, V_L et V_D croissent, de façon continue, en fonction du temps pour atteindre environ 2800 m/s au bout de 4 mois (fig.III.19). Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'arène "Le Sourn", on ne retient ici que la variation de V_D en fonction de "t" dont la courbe représentative est formée de deux arcs de courbes, d'allure hyperbolique, d'expression analytique donnée ci-après :

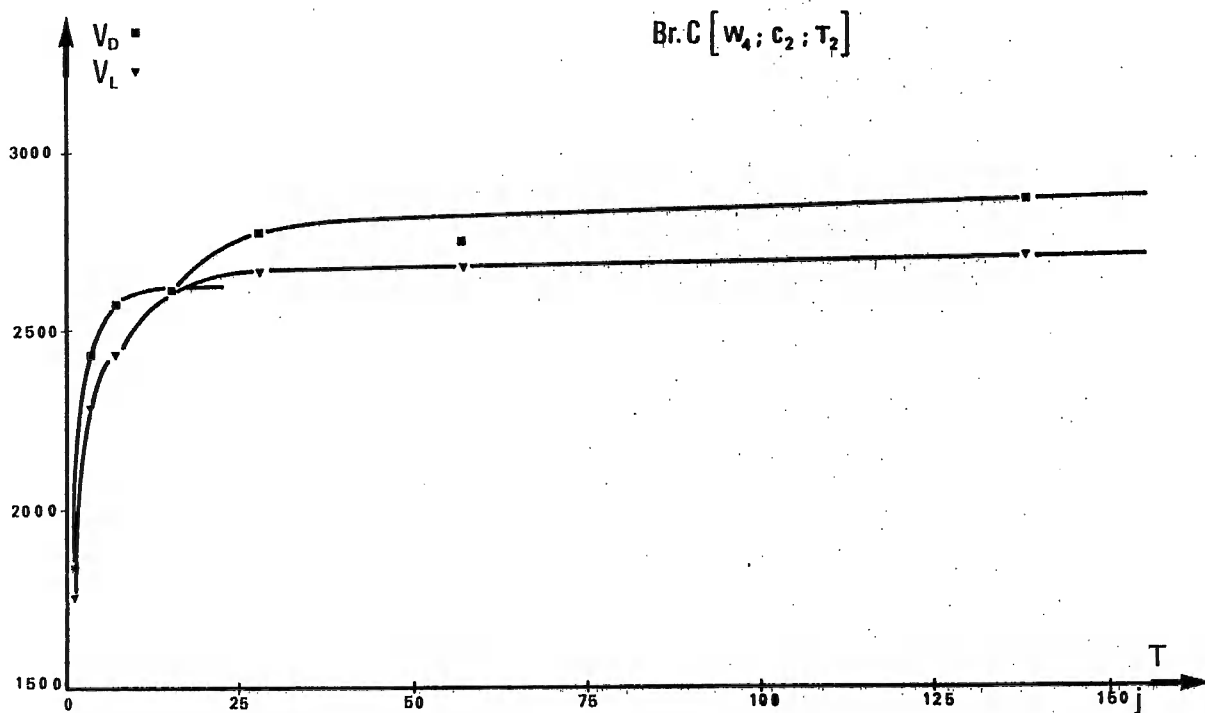


Fig. III.19 : Variations des célérités des ondes longitudinales V_L et V_D en fonction du temps.

$$\text{1ère phase : } V_D = - 858,85 \frac{1}{t} + 2692,64$$

$$\text{2ème phase : } V_D = - 4203,37 \frac{1}{t} + 2903,94$$

Ces expressions analytiques de V_D permettent de calculer les coordonnées du point de transition, on trouve :

$$t = 15,83 \text{ jours}$$

$$V_D = 2638,38 \text{ m/s}$$

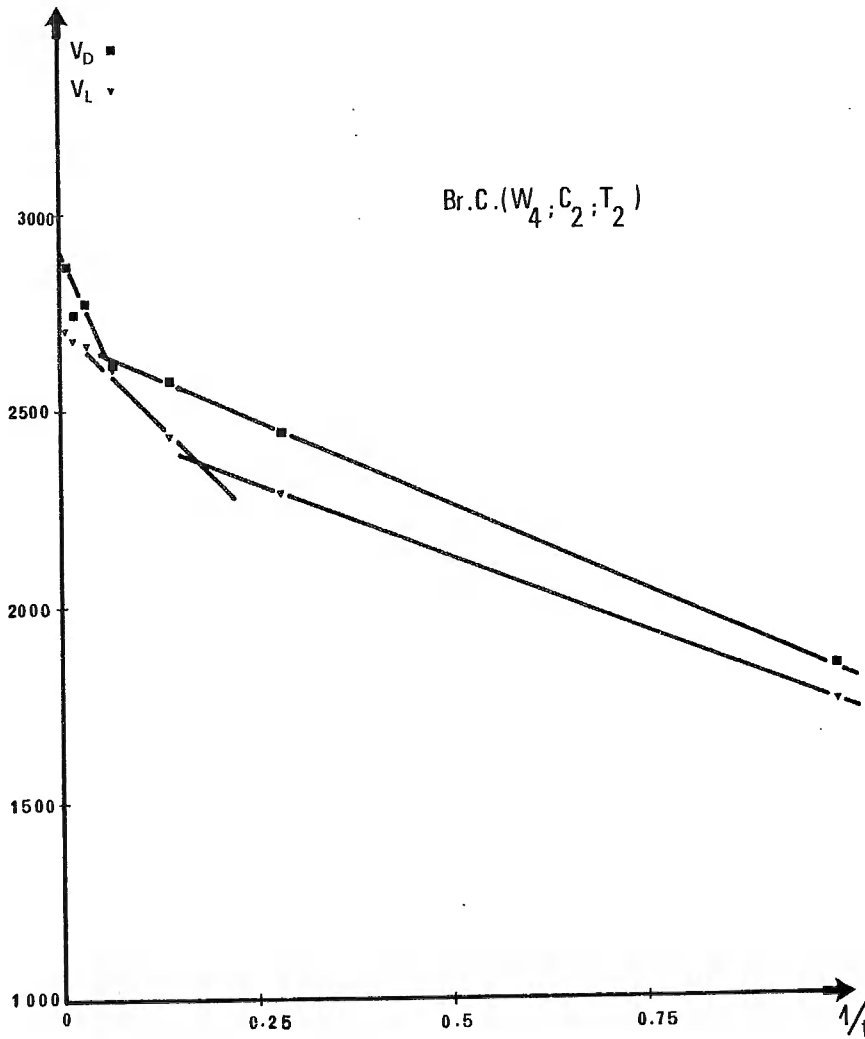


Fig.III.20 : Variations des célérités des ondes longitudinales V_L et V_D en fonction de l'inverse du temps.

III.2.2.1.4. Variation du rapport R_C/C_C en fonction du temps t

Pour cette série d'essais, la valeur à l'origine du rapport est R_C/C_C est de 0,024. A l'instant $t = 1$ jour, ce rapport vaut 0,068. A partir de cette valeur il croît progressivement pour atteindre 0,130 au bout de six mois. Cette croissance se fait en deux étapes, d'allure hyperbolique, d'équations : (fig.III.21).

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_C/C_C = - 0,032 \frac{1}{t} + 0,100$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_C/C_C = - 0,251 \frac{1}{t} + 0,133$$

Les coordonnées du point de transition se calculent aisément à partir de ces deux expressions, on obtient :

$$t = 6,66 \text{ jours}$$

$$R_C/C_C = 0,095$$

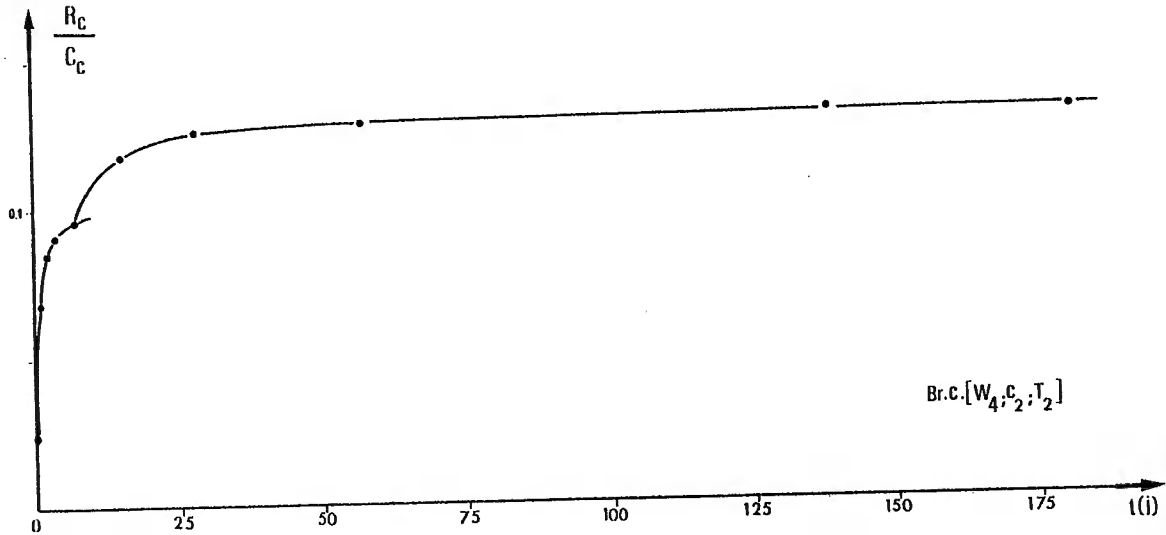


Fig. III.21: Variations du rapport R_c/C_c en fonction du temps.

En résumé, l'examen des résultats de la série de référence effectuée sur l'arène "Le Breuil" montre que l'on observe deux phases dont le point de transition se situe aux alentours de 7 jours. A ce moment-là, la résistance R_c est élevée : elle atteint 8 MPa pour une consommation en chaux de 80%. Le rendement R_c/C_c présente bien évidemment une transition aux environs de 7 jours, tandis que l'on ne retrouve pas ce résultat pour les vitesses diamétrales V_D .

III.2.2.2. Influence du traitement

III.2.2.2.1. Influence du dosage en chaux

- Pour étudier l'influence du dosage en chaux, cinq séries d'essais ont été réalisées. La série de référence (dosage en chaux : $C_2 = 5\%$) qui constitue la série médiane, est encadrée par deux séries comportant des dosages en chaux inférieurs : ($C_0 = 1\%$ et $C_1 = 3\%$) et par deux autres séries comportant des dosages en chaux supérieurs : ($C_3 = 7\%$ et $C_4 = 10\%$), les autres facteurs demeurant constants. Comme cela a été précisé auparavant dans le paragraphe III.2.1.2, la teneur en eau W_4 qui correspond à l'Optimum Proctor Modifié du matériau traité varie très légèrement avec le dosage en chaux.

- La figure III.22 montre l'accroissement des résistances mécaniques obtenues par augmentation du dosage en chaux. Il apparaît que le gain de résistance à tout instant lorsqu'on passe du dosage $C_0 = 1\%$ au dosage $C_1 = 3\%$, se maintient entre le dosage $C_1 = 3\%$ et le dosage $C_2 = 5\%$, mais ne se poursuit plus lorsque l'on passe du dosage $C_2 = 5\%$ au

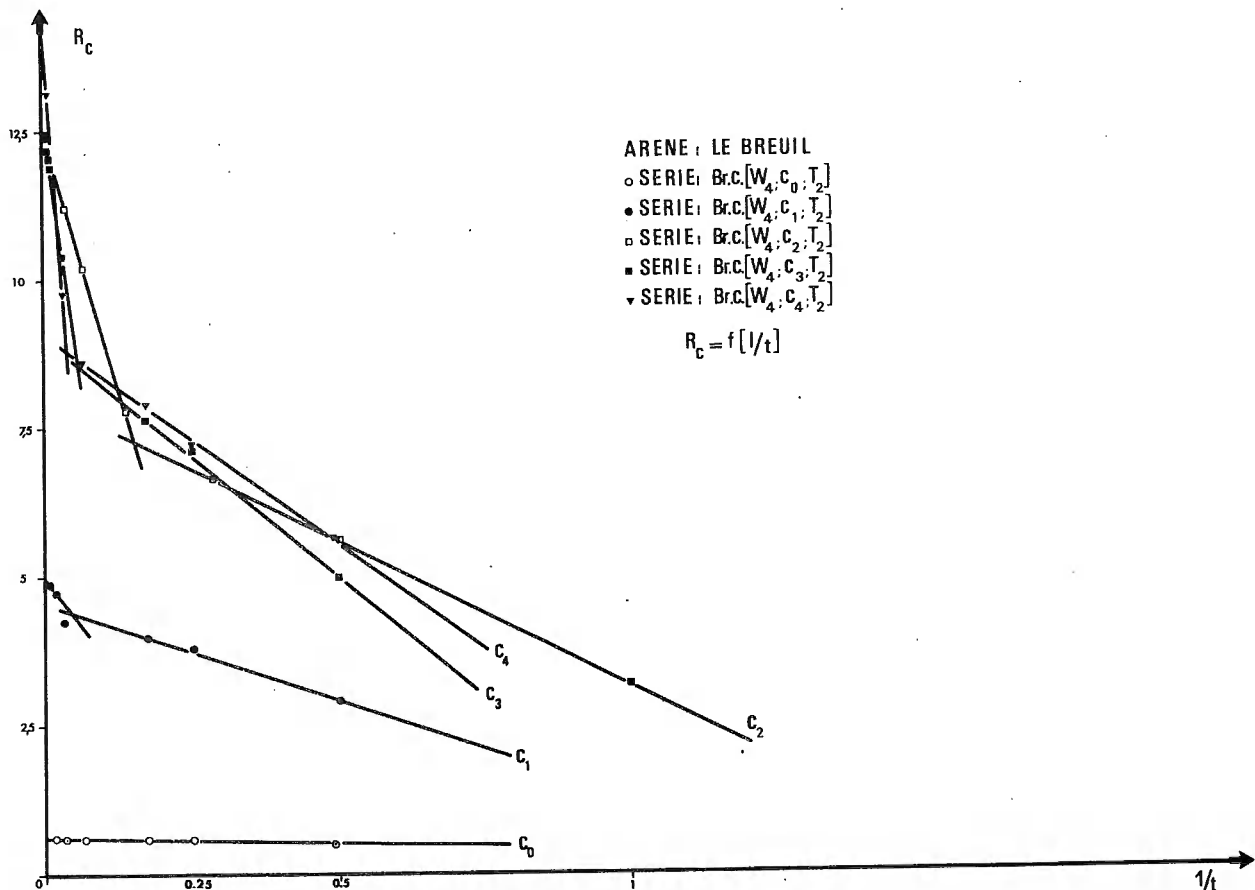


Fig. III.22 : Variations des résistances mécaniques R_c en fonction de l'inverse du temps, pour différents dosages en chaux C_j

dosage $C_3 = 7\%$ et de C_3 au dosage $C_4 = 10\%$. En effet, on peut constater sur le diagramme transformé de la figure III.22 que pour les dosages en chaux C_2 , C_3 et C_4 , les valeurs des résistances mécaniques se regroupent dans un faisceau étroit où C_2 présente les meilleures performances aux jeunes âges, suivi dans l'ordre par les dosages C_4 et C_3 ; mais aux âges élevés, les résistances obtenues pour C_4 et C_3 deviennent supérieures à celles de C_2 .

- Si l'on considère les consommations absolues en chaux, on constate évidemment que les consommations ultimes sont d'autant plus élevées que le dosage initial est important. Plus précisément, il existe une corrélation entre les consommations maximales théoriques pour chacune des phases et le dosage en chaux initial (tableau XV). Il est à remarquer que cette corrélation subsiste pour les quantités de chaux consommées dans la 1ère phase de stabilisation.

Dosage initial en chaux	1ère phase	2ème phase
$C_0 = 1\%$	0,8808	
$C_1 = 3$	2,1027	2,4114
$C_2 = 5$	3,7998	4,1695
$C_3 = 7$	5,2886	5,8812
$C_4 = 10$	6,2991	8,3440

Tableau XV : Valeurs des consommations ultimes de chacune des phases en fonction du dosage initial en chaux C_i .

Ces corrélations s'expriment par les équations suivantes :

$$\text{1ère phase } (C_c) = 0,6285 C_i + 0,4061$$

$$\text{2ème phase } (C_c) = 0,8468 C_i - 0,0910$$

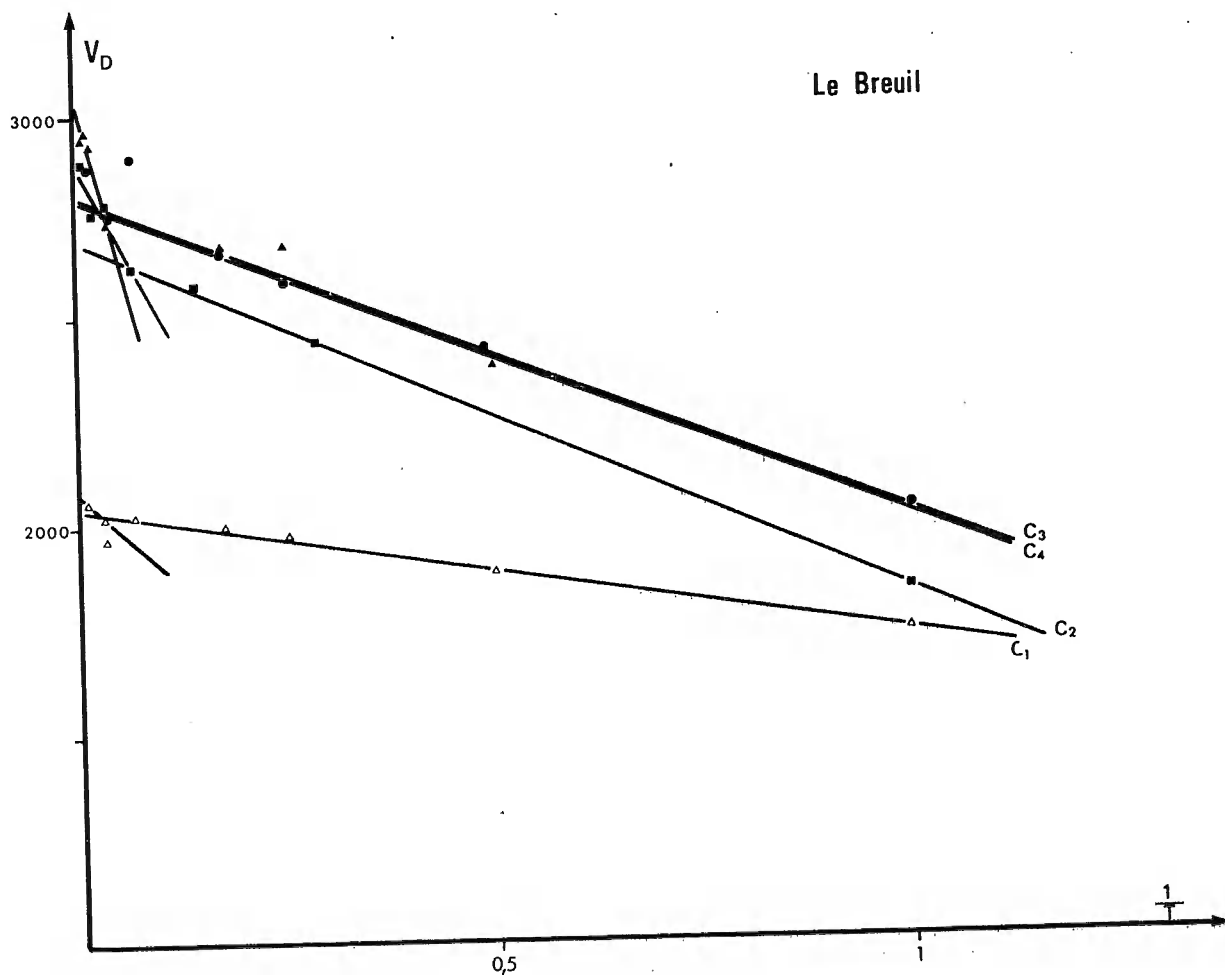


Fig.III.23 : Variations des célérités des ondes longitudinales en fonction de $1/t$, pour différents dosages initiaux en chaux C_i .

Les célérités des ondes longitudinales n'ont pu être mesurées que sur les quatre séries : Br. C(W₄ ; C₁ ; T₂), Br. C(W₄ ; C₂ ; T₂), Br. C(W₄ ; C₃ ; T₂) et Br. C(W₄ ; C₄ ; T₂), correspondant aux dosages supérieurs ou égaux à 3%. Le diagramme de la figure III.23. (V_D 1/t ; C_i) permet d'observer deux phases (pour chaque série) dans l'évolution des célérités des ondes longitudinales au cours du vieillissement, toutefois, il convient de noter, comme dans la série de référence, que le point de transition se produit à un âge plus grand que celui relatif à R_C ou à C_C. Il apparaît que l'accroissement des célérités des ondes croît avec le dosage en chaux. Cet accroissement important lorsque l'on passe de C₁ à C₂ diminue entre C₂ et C₃ pour devenir négligeable en passant de C₃ à C₄.

Il est très instructif de comparer les valeurs des résistances mécaniques R_C par rapport à celles de la consommation de chaux C_C, en fonction du dosage initial en chaux. Le diagramme de la figure III.24 : (R_C = f (C_C) ; C_i) a été tracé dans ce but. Il permet de constater que pour les séries Br. C (W₄ C_i T₂).

Pour C₀, tous les points se trouvent rassemblés dans un nuage proche de l'origine.

Pour C₁, les points se trouvent répartis le long de deux droites d'équations :

$$\text{1ère phase : } R_C = 0,110 C_C - 1,546$$

$$\text{2ème phase : } R_C = 0,225 C_C - 7,777$$

Pour C₂, les points se répartissent sur deux droites d'équations :

$$\text{1ère phase : } R_C = 0,110 C_C - 1,604$$

$$\text{2ème phase : } R_C = 0,315 C_C - 17,198$$

Pour C₃, les points se répartissent suivant deux droites d'équations :

$$\text{1ère phase : } R_C = 0,107 C_C - 3,369$$

$$\text{2ème phase : } R_C = 0,438 C_C - 45,274$$

Pour C₄, les points se trouvent sur deux droites d'équations :

$$\text{1ère phase : } R_C = 0,100 C_C + 0,970$$

$$\text{2ème phase : } R_C = 0,524 C_C - 35,414$$

III.2.2.3. Influence de la température

L'influence de la température a été étudiée sur trois séries d'essais effectués sur un dosage moyen de chaux (C₂ = 5%) à l'humidité correspondant à l'Optimum Proctor Modifié du sol traité à trois températures différentes 20°C, 40°C et 60°C.

Comme pour la série de référence effectuée à 40°C, on constate que l'accroissement des résistances mécaniques pour la série de 60°C se fait en deux étapes. Quant à la série effectuée à 20°C, on note la présence de 3 phases.

Si l'on compare les valeurs des résistances R_C en fonction des consommations en chaux C_C pour les 3 températures étudiées, on obtient le diagramme représenté sur la figure III. 25 : (R_C = f (C_C) ; T_i). Ce diagramme permet de constater que la 1ère phase de la

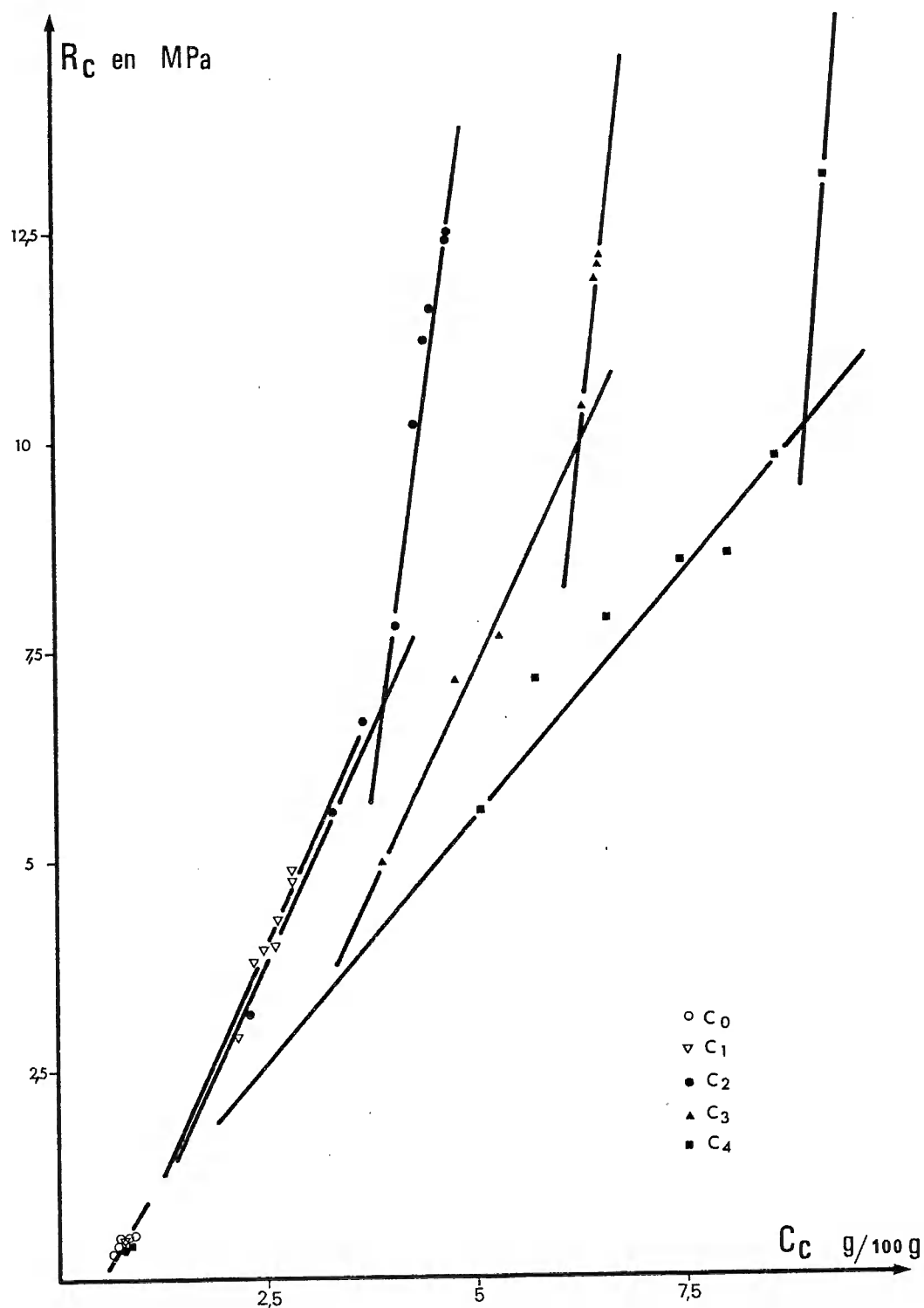


Fig. III.24 : Variations des résistances R_C en fonctions des consommations en chaux C_C pour différents dosages initiaux C_i .

série à 20°C échappe à l'observation pour les températures de 40°C et de 60°C. Au cours de la 2ème phase, les trois séries figurent sous forme de droites de pentes pratiquement parallèles (0,11 à 20°C - 0,11 à 40°C et 0,11 à 60°C), c'est-à-dire que les trois séries possèdent le même rendement. Il en est de même pour la troisième phase. Ceci est important car cela prouve que l'élévation de température accélère fortement les progrès de la stabilisation sans changer la nature des réactions qui sont à l'origine de la stabilisation comme on le verra dans la discussion.

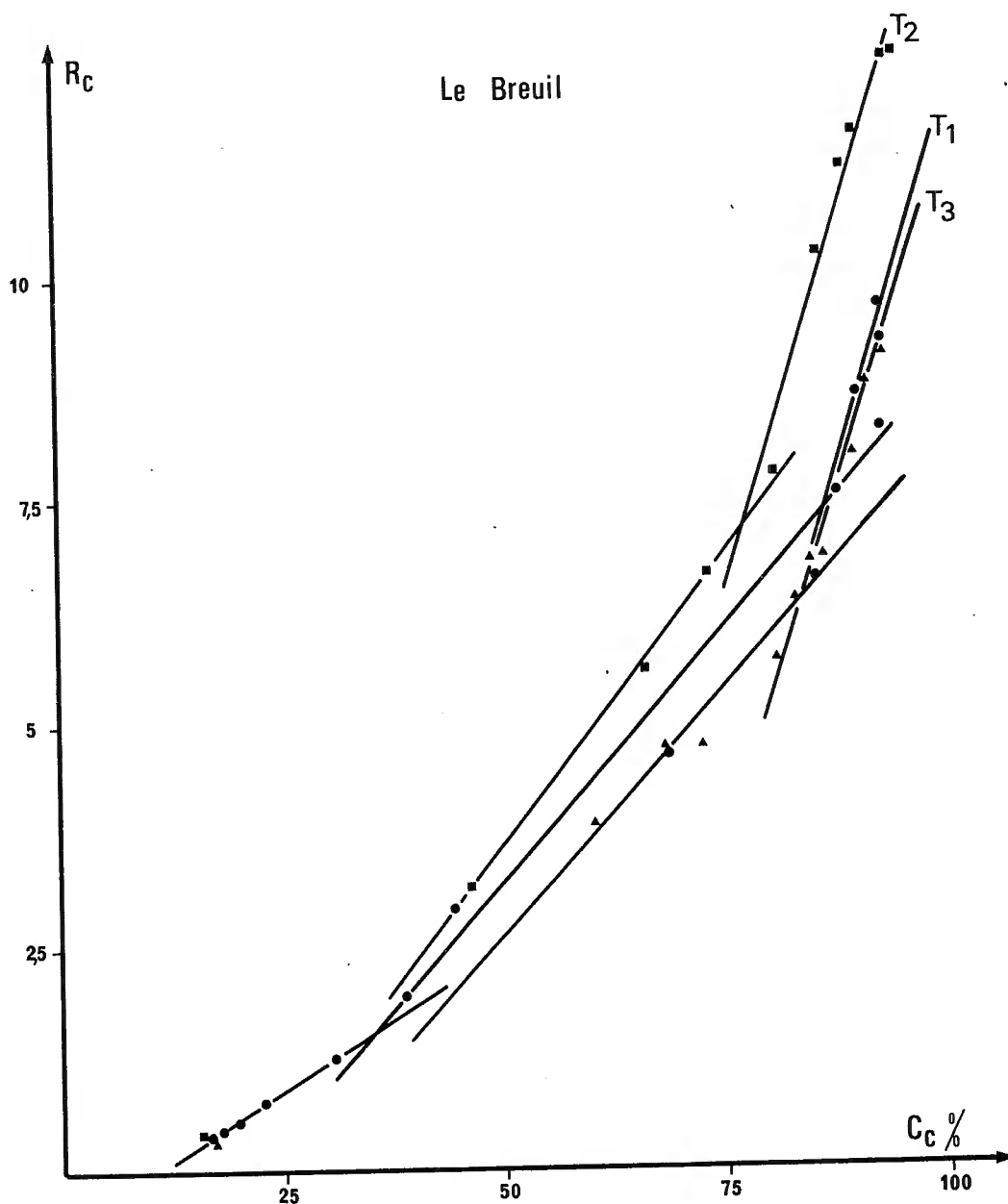


Fig. III. 25 . Variations de la résistance mécanique R_c en fonction de la consommation de chaux C_c , pour différentes températures T_i .

III.2.3. Arène de BARRAUD

III.2.3.0. Série d'essais effectuée avec l'arène de BARRAUD

Une seule série d'essais a été effectuée correspondant au dosage en chaux $C_2 = 5\%$, à la teneur en eau W_4 (Optimum Proctor du sol traité) et à la température de 40°C . Cette série sera notée Bd.C. ($W_4 ; C_2 ; T_2$) et considérée comme la série de référence tableau XVI.

