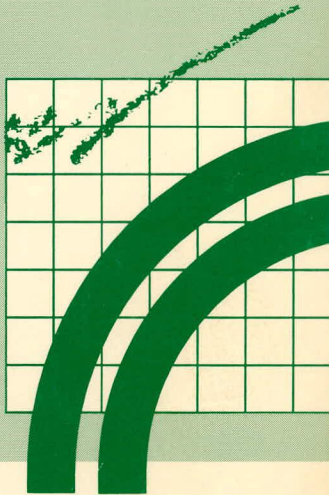


ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



ÉTUDE EN LABORATOIRE DE MÉLANGES D'ARGILE OU DE SABLE AVEC DES ADDITIFS MINÉRAUX POUR LE TRAITEMENT D'INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES



PAUL FLON
JEAN BESNER

ESSAIS
ET MATÉRIAUX

CANQ
TR
GE
SM
185

Québec 

470 164

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

ÉTUDE EN LABORATOIRE DE MÉLANGES
D'ARGILE OU DE SABLE AVEC DES ADDITIFS
MINÉRAUX POUR LE TRAITEMENT
D'INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

CANQ
TR
GE
SPM
ARS

146
47
103

Dépôt légal, 3^e trimestre 1987
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN: 2-550-17895-5



Titre et sous-titre du rapport <u>Etude en laboratoire de mélanges d'argile et de sable avec des additifs minéraux pour le traitement d'infrastructures routières.</u>				N° du rapport Transports Québec RTQ-87-08	
Auteur(s) du rapport <u>Jean Besner</u> <u>Paul Flon</u>				Rapport d'étape ☐ An Mois Jour Rapport final ☒ N° du contrat Date du début d'étude Date de fin d'étude Coût de l'étude	
Etude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Service du laboratoire central Division des sols et granulats 2700, rue Einstein Sainte-Foy QC G1P 3W8			Etude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) Ministère des Transports du Québec 700, boul. Saint-Cyrille Est Québec QC G1R 5H1		
But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche visant à diversifier les méthodes de traitement des infrastructures routières à l'aide d'additifs. Les résultats d'essais exposés dans ce rapport tendent vers le but qui est de trouver les additifs les meilleurs, les mélanges adéquats et les proportions optimales. Un sable pollué a aussi été traité en vue de sa réutilisation dans une sous-fondation.					
Résumé du rapport La recherche en laboratoire de la meilleure combinaison possible s'effectue à partir de différents matériaux qu'il faut caractériser précisément, aussi bien les sols que les additifs. Un sable silteux et une argile très plastique sont plus faciles à traiter qu'une argile peu plastique. Une fumée de silice a davantage d'influence qu'un filler minéral ou une poussière de ciment. Les liants hydrauliques, chaux ou ciment, améliorent sensiblement les sols s'ils sont employés seuls, mais sont plus efficaces s'ils sont mélangés avec un autre additif. La chaux semble plus utile dans un mélange argileux, et le ciment dans un mélange sableux. Il est toujours préférable d'ajouter des additifs à une teneur en eau proche de l'optimum. Dans un sol très plastique et à forte humidité, le mélange semble empirer certaines propriétés physiques à court terme (consistance), mais la résistance augmente à plus long terme. Le matériau traité est plus fragile. La rupture est atteinte pour une déformation moindre que sans additif, mais la résistance atteinte est plus élevée. Il est important de respecter des périodes de curage, d'autant plus si la charge est grande, avant la densification du mélange et avant la mise en service de la section traitée. Il semble par contre que le liant hydraulique doit être ajouté juste avant la densification. Les sortes et les quantités optimales d'additifs à rajouter dépendent du coût relatif des matériaux et du gain de résistance recherché. Il faut continuellement s'adapter aux nouvelles conditions, et prendre connaissance des nouvelles expériences dans le domaine.					
Nbre de pages 58	Nbre de photos	Nbre de figures 15	Nbre de tableaux 9	Nbre de références bibliographiques 15	Langue du document ☒ Français ☐ Anglais Autre (spécifier)
Mots-clés additifs minéraux, liants hydrauliques, traitement, argile, sable, mélange, proportions optimales, curage, densification, résistance, consistance, ciment, mélange argileux, mélange sableux, fumée de silice, filler minéral.				Autorisation de diffusion ☒ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite <u>Jean Besner</u> 87/09/02 Signature du directeur général Date	

TABLE DES MATIÈRES

	Page
TABLE DES MATIÈRES	I
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES FIGURES	III
REMERCIEMENTS	V

CHAPITRE I

INTRODUCTION	1
------------------------	---

CHAPITRE II

BIBLIOGRAPHIE	3
2.1 TRAITEMENT À LA CHAUX	3
2.1.1 Réactions sol-chaux	3
2.1.2 Propriétés des sols traités	4
2.1.3 Application	6
2.2 TRAITEMENT AU CIMENT	6
2.3 AUTRES TRAITEMENTS	8
2.3.1 Expériences étrangères	8
2.3.1 Applications pour le Québec	10