Barraud		teneur en eau
		W_4
teneur en chaux	C_2	Bd.C. ($W_4 ; C_2 ; T_2$)

Tableau XVI : Série d'essais effectuée avec l'arène Barraud.

III.2.3.1. Etude détaillée de la série de référence Bd.C ($W_4 ; C_2 ; T_2$)

III.2.3.1.1. Variation de la résistance à la compression simple R_c en fonction du temps t

La valeur de la résistance R_c d'un échantillon de matériau naturel non traité est de 0,298 MPa. Celle d'un échantillon de matériau traité dans les mêmes conditions que la série de référence, rompu immédiatement après compactage, est de 0,503 MPa.

A partir de cette valeur, la résistance R_c croît de manière continue en fonction du temps pour atteindre 7,6 MPa environ au bout de deux mois (fig.III.26).

La croissance de la résistance se fait en deux étapes. La figure III. 27, qui correspond à la série de référence indique que les deux arcs de courbes correspondent, dans le diagramme transformé, à deux segments de droites dont les expressions analytiques se mettent sous la forme :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_c = - 3,35 \frac{1}{t} + 4,83$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c = - 14,35 \frac{1}{t} + 7,47$$

Ces deux équations permettent de calculer les coordonnées du point de transition (t, R_c), on obtient :

$$t = 4,18 \text{ jours}$$

$$R_c = 4,035 \text{ MPa}$$

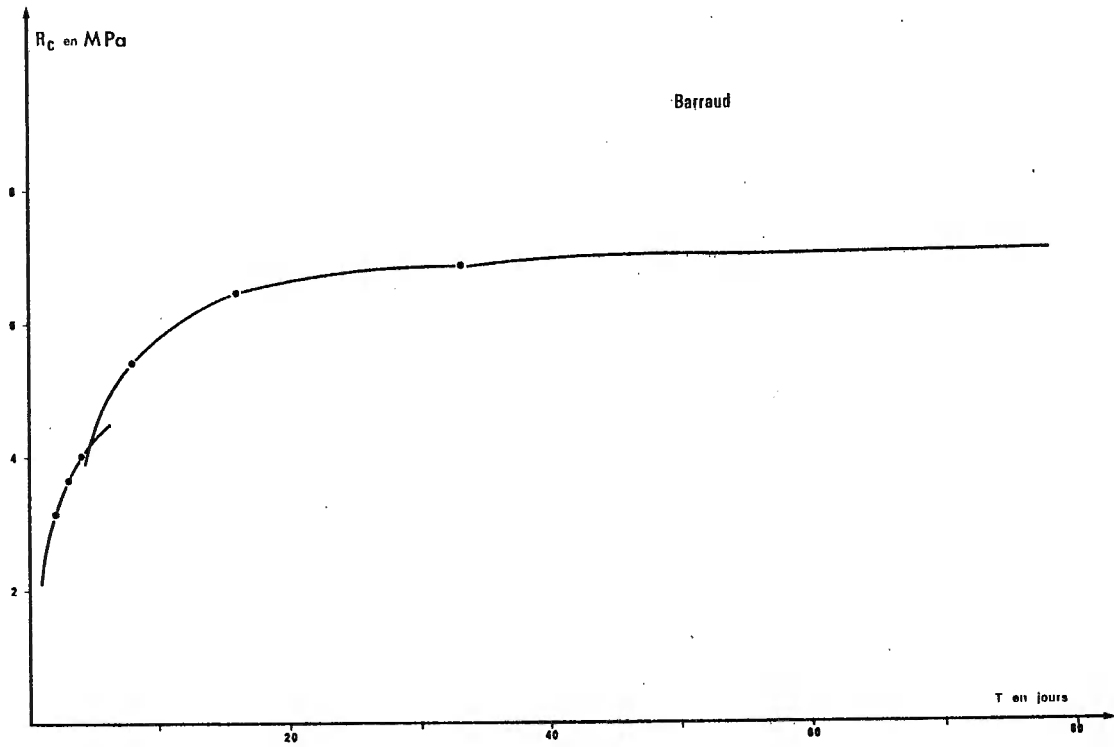


Fig. III.26 : Variations de la résistance à la compression simple R_C en fonction du temps.

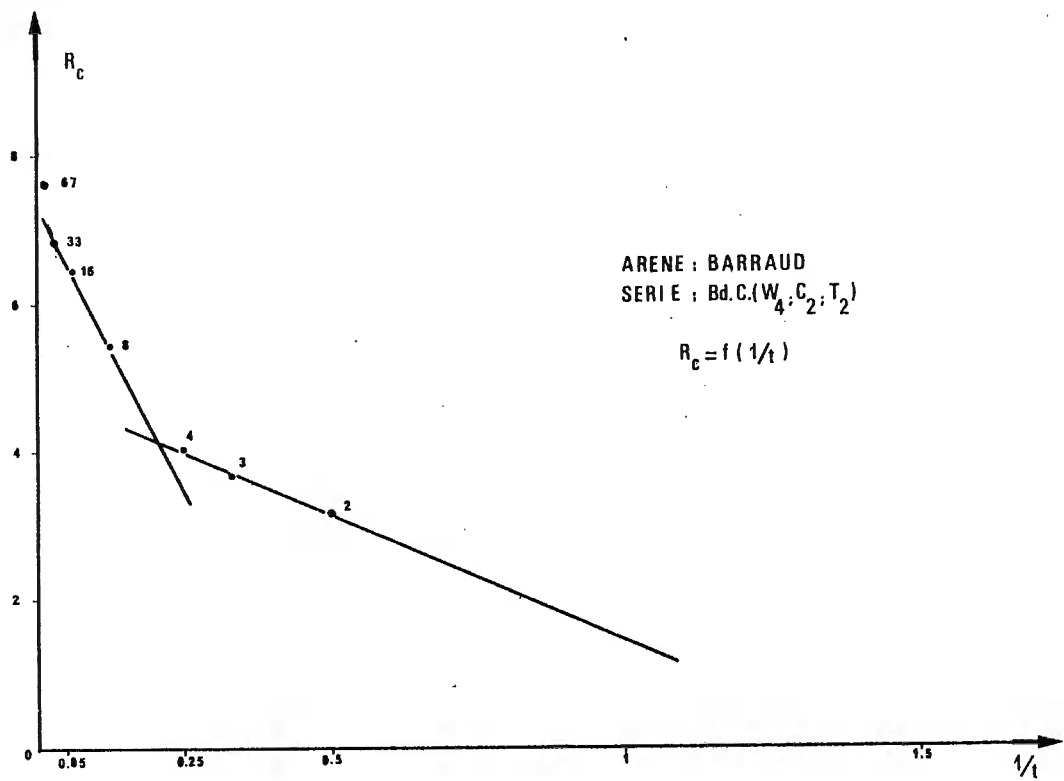


Fig. III. 27 : Variations de la résistance à la compression simple R_C en fonction de $1/t$.

III.2.3.1.2. Variation du pourcentage de chaux consommée $C_c\%$ en fonction du temps t .

Le pourcentage de chaux consommée par un échantillon à l'instant qui suit son compactage est de 30,10%.

Comme pour R_c , la consommation en chaux en fonction du temps permet aussi d'observer deux arcs de courbes, d'allure hyperbolique, qui montrent que le phénomène se fait en deux étapes. Au bout de deux mois, lors de l'arrêt des essais, le pourcentage de chaux consommée vaut 90% environ. Sur le diagramme transformé ($1/t ; C_c$), représenté sur la fig. III.28, ces deux arcs se trouvent matérialisés par deux segments de droites d'expressions analytiques :

$$\text{1ère phase : } C_c = - 38,59 \frac{1}{t} + 85,70$$

$$\text{2ème phase : } C_c = - 52,59 \frac{1}{t} + 88,99$$

Ces deux équations permettent de calculer les coordonnées du point de transition :

$$t = 4,26 \text{ jours}$$

$$C_c = 76,63\%$$

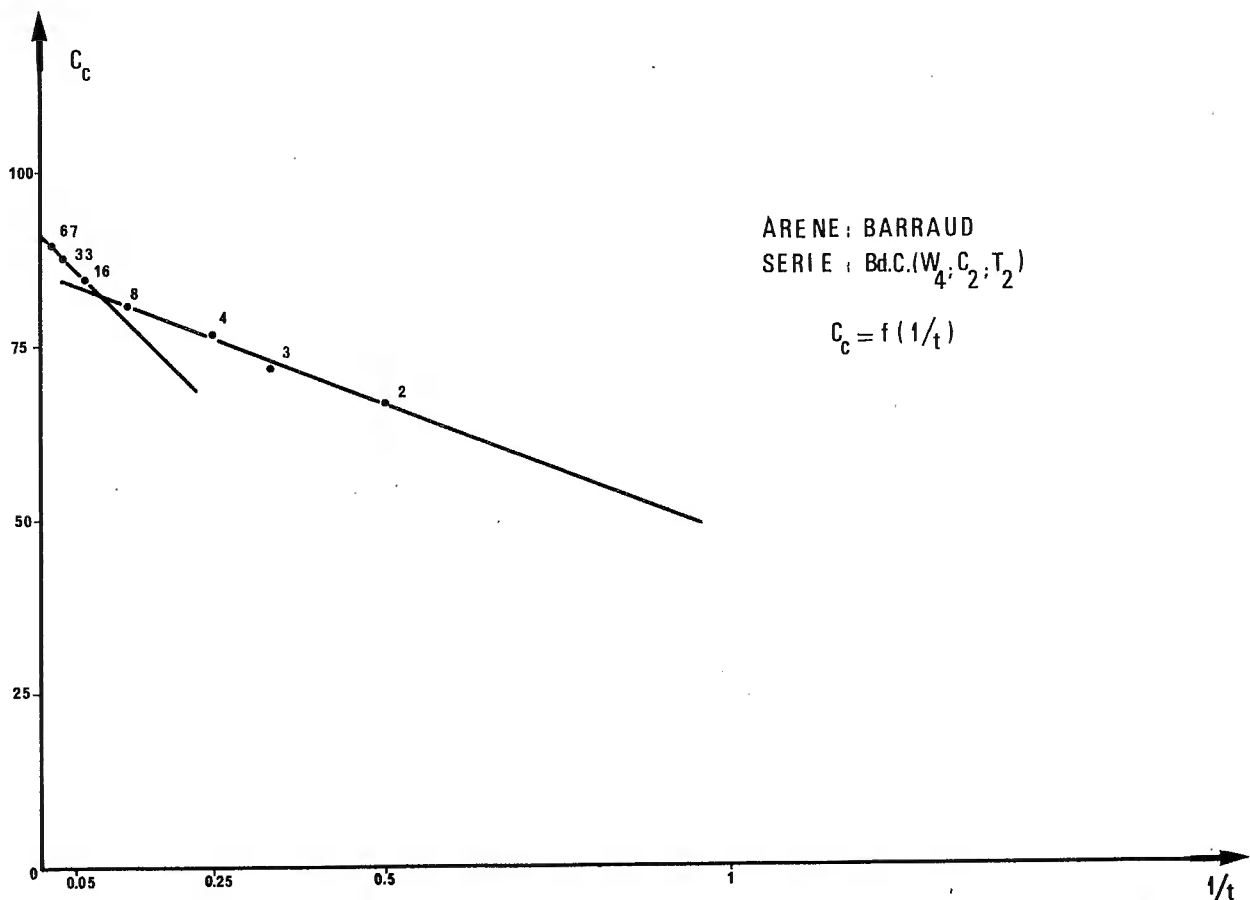


Fig. III.28 : Variations de la consommation de chaux C_c en fonction de $1/t$

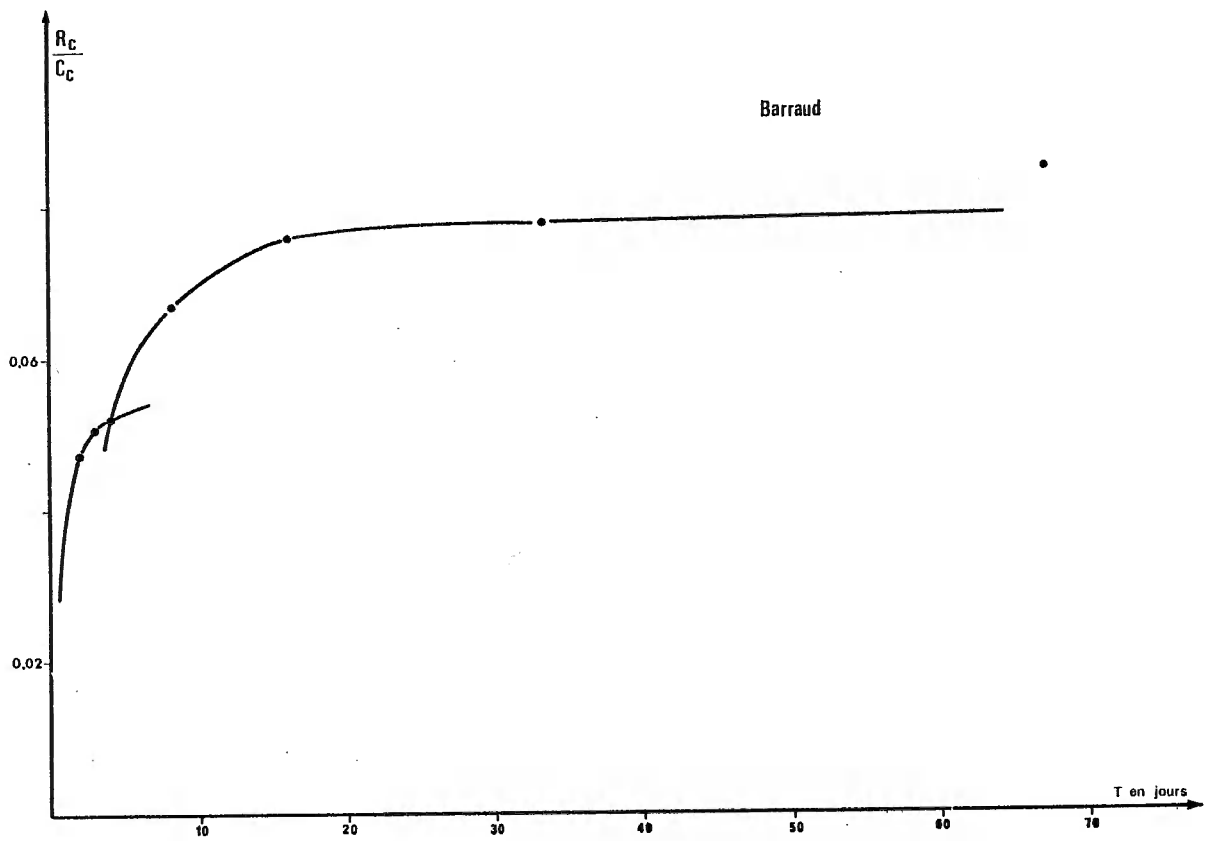


Fig. III.29 : Variations du rapport R_c/C_c en fonction du temps (arène de Barraud).

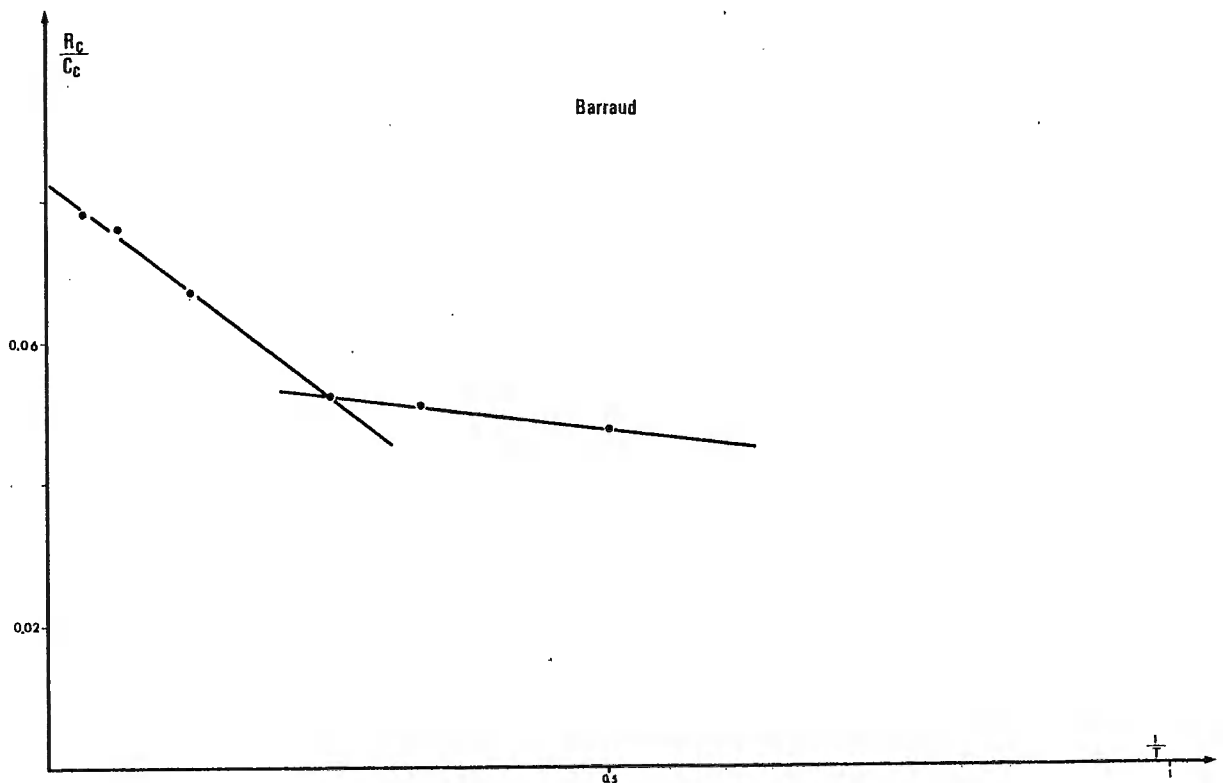


Fig. III.30 : Variations du rapport R_c/C_c en fonction de $1/t$ (arène de Barraud).

III.2.3.1.3. Variation de la célérité des ondes longitudinales en fonction du temps t

Les valeurs de la célérité des ondes longitudinales à l'instant $t = 2$ jours sont :

$$V_L = 1967 \text{ m/s}$$

et $V_D = 1843 \text{ m/s}$

A partir de ces valeurs, V_L et V_D croissent de façon continue, en fonction du temps, pour atteindre respectivement 2468 m/s et 2460 m/s au bout de deux mois.

Pour les raisons évoquées avec le "Sourn", on considère seulement la variation de V_D en fonction du temps. La courbe représentative est constituée de deux arcs de courbes, d'allure hyperbolique, d'équations :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } V_D = - 1019,14 \frac{1}{t} + 2347,35$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } V_D = - 1639,59 \frac{1}{t} + 2499,68$$

Ces deux équations permettent de calculer aisément les coordonnées du point de transition :

$$t = 4,073 \text{ jours}$$

$$V_D = 2097,13 \text{ m/s}$$

III.2.3.1.4. Variation du rapport R_c/C_c en fonction du temps t

Pour cette série d'essais, la valeur à l'origine du rapport R_c/C_c est de $16,05 \times 10^{-3}$. A l'âge de deux jours, ce rapport vaut $47,58 \times 10^{-3}$. A partir de cette valeur, il évolue progressivement pour atteindre $85,24 \times 10^{-3}$ au bout de deux mois. Cette croissance se fait en deux étapes, d'allure hyperbolique, dont les expressions analytiques s'écrivent sous la forme :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_c/C_c = - 19,89 \times 10^{-3} \frac{1}{t} + 57,59 \times 10^{-3}$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c/C_c = - 130,44 \times 10^{-3} \frac{1}{t} + 84,48 \times 10^{-3}$$

Ces équations permettent de calculer aisément les coordonnées du point de transition entre les deux arcs de courbes, on obtient :

$$t = 4,11 \text{ jours}$$

$$R_c/C_c = 52,75 \times 10^{-3}$$

En résumé, cette série d'essais permet de constater que les paramètres mécaniques (R_c , V_D) évoluent de pair avec la consommation de chaux. On peut observer deux phases dont le point de transition se situe à quatre jours environ.

III.2.4. Arène de CHIRAC

III.2.4.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène de Chirac.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des séries d'essais effectuées sur l'arène "Chirac".

Arène Chirac		teneur en eau		
		W ₂	W ₃	W ₄
teneur en chaux	C ₁			C.C.(W ₄ ;C ₁ ;T ₂)
	C ₂	C.C.(W ₂ ;C ₂ ;T ₂)	C.C.(W ₃ ;C ₂ ;T ₂)	C.C.(W ₄ ;C ₂ ;T ₂)
				C.C.(W ₄ ;C ₂ ;T ₂)
	C ₃			C.C.(W ₄ ;C ₃ ;T ₂)

Tableau XVII: Séries d'essais effectuées sur l'arène granitique "Chirac".

III.2.4.1. Etude détaillée de la série de référence C.C. (W₄;C₂;T₂)

III.2.4.1.1. Variation de la résistance à la compression simple R_C en fonction du temps t

La valeur de la résistance R_C d'un échantillon de matériau naturel non traité est de 0,3 MPa. Celle d'un échantillon de matériau traité dans les mêmes conditions que la série de référence, rompu tout de suite après compactage, est de 0,36 MPa.

A partir de cette valeur, la résistance R_C croit de façon continue en fonction du temps pour atteindre environ 4 MPa au bout de cinq mois. (fig. III.31). La croissance de la résistance s'effectue en trois étapes. La figure III.32 qui correspond à la série de référence indique que les 3 arcs de courbes se transforment, dans le diagramme (1/t, R_C), en trois segments de droites dont les expressions analytiques s'écrivent sous la forme :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_C = - 0,278 \frac{1}{t} + 0,802$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_C = - 4,425 \frac{1}{t} + 1,807$$

$$3^{\text{ème}} \text{ phase : } R_C = - 66,247 \frac{1}{t} + 4,322$$

Ces trois équations permettent de calculer les coordonnées des deux points de transition

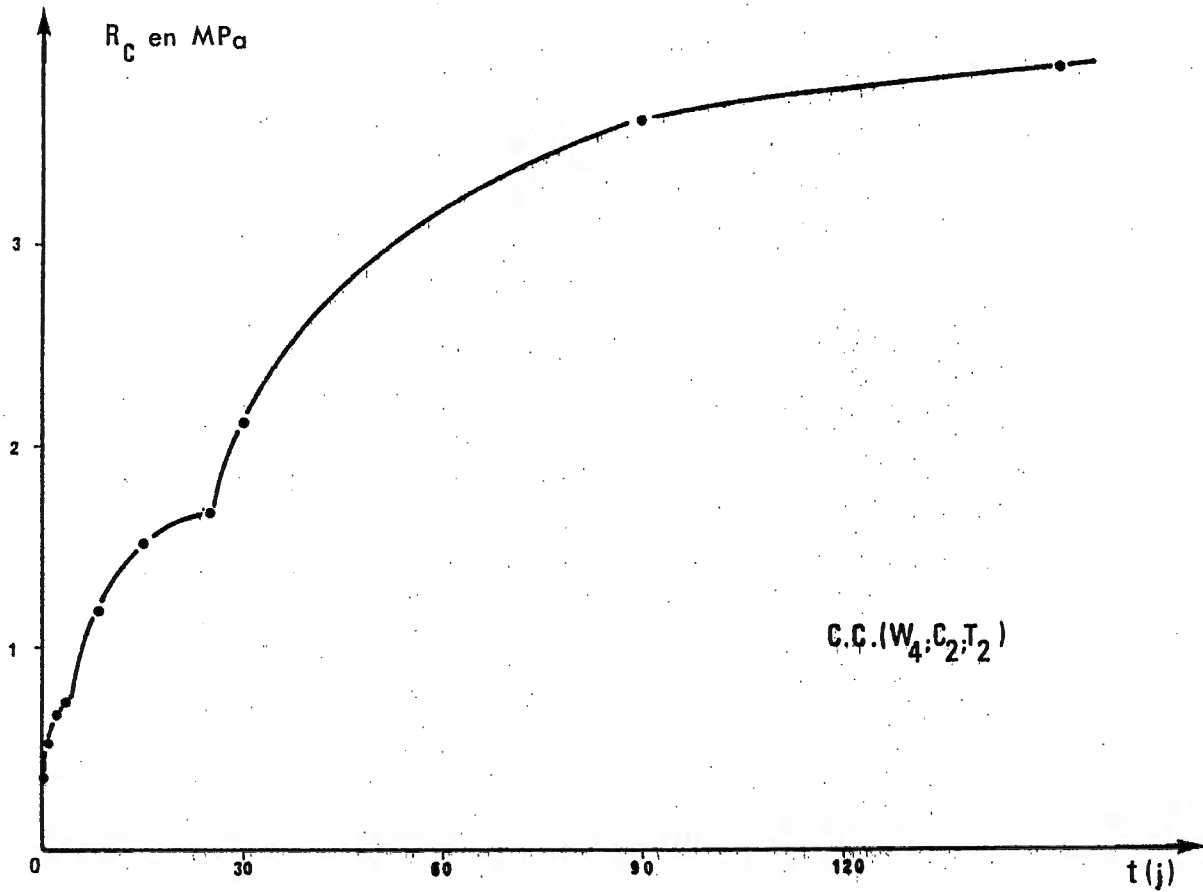


Fig.III.31 : Variations de la résistance à la compression simple R_c en fonction du temps.

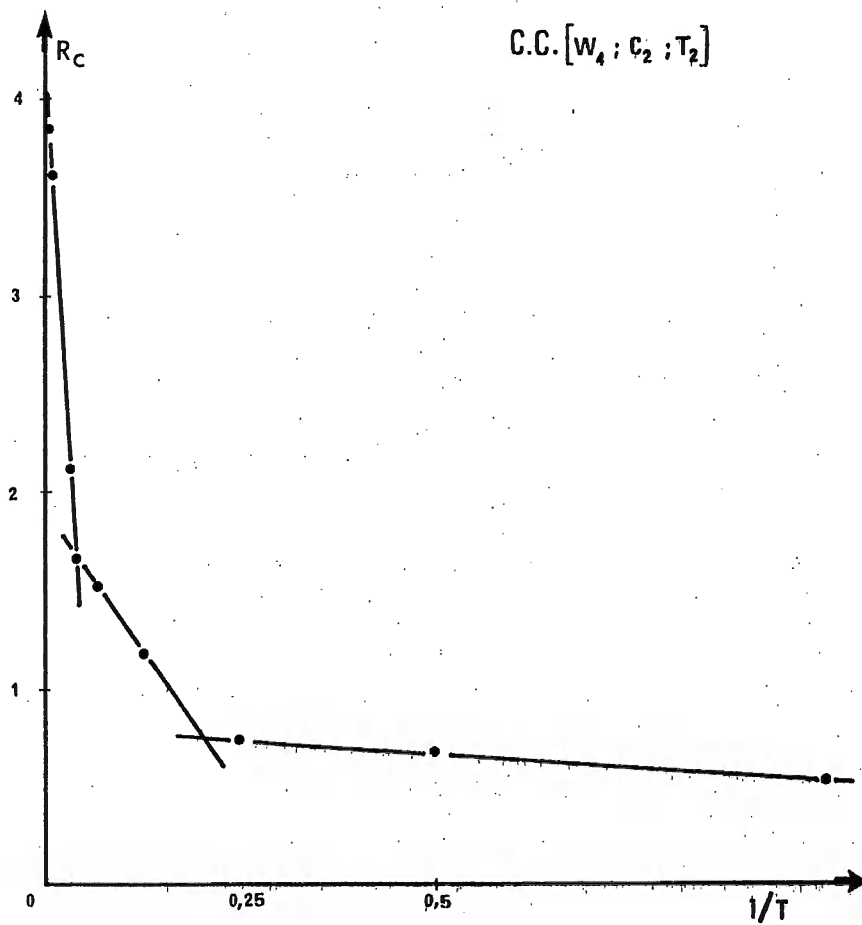


Fig.III.32 : Variations de la résistance à la compression simple R_c en fonction de l'inverse du temps.

1er point de transition : $t = 4,13$ Jours

$$R_C = 0,734 \text{ MPa}$$

2ème point de transition : $t = 24,58$ jours

$$R_C = 1,627 \text{ MPa}$$

III.2.4.1.2. Variation du pourcentage de chaux consommée C_c % en fonction du temps t

La consommation de chaux d'un échantillon à l'instant qui suit son compactage s'élève à 20,68%. Comme pour la résistance R_C , la consommation en chaux en fonction du temps permet aussi d'observer trois arcs de courbes, d'allure hyperbolique qui s'enchaînent. Au bout de cinq mois environ, lors de l'arrêt des essais, le pourcentage de chaux consommée atteint 88% environ (fig.III.33).

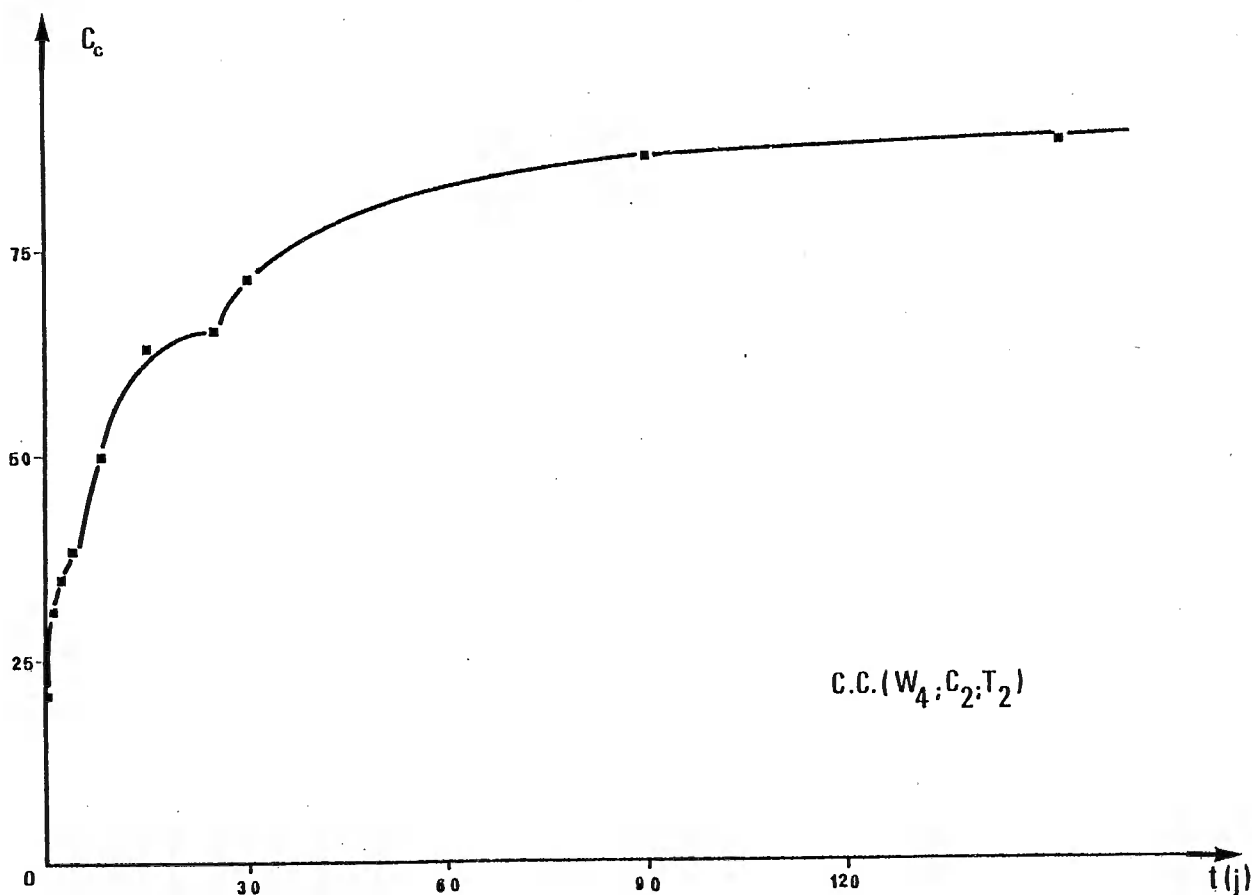


Fig. III.33 : Variations de la consommation de chaux C_c en fonction du temps.

Sur le diagramme transformé ($1/t ; C_c$), ces trois arcs figurent sous forme de trois segments de droite d'expression :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } C_c = - 9,4257 \frac{1}{t} + 40,14$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } C_c = - 131,20 \frac{1}{t} + 69,81$$

$$3^{\text{ème}} \text{ phase : } C_c = - 673,38 \frac{1}{t} + 92,76$$

Ces équations permettent de calculer aisément les coordonnées des deux points de transition :

$$1^{\text{er}} \text{ point de transition : } t = 4,10 \text{ jours}$$

$$C_c = 37,84\%$$

$$2^{\text{ème}} \text{ point de transition : } t = 23,62 \text{ jours}$$

$$C_c = 64,26\%$$

III.2.4.1.3. Variation du rapport R_c/C_c en fonction du temps t

Pour cette série d'essais, la valeur à l'origine du rapport R_c/C_c est de $17,50 \times 10^{-3}$. Après une phase initiale de quelques jours durant laquelle le rapport R_c/C_c se maintient constant voisin de 19×10^{-3} , la courbe représentative de R_c/C_c en fonction du temps est constituée de deux arcs de courbes d'expression :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : phase initiale } R_c/C_c \text{ constante } 19 \times 10^{-3}$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c/C_c = - 29,73 \times 10^{-3} \frac{1}{t} + 26,72 \times 10^{-3}$$

$$3^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c/C_c = - 554 \times 10^{-3} \frac{1}{t} + 47,97 \times 10^{-3}$$

A partir de ces équations, on calcule aisément les coordonnées des points de transition :

$$1^{\text{er}} \text{ point de transition : } t = 3,85 \text{ jours}$$

$$R_c/C_c = 19 \times 10^{-3}$$

$$2^{\text{ème}} \text{ point de transition : } t = 24,67 \text{ jours}$$

$$R_c/C_c = 25,51 \times 10^{-3}$$

En résumé, cette série d'essais de référence permet de constater que les paramètres physiques (R_c, V_D) évoluent de pair avec la consommation de chaux. On peut observer trois phases dont les points de transition se situent respectivement à 4 jours et à 24 jours.

III.2.4.2. Influence du traitement

III.2.4.2.1. Influence du dosage en chaux

Pour étudier l'influence du dosage en chaux, trois séries d'essais ont été réalisées. La série de référence (dosage en chaux : $C_2 = 5\%$) qui constitue la série médiane, est encadrée par une première série comportant un dosage en chaux inférieur : $C_1 = 3\%$ et par une série comportant un dosage en chaux supérieur $C_3 = 7\%$, les autres facteurs demeurant constants. Il convient toutefois de rappeler, comme on l'a vu pour l'arène "Le Sourn", que W_4 qui correspond à l'Optimum Proctor Modifié du matériau traité n'est pas rigoureusement constant, mais varie légèrement avec le dosage en chaux. La figure III.34 montre l'accroissement des résistances obtenues par augmentation du dosage en chaux. Il apparaît que le gain de résistance, à tout instant, lorsqu'on passe du dosage $C_1 = 3\%$ au dosage $C_2 = 5\%$ se poursuit lorsque l'on passe du dosage $C_2 = 5\%$ au dosage $C_3 = 7\%$. A tout moment, les résistances obtenues pour le dosage C_3 sont supérieures à celles obtenues avec le traitement C_2 qui possède des performances mécaniques plus élevées que C_1 . Le diagramme transformé permet de faire les mêmes constatations : s'il est de lecture moins immédiate, il a cependant l'avantage d'indiquer directement les résistances maximales susceptibles d'être atteintes pour chacune des différentes phases des trois séries d'essais.

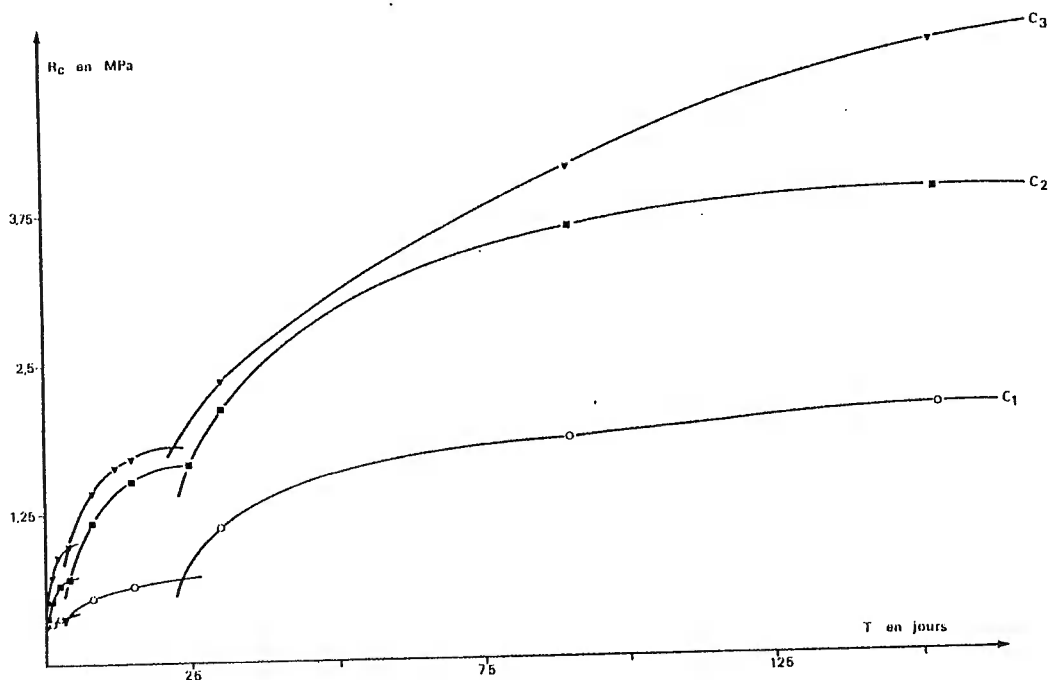


Fig.III. 34 : Variations de la résistance mécanique R_c en fonction du temps pour différents dosages en chaux.

- Si l'on considère les consommations absolues en chaux, on constate évidemment que les consommations ultimes sont d'autant plus élevées que le dosage initial est important. De même, si l'on considère les consommations relatives, on constate que dans le premier temps de la stabilisation, elles sont d'autant plus élevées que le dosage en chaux initial est faible, puis elles tendent vers des valeurs voisines. Si l'on examine plus précisément les consommations maximales théoriques pour chacune des phases, on constate, comme pour les autres arènes déjà étudiées, qu'il existe une corrélation entre celles-ci et le dosage en chaux initial. Si cela constitue une évidence pour la dernière phase de stabilisation, il est toutefois utile de noter,

une fois de plus, que cette corrélation subsiste pour les quantités de chaux consommées dans les premières et des deuxièmes phases de la stabilisation, comme le montre le tableau XVIII.

Dosage initial en chaux	Consommations ultimes en chaux		
	1ère phase	2ème phase	3ème phase
$C_1 = 3\%$	1,33	1,56	2,26
$C_2 = 5\%$	1,78	3,10	4,12
$C_3 = 7\%$	2,44	3,58	6,01

Tableau XVIII : Valeurs des consommations ultimes $C_{C\infty}$ pour chacune des phases en fonction du dosage initial en chaux C_i .

Ces corrélations s'expriment par les équations suivantes :

$$\text{1ère phase } C_{C\infty} = 0,28 C_i + 0,46$$

$$\text{2ème phase } C_{C\infty} = 0,51 C_i + 0,22$$

$$\text{3ème phase } C_{C\infty} = 0,94 C_i - 0,56$$

- La célérité des ondes longitudinales n'a pu être mesurée sur aucune des séries en question.

- Le diagramme de la figure III.35 permet de comparer les valeurs des résistances mécaniques R_C à celles de la consommation de chaux C_C en fonction du dosage initial en chaux. On constate que durant la première phase, quel que soit le dosage initial en chaux, le rendement R_C/C_C est sensiblement constant. Le diagramme de la figure III.35 montre en outre que les points représentatifs relatifs à la deuxième phase s'alignent également avec une bonne corrélation. Le rapport R_C/C_C pour le dosage $C_1 = 3\%$ est légèrement supérieur à celui de $C_2 = 5\%$ qui possède un rendement plus élevé que celui de $C_3 = 7\%$. Il est également important de remarquer qu'un dosage en chaux faible ($C_1 = 3\%$) ne permet pas à la troisième phase de se développer par suite du manque de chaux. Cette question sera réexaminée plus loin.

En résumé, on observe que pour tous les dosages en chaux aussi bien du point de vue des résistances mécaniques que du point de vue des consommations en chaux, la stabilisation s'effectue par étapes. L'accroissement des résistances mécaniques en fonction du dosage initial en chaux permet de constater l'existence d'une relation linéaire entre les valeurs maximales théoriques de la résistance R_C et les dosages initiaux en chaux.

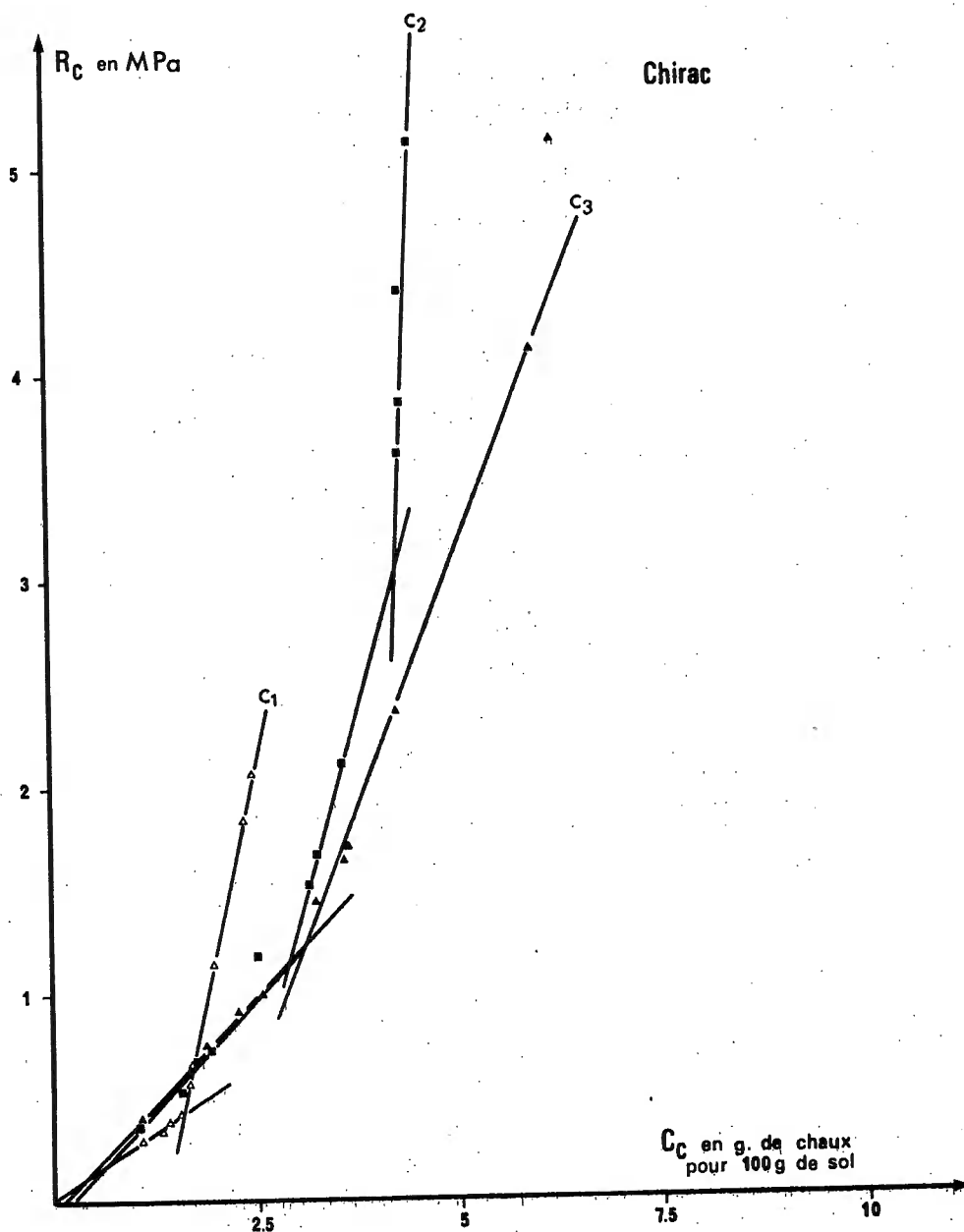


Figure III.35 : Variation de la résistance en compression simple R_c de l'arène Chirac par rapport à la chaux consommée C_c pour différentes teneurs initiales en chaux C_i .

III.2.4.2.2. Influence de l'humidité.

L'influence de l'humidité du sol traité a été étudiée avec un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) pour trois humidités différentes :

- W_2 : humidité de l'Optimum Proctor Modifié du sol non traité.
- W_3 : humidité comprise entre celles des Optimum Proctor Modifié des sols non traité et traité.
- W_4 : humidité de l'Optimum Proctor Modifié du sol traité à $C_2 = 5\%$.

L'influence de l'humidité sur les résistances mécaniques est illustrée sur le diagramme de la figure III.36. Toutes ces séries d'essais confirment l'existence

des trois phases déjà observées avec la série de référence. D'autre part, on constate que les résistances sont d'autant plus élevées que l'humidité du sol est faible.

- Si d'une manière analogue, on représente les consommations en chaux, l'existence des trois phases de stabilisation est confirmée pour toutes les séries. Par contre, on constate que des variations de l'humidité n'ont pas d'influence nette sur la consommation en chaux.

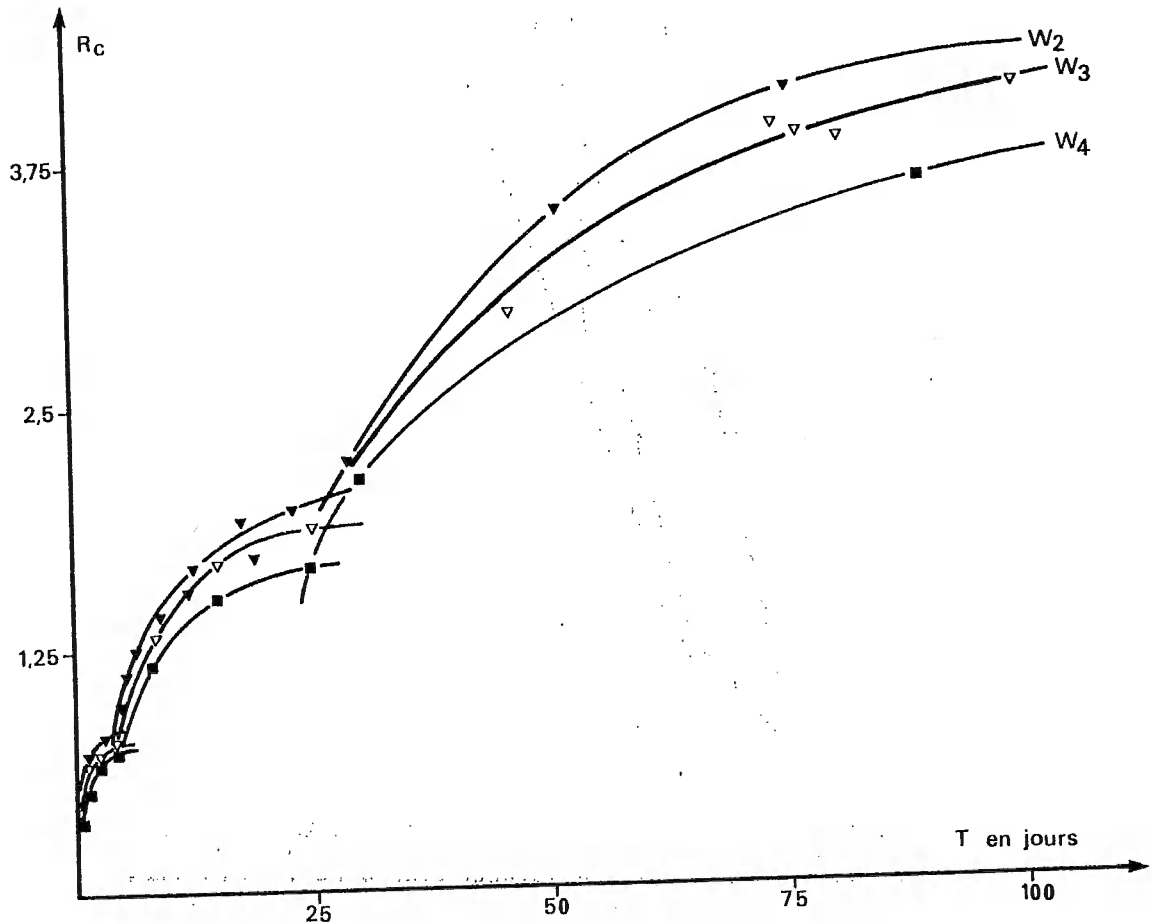


Figure III.36 : Influence de l'humidité sur les résistances mécaniques de l'arène de Chirac.

III.2.4.3. Influence de la température

L'influence de la température a été étudiée sur trois séries d'essais effectuées sur un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) à l'humidité correspondant à l'Optimum Proctor Modifié du sol traité à trois températures différentes : 20°C, 40°C et 60°C.

- Comme pour la série de référence effectuée à 40°C, on constate que l'accroissement des résistances se fait par étapes. L'élévation de température accélère fortement les progrès de la stabilisation. C'est ainsi que les résistances atteintes à 7 jours à 60°C correspondent à celles qui seraient atteintes en 28 jours à 40°C et 300 jours à 20°C.

- Il est également très instructif de comparer les valeurs des résistances mécaniques R_c à celles de la consommation de chaux C_c pour les trois températures

étudiées, on obtient le diagramme représenté sur la figure III.37. Ce diagramme permet de constater que durant la première phase, le rapport R_c/C_c est constant quelle que soit la température. Au cours de la deuxième phase, ceci se vérifie pour 40°C et 60°C tandis que pour la température de 20°C, le rendement est plus élevé que celui de 40°C et 60°C. Ce diagramme met, en outre, en évidence une troisième phase observée aux températures de 40°C et de 60°C, mais non observable à 20°C. Le rendement à 40°C de cette troisième phase est supérieur à celui de 60°C.

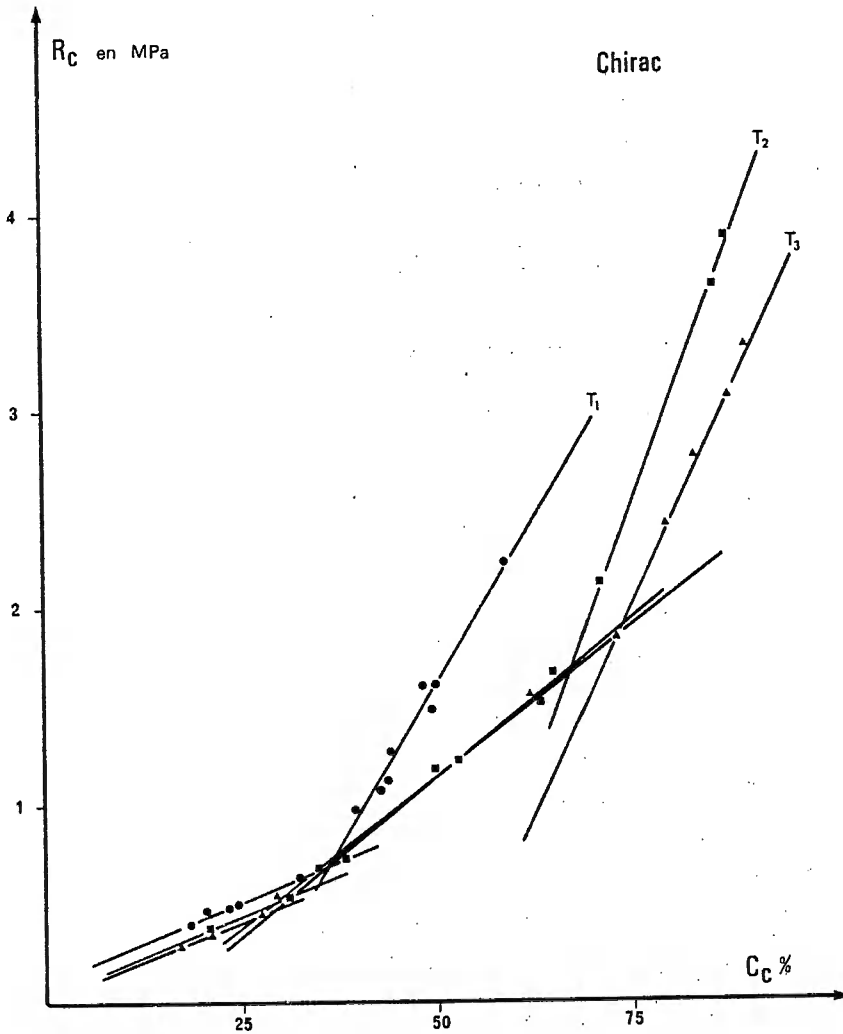


Figure III.37 : Variation de la résistance en compression simple de l'arène Chirac, en fonction de la chaux consommée pour différentes températures.

III.2.5. Arène de la BERTHE

III.2.5.0. Séries d'essais effectuées avec l'arène de la Berthe

Le tableau XIX résume l'ensemble des séries d'essais effectuées sur l'arène "La Berthe".

Arène de la Berthe		Teneur en eau			
		W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
Teneur en chaux	C ₁			B.C. (W ₄ ; C ₁ ; T ₂)	
	C ₂	B.C. (W ₂ ; C ₂ ; T ₁)	B.C. (W ₃ ; C ₂ ; T ₂)	B.C. (W ₄ ; C ₂ ; T ₁)	B.C. (W ₅ ; C ₂ ; T ₂)
		B.C. (W ₂ ; C ₂ ; T ₂)		B.C. (W ₄ ; C ₂ ; T ₂)	
				B.C. (W ₄ ; C ₂ ; T ₃)	
	C ₃			B.C. (W ₄ ; C ₃ ; T ₂)	
C ₄			B.C. (W ₄ ; C ₄ ; T ₂)		

Tableau XIX : Séries d'essais effectuées sur l'arène de "La Berthe".

III.2.5.1. Etude de la série de référence B.C. (W₄; C₂; T₂)

III.2.5.1.1. Variation de la résistance à la compression simple R_c en fonction du temps t

La valeur de la résistance R_c d'un échantillon de matériau naturel non traité rompu immédiatement après compactage, dans les mêmes conditions que la série de référence, est de 0,95 MPa. A partir de cette valeur, la résistance R_c croît de manière continue en fonction du temps pour atteindre 4,5 MPa environ au bout de quatre mois (fig. III 38) La croissance de la résistance à la compression simple se fait en deux étapes. Chacune d'elles figurent sous forme d'un segment de droite dans le diagramme transformé (1/t ; R_c). Leurs expressions analytiques s'écrivent ainsi sous la forme suivante :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_c = 0,91 \frac{1}{t} + 3,13$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_c = - 12,20 \frac{1}{t} + 4,58$$

Les coordonnées des deux points de transition se calculent aisément à partir de ces équations, on trouve :

$$\text{point de transition : } t = 7,78 \text{ jours}$$

$$R_c = 3,02 \text{ MPa}$$

III.2.5.1.2. Variation du pourcentage de chaux consommée C_c en fonction du temps t

Le pourcentage de chaux consommée par un échantillon de cette série à l'instant qui suit son compactage est de 37,28%.

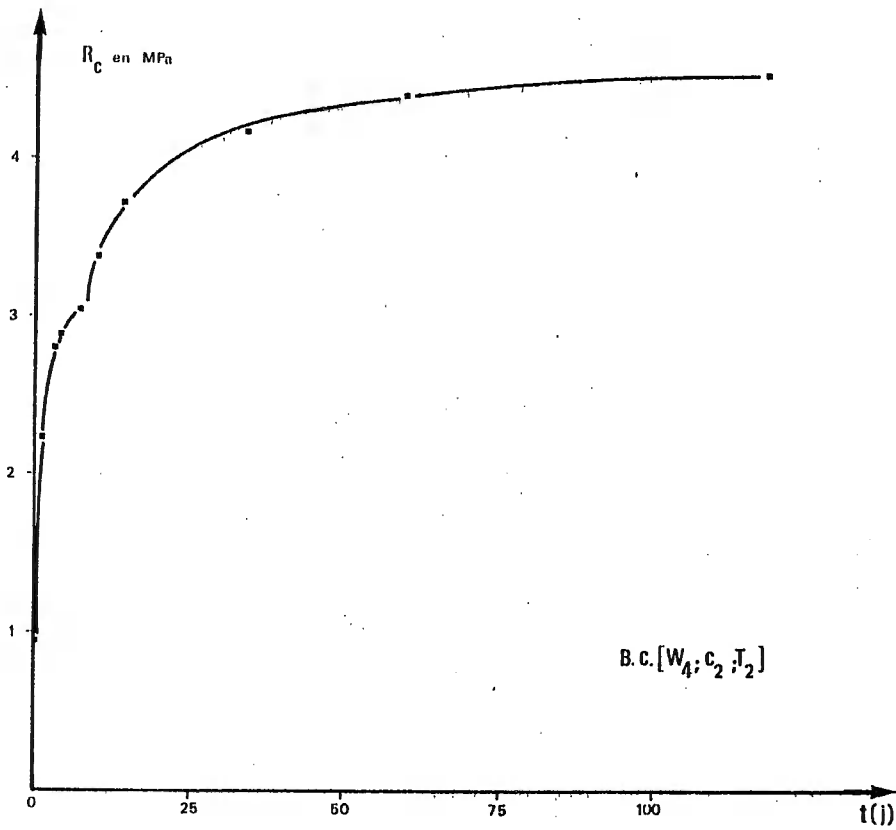


Figure III.38 : Variations de la résistance mécanique en fonction du temps.

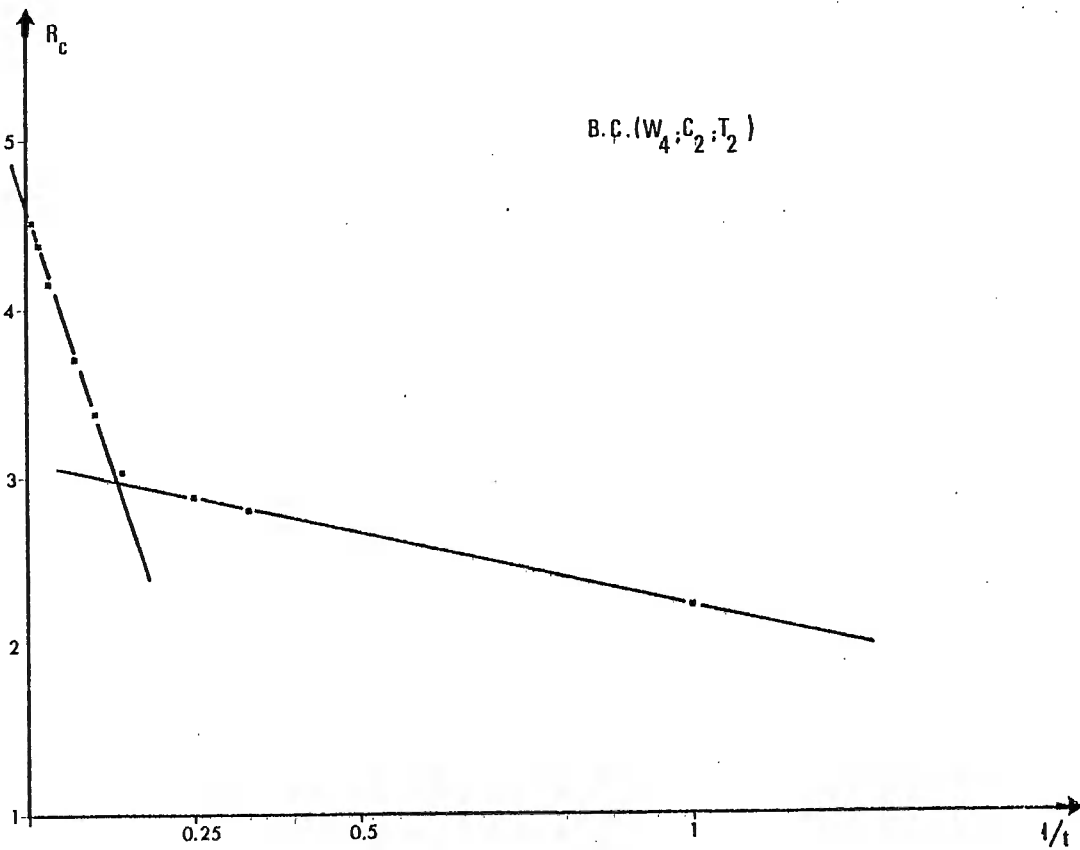


Figure III.39 : Variations de la résistance mécanique en fonction de l'inverse du temps (Arène de la BERTHE).

Comme pour R_C , la consommation de chaux en fonction du temps permet aussi d'observer deux arcs de courbes, d'allure hyperbolique. Au bout de quatre mois, lors de l'arrêt des essais, le pourcentage de chaux consommée est d'environ 86% (figure III.40). Sur le diagramme transformé ($1/t$; C_C) (figure III.41), ces arcs correspondent à des segments de droite dont les expressions analytiques s'écrivent comme suit :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } C_C = - 16,32 \frac{1}{t} + 75,71$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } C_C = - 86,96 \frac{1}{t} + 85,41$$

Ces expressions permettent de calculer les coordonnées du point de transition, à savoir :

$$t = 7,28 \text{ jours}$$

$$C_C = 73,47\%$$

III.2.5.1.3. Variation de la célérité des ondes longitudinales en fonction du temps t.