CHAPITRE III

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS	13
3.1 ADDITIFS	13
3.1.1 Chaux	13
3.1.2 Ciment	13
3.1.3 Fumée de silice	14
3.1.4 Carborundum ou fumée de silice secondaire	15
3.1.5 Poussière de Cottrel	15
3.1.6 Filler	15

TABLE DES MATIÈRES (SUITE)

	Page
3.2 CARACTÉRISTIQUES DES SOLS	15
3.2.1 Argile de Saint-Vallier.	15
3.2.2 Argile de Saint-Thuribe.	16
3.2.3 Sable P.E.B.	17
CHAPITRE IV	
ESSAIS	19
4.1 DESCRIPTION DES ESSAIS	19
4.2 RÉSULTATS DES ESSAIS ET INTERPRÉTATION	21
4.2.1 Généralités	21
4.2.2 Propriétés physiques	22
4.2.3 Propriétés mécaniques	23
CHAPITRE V	
CONCLUSION	27
5.1 RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE	27
5.2 SUITE DE L'ÉTUDE	29
RÉFÉRENCES	31

LISTE DES TABLEAUX

	Page
1- Caractéristiques physiques des additifs	34
2- Caractéristiques chimiques des additifs	35
3- Caractéristiques physiques des sols	36
4- Caractéristiques mécaniques des sols	37
5- Caractéristiques de mélanges sol + un additif	38
6- Essais Proctor et de perméabilité sur les mélanges sol + un additif	39
7- Caractéristiques de mélanges sol + deux additifs	40
8- Essais de compression simple sur les mélanges sol + un additif	41
9- Essais de compression simple sur des mélanges sol + deux additifs	42

LISTE DES FIGURES

1- Courbe granulométrique des additifs	45
2- Site de l'argile de Saint-Vallier	46
3- Courbe granulométrique des sols et susceptibilité au gel	47
4- Soulèvement par le gel 100% P.E.B.	48
5- Soulèvement par le gel 95% P.E.B. + 5% silice	49
6- Soulèvement par le gel 95% P.E.B. + 5% filler	50
7- Soulèvement par le gel 97% P.E.B. + 3% chaux	51
8- Essais Proctor (Saint-Vallier + 5% additif minéral)	52
9- Essais Proctor (Saint-Vallier + liant hydraulique)	53
10- Essais Proctor (Saint-Vallier + 3% chaux + 5% additif minéral)	54
11- Essais Proctor (Saint-Thuribe + 5% additif minéral)	55
12- Essais Proctor (P.E.B. + 5% additif minéral)	56
13- Essais Proctor (P.E.B. + liant hydraulique ou 10% silice)	57
14- Essais Proctor (P.E.B. + 2% ciment + 5% additif minéral)	58
15- Essais de compression simple à 0 et 7 jours	59

REMERCIEMENTS

Nous remercions particulièrement messieurs Lucien Arial, Nelson Dubé et Michel Mercier qui ont prêté main forte à la réalisation des essais, ainsi que le personnel de la Division sols et granulats pour leur compréhension et leur aide.

Les auteurs

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Une construction de route nécessite une infrastructure qui puisse supporter les fondations et le trafic; il est parfois indispensable de la traiter si ses caractéristiques physiques et mécaniques sont insuffisantes. Le traitement à la chaux est celui qui a été le plus étudié et quelque peu utilisé ces dernières années au Québec; il ne semble pourtant pas idéal, il peut s'avérer insuffisant, dispendieux, inadéquat dans certains cas. Le ministère des Transports cherche donc à diversifier les méthodes de traitement, en essayant d'autres additifs, ou des mélanges d'additifs, qui pourraient tout aussi bien améliorer les propriétés de l'infrastructure à traiter. Le Laboratoire central a commencé en 1982 et 1984 un programme d'essais qui s'est poursuivi par une autre série d'essais en 1986.

Par ailleurs, le Ministère ne peut utiliser, dans les fondations de route, certains matériaux marginaux qui ne répondent pas aux exigences, mais qui pourraient devenir acceptables après traitement. C'est pourquoi des essais ont aussi été réalisés sur un sable pollué, pouvant éventuellement être employé dans une sous-fondation.

Le nombre d'essais effectués ne permet pour l'instant que de dégrossir le problème, et devra se multiplier. Il est en effet difficile de trouver d'emblée des additifs idéaux et des proportions optimums, d'autant plus que les ressources bibliographiques sont limitées. Les produits ayant servi aux expériences sont de la fumée de silice, du filler minéral, de la poussière de Cottrel, de la chaux et du ciment; ils ont été utilisés soit séparément, soit sous forme de mélange.