A partir de l'instant origine, les mesures de la célérité des ondes longitudinales sont possibles pour la série B.C. ($W_4; C_2; T_2$). A cet âge, V_L est égal à 983 m/s et V_D atteint la valeur de 1045 m/s. Puis V_L et V_D croissent, de façon continue, en fonction du temps pour atteindre environ 2000 m/s au bout de 4 mois. Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour l'arène "Le Sourn", on ne retient ici que l'étude de la variation de V_D en fonction du temps : la courbe représentative est formée de deux arcs, d'allure hyperbolique, d'expression analytique donnée ci-dessous :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } V_D = - 189,37 \frac{1}{t} + 1817,81$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } V_D = - 933,27 \frac{1}{t} + 1967,78$$

Ces expressions analytiques de V_D permettent de calculer les coordonnées du point de transition, à savoir :

$$t = 8,27 \text{ jours}$$

$$V_D = 1794,91 \text{ m/s}$$

III.2.5.1.4. Variation du rapport R_C/C_C en fonction du temps t

Pour cette série d'essais, la valeur à l'origine de R_C/C_C est de $25,4 \times 10^{-3}$. A un jour, ce rapport est de $37,3 \times 10^{-3}$. Puis, il augmente progressivement pour atteindre la valeur de $52,60 \times 10^{-3}$ au bout de quatre mois. Cette croissance s'est effectuée en deux étapes, d'allure hyperbolique, dont les expressions analytiques sont :

$$1^{\text{ère}} \text{ phase : } R_C/C_C = - 4,18 \times 10^{-3} \frac{1}{t} + 41,58 \times 10^{-3}$$

$$2^{\text{ème}} \text{ phase : } R_C/C_C = - 94,44 \times 10^{-3} \frac{1}{t} + 53,68 \times 10^{-3}$$

Ces expressions permettent de calculer les coordonnées des points de transition, à savoir :

$$t = 7,46 \text{ jours}$$

$$R_C/C_C = 41,02 \times 10^{-3}$$

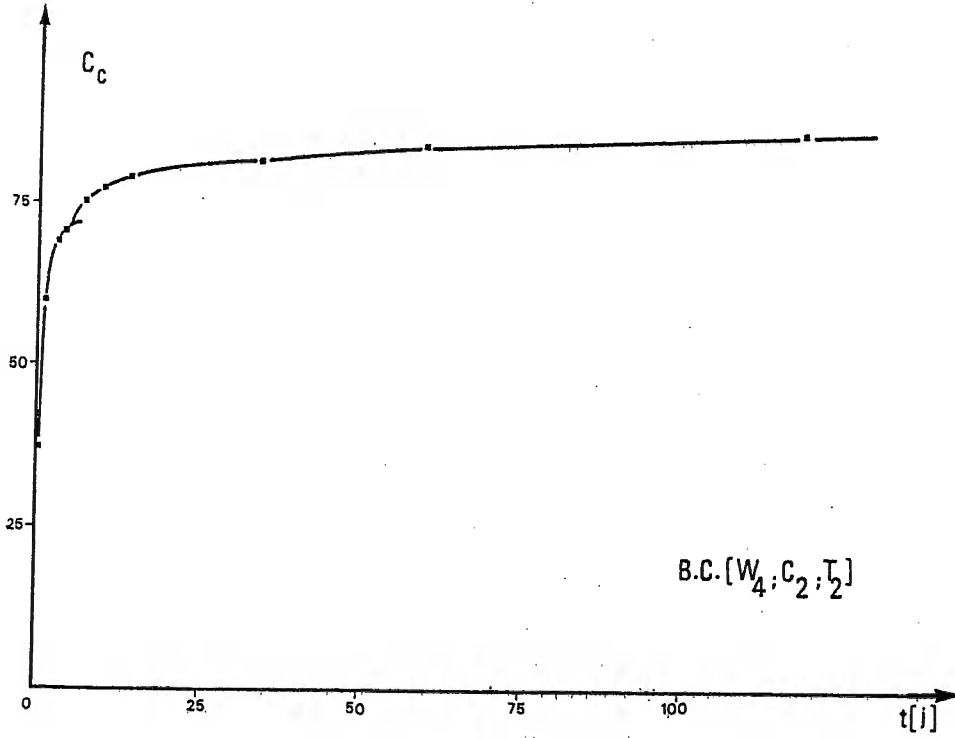


Figure III.40 : Variations de la quantité de chaux consommée C_c en fonction du temps (Arène de la BERTHE)

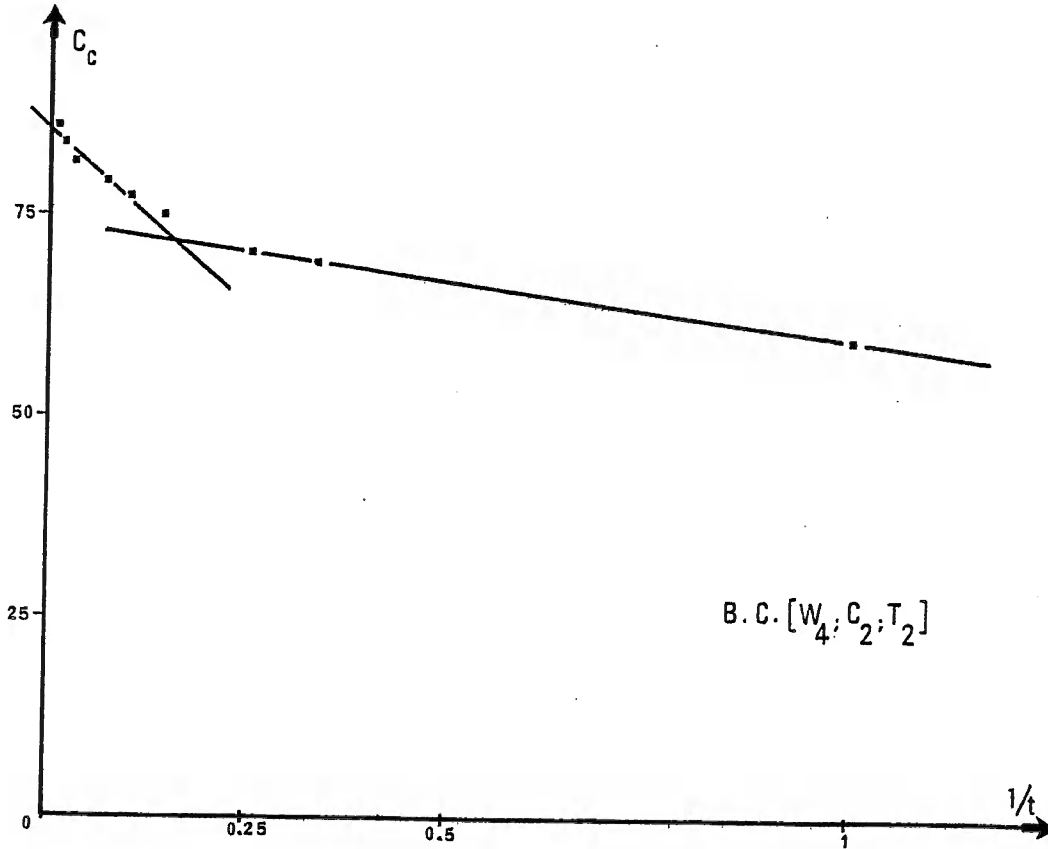


Figure III.41 : Variations de la quantité de chaux consommée C_c en fonction de l'inverse du temps (Arène de la BERTHE).

III.2.5.2. Influence du traitement

III.2.5.2.1. Influence du dosage en chaux

Pour étudier l'influence du dosage en chaux, quatre séries d'essais ont été réalisées. La série de référence (dosage en chaux : $C_2 = 5\%$) est encadrée par une première série comportant un dosage en chaux inférieur : $C_1 = 3\%$ et par deux autres séries comportant des dosages en chaux supérieurs : $C_3 = 7\%$ et $C_4 = 10\%$, les autres facteurs demeurant constants. Il convient toutefois de rappeler que W_4 , qui correspond à l'Optimum Proctor Modifié du matériau traité, n'est pas rigoureusement constant, mais varie légèrement avec le dosage en chaux.

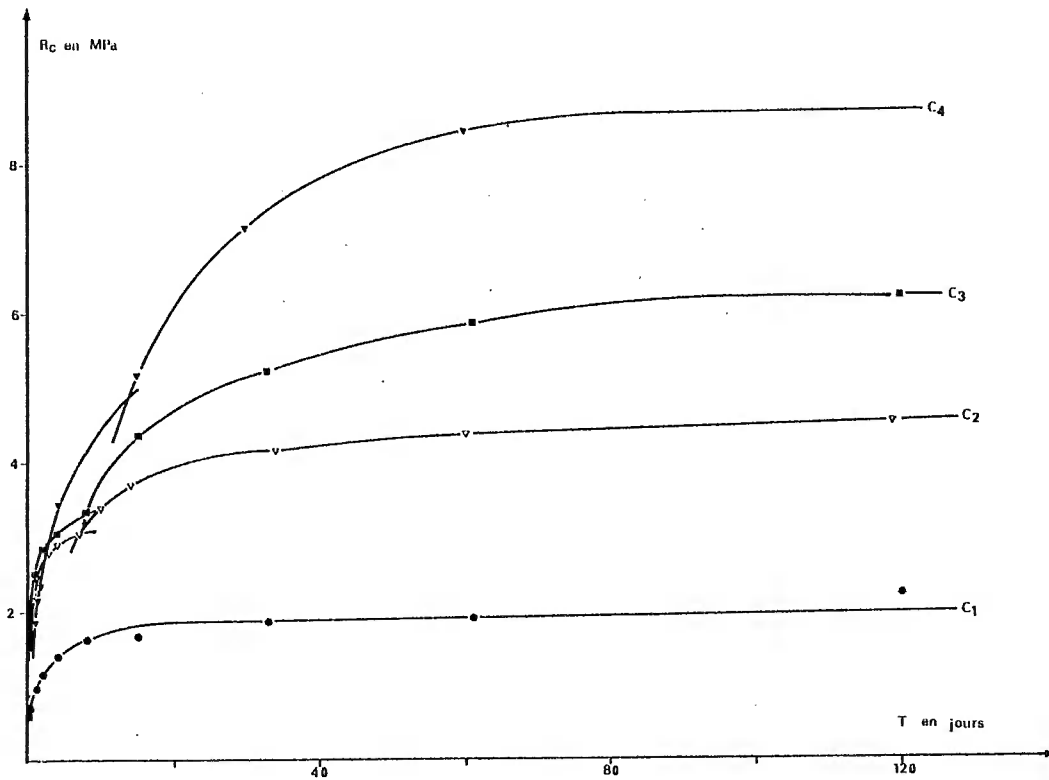


Fig. III.42 : Variations de la résistance mécanique R_c en fonction du temps pour différents dosages en chaux C_i .

La figure III.42 montre l'accroissement des résistances obtenues par augmentation du dosage en chaux. Il apparaît que le gain de résistance aux jeunes âges lorsqu'on passe du dosage $C_1 = 3\%$ au dosage $C_2 = 5\%$ ne se poursuit plus lorsque l'on passe du dosage C_2 à C_3 et de C_3 à C_4 . Par contre, le gain de résistance, à moyen et long termes, lorsque l'on passe du dosage C_1 à C_2 se poursuit de la même manière lorsque l'on passe du dosage C_2 à C_3 et de C_3 à C_4 . Le diagramme transformé permet de faire les mêmes constatations : s'il est de lecture moins immédiate, il a cependant l'avantage d'indiquer directement les résistances maximales susceptibles d'être atteintes pour chacune des différentes phases des trois séries d'essais.

- Si l'on considère les consommations absolues en chaux, on constate évidemment que les consommations ultimes sont d'autant plus élevées que le dosage initial est important. De même, si l'on considère les consommations relatives, on constate que dans le premier temps de la stabilisation, elles sont d'autant plus élevées que le dosage en chaux initial est faible, puis elles tendent vers des valeurs voisines. Si l'on examine les consommations maximales théoriques pour chacune des phases indiquées sur le tableau XX, on constate, comme cela a été le cas pour les autres arènes, qu'il existe une corrélation entre celles-ci et le dosage en chaux initial.

Dosage initial en chaux	Consommations ultimes $C_{C\infty}$	
	1ère phase	2ème phase
$C_1 = 3\%$	2,27	2,42
$C_2 = 5\%$	3,28	3,78
$C_3 = 7\%$	4,51	5,60
$C_4 = 10\%$	4,79	7,77

Tableau XX : Valeurs des consommations ultimes $C_{C\infty}$ de chacune des phases en fonction du dosage initial C_i .

Ces corrélations s'expriment par les équations suivantes :

$$\text{1ère phase : } C_{C\infty} = 0,37 C_i + 1,41$$

$$\text{2ème phase : } C_{C\infty} = 0,78 C_i + 0,04$$

- Les célérités des ondes longitudinales ont été mesurées sur les quatre séries, le diagramme transformé permet d'observer deux phases dans l'augmentation des vitesses soniques au cours du vieillissement pour les séries correspondantes aux dosages C_2, C_3 et C_4 et une seule phase pour la série correspondant au dosage C_1 . Il est à noter que l'accroissement de la célérité des ondes longitudinales lorsque l'on passe du dosage $C_1 = 3\%$ à $C_2 = 5\%$ se maintient lorsque l'on passe du dosage $C_2 = 5\%$ à $C_3 = 7\%$, mais ne se poursuit pas en passant de $C_3 = 7\%$ à $C_4 = 10\%$. Dans ce cas précis, à tout instant, les célérités des ondes longitudinales obtenues pour le dosage $C_3 = 7\%$ sont supérieures à celles obtenues avec le dosage $C_4 = 10\%$.

- Si l'on compare les valeurs des résistances mécaniques R_c à celles de la consommation de chaux C_c en fonction du dosage initial en chaux, on obtient le diagramme de la figure III. 43. Il permet de constater que, durant la première phase, quel que soit le dosage initial en chaux (exception faite pour le dosage $C_2 = 5\%$ qui a un rapport R_c/C_c nettement plus élevé que

ceux des autres dosages) le rendement R_c/C_c est constant. Le diagramme de la figure III.43 permet, en outre, de constater que les points représentatifs relatifs à la deuxième phase s'alignent également avec une bonne corrélation. Le rapport R_c/C_c pour le dosage $C_3 = 7\%$ est supérieur à celui de $C_2 = 5\%$, supérieur aussi à celui de $C_4 = 10\%$.

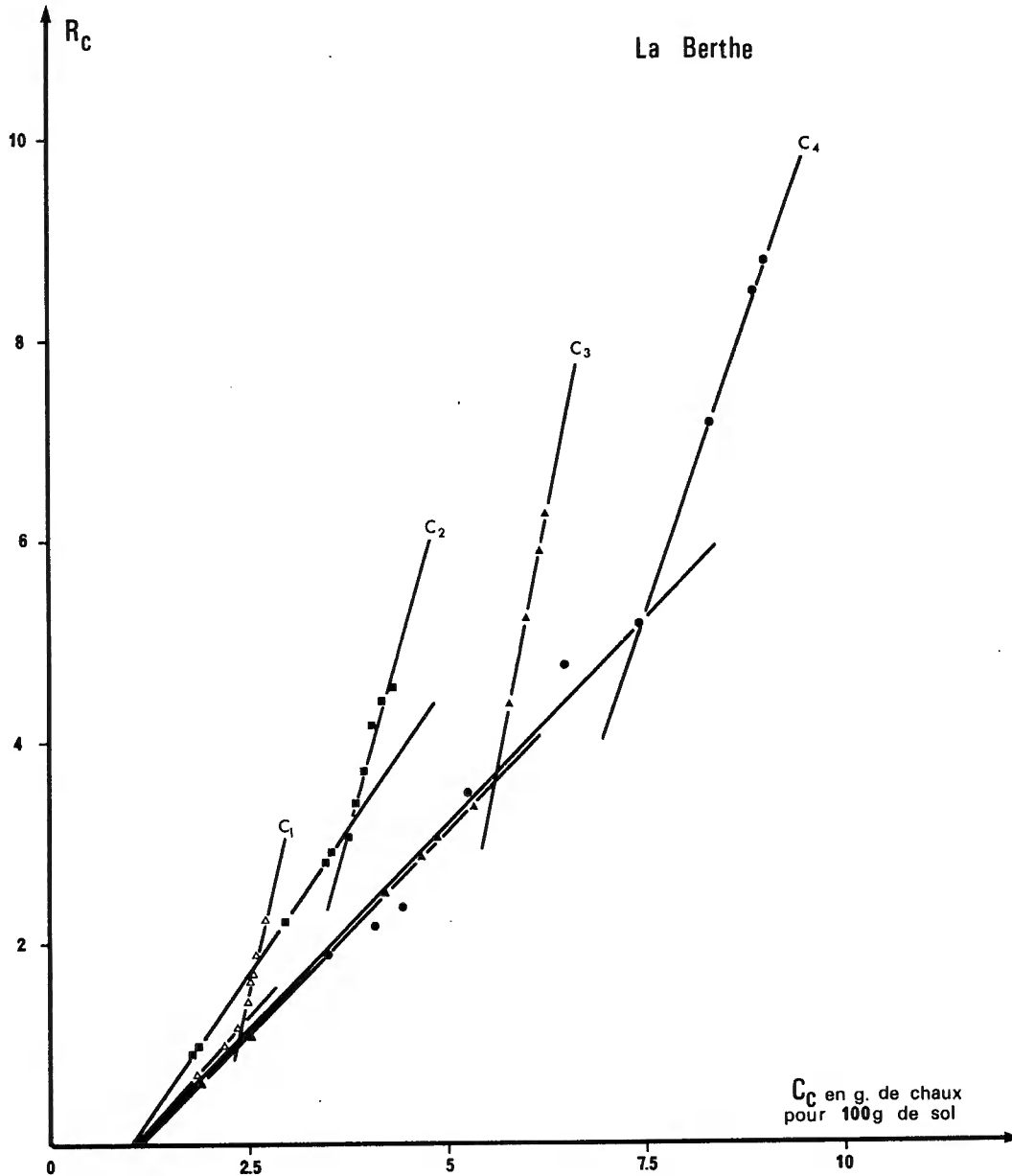


Fig. III.43 : Variation de la résistance en compression simple R_c par rapport à la chaux consommée C_c pour différents dosages en chaux C_i .

En résumé, on observe que pour tous les dosages en chaux aussi bien du point de vue des résistances mécaniques que du point de vue des consommations en chaux, la stabilisation s'effectue par étapes (2 étapes observées). L'accroissement des résistances mécaniques en fonction du dosage en chaux initial est observé jusqu'au dosage de 10%, mais le rendement R_c/C_c atteint son maximum pour un dosage voisin de $C_3 = 7\%$. Ceci concorde avec les résultats des mesures des célérités des ondes longitudinales qui atteignent leur optimum pour le dosage $C_3 = 7\%$.

III.2.5.2.2. Influence de l'humidité

L'influence de l'humidité du sol traité a été étudiée avec un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) pour quatre humidités différentes :

- W_2 : humidité de l'Optimum Proctor Modifié du sol non traité
- W_3 : humidité comprise entre celles des Optimums Proctor Modifié des sols non traité et traité
- W_4 : humidité de l'Optimum Proctor Modifié du sol traité
- W_5 : humidité supérieure de 4% à celle de l'Optimum Proctor Modifié du sol traité.

Toutes ces séries confirment l'existence des deux phases observées. D'autre part, on constate que les résistances varient beaucoup en fonction de l'humidité du sol, elles sont maximales pour la teneur en eau W_4 .

- Si d'une manière analogue, on représente les consommations en chaux, l'existence des deux phases de stabilisation est confirmée pour toutes les séries. Par contre, on constate que des variations de l'humidité n'ont pas d'influence nette sur la consommation en chaux.

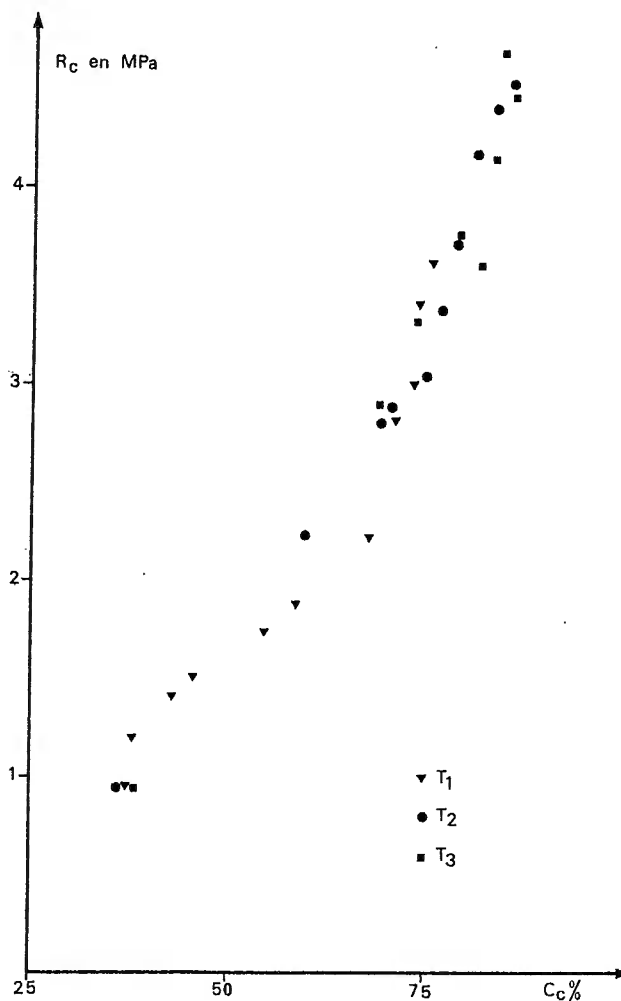


Fig. III.44 : Variations des résistances mécaniques R_c en fonction des quantités de chaux consommées C_c pour différentes températures T_1 .

III.2.5.3. Influence de la température

L'influence de la température a été étudiée sur trois séries d'essais effectuées sur un dosage en chaux moyen ($C_2 = 5\%$) à l'humidité correspondant à l'Optimum Proctor Modifié du sol traité à trois températures différentes : 20°C, 40°C et 60°C.

- Comme pour la série de référence effectuée à 40°C, on constate que l'accroissement des résistances mécaniques se fait par étapes. L'élévation de température accélère fortement les progrès de la stabilisation. C'est ainsi que les résistances atteintes à 7 jours à 60°C correspondent à celles qui seraient atteintes en 25 jours à 40°C et 350 jours à 20°C.

- Il est également instructif de comparer les valeurs des résistances mécaniques R_C à celles de la consommation en chaux C_C pour les trois températures étudiées, on obtient le diagramme représenté sur la figure III.44.

III.3. RELATION ENTRE LES OXYDES COMBINES ET LES RESISTANCES MECANIQUES

III.3.0. Introduction

Les dosages effectués sur les différentes éprouvettes d'arènes traitées portent sur la "silice combinée", l'"alumine combinée" et les "oxydes de fer combinés". Les résultats relatifs à ces derniers sont généralement très faibles pour les arènes et ne présentent pas de relations nettes avec les résistances mécaniques. Seuls, sont considérés ici les résultats relatifs à la silice et à l'alumine "combinées".

III.3.1. Arène "Le Sourn"

Les neuf éprouvettes de l'arène du Sourn analysées sont à la teneur en eau W_4 correspondant à celle de l'Optimum Proctor Modifié du sol traité et elles ont été conservées à 40°C. Elles diffèrent par le dosage en chaux et la durée de maturation. Le tableau XXI indique le taux des oxydes combinés et rappelle les résistances en compression simple R_C correspondantes. Les diagrammes de la figure III.45 montrent la corrélation qui existe entre les résistances mécaniques R_C d'une part, et la silice et l'alumine combinées d'autre part. La droite de régression relative à la silice combinée a pour équation :

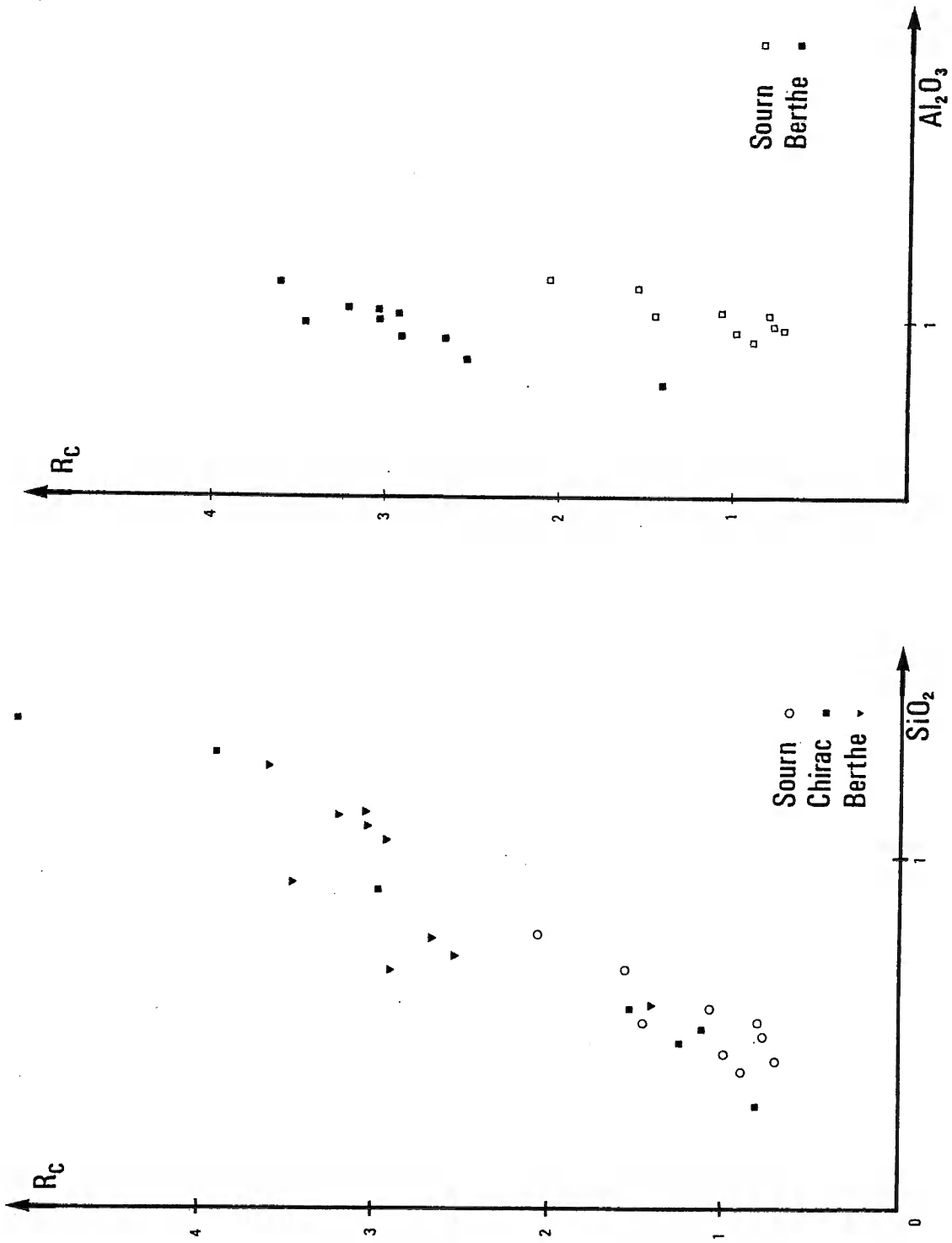
$$R_C = 3,16 (SiO_2\%) - 0,55$$

et celle relative à l'alumine combinée :

$$R_C = 3,39 (Al_2O_3\%) - 2,34$$

Il est à noter que le taux de silice combinée est lié au taux d'alumine combinée. C'est ce qu'illustre le diagramme de la figure III. 47 : la droite de régression ajustée sur les neufs points a pour équation :

$$(SiO_2\%) = 1,09 (Al_2O_3\%) - 0,58$$



Arène du Sourn	Oxydes combinés		Résistance à la compression simple
Dosage initial en chaux	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	R _c (MPa)
C ₁ = 3%	0,42	0,95	0,71
	0,49	0,97	0,77
	0,53	1,03	0,80
C ₂ = 5%	0,39	0,88	0,89
	0,57	1,05	1,08
C ₃ = 7%	0,49	0,93	0,99
	0,53	1,03	1,46
	0,68	1,18	1,56
	0,78	1,23	2,07

Tableau XXI : Taux des oxydes combinés et résistances à la compression simple d'éprouvettes de l'arène du Sourn traitées à différentes teneurs en chaux.

III.3.2. Arène "Le Breuil"

Les 12 éprouvettes de l'arène du Breuil analysées ont une teneur en eau W₄ correspondant à l'Optimum Proctor Modifié du sol traité et elles ont été conservées à 40°C. Elles diffèrent par le dosage en chaux et la durée de maturation. Le tableau XXII indique le taux des oxydes combinés et rappelle les résistances en compression simple R_c.

La figure III.46 permet de saisir immédiatement la corrélation directe qui existe entre la résistance à la compression simple R_c et les oxydes combinés. La droite de régression relative à la silice combinée a pour équation :

$$R_c = 5,54 (SiO_2\%) - 1,28$$

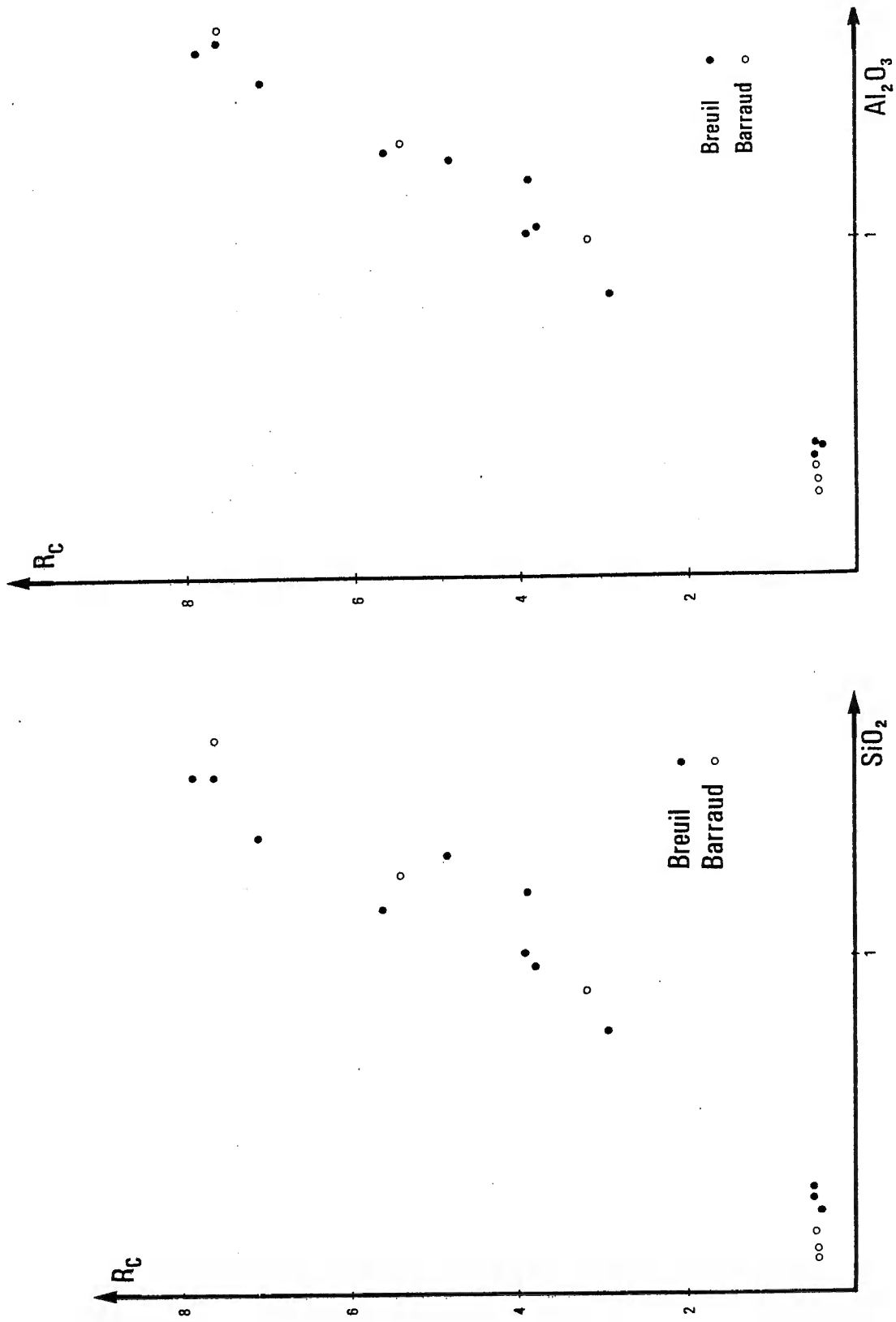


Figure III 46: Diagramme illustrant les corrélations entre les oxydes combinés et les résistances mécaniques.

et celle relative à l'alumine combinée :

$$R_c = 5,90 (Al_2O_3\%) - 1,97$$

Il convient toutefois de remarquer qu'il existe, aussi pour le Breuil, une relation étroite entre le taux de silice combinée et le taux d'alumine combinée comme le montre la figure III.47 . Cette relation peut s'exprimer par l'équation suivante :

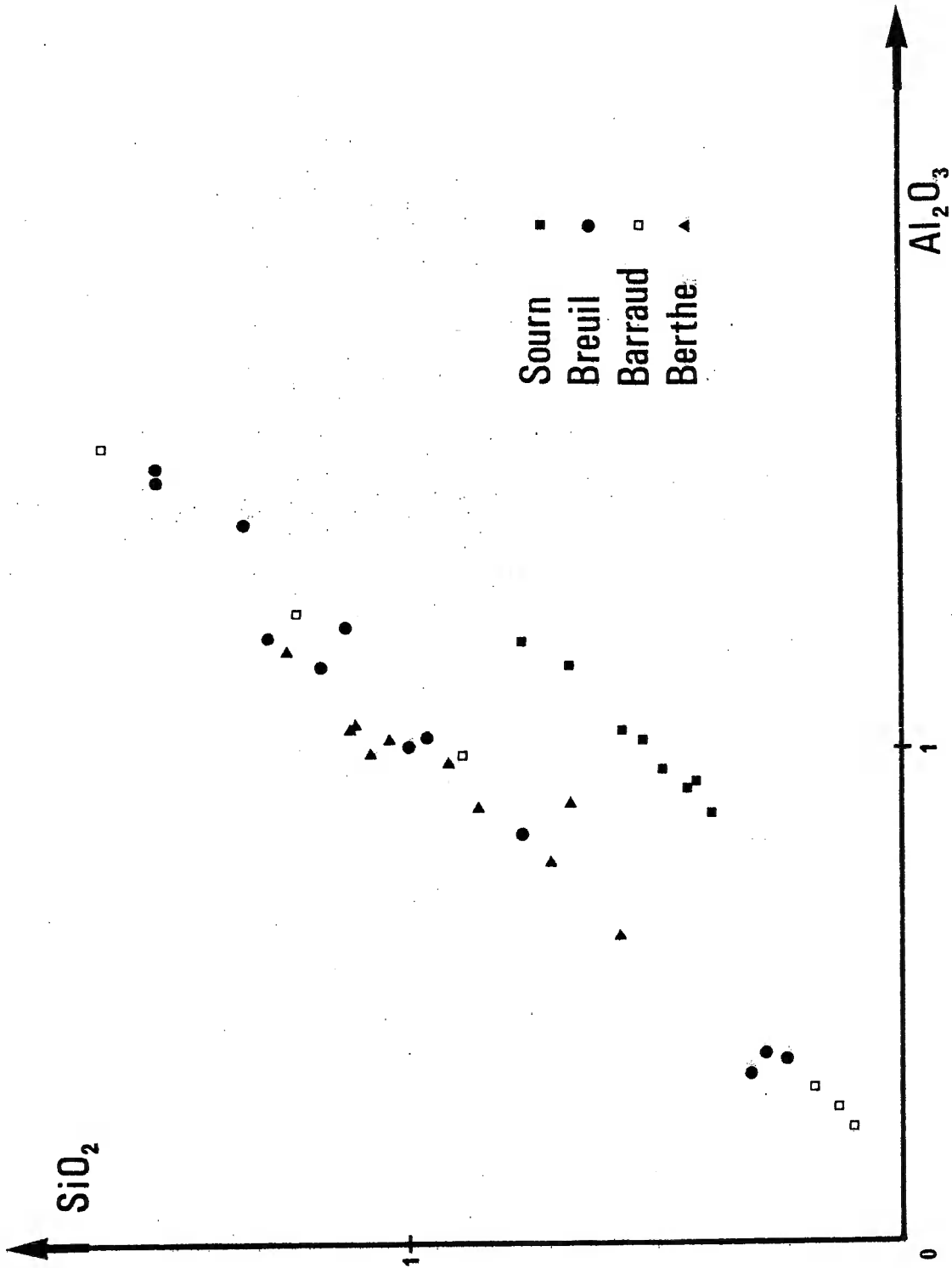
$$(SiO_2\%) = 1,04 (Al_2O_3\%) - 0,10$$

Arène du Breuil	Oxydes combinés		Résistance à la compression simple en MPa
Dosage initial en chaux	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	R _c
C ₀ = 1%	0,24	0,38	0,40
	0,28	0,39	0,48
	0,31	0,35	0,49
C ₁ = 3%	0,78	0,84	2,92
	0,97	1,04	3,79
	1,01	1,02	3,92
	1,19	1,18	3,89
	1,30	1,24	4,87
C ₃ = 7%	1,35	1,47	7,12
	1,53	1,59	7,64
C ₄ = 10%	1,14	1,26	5,63
	1,53	1,56	7,89

Tableau XXII: Taux des oxydes combinées et résistances à la compression simple R_c des éprouvettes de l'arène du Breuil traitées à différents teneurs en chaux.

III.3.3. Arène de BARRAUD

Seules six éprouvettes de la série de référence de Barraud ont été analysées. Les résultats sont consignés dans le tableau XXIII.



Arène de Barraud	Oxydes combinés		Résistance à la compression simple	
	Dosage initial en chaux	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	R _c (MPa)
C ₂ = 5%		0,10	0,24	0,45
		0,13	0,28	0,46
		0,18	0,32	0,48
		0,90	1,00	3,18
		1,24	1,29	5,43
		1,64	1,63	7,63

Tableau XXIII: Taux des oxydes combinés et résistance à la compression simple R_c des éprouvettes de la série de référence de l'arène de Barraud.

La figure III.46 montre que les points représentatifs correspondant à l'arène de Barraud se situent sur le diagramme de façon analogue à ceux de l'arène du Breuil.

Bien que moins significatives, les équations des droites de régression relatives à la silice et à l'alumine combinées ont été déterminées à titre de comparaison :

$$R_c = 4,60 (\text{SiO}_2\%) - 0,28$$

$$R_c = 5,06 (\text{Al}_2\text{O}_3\%) - 1,08$$

Comme pour l'arène du Breuil, le diagramme de la figure III.47 permet d'apprécier la liaison étroite entre le taux de silice combinée et celui d'alumine combinée. L'équation de la droite de régression ajustée sur six points est :

$$(\text{SiO}_2\%) = 1,10 (\text{Al}_2\text{O}_3\%) - 0,18$$

III.3.4. Arène de Chirac

Seule la silice combinée a été dosée pour des éprouvettes à l'humidité W₂ correspondant à l'Optimum Proctor Modifié du sol naturel, traitées avec un dosage initial en chaux de 5% et conservées à 40°C.

La figure III.45 indique la relation entre le taux de silice combinée et la résistance à la compression simple des éprouvettes. La droite de régression ajustée sur les points expérimentaux a pour équation :

$$R_c = 3,72 (\text{SiO}_2\%) - 0,51$$

Le tableau XXIV indique le taux de silice combinée et rappelle les résistances à la compression simple.

Arène de Chirac	Oxydes combinés	Résistance à la compression simple
Dosage initial en chaux	SiO ₂ %	R _c (MPa)
C ₂ = 5%	0,29	0,81
	0,51	1,23
	0,47	1,25
	0,57	1,54
	0,91	2,98
	1,30	3,91
	1,39	5,04

Tableau XXIV : Taux des oxydes combinés et résistance à la compression simple des éprouvettes traitées à 5% de chaux de l'arène de Chirac.

III.3.5. Arène de la Berthe

Les éprouvettes de l'arène gneissique de la Berthe analysées ont été conservées à 40°C. Le tableau XXV indique la nature du traitement, les taux d'oxydes combinés et rappelle les résistances en compression simple.

Traitement		Oxydes combinés		Résistance à la compression simple
Dosage en chaux	Humidité	Silice	Alumine	R _c (MPa)
C ₁ = 3%	W ₄	0,58	0,63	1,42
C ₂ = 5%	W ₂	0,72	0,78	2,55
		0,87	0,89	2,67
		0,68	0,90	2,91
		1,05	1,03	2,93
		1,12	1,06	3,21
	1,26	1,21	3,61	
	W ₄	1,09	1,00	3,04
C ₃ = 7%	W ₄	1,13	1,05	3,05
C ₄ = 10%	W ₄	0,93	0,98	3,47
		2,85	2,64	8,75

Tableau XXV : Taux des oxydes "combinés" et résistance à la compression simple R_c des éprouvettes traitées à différentes teneurs en chaux de l'arène gneissique de la Berthe.

La figure III.45 montre la corrélation entre les résistances mécaniques et les oxydes "combinés". La droite de régression relative à la silice combinés a pour équation :

$$R_c = 2,97 (SiO_2\%) + 0,09$$

et celle relative à l'alumine combinée :

$$R_c = 3,50 (Al_2O_3\%) - 0,47$$

La relation entre la silice et l'alumine combinées est donnée par l'équation

$$(SiO_2) = 1,14 (Al_2O_3) - 0,15.$$

III.3.6. En résumé, les corrélations mises en évidence entre les résistances mécaniques de quelques arènes traitées à la chaux et le silice ou l'alumine dites "combinés", exprimées par l'équation des droites de régression ajustées sur les résultats expérimentaux sont regroupés avec les relations entre la silice "combinée" et l'alumine "combinée" dans le tableau XXVI ci-dessous.

Relations entre la résistance mécanique R_c et le pourcentage de silice combinée.	
Le Sourn	$R_c = 3,16 (SiO_2\%) - 0,55$
Le Breuil	$R_c = 5,54 (SiO_2\%) - 1,28$
Barraud	$R_c = 4,60 (SiO_2\%) - 0,28$
Chirac	$R_c = 3,72 (SiO_2\%) - 0,51$
La Berthe	$R_c = 2,97 (SiO_2\%) + 0,09$
Relations entre la résistance mécanique R_c et le pourcentage d'alumine combinée.	
Le Sourn	$R_c = 3,39 (Al_2O_3\%) - 2,34$
Le Breuil	$R_c = 5,90 (Al_2O_3\%) - 1,97$
Barraud	$R_c = 5,06 (Al_2O_3\%) - 1,08$
La Berthe	$R_c = 3,50 (Al_2O_3\%) - 0,47$
Relations entre les pourcentages de silice et d'alumine combinées.	
Le Sourn	$(SiO_2\%) = 1,09 (Al_2O_3\%) - 0,58$
Le Breuil	$(SiO_2\%) = 1,04 (Al_2O_3\%) - 0,10$
Barraud	$(SiO_2\%) = 1,10 (Al_2O_3\%) - 0,18$
La Berthe	$(SiO_2\%) = 1,14 (Al_2O_3\%) - 0,15$

Tableau XXVI : Relations expérimentales entre les oxydes combinés et les résistances à la compression simple R_c .

IV DISCUSSIONS ET INTERPRETATIONS

DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

IV.0 - INTRODUCTION

Les résultats expérimentaux rapportés et déjà formalisés dans le chapitre précédent vont être analysés et discutés :

- pour dégager les lois qui régissent l'évolution, des paramètres mécaniques (et éventuellement des paramètres chimiques), en fonction du temps. Cette question prend toute son importance au niveau des applications géotechniques où le développement des résistances mécaniques dans le temps conditionne le déroulement des travaux.

- pour considérer la relation entre la consommation en chaux C_c et l'accroissement des résistances mécaniques R_c .

- et enfin, pour tenter d'aborder les phénomènes fondamentaux qui commandent les processus de stabilisation des sols par la chaux et sont, de ce fait, l'essence même de ce procédé.

IV.1 - EVOLUTION DES PARAMETRES MECANIQUES EN FONCTION DU TEMPS

IV.1.0 - Introduction

Les résultats expérimentaux montrent que, comme dans le cas des sols de limons, la stabilisation des arènes par la chaux s'effectue en plusieurs phases et que le développement des résistances R_c suit la consommation de chaux.

IV.1.1 - Application aux arènes du mode de représentation utilisé pour les sols de limons

Il était naturel d'adopter le mode de représentation utilisé pour les sols de limons (ESTEOULE et PERRET, 1975 - PERRET, 1977). Celui-ci consiste à porter sur un diagramme dit "diagramme transformé" les accroissements des résistances mécaniques par rapport au temps : $(R_c - R_{c0})/t$, en fonction des résistances mécaniques R_c .

Sur ce diagramme (R_c ; $R_c - R_{c0}/t$, on constate que les points s'alignent sur plusieurs segments de droite, ce qui implique que l'évolution des résistances mécaniques R_c , en fonction du temps, suit sur une loi homographique (PERRET, 1977 - pp 85-102).

Si l'on considère l'arène gneissique de la Berthe, les diagrammes de la figure IV.1 permettent de constater que ce mode de représentation convient aussi bien pour les résistances mécaniques R_c que pour la consommation de chaux C_c .

Par contre, si l'on considère un autre type d'arène, comme le Sourn par exemple, il apparaît que le mode de représentation utilisé ne convient plus parfaitement comme le montre le diagramme de la figure IV.2 correspondant à la série d'essais S.C. ($W_1; C_2; T_2$).

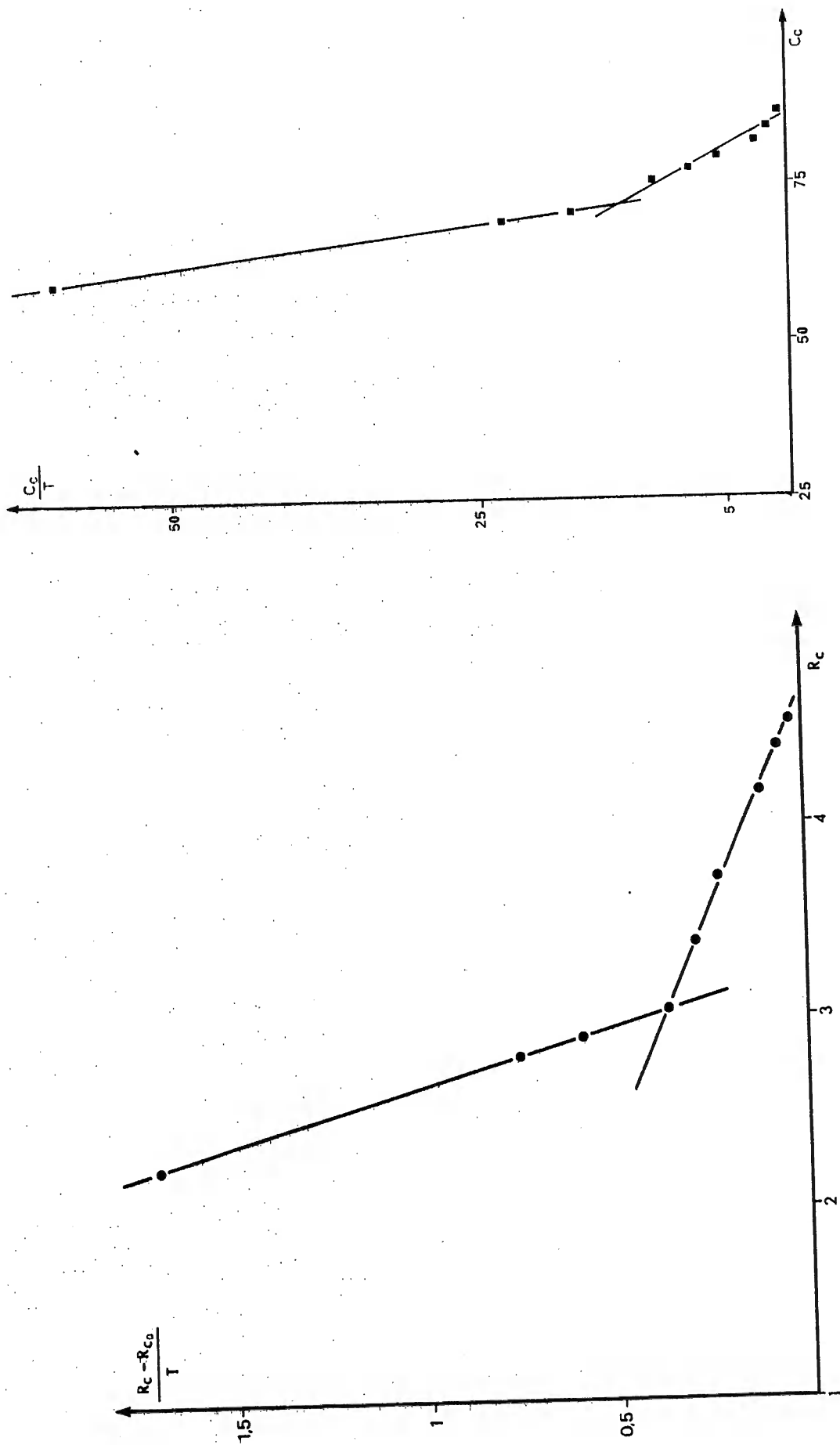


Figure : IV-1. Diagrammes transformés dans le système (X ; $\frac{X - X_0}{t}$) pour l'arène de La BERTHE.

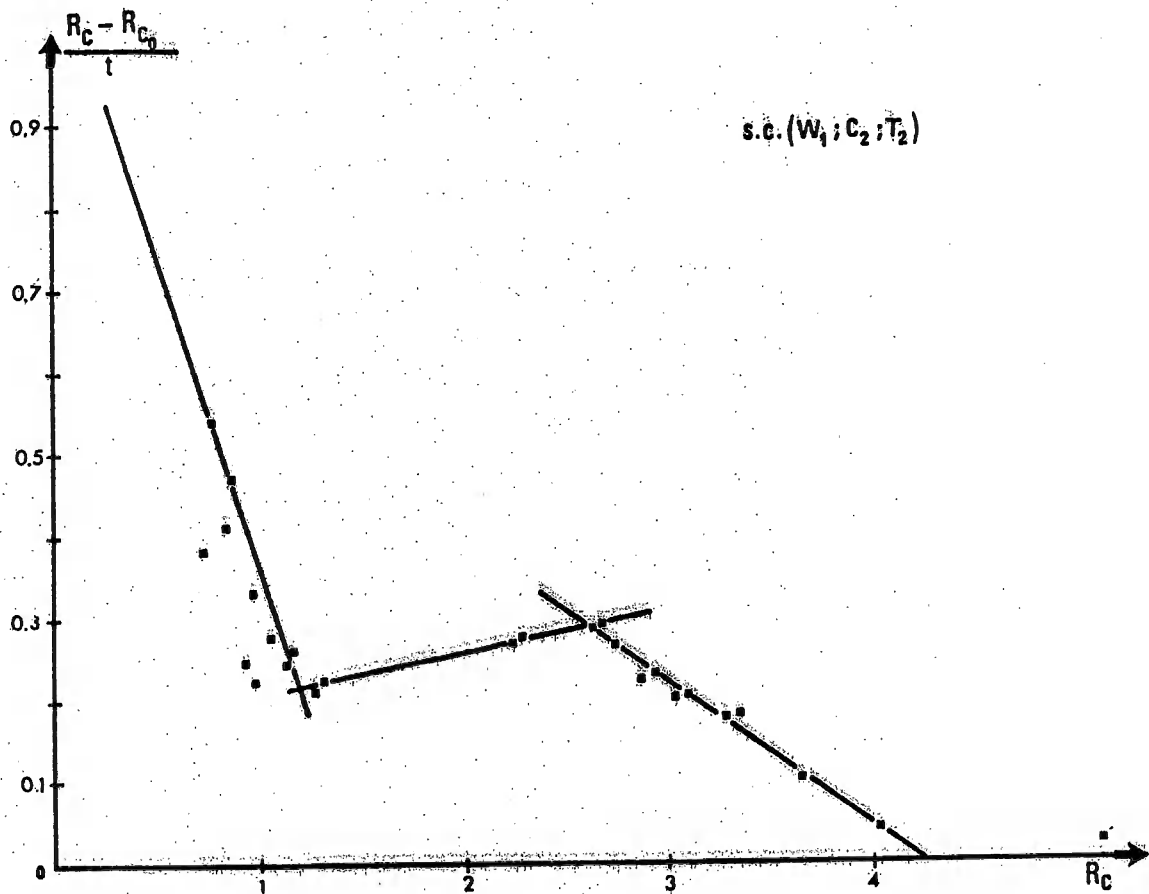
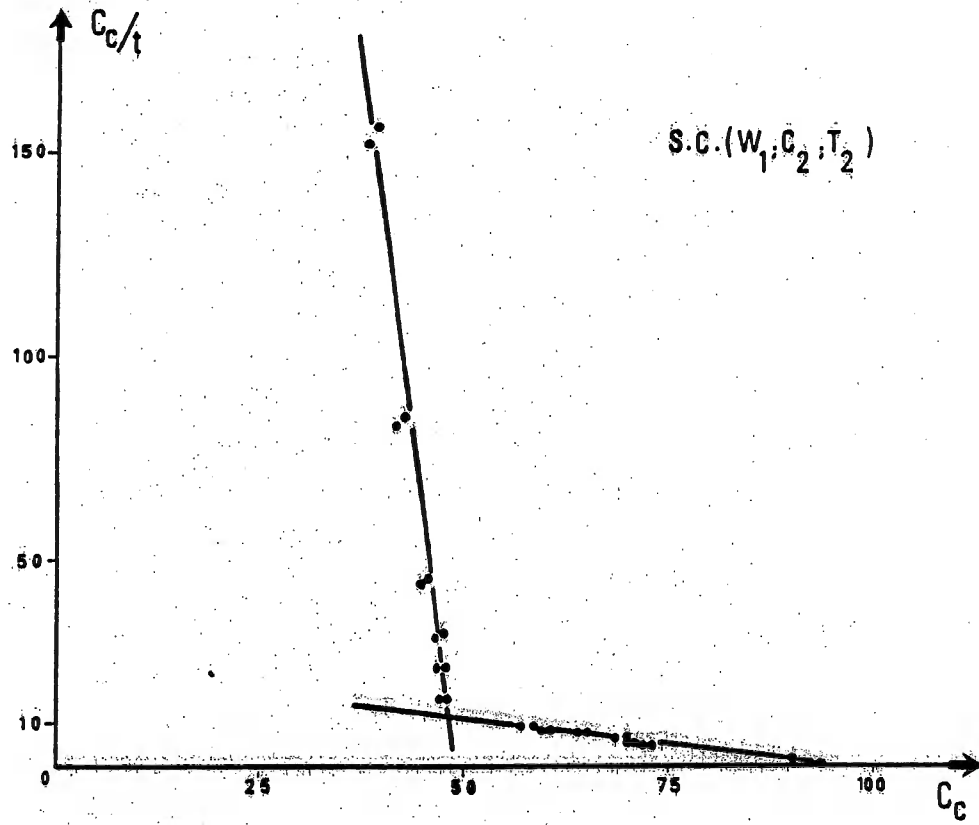


Figure IV-2 : Diagrammes transformés dans le système $(X ; \frac{X - X_0}{t})$ pour l'arène du SOURN.

Si les points expérimentaux relatifs à la consommation de chaux C_c s'alignent sur deux segments de droite avec des coefficients de corrélation relativement élevés ($r_1 = -0,9749$ et $r_2 = -0,9794$), par contre le graphique relatif aux résistances mécaniques R_c montre, non seulement que les points expérimentaux s'alignent moins bien sur plusieurs segments de droite, mais surtout que les segments de droite, sur lesquels s'alignent statistiquement les points, ne se coupent pas normalement. Cette disposition aberrante des segments correspondant aux phases de stabilisation, disposition qui sera réexaminée plus loin au paragraphe IV.1.4, se retrouve de façon plus ou moins accusée pour les arènes du breuil, de Barraud et de Chirac.

Elle se retrouve également, lorsque l'arène de la Berthe, est traitée avec un dosage élevé en chaux ($C_4 = 10\%$).

IV.1.2. Autre mode de représentation proposé

Dans le chapitre III, il a été, à plusieurs reprises, fait allusion au fait qu'il est possible de montrer que chacun des arcs de la courbe représentant l'évolution d'un paramètre chimique ou mécanique traduisant l'avancement de la stabilisation en fonction du temps est hyperbolique.

Les paramètres mesurés expérimentalement sont les résistances à la compression simple R_c , les célérités des ondes longitudinales V_L et V_D et les consommations en chaux C_c . Ce que l'on va dire au sujet de la résistance à la compression simple R_c , prise comme exemple, peut s'appliquer aux deux autres paramètres. Comme cela a pu être constaté au chapitre précédent, les résistances mécaniques (ainsi que la consommation en chaux : C_c et la célérité des ondes longitudinales : V_L et V_D) se linéarisent en fonction de $1/t$ de façon satisfaisante.

Ainsi, si l'on représente sur un graphique les variations de R_c en fonction de $1/t$, on constate, comme le montre la figure IV.3, que les points représentatifs s'alignent.

La figure IV.3, qui correspond à la série d'essais S.C. ($W_1; C_2; T_2$), effectuée sur l'arène du Sourn et déjà prise comme exemple, indique clairement que les arcs de courbe correspondent, après l'inversion de l'axe des temps, à des portions de droites : les points expérimentaux représentés sont effectivement bien alignés.

Si l'on s'intéresse à une phase de stabilisation donnée, l'équation de la droite représentative est de la forme :

$$R_c = - a \frac{1}{t} + b \quad (1)$$

Les prolongements du segment de droite correspondant à une phase de stabilisation coupent l'axe des R_c au point d'ordonnée "b" et l'axe $1/t$ au point d'abscisse.

$$\frac{1}{t} = \frac{b}{a} \quad \text{soit} \quad t = \frac{a}{b}$$

De plus, la relation (1) peut s'écrire :

$$(b - R_c) \cdot t = a \quad (2)$$

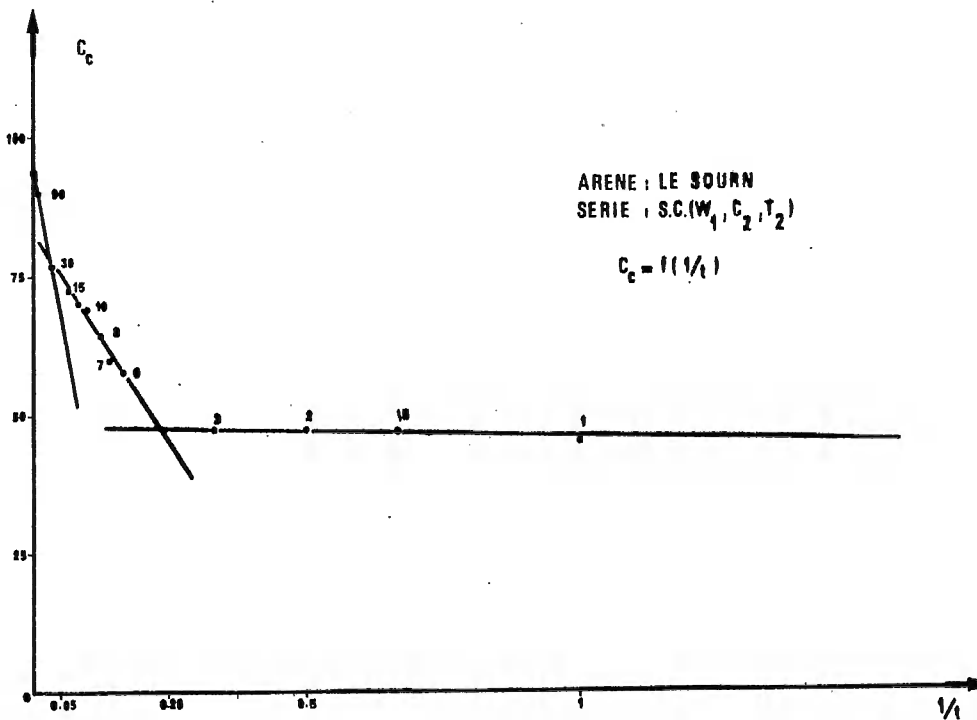
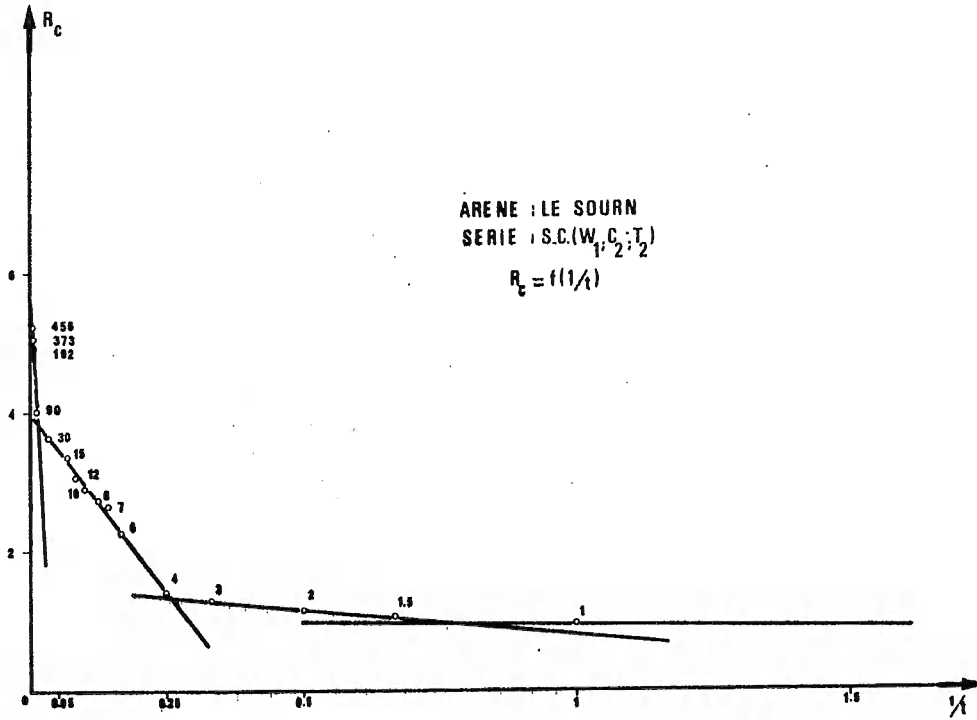


Figure IV-3 : Représentation dans le système ($\frac{1}{t}$; X) pour l'arène du SOURN.

facilité avec laquelle il est possible d'obtenir les valeurs des résistances ultimes $R_{C\infty}$ et les coordonnées des points de transition constituent un élément précieux au niveau des applications géotechniques. Mais, il ne faut pas le considérer comme un modèle théorique car, comme on le verra plus loin, il n'est en fait, qu'une première approximation d'un modèle plus élaboré.

IV.1.4. Comparaison entre les deux modes de représentation

Dans le mode de représentation proposé, chaque phase de stabilisation peut être exprimée de la façon suivante (voir paragraphe IV.1.2) .

$$R_C = - a/t + b$$

$$\text{ou } t = a / (b - R_C)$$

Il est intéressant de remarquer que si l'on porte l'expression de t dans le modèle proposé pour les sols de limons, la variable intermédiaire :

$$y = R_C - R_{CO}/t \text{ s'écrit : } R_C - R_{CO}/t = 1/a \cdot (R_C - R_{CO}) (b - R_C)$$

$$\text{soit : } R_C - R_{CO}/t = - 1/a \cdot R_C^2 + (b + R_{CO})/a \cdot R_C - b/a \cdot R_{CO}$$

Cette variable intermédiaire ($R_C - R_{CO}/t$) n'est pas une fonction linéaire de R_C , mais une fonction de second degré par rapport à R_C . La courbe représentative est une parabole de sommet S dont les coordonnées s'expriment par :

$$X_S = (R_{CO} + b)/2$$

$$Y_S = (R_{CO} - b)^2/4 a$$

L'ensemble des points expérimentaux obtenus pour une série d'essais donnée, se répartit sur des paraboles correspondant aux phases de stabilisation. Deux cas peuvent se présenter selon que le sommet d'une parabole donnée tombe à l'intérieur ou à l'extérieur de la parabole qui la précède, comme le montrent les diagrammes de la figure IV.4.

Si l'on désigne par A le point d'intersection des deux paraboles, ces deux cas peuvent s'exprimer analytiquement par :

$$\text{1er cas } X_A > X_S$$

$$\text{2ème cas } X_A < X_S$$

Pour cela, il faut calculer l'expression de l'abscisse du point A à partir de l'équation des paraboles, soit :

$$X_A = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 - a_2}$$

(a_1 et b_1 : paramètres de la 1ère parabole)

(a_2 et b_2 : paramètres de la 2ème parabole)

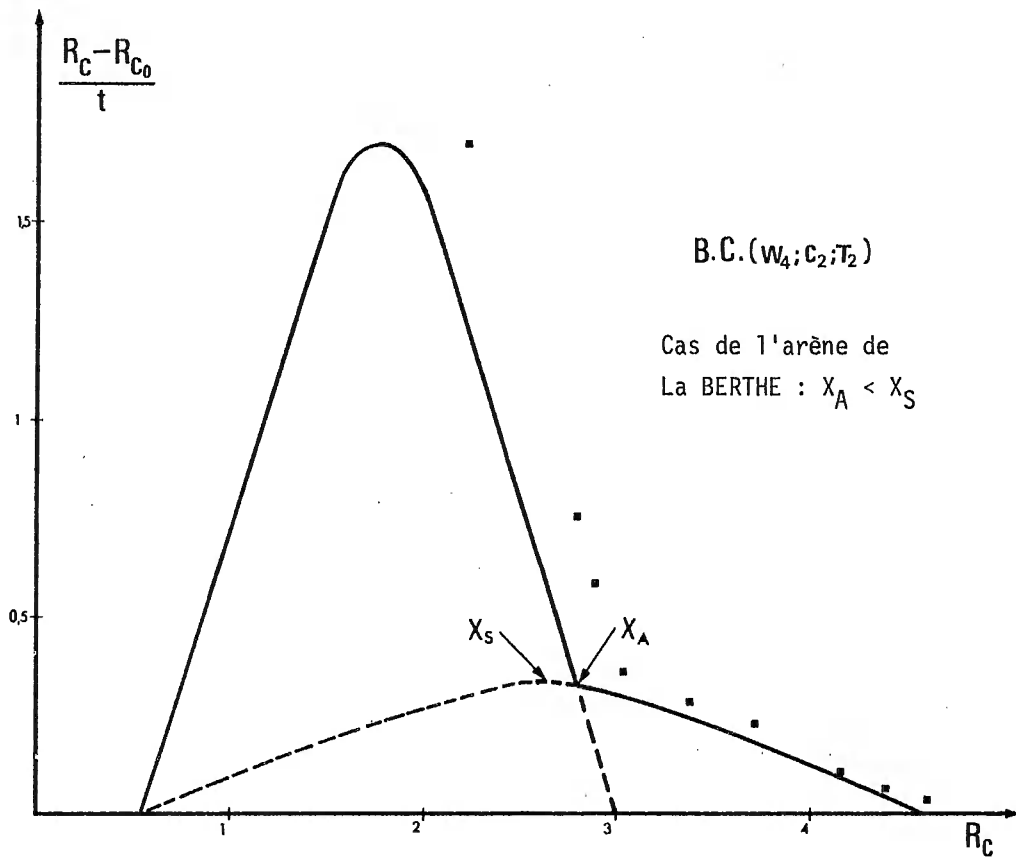
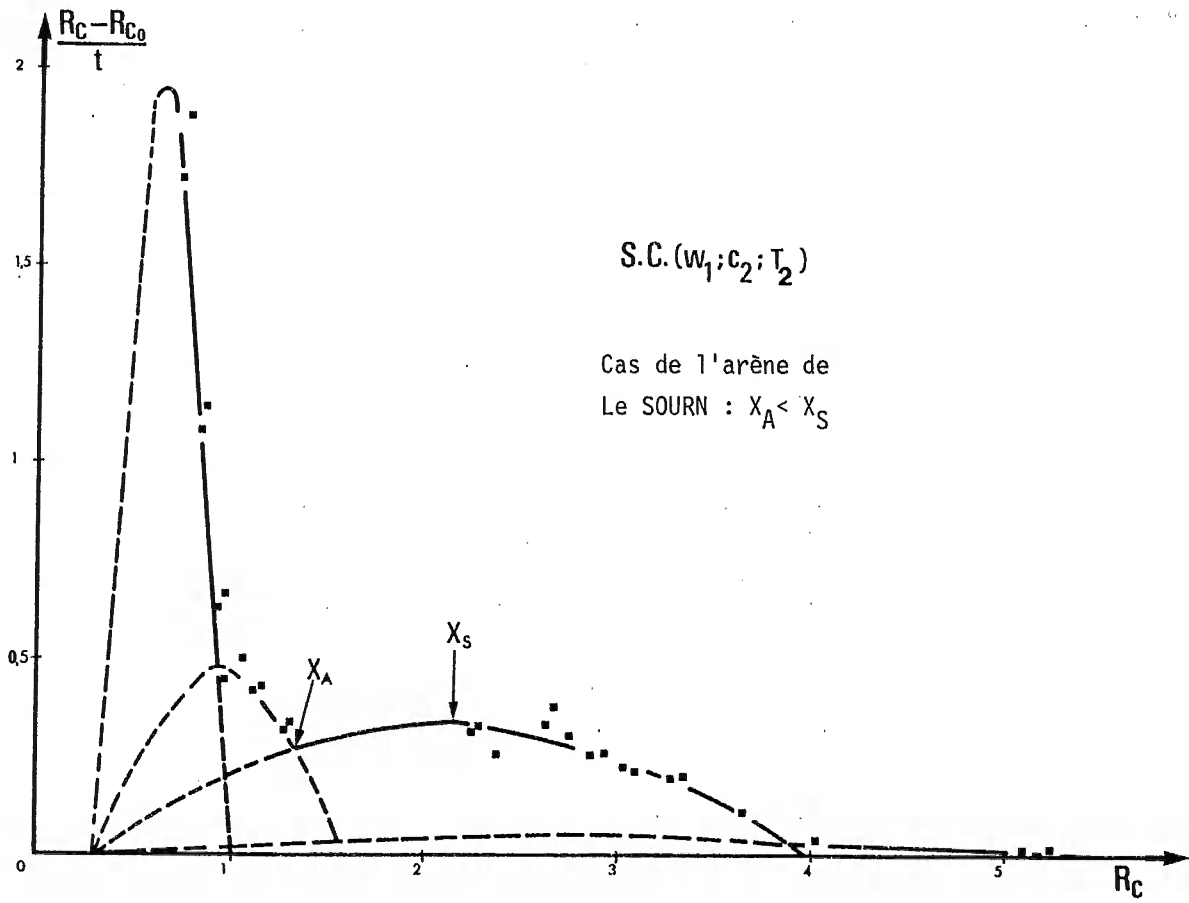


Figure IV-4 : Diagrammes $\frac{R_C - R_{C0}}{t} = f(R_C)$.

Ainsi, le premier cas se traduit par la condition :

$$\frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 - a_2} > \frac{b_2 + R_{co}}{2}$$

Le deuxième cas par la condition :

$$\frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 - a_2} < \frac{b_2 + R_{co}}{2}$$

Dans le cas des séries prises comme exemple pour la Berthe et pour le Sourn, les abscisses respectives du sommet et des intersections des paraboles donnent :

La Berthe	$X_A = 2,8 \text{ MPa}$	Le Sourn	$X_A = 1,35 \text{ MPa}$
	$X_S = 2,6 \text{ MPa}$		$X_S = 2,15 \text{ MPa}$

Dans le cas de la Berthe, l'abscisse du sommet est inférieure à celle du point d'intersection des deux paraboles : le mode de représentation proposé pour les limons peut s'appliquer de façon satisfaisante et les arcs de parabole peuvent être assimilés à des segments de droite. Par contre, dans le cas du Sourn, où le sommet de la seconde parabole est extérieur à la première, le mode de représentation ne peut plus s'appliquer parce que les points voisins du sommet de la seconde parabole ont un alignement très médiocre et que l'intersection des segments ne constitue plus une approximation de l'intersection des arcs de parabole. Ceci montre bien que le mode de représentation proposé pour les sols de limon ne convient que dans le cas où le sommet de la parabole est situé à l'intérieur de la parabole précédente. De plus, ce mode de représentation revient à assimiler les arcs de parabole à des segments de droite. Il est clair que cette approximation est d'autant meilleure que les arcs de parabole considérés sont plus éloignés du sommet des paraboles.

En conclusion, pour les raisons qui viennent d'être évoquées, il apparaît que le mode de représentation utilisé pour les sols de limons se révèle inadéquat pour les arènes. Néanmoins, l'essentiel des conclusions auxquelles il a conduit demeure :

- la stabilisation s'effectue par étapes successives
- au cours de chacune de ces étapes, l'évolution des caractéristiques mécaniques (ou chimiques) est régie par une loi d'allure hyperbolique.

IV.2. RELATION ENTRE LE DEVELOPPEMENT DES RESISTANCES MECANIQUES ET LA CONSOMMATION DE CHAUX

IV.2.0. Introduction

Les relations entre les consommations de chaux et les progrès des résistances mécaniques sont également intéressantes du point de vue fondamental et du point de vue technique. Du point de vue fondamental, c'est à ce niveau que s'articulent les processus chimiques et les résistances mécaniques. Du point de vue technique, cette question est celle du rendement d'un traitement à la chaux qui conditionne en partie le coût du procédé.

IV.2.1. Relation directe entre la consommation de chaux et les résistances mécaniques

Les diagrammes illustrant la relation directe entre la résistance mécanique et la consommation de chaux ont été présentés dans le chapitre précédent.

Pour obtenir une relation analytique entre la consommation de chaux C_C et la résistance mécanique R_C , il suffit d'éliminer le temps t entre les expressions :

$$R_C = - a/t + b$$

et $C_C = - a'/t + b'$

soit :
$$R_C = a/a' \cdot C_C - \frac{ab' - a'b}{a'}$$

Ceci implique que pour une phase de stabilisation donnée, il existe une relation linéaire entre la résistance mécanique et la consommation de chaux C_C de la forme :

$$R_C = A \cdot C_C - B.$$

ou : $R_C/C_C = A - B/C_C$

avec : $A = a/a'$ et $B = \frac{ab' - a'b}{a'}$

IV.2.2. Autre type de relation proposé :

La relation linéaire que l'on a pu constater entre la résistance mécanique et la consommation de chaux n'est pas la seule à se vérifier expérimentalement. En effet, si l'on construit un diagramme bilogarithmique ($\text{Log. } C_C ; \text{Log. } R_C$), on constate également que les points expérimentaux s'alignent sur des portions de droite. Un examen plus approfondi montre non seulement que l'alignement des points est meilleur que dans le diagramme ($C_C ; R_C$) mais surtout que le coefficient angulaire des divers segments de droite prend diverses valeurs en général différentes de 1 (fig. IV.5). Ceci montre que l'alignement des points expérimentaux que l'on constate sur les diagrammes ($C_C ; R_C$) n'est en fait qu'apparent car s'il était réel le coefficient angulaire de tous les segments serait égal à 1. La droite de régression calculée à partir des points expérimentaux de divers segments n'est en fait que la droite moyenne des points expérimentaux disposés sur un arc de courbe très redressée. Le bon alignement des points expérimentaux sur le diagramme bilogarithmique suggère que la relation qui lie la résistance mécanique R_C et la consommation de chaux C_C est la relation de la forme :

$$R_C = \beta \cdot C_C^\alpha$$

IV.3. MODELE PROPOSE POUR L'EVOLUTION DES RESISTANCES MECANIQUES EN FONCTION DU TEMPS :

IV.3.0. Introduction

Si l'on admet la relation $R_C = \beta \cdot C_C^\alpha$, la représentation de la résistance mécanique R_C en fonction de $1/t$, si elle est pratiquement satisfaisante, n'est plus formellement valable et ne constitue donc qu'une approximation.

IV.3.1. Modèle proposé

IV.3.1.1. Expression générale de la consommation en chaux.

Dans le cas des sols de limons, il a été proposé d'exprimer l'évolution

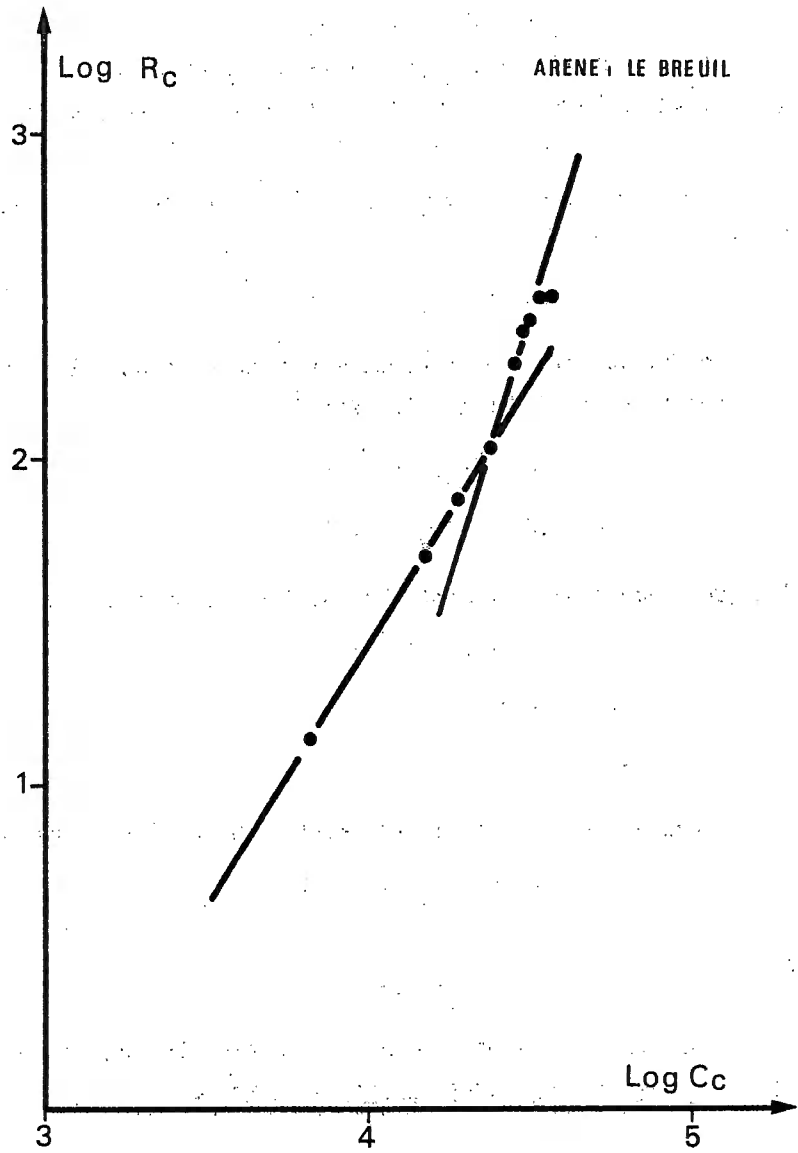


Figure IV-5 : Diagramme bilogarithmique (Log C_c ; Log R_c)

de la consommation en chaux en fonction du temps par une relation de la forme :

$$C_c = \frac{bt}{1+at}$$

Contrairement à ce qui en est pour les résistances mécaniques R_c , elle se vérifie aussi pour les arènes sur le plan expérimental.

Dans le cas des arènes, une relation de la forme :

$$C_c = a \times 1/t + b$$

se vérifie également du point de vue expérimental et elle a été utilisée dans ce mémoire par souci de simplicité et de symétrie avec la relation rendant compte de l'évolution des résistances mécaniques.

Ces deux relations ne sont en fait que des approximations d'une relation plus générale de la forme :

$$C_c = C_{c\infty} (1+1/t)^{-\alpha}$$

En effet, à partir d'un certain temps, le rapport $1/t$ peut être négligé devant 1 et de ce fait l'expression de C_c peut s'écrire :

$$C_c \approx C_{c\infty} (1-\alpha'/t)$$

$$\text{ou } C_c \approx -\alpha' C_{c\infty} \times 1/t + C_{c\infty}$$

qui n'est autre que le mode de représentation utilisé au chapitre III.

$$C_c \approx a \times 1/t + b$$

$$\text{avec } a = -\alpha' \times C_{c\infty}$$

$$\text{et } b = C_{c\infty}$$

D'une autre manière, l'expression générale de la consommation en chaux

$$C_c = C_{c\infty} (1 + 1/t)^{-\alpha'}$$

peut s'écrire :

$$C_c = \frac{C_{c\infty}}{(1+\frac{1}{t})^{\alpha'}}$$

A partir d'un certain temps, le rapport $1/t$ peut être considéré comme petit devant 1 et de ce fait l'expression de C_c peut s'écrire :

$$C_c \approx \frac{C_{c\infty}}{(1+\frac{1}{t})^{\alpha'}}$$

$$C_c \approx \frac{C_{c\infty}}{\alpha'+t} \times t$$

ce qui donne en divisant numérateur et diviseur par α' :

$$C_c \approx \frac{C_{c\infty} \times 1/\alpha'}{1 + \frac{1}{\alpha'}t} \times t$$

qui n'est autre que le mode représentation proposé par PERRET, (1977) à propos des sols de limons :

$$C_c \approx \frac{bt}{1+at} \quad \text{avec} \quad b = \frac{C_{c\infty}}{\alpha}$$
$$\text{et} \quad a = \frac{1}{\alpha}$$

Ainsi, les expressions de la consommation de chaux C_c , en fonction du temps, proposées à partir des résultats expérimentaux et qui, contrairement aux résistances mécaniques, se vérifient aussi bien pour les arènes que pour les sols de limons, ne sont en réalité que deux approximations différentes d'une expression générale s'écrivant sous la forme :

$$C_c = C_{c\infty} \cdot (1 + 1/t)^{-\alpha}$$

Si l'on reporte l'expression générale de la consommation de chaux

$$C_c = C_{c\infty} (1 + 1/t)^{-\alpha}$$

dans l'équation : $R_c = \beta \cdot C_{c\infty}^\alpha$, exprimant la relation entre la consommation de chaux et le progrès de la résistance à la compression simple, on obtient l'équation :

$$R_c = \beta \cdot C_{c\infty}^\alpha (1 + 1/t)^{-\alpha \cdot \alpha}$$

soit une relation de la forme :

$$R_c = \gamma \cdot (1 + 1/t)^{-\delta}$$

avec :

$$\gamma = \beta C_{c\infty}^\alpha \quad \text{et} \quad \delta = \alpha \alpha$$

La relation proposée : $R_c = \gamma \cdot (1 + 1/t)^{-\delta}$ se trouve bien vérifiée expérimentalement si l'on construit le diagramme bilogarithmique $\text{Log.} (1 + 1/t) ; \text{Log.} R_c$: les points expérimentaux s'alignent de façon remarquable et les corrélations obtenues sont nettement meilleures que celles obtenues par d'autres types de diagramme, notamment dans le diagramme $(\text{Log.} t ; \text{Log.} R_c)$.

Les diagrammes de la figure IV.6, illustrent pour toutes les séries de base effectuées sur les arènes l'étroite corrélation que l'on peut constater.

Les équations des droites de régression $\text{Log.} R_c = -\delta \text{Log.} (1 + 1/t) + \text{Log.} \gamma$ ajustées sur les points expérimentaux sont consignées dans le tableau XXVI.

Ces équations de la forme :

$$\text{Log.} R_c = c - d \text{Log.} (1 + 1/t),$$

permettent de déterminer à partir des résultats expérimentaux, les coefficients γ et δ de la formule :

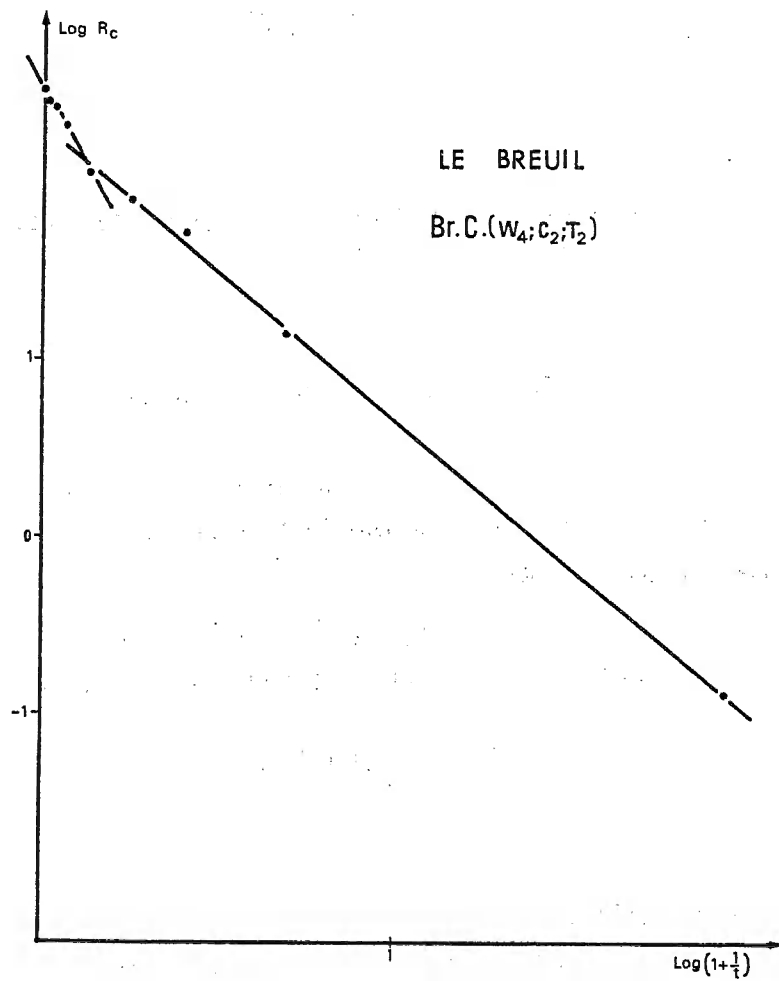
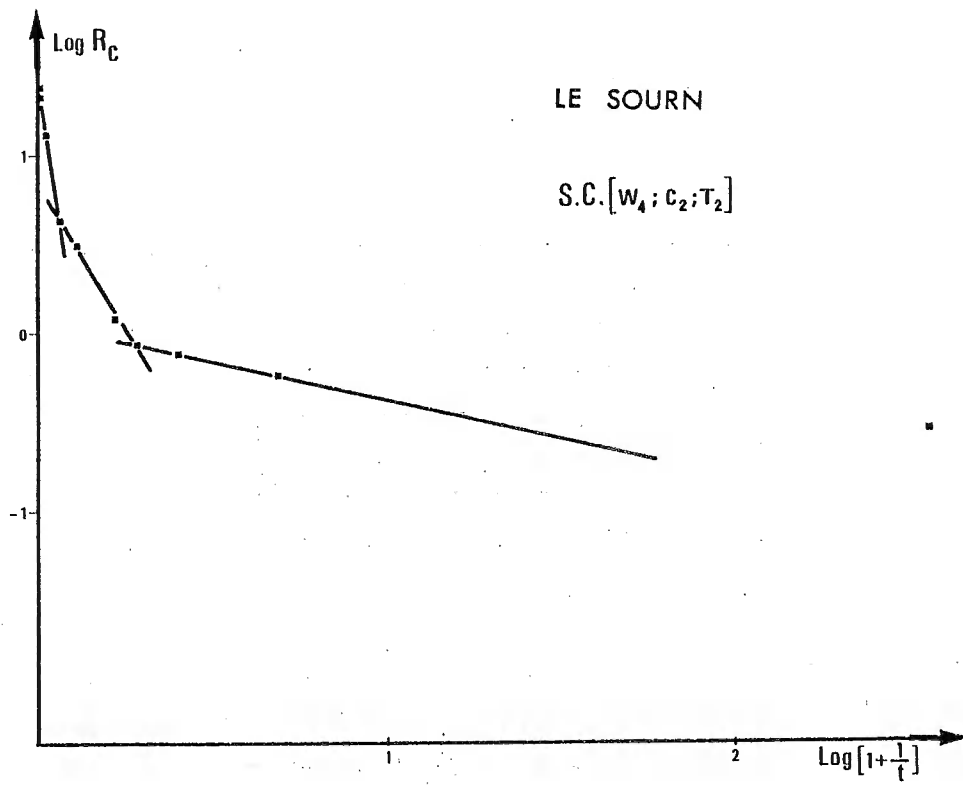
$$R_c = \gamma \cdot (1 + 1/t)^{-\delta}$$

$$\text{avec} \quad c = \text{Log.} \gamma$$

$$\text{et} \quad d = \delta$$

L'analyse des résultats expérimentaux aussi bien que les considérations du paragraphe précédent, conduisent à proposer comme modèle de l'évolution des résistances mécaniques, en fonction du temps, un modèle de la forme :

$$R_c = \gamma \cdot (1 + 1/t)^{-\delta}$$



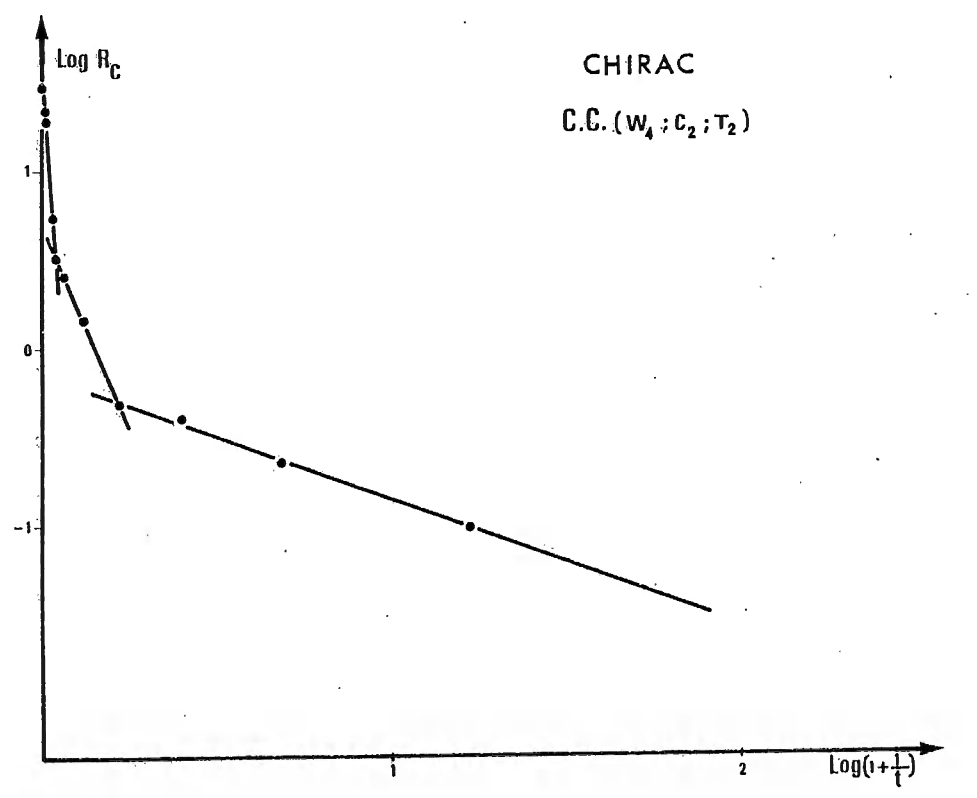
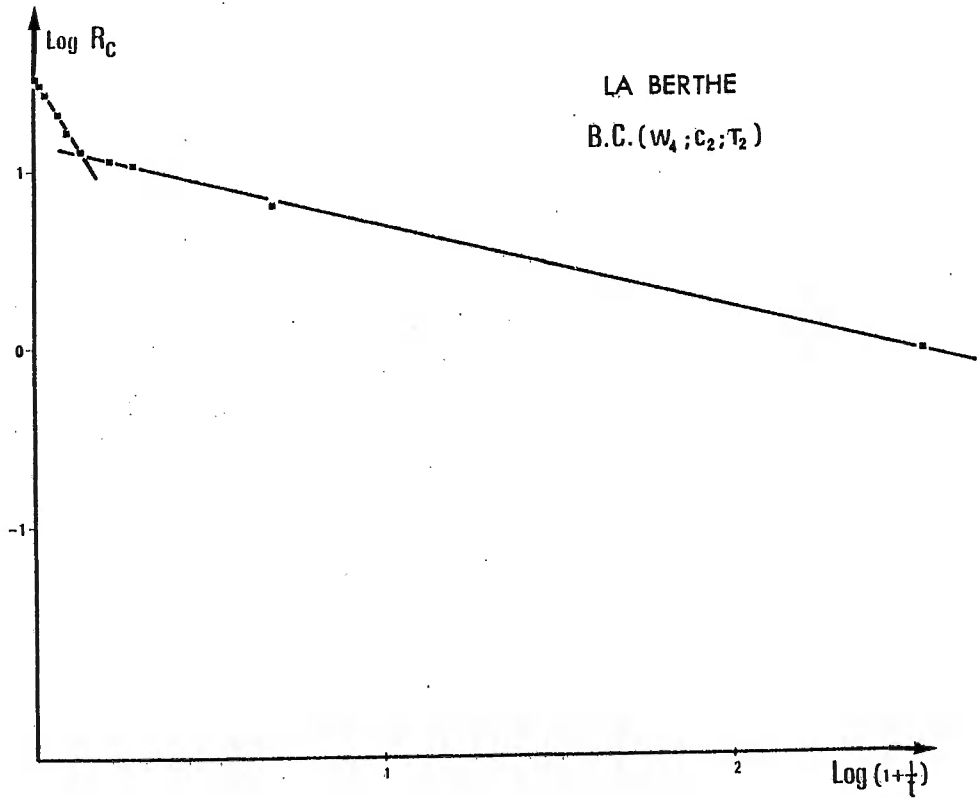


Figure IV-6 : Diagrammes bilogarithmique ($\text{Log } 1 + \frac{1}{t}$; $\text{Log } R_C$) pour les séries de base des différentes arènes.

Le SOURN ::	1ère phase : $\text{Log } R_C = - 0,4363 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,0623$ 2ème phase : $\text{Log } R_C = - 3,3042 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,8608$ 3ème phase : $\text{Log } R_C = -12,9471 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,4813$
Le BREUIL :	1ère phase : $\text{Log } R_C = - 1,6472 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,3162$ 2ème phase : $\text{Log } R_C = - 3,5900 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,5376$
BARRAUD :	1ère phase : $\text{Log } R_C = - 1,3146 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,6848$ 2ème phase : $\text{Log } R_C = - 2,9398 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,0443$
CHIRAC :	1ère phase : $\text{Log } R_C = - 0,7162 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,1407$ 2ème phase : $\text{Log } R_C = - 4,5424 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,6999$ 3ème phase : $\text{Log } R_C = -25,7820 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,5548$
La BERTHE :	1ère phase : $\text{Log } R_C = - 0,4758 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,1615$ 2ème phase : $\text{Log } R_C = - 3,1696 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,5682$

TABLEAU XXVI : Equations des droites dans le système $|\text{Log } (1 + 1/t)|$; $|\text{Log } R_C|$ correspondant aux phases de stabilisation pour toutes les séries de base effectuées sur les arènes étudiées.

IV.3.1.3. Commentaires

Si l'on considère la relation précédente, il apparaît à l'évidence que lorsque $t \rightarrow +\infty$, $R_C \rightarrow \gamma$ donc : $\gamma = R_{C\infty}$.

La signification physique de γ est donc parfaitement claire : c'est la résistance à très long terme $R_{C\infty}$ que permet d'atteindre une phase de stabilisation

Cette représentation suppose que le temps t ne soit jamais nul. Il convient de borner le temps inférieurement par un temps t_0 : on peut considérer que ce temps est le temps nécessaire pour que les réactions qui précèdent les réactions pouzzolaniques aient lieu et que ces dernières démarrent. Dans la pratique, le temps de préparation des éprouvettes demande une durée minimale de deux heures. Ce temps nécessaire pour la confection des éprouvettes au laboratoire, se retrouve également lors de l'exécution d'un chantier. La condition imposée par la forme de la relation se trouve donc toujours vérifiée, aussi bien dans la pratique des chantiers que lors des expérimentations en laboratoire.

La forme de la relation laisse penser que le coefficient " δ " est une fonction de la température. Si l'on considère les expressions des résistances mécaniques relatives à des séries d'essais effectuées à différentes températures, on constate qu'il existe une

corrélation entre la valeur du coefficient "δ" et l'inverse de la température. Ceci sera examiné de façon plus précise dans le paragraphe IV.5 relatif à l'influence de la température.

IV.3.2. Relation entre le mode de représentation proposé et le modèle d'évolution des résistances mécaniques en fonction du temps.

Le développement en série de la relation :

$$R_C = R_{C\infty} (1 + 1/t)^{-\delta}$$

donne

$$R_C = R_{C\infty} \left[1 - \delta/t + \dots \right]$$

et si l'on se limite au premier terme :

$$R_C = R_{C\infty} (1 - \delta/t)$$

ou

$$R_C = -\delta R_{C\infty} \times 1/t + R_{C\infty}$$

qui n'est autre que le mode de représentation utilisé au chapitre III :

$$R_C = -a \times 1/t + b$$

avec

$$a = \delta \times R_{C\infty}$$

et

$$b = R_{C\infty}$$

La signification du coefficient "b" a déjà été mise en évidence lors de la discussion du mode de représentation choisi : l'ordonnée à l'origine de la droite portant le segment représentatif d'une phase de stabilisation permet d'obtenir de façon simple et immédiate la valeur de l'asymptote c'est-à-dire la valeur de $R_{C\infty}$.

Tout comme δ, le coefficient $a = \delta \cdot R_{C\infty}$ est évidemment fonction de la température.

IV.4. REACTION DE LA CHAUX SUR LES ARENES

IV.4.0. Introduction

Après avoir proposé un modèle pour écrire l'évolution des phénomènes dans le temps, il importe de voir comment la chaux réagit sur le sol, quel sont les paramètres chimiques susceptibles de révéler la plus ou moins bonne aptitude des arènes à réagir avec la chaux, enfin quels sont les dosages en chaux capables de fournir des résistances intéressantes soit dans l'absolu, soit d'un point de vue économique.

IV.4.1. Essai d'interprétation des phénomènes

Le paramètre chimique mesuré systématiquement au cours de cette étude expérimentale est la quantité de chaux consommée et par là même la quantité de chaux encore disponible pour alimenter les réactions de type pouzzolaniques. Bien que le sol constitue un milieu très complexe et mal connu du point de vue physico-chimique, et bien que vraisemblablement, la plupart des processus mis en jeu soit du domaine de la cinétique hétérogène, il peut être tentant d'essayer d'affecter un ordre tout au moins formel aux réactions que l'on peut supposer correspondre aux diverses phases de stabilisation. Les tentatives faites dans cette voie, soit pour

proposer un modèle à partir de considérations de cinétique chimique, soit pour caractériser les diverses phases de la stabilisation par une réaction chimique, se sont révélées décevantes.

Il convient donc d'aborder le problème par un autre biais. Si l'on considère que les éprouvettes ont une humidité d'environ 12%, 100 g. de sol contiennent en moyenne 120 ml d'eau capables de dissoudre environ 144 mg de chaux à 20°C, 120 mg à 40°C et environ 96 mg à 60°C. La quantité de chaux nécessaire à saturer l'humidité de l'éprouvette à 40°C est 120 mg ; ce qui représente, pour un dosage moyen $C_2 = 5\%$, moins de 3% de la chaux mise en oeuvre. On peut supposer, étant donné la finesse de la chaux mélangée à l'arène, qu'après une période transitoire relativement courte, toute l'eau contenue dans le sol est saturée par rapport à la chaux. Les réactions pouzzolaniques s'opéreraient entre les phases solides du sol et cette phase liquide dont la saturation serait constamment maintenue par la dissolution de l'hydroxyde de calcium solide. Il apparaît donc que la concentration en chaux reste vraisemblablement constante pendant toute la durée de la conservation des éprouvettes ; ce qui signifie que, dans le développement des réactions chimiques, la concentration en chaux n'interviendrait pas et que seules sont en cause, les réactivités des divers composés minéraux du sol, ou en d'autres termes pour employer le langage de la cinétique chimique, les réactions qui se déroulent après la période transitoire seraient d'ordre nul par rapport à la concentration en chaux des solutions interstitielles des éprouvettes. La période transitoire pendant laquelle s'effectue la saturation en chaux de la phase liquide, comprend vraisemblablement une phase d'absorption et/ou d'attaque précoce des surfaces du sol par la chaux. Cette phase transitoire n'a pas été directement prise en considération dans cette étude : elle a été simplement constatée. Le temps nécessaire à son accomplissement a été désigné sous l'expression "temps de repos" : il a été déterminé expérimentalement pour chacune des arènes étudiées. Pour évaluer le temps de repos optimal, des éprouvettes ont été compactées après les temps de repos croissants, puis rompues sur le champ : il a été constaté

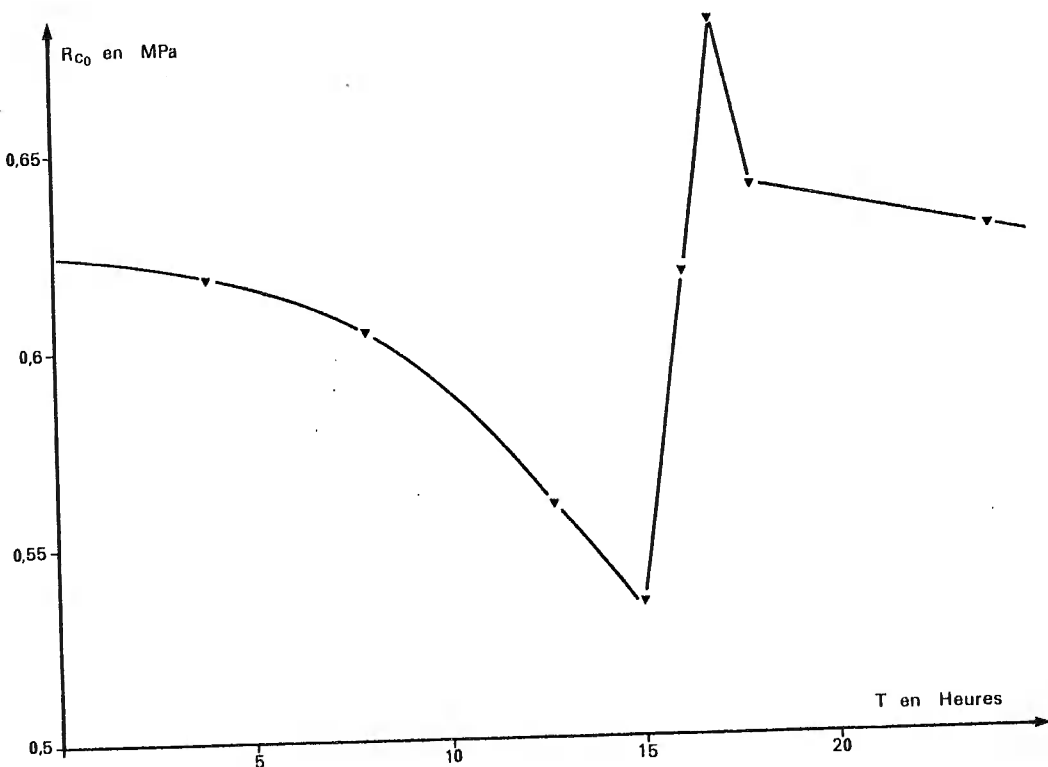


Figure IV-7 : Evolution des résistances immédiates R_{C0} en fonction du temps de repos pour l'arène du SOURN.

que l'évolution des résistances mécaniques en fonction du temps de repos présente une variation complexe dont la figure IV.7 rend compte pour l'arène du Sourn. Le temps de repos optimal a été choisi au sommet du pic, il est variable d'une arène à l'autre et sa valeur a été déterminée pour chacune d'elles, comme l'indique le tableau XXVII. La baisse des résistances constatées pour les éprouvettes, après ce temps de repos optimal, correspond à la rupture en pure perte, lors du compactage, des premières liaisons de type pouzzolaniques. A cette période transitoire correspond une consommation de chaux qui est loin d'être négligeable, comme l'indique le tableau.

Arènes	t repos optimal	C _{co}	R _{co}
Le Sourn	16 h 30	28,4%	0,58
Le Breuil	4 h	16,88%	0,41
Barraud	20 h	30,10%	0,49
Chirac	9 h	20,68%	0,36
La Berthe	3 h	37,28%	0,95

Tableau XXVII : Valeurs du temps de repos optimal, de la consommation initiale en chaux et de la résistance initiale à la compression simple des arènes étudiées.

Bien que cela n'entre pas dans le cadre de ce travail, il était nécessaire de bien montrer quelle est l'importance de ces phénomènes transitoires au départ, en particulier au niveau de la consommation de chaux. Par contre, une fois cette période passée les phénomènes suivent une évolution régulière qui, pour chacune des phases de stabilisation, se ralentit au fur et à mesure que l'on avance dans le temps. C'est ce type de considération qui m'a incité à me référer à l'état ultime, en fin de phase, plutôt qu'à l'état initial qui risquait d'être influencé de façon importante par les phénomènes de la phase transitoire.

Ces quelques considérations montrent, qu'il existe des phénomènes transitoires qui influent sur la résistance des éprouvettes confectionnées. Le temps de repos optimal a été choisi de façon à procéder au compactage des éprouvettes juste avant le démarrage des phénomènes pouzzolaniques. Il ne semble pas que ce soit la concentration en chaux des solutions interstitielles qui règle le déroulement des processus, mais plutôt l'aptitude du sol à se combiner avec la chaux présente de façon constante dans ces solutions.

IV.4.2. Aptitude du sol à se combiner avec la chaux

Pour connaître l'aptitude du sol à réagir avec la chaux et par suite à développer les résistances R_c, trois types de test ont été faits :

- le dosage des oxydes dits "libres".

- les besoins en chaux.
- les oxydes dits combinés.

IV.4.2.1. Dosage des oxydes "libres"

Les valeurs des oxydes "libres" déterminés sur les différentes arènes donnant une indication grossière sur les résistances mécaniques que l'on peut espérer. Celles-ci sont d'autant plus élevées que les taux d'alumine "libre" et de silice "libre" sont importants. A titre d'exemple, le tableau XXVIII donne les corrélations qui existent entre les résistances mécaniques obtenues en fin de phases de stabilisation et les oxydes "libres". Il apparaît que, pour les premières phases, les corrélations sont bonnes pour l'alumine et, à un degré moindre, pour la silice. Elles deviennent médiocres lorsqu'il s'agit des secondes phases. Il n'y a aucune corrélation avec les oxydes de fer.

	$R_{C_1} = 2,78$	$[Al_2O_3] - 1,33$	$(r=0,9936)$
1ère phase :	$R_{C_1} = 2,89$	$[Si O_2] - 1,86$	$(r=0,9430)$
	$R_{C_1} = -0,09$	$[Fe_2O_3] - 4,66$	$(r=0,0100)$
	$R_{C_2} = 2,94$	$[Al_2O_3] - 0,56$	$(r=0,8614)$
2ème phase :	$R_{C_2} = 3,20$	$[Si O_2] - 0,33$	$(r=0,8575)$
	$R_{C_2} = 1,11$	$[Fe_2O_3] - 5,70$	$(r=0,1040)$

Tableau XXVIII : Equations des droites de corrélation entre les résistances mécaniques ultimes des différentes phases et les taux d'oxydes "libres" pour l'ensemble des arènes étudiées, avec le coefficient de corrélation "r".

De façon plus précise, si l'on considère le coefficient " α " de la relation : $R_C = \beta C_C^\alpha$ on constate qu'il existe de bonnes corrélations entre le coefficient et la silice et/ou l'alumine "libre". Par contre, il n'y a pas de relation entre l'oxyde de fer libre et ce coefficient " α ". De plus, l'examen des valeurs numériques montre que l'arène de Chirac a un comportement sensiblement différent des autres arènes, et cette légère différence de comportement a été constatée tout au long de cette étude sans que puisse être avancée une interprétation satisfaisante.

	α Coefficient de la relation $R_C = \beta C_C^\alpha$	Taux d'oxydes libres		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Le Sourn	1ère phase : 0,91 2ème phase : 2,71	0,713	0,916	0,580
Le Breuil	1ère phase : 1,61 2ème phase : 3,05	3,021	3,090	0,939
Barraud	1ère phase : 1,71 2ème phase : 3,13	3,372	3,448	1,008
Chirac	1ère phase : 1,16 2ème phase : 2,93	1,789	1,041	1,543
La Berthe		Oxydes libres non déterminables		

Tableau XXIX : Valeurs des coefficients " α " de la relation $R_C = \beta C_C^\alpha$ et les taux des oxydes "libres" des arènes étudiées.

En résumé, les teneurs en oxydes "libres" des sols ne présentent des corrélations précises qu'avec la première phase de stabilisation pour l'alumine et à un degré moindre pour la silice. Par contre, il existe une bonne corrélation entre le coefficient " α " de la relation $R_C = \beta C_C^\alpha$ et les taux en silice et au alumine "libre". Les oxydes de fer ne semblent intervenir d'aucune façon.

IV.4.2.2. Les besoins en chaux

La détermination des besoins en chaux telle qu'elle a été définie plus haut est plus directement liée au processus de stabilisation. C'est ainsi que les résultats présentés au chapitre précédent suivent très exactement le modèle d'évolution de la consommation de chaux en fonction du temps de la forme :

$$C_C = A \cdot (1 + 1/t)^{-\alpha}$$

à titre d'exemple, seront données les équations de C_C pour les différentes arènes étudiées :

$$\text{Le Sourn} : C_C = 11,85 (1 + 1/t)^{-2,0249}$$

$$\text{Le Breuil} : C_C = 7,33 (1 + 1/t)^{-1,9308}$$

$$\text{Chirac} : C_C = 6,84 (1 + 1/t)^{-0,9780}$$

$$\text{La Berthe} : C_C = 18,83 (1 + 1/t)^{-1,7611}$$

Si l'on compare les coefficients " α " obtenu ci-dessus et le coefficient " α' " obtenu au cours des séries d'essais, on constate que, pour toutes les arènes, il existe une étroite corrélation entre les essais effectués à 60°C et les besoins en chaux. La détermination

relativement rapide de α'' peut donc être utilisée pour déterminer le coefficient α' . Il est également à noter que la valeur numérique de α' relative à l'arène de Chirac s'écarte de celles des autres arènes.

IV.4.2.3. Les oxydes combinés

Les résultats relatifs aux oxydes "combinés" présentés au paragraphe III ont montré une bonne corrélation entre les pourcentages d'alumine "combiné" et de silice "combiné" avec les résistances mécaniques obtenues. Comme pour les oxydes "libres", les oxydes de fer dits combinés ne présentent aucune corrélation avec les résistances mécaniques R_C .

IV.4.2.4. Conclusion

Les essais chimiques effectués montrent que les éléments du sol susceptibles de réagir avec la chaux et de conférer à celui-ci des résistances mécaniques intéressantes au cours de la stabilisation sont l'alumine et à un degré moindre la silice. La corrélation étroite qui existe entre ces deux oxydes ne permet pas de déterminer de façon claire leur rôle respectif. De plus, il s'avère de façon indubitable que les oxydes de fer ne contribuent nullement aux résistances mécaniques.

Enfin, la technique dite des "besoins en chaux" reproduit très exactement ce qui se passe à la même température durant les essais et donne des indications sur les phases tardives de stabilisation. Une très étroite corrélation existe entre les coefficients α'' et α' déterminés respectivement par le dosage des besoins en chaux et par le dosage des éprouvettes traitées. Il existe là le moyen de connaître rapidement une valeur approchée du coefficient α' .

IV.4.3. Influence du dosage initial en chaux

L'étude des consommations de chaux en fonction du dosage initial pour les diverses arènes fournit des résultats très intéressants susceptibles d'être exploités au niveau des applications géotechniques.

Le diagramme de la figure IV.8 qui représente l'évolution des résistances mécaniques R_C en fonction de la quantité de chaux consommée pour l'arène du Breuil prise comme exemple permet de faire deux constatations :

1°) Il existe un seuil au-dessous duquel les réactions pouzzolaniques ne peuvent démarrer par suite d'une insuffisance en chaux, c'est le cas du dosage $C_0 = 1\%$ (1 g de chaux pour 100 g de sol). En effet, si l'on se réfère aux consommations effectuées durant la phase transitoire, données dans le tableau XVIII du paragraphe IV.4.2.1., on remarque qu'il est de 16,88% de la quantité de chaux mise en oeuvre pour un dosage initial de 5% soit en valeur absolue 0,84 g de chaux pour 100 g de sol. Il est clair qu'un dosage initial de 1% suffit tout juste à satisfaire les réactions de la phase transitoire qui, si elles donnent des propriétés intéressantes au sol en ce qui concerne la diminution de la plasticité et une meilleure aptitude à recevoir un traitement hydraulique comme dans le cas des stabilisations mixtes, ne confèrent pas au sol qu'un accroissement négligeable des résistances mécaniques (on passe de $R_{CO} = 0,30$ MPa à $R_C = 0,52$ MPa correspondant à une durée de maturation de 2 mois à 40°C).

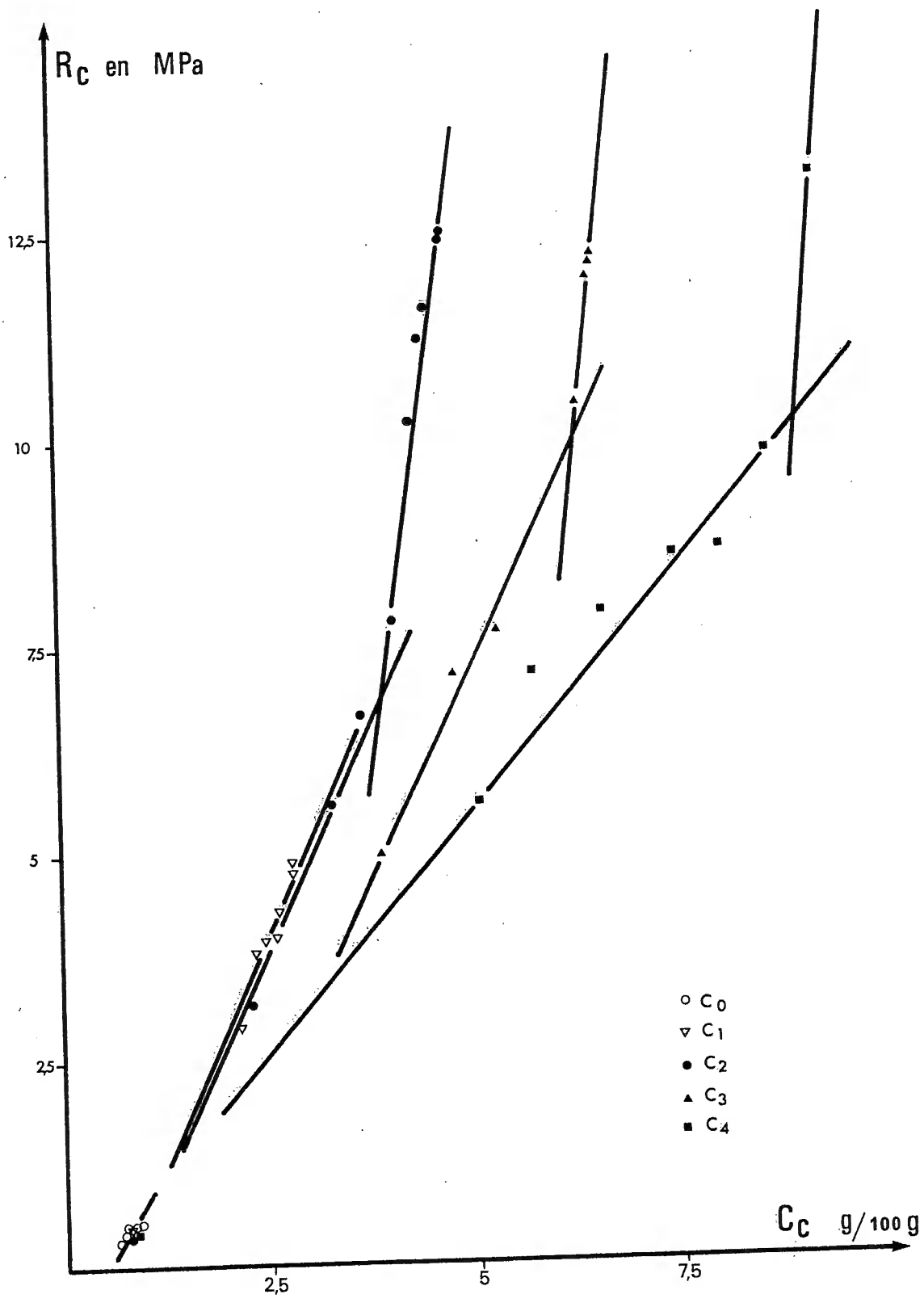


Figure IV-8 : Résistances mécaniques en fonction de la quantité de chaux consommée pour différents dosages en chaux dans le cas de l'arène du Breuil.

2°) Il existe un dosage initial en chaux optimal qui correspond au meilleur rendement de la teneur en chaux. En effet, si on porte les valeurs du rendement $\mathcal{R} = R_{C_{\infty}}/C_0$ en fonction du dosage initial (tableau XXX), on constate que le dosage optimal se trouve aux environs de 5% exception faite pour l'arène Chirac qui a un comportement différent des autres arènes et qui ne présente pas de maximum net pour les dosages utilisés. (Fig.IV.9). Comme cela a déjà été dit précédemment, il convient de s'interroger sur les raisons de ce comportement, mais aucune explication ne peut être avancée. La seule particularité que présente l'arène de Chirac, par rapport aux arènes étudiées, est la nature calco-alcaline de la roche-mère.

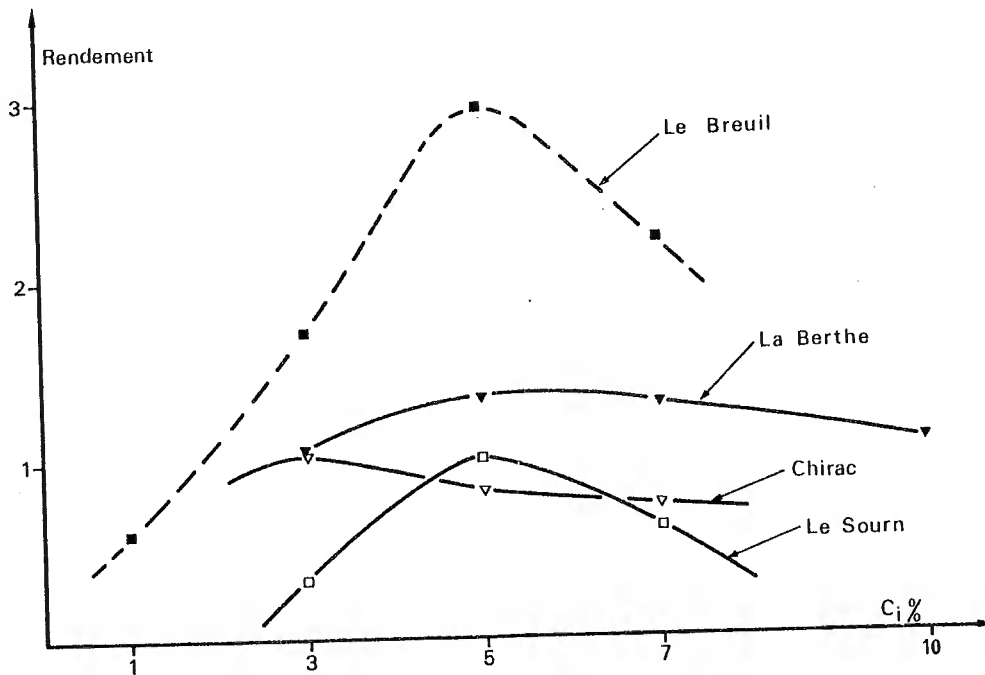


Figure IV-9 : Valeur du rendement $R_{C_{\infty}}/C_0$ en fonction du dosage initial.

Arène	Dosage initial	$C_0 = 1\%$	$C_1 = 3\%$	$C_2 = 5\%$	$C_3 = 7\%$	$C_4 = 10\%$
Le Sourn	-	-	0,33	1,00	0,6	-
Le Breuil	0,59	-	1,70	2,93	2,2	-
Chirac	-	-	1,02	0,8	0,73	-
La Berthe	-	-	1,06	1,33	1,30	1,08

Tableau XXX : Rendement maximal de la chaux utilisée en fonction du dosage initial en chaux, pour différentes arènes.

IV.4.4. Conclusion

En conclusion, il apparaît que l'aptitude des arènes à réagir avec la chaux pour donner des sols traités à caractéristiques élevées est très variable d'une arène à l'autre. Des essais systématiques permettent de connaître exactement le comportement de ces diverses arènes. Néanmoins, cette étude a montré qu'il existe un certain nombre de guides pratiques et faciles à utiliser :

- le test dit "de besoins en chaux" permet d'atteindre rapidement une valeur approchée du coefficient α' .
- le dosage des oxydes dits "libres" permet une estimation grossière de l'aptitude des arènes à réagir avec la chaux et il a été montré que les oxydes de fer ne contribuaient pas au développement des résistances mécaniques.
- enfin, cette étude a montré qu'il existe un seuil minimal de dosage en chaux au-dessous duquel il est vain d'escompter des résultats intéressants car les processus pouzzolaniques ne se produisent pas et qu'il existe un dosage en chaux optimal voisin de 5% qui correspond au rendement maximal de la chaux utilisée. Ce dosage appartient à la gamme de teneurs en chaux utilisables de façon économique en technique routière.

IV.5. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

IV.5.0. Introduction

L'étude de la stabilisation des sols de limons par la chaux avait montré l'influence de la température sur le déroulement des phénomènes de stabilisation et le parti qu'on pourrait en tirer du point de vue technique par la mise au point d'un protocole d'essais accélérés (P. PERRET, 1977).

Dans le cas des arènes, cette influence se trouve bien évidemment confirmée, mais, de plus, les résultats présentés montrent des relations précises entre les coefficients expérimentaux et la température. Après avoir analysé ces relations, il convient donc de voir comment l'influence de la température s'intègre dans le modèle proposé aux paragraphes précédents et quels sont les enseignements utiles que l'on peut mettre à profit pour la conception des projets ou la conduite des chantiers.

IV.5.1. Accélération des phénomènes de stabilisation

Les résultats des différentes séries d'essais effectuées en fonction de la température, montrent que les processus de stabilisation, exprimés soit par un paramètre chimique comme la consommation de chaux, soit par un paramètre mécanique comme la résistance à la compression simple, se trouvent considérablement accélérés par la température. Il n'est pas utile d'insister sur cet effet de la température, mais il convient de se demander si son élévation non contente d'accélérer les phénomènes pouzzolaniques, n'en modifie pas la nature.

L'examen rapide des résultats montre que la température ne modifie pas de façon fondamentale les résistances mécaniques atteintes $R_{C_{\infty}}$ pour des phases homologues. Toutefois, un examen plus approfondi montre que si elles ne sont pas modifiées de façon importante, elles tendent à décroître légèrement et régulièrement au fur et à mesure que la température s'élève.

Comme ces dernières, les consommations de chaux atteintes à long terme $C_{C\infty}$ ne changent pas de façon importante avec la température.

La légère décroissance observée pour les résistances mécaniques, au fur et à mesure que la température s'élève, se retrouve très atténuée en ce qui concerne les consommations de chaux. Ces deux paramètres fondamentaux, correspondant à des phases homologues de stabilisation, ne sont donc influencés que de façon mineure et parallèle par la température : il en résulte que leur rapport R_C/C_C est pratiquement constant quelle que soit la température.

Ce résultat important permet d'identifier, sans ambiguïté, une phase de stabilisation donnée et de la distinguer des autres. Cette distinction objective des diverses phases de stabilisation permet une caractérisation des divers types de processus pouzzolaniques observés.

Ces considérations confirment pleinement ce qui avait été démontré d'une autre manière à propos de sols de limons (P. PERRET, 1977) : l'élévation de température accélère les processus pouzzolaniques sans en changer la nature.

IV.5.2. Examen détaillé des relations entre la température et les coefficients expérimentaux.

La présentation des résultats expérimentaux^a montre qu'il existe des relations étroites entre l'inverse de la température et les pentes (a) et (a') des équations : $R_C = - a/t + b$ et $C_C = - a'/t + b'$, utilisées pour représenter commodément les résultats expérimentaux.

Le fait de pouvoir donner une forme aussi précise aux relations entre la température et les paramètres expérimentaux qui décrivent les progrès de la stabilisation par la chaux, conduit à penser qu'il existe une relation entre celle-ci et les coefficients du modèle fondamental proposé au paragraphe IV.3.

IV.5.3. Variation du coefficient "δ" en fonction de la température T.

Les résultats des séries d'essais effectuées à 20°C, 40°C et 60°C pour les différentes arènes ont permis de calculer la valeur des coefficients "δ" pour les différentes phases (tableau XXXI p 117). On constate qu'entre le coefficient "δ" et l'inverse de la température, il existe une relation de la forme :

$$\delta = - e. 1/T_C + f$$

Il est à noter que, pour des raisons de commodités pratiques, les températures utilisées sont les températures centésimales ordinaires. En toute rigueur, les températures absolues auraient dû être utilisées ce qui aurait changé les valeurs numériques des coefficients "e" et "f" et aurait évité à ce que $1/T$ prenne une valeur infinie, ce qui donne une valeur absurde pour "δ". Néanmoins, le cas de $T = 0^\circ\text{C}$ ne se pose pas du point de vue expérimental car, à cette température, on ne peut mettre en évidence aucun progrès de la stabilisation.

Cette relation de δ se vérifie bien pour toutes les séries comme en témoigne les valeurs du tableau XXXII. La bonne corrélation des valeurs de "δ" avec l'inverse des températures des essais montre que dans le modèle proposé, l'influence de la température s'inscrit au niveau de ce coefficient et le modèle proposé peut s'écrire :

$$R_C = R_{C\infty} (1 + 1/t)^{-\delta(T_C)}$$

Le SOURN		Le BREUIL	
20°C	<p> $\text{Log } R_C = - 0,14 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,21$ $\text{Log } R_C = - 13,02 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,42$ $\text{Log } R_C = - 54,97 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,26$ $\text{Log } R_C = -272,90 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,14$ </p>	<p> $\text{Log } R_C = - 0,43 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,34$ $\text{Log } R_C = - 4,39 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,51$ $\text{Log } R_C = - 11,35 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,25$ </p>	
40°C	<p> $\text{Log } R_C = - 0,44 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,06$ $\text{Log } R_C = - 3,30 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,86$ $\text{Log } R_C = - 12,95 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,48$ </p>	<p> $\text{Log } R_C = - 1,65 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,32$ $\text{Log } R_C = - 3,59 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,54$ </p>	
60°C	<p> $\text{Log } R_C = - 0,49 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,61$ $\text{Log } R_C = - 1,07 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,19$ </p>	<p> $\text{Log } R_C = - 0,62 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,02$ $\text{Log } R_C = - 1,08 \text{ Log } (1 + 1/t) + 2,23$ </p>	
La BERTHE		CHIRAC	
20°C	<p> $\text{Log } R_C = - 0,70 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,65$ $\text{Log } R_C = - 15,12 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,31$ </p>	<p> $\text{Log } R_C = - 0,16 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,68$ $\text{Log } R_C = - 13,89 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,28$ $\text{Log } R_C = - 84,60 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,01$ </p>	
40°C	<p> $\text{Log } R_C = - 0,48 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,16$ $\text{Log } R_C = - 3,17 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,57$ </p>	<p> $\text{Log } R_C = - 0,72 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,14$ $\text{Log } R_C = - 4,54 \text{ Log } (1 + 1/t) + 0,70$ $\text{Log } R_C = - 27,78 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,55$ </p>	
60°C	<p> $\text{Log } R_C = - 0,43 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,37$ $\text{Log } R_C = - 2,40 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,61$ </p>	<p> $\text{Log } R_C = - 0,47 \text{ Log } (1 + 1/t) - 0,30$ $\text{Log } R_C = - 3,78 \text{ Log } (1 + 1/t) + 1,26$ </p>	

Tableau XXXI : Tableau donnant les valeurs du coefficient δ en fonction de la température pour les différentes phases de stabilisation.

Le SOURN :	2ème phase : $\delta = - 378,7426 \ 1/T + 5,9690$ 3ème phase : $\delta = - 1631,5938 \ 1/T + 26,8582$
Le BREUIL :	2ème phase : $\delta = - 112,5028 \ 1/T + 1,2192$ 3ème phase : $\delta = - 308,6031 \ 1/T + 4,0915$
CHIRAC :	2ème phase : $\delta = - 396,0549 \ 1/T + 5,8011$ 3ème phase : $\delta = - 2408,0746 \ 1/T + 35,5274$
La BERTHE :	1ère phase : $\delta = - 8,3986 \ 1/T + 0,2791$ 2ème phase : $\delta = - 403,8568 \ 1/T + 5,4416$

TABLEAU XXXII : Relations entre le coefficient δ et la température T en degré celsius.

Le même raisonnement peut se faire en ce qui concerne les consommations de chaux et l'on constate de la même façon qu'il existe une corrélation entre le coefficient α' et l'inverse de la température.

Les consommations en chaux s'expriment donc par une relation de la forme :

$$C_c = C_{c\infty} (1 + 1/t)^{-\alpha'(T)}$$

Le fait que les coefficients δ et α' soient reliés de façon étroite à l'inverse de la température explique que l'on constate une corrélation entre l'inverse de la température et les coefficients a et a' car il a été montré précédemment que : $a = \delta \cdot R_{c\infty}$ et $a' = \alpha' \cdot C_{c\infty}$.

IV.5.4. Protocole d'essais accélérés :

Le fait qu'il existe une bonne corrélation entre " δ " et l'inverse de la température permet d'envisager un protocole d'essais accélérés pour tester l'aptitude des arènes à recevoir un traitement à la chaux.

Le principe de ces essais accélérés est le suivant : l'action d'un traitement est évaluée à partir de deux séries effectuées l'une à 40°C et l'autre à 60°C dont les durées respectives seront de 40 jours et 15 jours. Pour les dernières phases de stabilisation, le dépouillement des résultats nous fournit d'une part les valeurs de $R_{c\infty}$ à 40°C, $R_{c\infty}$ à 60°C, et d'autre part les valeurs de δ à 40°C et δ à 60°C.

D'après ce qui a été dit dans le paragraphe précédent ($R_{C\infty}$)_{40°C} et ($R_{C\infty}$)_{60°C} constituent pour chacune des phases considérées une bonne approximation par défaut de ($R_{C\infty}$)_{20°C}. La corrélation entre "δ" et l'inverse de la température permet à partir de δ_{40°C} et δ_{60°C} de calculer δ_{20°C}. On dispose donc de tous les éléments pour le calcul de la résistance mécanique R_C à 20°C.

$$(R_C)_{20^\circ} \geq (R_{C\infty})_{\text{approx.}} \cdot [1 + 1/t]^{-(\delta_{20^\circ}) \text{ calculé}}$$

IV.5.5. Conclusion

L'interprétation des résultats expérimentaux exposés au chapitre précédent a permis de proposer un mode de représentation judicieux en fonction de l'inverse du temps. Cette simplicité de représentation permet d'obtenir de façon immédiate les résistances ultimes et des consommations de chaux correspondantes. De plus, la bonne adéquation de ce mode de représentation aux résultats expérimentaux confirme, pour les arènes, l'essentiel des conclusions déjà avancées à propos des sols de limons (P. PERRET, 1977) :

- la stabilisation d'un sol par la chaux s'effectue par étapes,
- son évolution, pour chacune de ces étapes, est régie par une loi d'allure hyperbolique en fonction du temps.

La considération du rapport R_C/C_C permet de conclure que les résistances en compression simple sont reliées aux consommations de chaux par une relation de la forme :

$$R_C = \beta C_C^\alpha$$

L'évolution des consommations de chaux en fonction du temps permet de proposer un modèle pour l'évolution des résistances mécaniques de la forme :

$$R_C = R_{C\infty} (1 + 1/t)^{-\delta(T)}$$

dans lequel $R_{C\infty}$ est la résistance ultime de la phase considérée et "δ" une fonction linéaire de l'inverse de la température.

Ce modèle conduit à proposer un protocole d'essais accélérés qui permet de tester l'efficacité d'un traitement avec une bonne approximation et une marge de sécurité.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La stabilisation des sols de caractéristiques médiocres constituant un procédé qui tend de plus en plus à s'imposer en construction routière; la présente étude a été entreprise en vue de déterminer dans quelles conditions les arènes pouvaient être valorisées par cette technique.

Pour représenter les différentes arènes susceptibles d'être rencontrées sur le territoire métropolitain, un éventail de cinq arènes comprenant :

- trois arènes de leucogranites (Le SOURN - Le BREUIL - BARRAUD),
- une arène de granite calco-alcalin (CHIRAC),
- une arène gneissique (La BERTHE),

a été choisi de façon que l'on puisse tester une gamme aussi large que possible de caractéristiques (texture, minéraux argileux, surface spécifique, caractéristiques géotechniques et indices chimiques).

La méthode expérimentale a été utilisée. Des séries d'éprouvettes correspondant à un traitement donné caractérisé par le dosage en chaux et l'humidité ont été conservées à différentes températures. Au bout d'un temps de conservation déterminé, la célérité des ondes longitudinales à travers les échantillons, sa résistance à la rupture en compression simple et la quantité de chaux consommée ont été mesurées de façon à pouvoir suivre les progrès de la stabilisation par des paramètres mécaniques et chimiques. Trente cinq séries dont une série de référence pour chacune des arènes ont été exécutées.

L'analyse des résultats expérimentaux permet de proposer un mode de représentation adéquat dans un diagramme dit transformé où le paramètre mécanique ou chimique est étudié en fonction de $1/t$: l'évolution de la caractéristique chimique ou mécanique permet de confirmer :

- que la stabilisation par la chaux procède par étapes,
- que chacune de ces étapes, comme l'indique le bon alignement des points expérimentaux sur les diagrammes transformés, est régie par une loi de nature hyperbolique en fonction du temps, s'écrivant sous la forme :

$$R_c = - a. 1/t + b.$$

$$C_c = - a'. 1/t + b'.$$

- qu'il existe une coïncidence entre l'avancement chimique des réactions et les progrès mécaniques de la stabilisation.

Une corrélation entre les coefficients a ou a' et l'inverse de la température est mise en évidence. De plus, il existe une corrélation entre les taux de silice et d'alumine combinée et les résistances mécaniques observées.

Les résistances mécaniques s'expriment en fonction des consommations de chaux par une équation de la forme :

$$R_C = \beta C_C^\alpha$$

Si l'on considère comme état de référence l'état ultime d'une phase de stabilisation, l'évolution des caractéristiques chimiques C_C ou des caractéristiques mécaniques R_C s'effectuent suivant un modèle qui s'exprime par des équations générales de la forme :

$$C_C = C_{C^\infty} (1 + 1/t)^{-\alpha'(T)}$$

et

$$R_C = R_{C^\infty} (1 + 1/t)^{-\delta(T)}$$

les coefficients α' et δ étant des fonctions linéaires de l'inverse de la température.

L'efficacité d'un traitement sur une arène donnée peut être rapidement testée par un protocole d'essais accélérés, basé sur le modèle proposé.

BIBLIOGRAPHIE

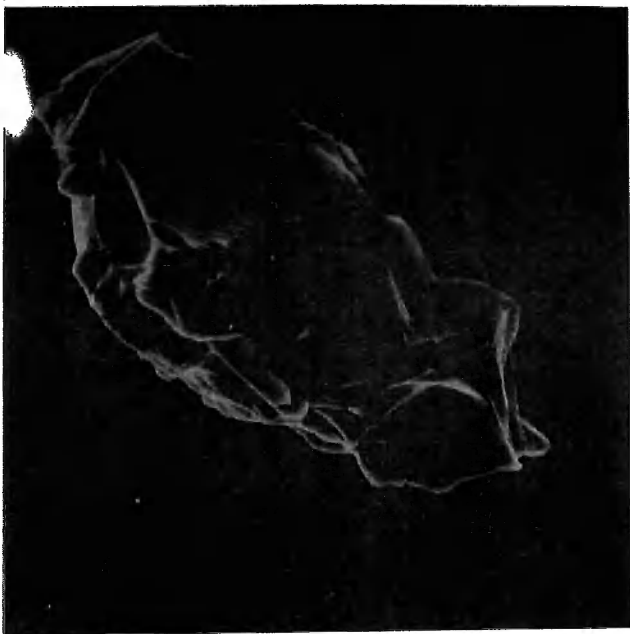
- Transportation Research Board
Committee.
- A.F.N.O.R. Norme 15 301. (1946).
- A.F.N.O.R. Norme T.60.113. (1960)
- MODE OPERATOIRE DU L.C.P.C. Essai d'équivalent de sable.
Ed. DUNOD. PARIS (1970).
- MODE OPERATOIRE DU L.C.P.C. Essai Proctor.
Ed. DUNOD. PARIS (1970).
- AILLERET B., ROUYET F., DELIGNE P. Plateforme traitée à la chaux et
au ciment.
Bulletin liaison. P et C. Spéc. X.
Mars 1975).
- ALEXANDRE J., VOLANT J. Utilisation routière de chaux.
Rapport intérieur.
CERILH. (1979).
- CAPDESSUS H. , CHAUVIN J.J. Traitement des sables de Landes.
Bull. Liaison. Labo. P et C. n°67.
(Sept. Oct. 1973).
- CHAUVIN J.J. Emploi des sables traités aux liants
hydrauliques en assises de chaussées.
Journée d'Information à Nantes,
6-8 Mai 1974, MEL. L.C.P.C.
- CHESTER. Mc. Dovvell. Evaluation of soil-lime stabilization
mixtures.
Highway Research Record, n° 139,
P. 15-24. (1965).
- CHEVASSU G. Les roches granitiques et leur alté-
ration.
Reconnaissance géotechnique de tracés
en Bretagne.
Rapport de Recherche L.P.C. n° 61.(1976).
- CIMPELLI C., KERGOET M. Utilisation en couches de forme des
argiles vertes de Romainville.
Traitées à la chaux et au ciment.
Bull. Liaison L.P.C., n° 73. (Sept.
Oct. 1974).
- COLOMBIER G. HERMANN, HENNO. Traitement des sols fins pour assises
de chaussées.
Rapport labo. Régional d'AUTUN.

- CROFT J.B. The processes involved in the lime, stabilization of clay-soils. Proceedings/second conférence. A.R.R.B. Vol. II. Part.2, paper n°121, pp. 1169-1203. (1964)
- CURMI P. Altération et différenciation pédologique sur granite en Bretagne. Etude d'une toposéquence. Thèse de Doct. Ing. en Sciences Agronomiques. Universités de Rennes. (1979).
- DAVID L., TOWNSEND, TONY W. KLYM. Durability of lime, stabilized soils. Highway Research Record, n°139, pp. 25-41. (1965).
- DAVIDSON L.K., DEMIREL T., HANDY R.L. Soil Pulvérisation and lime migration in soil lime stabilization. Highway Research Record, n°92, pp. 103-126. (1965).
- DEB B.C. The estimation of frac iron oxyde in soils and clays and their removal. J. Soil Science, V.1. pp. 212-220, (1950).
- DEJOU J. L'altération des granits du massif de la Pierre-qui-vire. (MORVAN) in Ann. Agronom. Vol. XVIII. (1967).
- DÉLEURENCE J.C. Utilisation des sols fins traités en assisés de chaussées. Bull. Liaison Labo. P.et C. n°90, (Juillet-Août 1977).
- DESTHIEUX M. Résultats de recherche sur l'action de la chaux dans le traitement des sols. Par : KVONEN. V. et HIRT R. - Straps und Verkehr, Suisse, n°11, pp. 567-571, (1966).(1967. L.C.P.C. Traduction 67.T.1).
- DRON R. Mécanisme de la prise du laitier granulé sous activation alcaline. Rapport de Recherche L.P.C. n°38, (Sept- 1974).
- DUCHAUFOR P. Précis de pédologie. Ed. Masson, Paris, (1960).
- DUTREUIL J.P. Les granites de l'Ouest du Limousin : leur pétrologie, leur altération, leurs sols. Thèse Limoges, 537 p. (1978)

- FOURNIER R. Les facteurs de qualité des chaux industrielles. Bull. Liaison. P et C. n°79, (Sept. Oct. 1975).
- GUILLOUX A. Influence de la pétrographie sur la compactabilité et la portance des sables fins traités. (Région Parisienne). Thèse de Doct. Ing. Univ. Paris VI et E.N.S.M. Paris. (1978).
- HAMEURT J.M. Etude géologique et pétrographique du massif granitique de Pontivy. Thèse 3ème cycle, Nancy, 104 pages. (1961).
- HAMZE M. Contribution à l'étude des propriétés des matériaux. Le traitement des sables. Rapport de Recherche P.C. n°67, (Juillet 1977).
- HERAUD H., RESTITUITO J., TERLE J. Traitement à la chaux et à la chaux-ciment des arènes granitiques d'Auvergne. Bull. Liaison. Labo. P et C. n°78, pp. 25-30, (Juillet-Août 1975).
- HERRIN et MITCHELL. Stabilisation à la chaux, traduction partielle du Bull. 304, du Highway Research Board, 1961. (1972).
- JACKSON M.L. Soil chemical analysis : advanced course. Univ. Wisconsin, Madison. (1956).
- LAMEYRE J. Leucogranite et muscovitisation dans le Massif Central Français. Thèse, Clermont Ferrand, 264 pages. (1966).
- LCPC et SETRA Recommandations pour les terrassements routiers. Fasc.2 : Utilisation des sols en remblai et en couche de forme, (Janv.1976).
- LELONG F. Nature et genèse des produits d'altération de roches cristallines sous climat tropical humide. (Guyane Française). Thèse Nancy, Mém. Sc. de la Terre, n°14, p. 188, (1969).
- LENEUF N. L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestières et les sols qui en sont dérivés. Thèse, Paris, 210 pages. (1959).
- LEROUX Traitement des sols argileux à la chaux. Bull. L.P.C., n°40, (1961).
- LEROUX A. Contribution à l'étude du traitement à la chaux des matériaux. Thèse de 3ème cycle, ORSAY, 105 pages. (1969).

- MVONDO-ONDOA J. Rôle de la granularité et la composition minéralogique sur la compactabilité et la résistance au cisaillement des mélanges de sable et d'argiles. Thèse de Doct. 3ème cycle, Univ. Paris VI, et E.N.S.M. Paris, (1979).
- PERRET P. Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux : étude globale du phénomène et application. Thèse Doct. Ing., I.N.S.A. de Rennes, 166 pages, (1977).
- PETIT Ph. Contribution à l'étude de la cohésion dans une pâte de laitier granulé. Rapport de Recherche L.P.C. n°27, (1973).
- PLIHON G. Les formations meubles sur les granites de Bonnemain et de Quintin. (Massif Armoricain). Arènes, remaniées et climons. Thèse 3ème cycle, Univ. de Rennes, (1974).
- PONCHON D., ANDRIEUX P., BONTOUX P., PUIATTI. Traitement en place des sols à la chaux et au ciment. Revue générale des Routes et Aérodrômes. Suppl. au n°536, (Nov.1977).
- PUIATTI D. Stabilisation des sols et couches de forme. Traitement des sols à la chaux et au ciment. (Labo. Rég. de Rouen, F.R.A.). Rev. Gén. Routes et Aérodrômes, F.R.A. n°563, supplément 15,16, (1980).
- RAGUENEL A., PUIG J., CORBIN , GESTIN. Bilan du traitement des climons à la chaux et à la chaux-ciment en Normandie. Bull. Liaison. P. et C. n°67, (Sept. Oct. 1973).
- SEDDOH F. Altération des roches cristallines du Morvan, (granites, granophyres, rhyolites). Etude minéralogique, géochimique et micromorphologique. Mém. Géol. Univ. Dijon, n°1, 377 pages. (1973).
- SEGALEN P. Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. Cah. O.R.S.T.O.M. Pédologie VI.I. pp. 105-126, (1968).
- SETRA et L.C.P.C. Recommandations pour le traitement en place des sols fins à la chaux. 23 pages, (1972).

- SIDNEY, DIAMOND.,
EARL B., KINTER. Mechanisms of soil-lime stabilisation.
Highway Research Record, n°92, pp.83-102,
(1965).
- STRUILLOU R. Altérations et altérabilité des roches
silicatées en climat tempéré dans l'op-
tique de la géologie de l'Ingénieur.
Thèse de Doct. es Sciences, Paris, (1973).
- VENUAT M. Traitement des sols à la chaux et au
ciment. (1980).
- VERHASSELT A. Le traitement des sols à la chaux.
Point de la question.
La Technique Routière, Belgique, vol.XX.
n°1, (1975).
- VIVIER M., ANDRIEUX P.,
BAILLY J.P., NAVARRO P.,
LEPLAT J. Essais de traitement des climons à la
chaux vive dans le département du Nord.
Bull. Liaison. P et C. n°23, (Janv.
Fév. 1968).
- VOGT K. La route en béton, la stabilisation au
ciment où à la chaux.
Bull. d'Infor. de la S.A. des routes
en béton à Wildug, n°70/71 et 72,
(Janv. Juillet 1967).



1. 860



4.



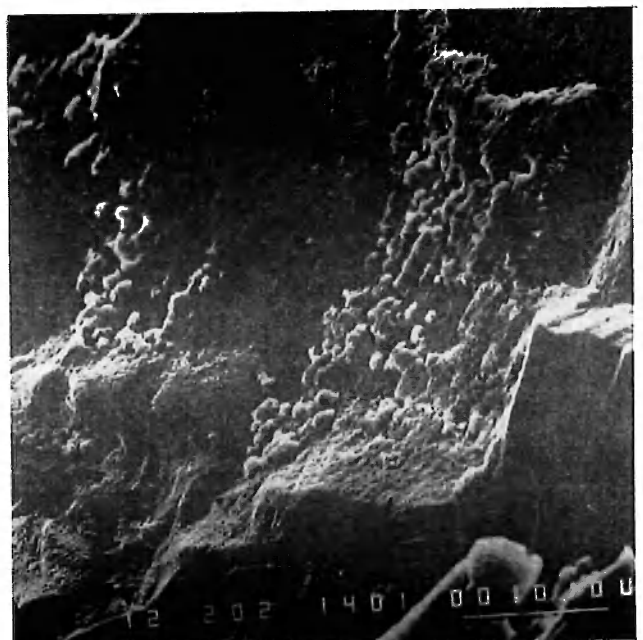
2. 3000



5. 10.000



3. 10.000



6. 10.000



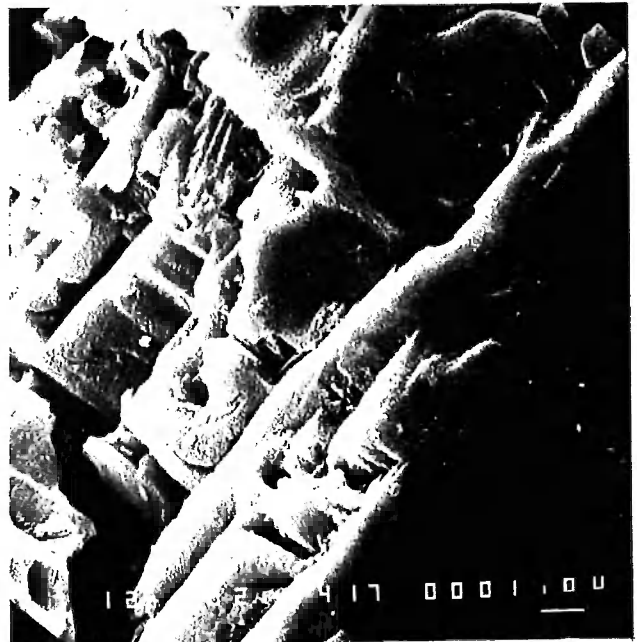
1. G : 2000



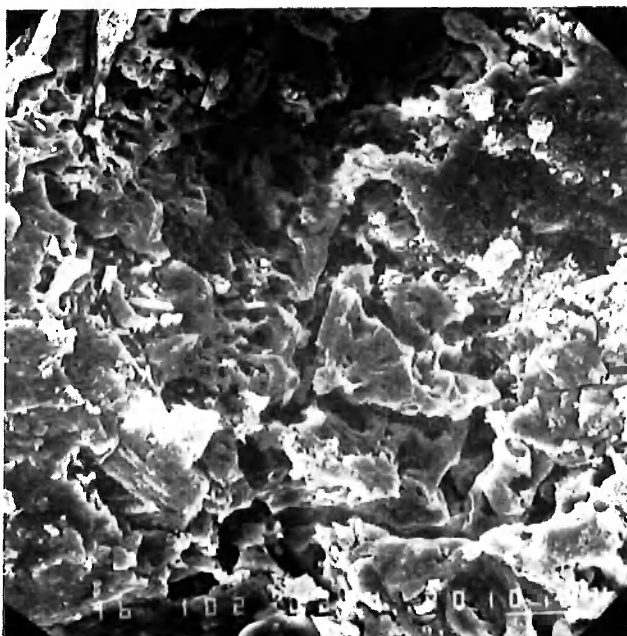
2. G : 10.000



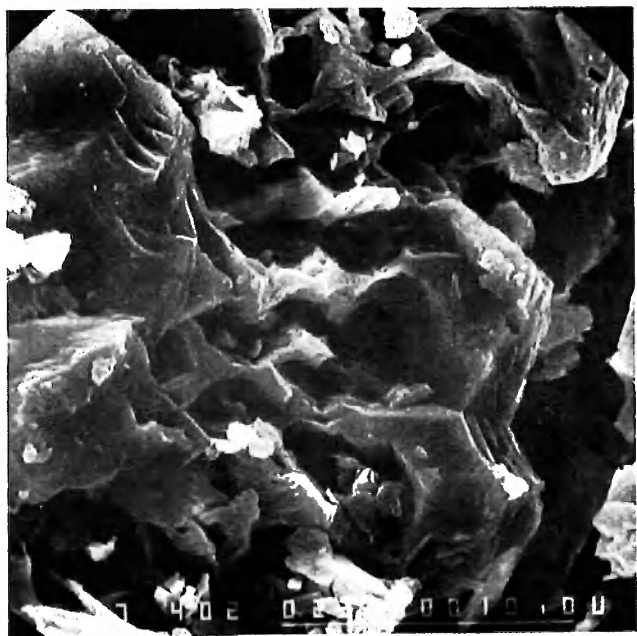
3. G : 2000



4. G : 6000



5. G : 1000



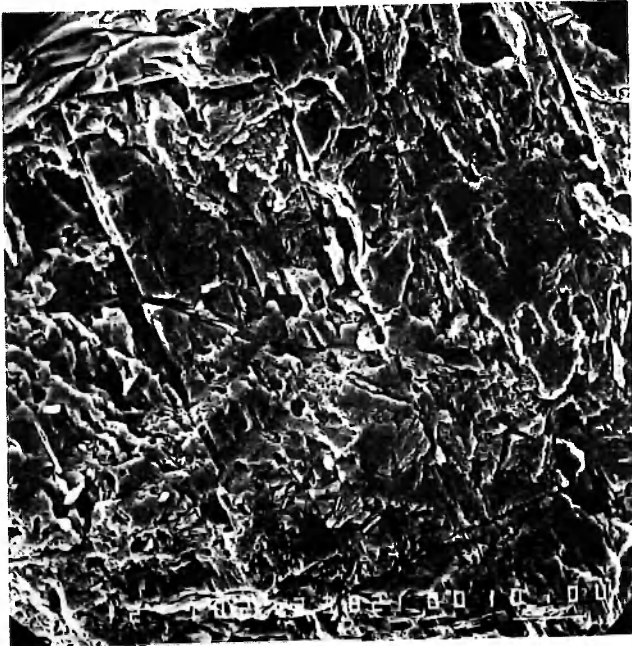
6. G : 4000



1. G : 40



4. G : 6000



2. G : 1000



5. G : 6000



3. G : 6000



6. G : 3000

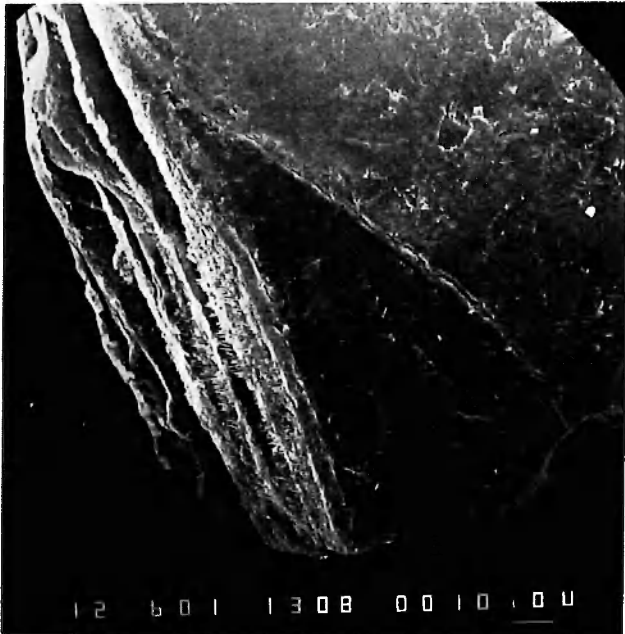
131
PLANCHE IV



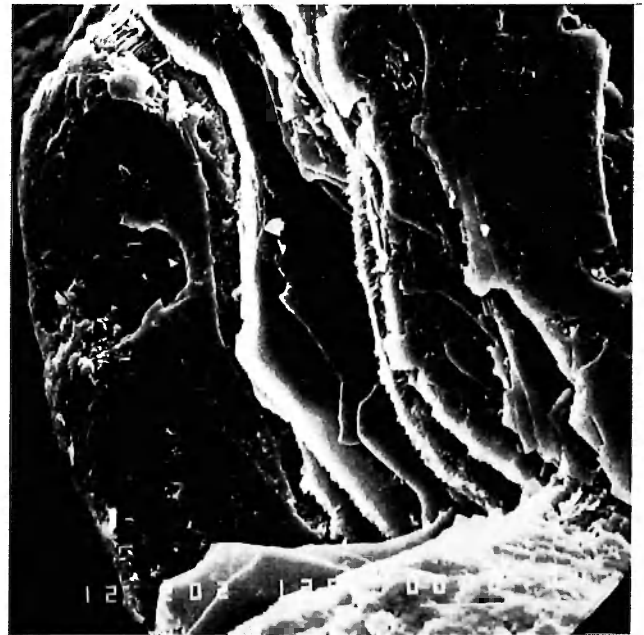
1. G : 320



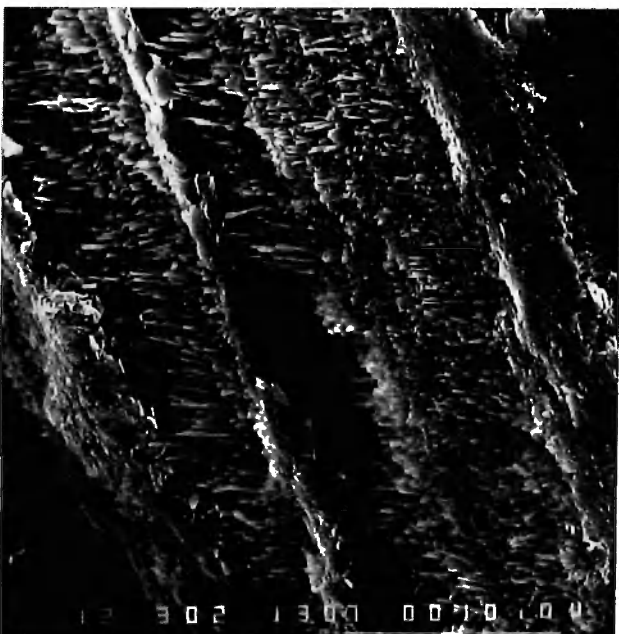
2. G : 300



3. G : 600



4. G : 2000



5. G : 3000



6. G : 10000

132
PLANCHE V



1. G : 40



3. G : 200



2. G : 600



4. G : 1000

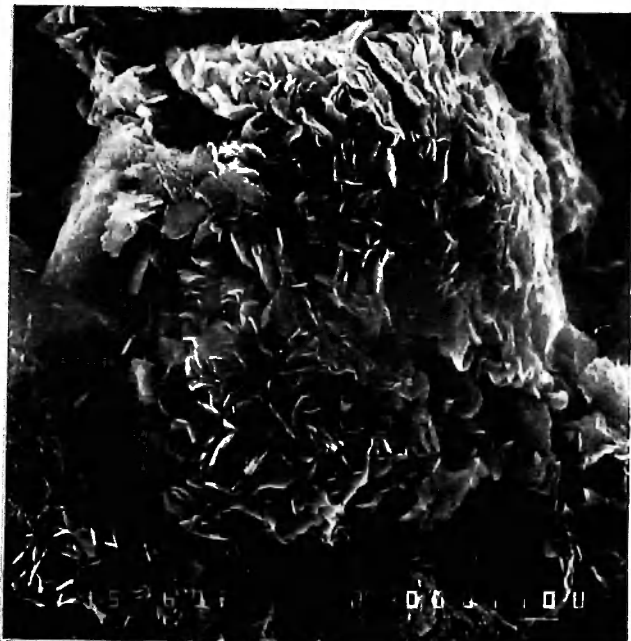
133
PLANCHE VI



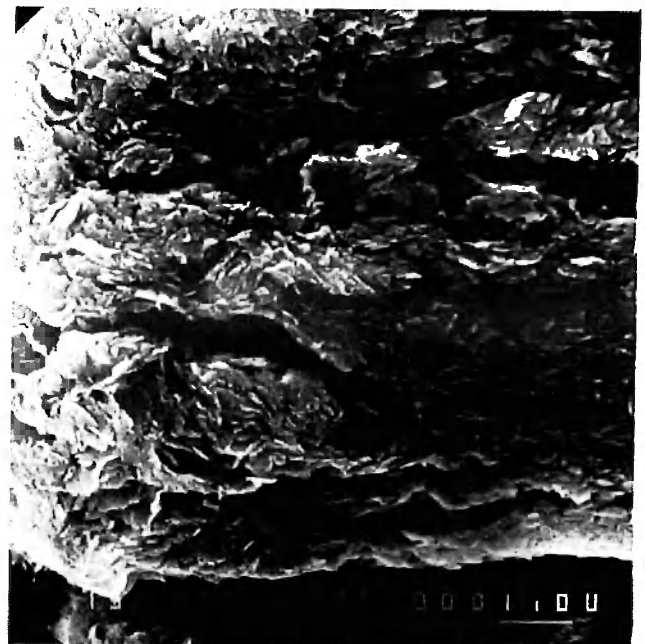
1. G : 1100



3. G : 3000



2. G : 6000



4. G : 10.000