L'amélioration des propriétés physiques et mécaniques de l'infrastructure ou de la sous-fondation peut s'apprécier en traçant certains facteurs de comportement en fonction d'indices de qualité, qui évoluent sous l'influence du pourcentage croissant d'additifs.

Ce rapport donne les résultats d'essais, et propose une suite d'essais complémentaires pour faire avancer la recherche dans ce domaine.

CHAPITRE II

BIBLIOGRAPHIE

2.1 TRAITEMENT À LA CHAUX

Le traitement des sols à la chaux a fait l'objet d'études à l'Université Laval ces dernières années. Les principaux résultats peuvent être rassemblés sous la forme qui suit:

2.1.1 Réactions sol-chaux

Les réactions se produisent non seulement avec les phyllosilicates, mais aussi selon certains auteurs avec des minéraux inertes comme le quartz et peut-être même le feldspath. Certains auteurs prétendent aussi que la kaolinite est plus réactive que la montmorillonite, d'autres affirment le contraire ! Il apparaît que les réactions de stabilisation dépendent de nombreux facteurs interreliés: nature du sol, nature de la fraction argileuse, quantité des particules amorphes, granulométrie, pH, température, teneur en eau, masse volumique, limites d'Atterberg, capacité d'échange cationique, surface spécifique, etc. Il est difficile d'isoler chacun de ces paramètres pour en mesurer l'influence !

Pourtant, il semble assez bien établi (par la littérature et par les études de l'Université) que l'apparition de nouvelles phases (silicates de calcium hydratés CSH, aluminates de calcium hydratés CAH, alumino-silicates de calcium hydratés CASH) soit responsable de l'augmentation de la résistance des sols. Mais les mécanismes de cette formation sont mal connus; s'agit-il d'une réaction directe in situ, ou d'une dissolution au préalable de silice et d'alumine ? La présence du fer aurait-elle un effet important ?

Tout le monde constate cependant que la présence de chaux modifie les forces interparticulaires du sol, provoque la floculation et l'agglomération des particules argileuses, et entraîne le remplacement des principaux cations du sol par le calcium de la chaux,

en commençant par Na^+ puis K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} . Par ailleurs, la chaux réagit avec le bioxyde de carbone de l'atmosphère pour former du carbonate de calcium CaCO_3 , au détriment du supplément de réaction qui aurait pu se produire avec le sol en formant des ajouts cimentaires plus forts que le CaCO_3 .

2.1.2 Propriétés de sols traités

Le pourcentage optimum de chaux se situe entre 3 et 7%. Il est déterminé en mesurant le pH de plusieurs échantillons à plusieurs pourcentages de chaux différents; l'optimum qui correspond au meilleur rapport qualité de résistance sur prix de traitement, est le pourcentage de chaux pour $\text{pH} = 12,4$. Une relation empirique a aussi été donnée dans le cas de sols riches en illite-chlorite ou kaolinite, qui auraient moins de 50% de silt et un indice d'activité Ac inférieur à 0,75: $\% \text{ chaux} = \frac{\% < 2 \mu\text{m}}{35} + 1,25$. Le dosage en chaux peut aussi être déterminé (méthode du LCPC) en considérant la courbe de variation de l'indice CBR en fonction du pourcentage de chaux, pour la teneur en eau maximale prévisible sur le chantier.

On a pu noter d'autres informations:

- le gain de résistance s'étale graduellement dans le temps, possiblement sur quelques années;
- la densité n'augmente pas; elle aurait plutôt tendance à diminuer;
- la résistance au gel diminue, si bien qu'il n'est pas conseillé de traiter un sol moins d'un mois avant les premiers gels. La résistance au gel n'augmente sensiblement qu'après un an, et que si le dosage dépasse 3%;
- un curage d'une heure au moins est nécessaire avant compactage, pour laisser "mûrir" le mélange;
- la vitesse de réaction augmente avec la température. Les réactions sont très faibles si la température est inférieure à 10°C ; elle devrait en fait être supérieure à 25°C ;

- la perméabilité d'un sol traité est plus forte que celle du sol non traité; mais si on l'arrose avant mûrissement, la perméabilité décroît considérablement, par formation de minéraux cimentaires qui réduisent l'écoulement;
- la limite plastique w_p augmente avec le traitement jusqu'au point de fixation, qui est le point d'inflexion de la courbe % de chaux versus w_p . La limite liquide s'accroît aussi, mais plus faiblement que w_p , ce qui fait que l'indice de plasticité a tendance à diminuer;
- la teneur en eau optimum Proctor est plus élevée; la masse volumique sèche maximum a une tendance à s'abaisser. Comme le sol s'assèche par évaporation (réaction exothermique), il faut réhumidifier le sol pour pouvoir ensuite le densifier adéquatement.

Les observations suivantes complètent les points précédents:

Le gain de résistance est avantageusement mesuré avec un céléromètre (mesure de vitesse d'ondes) si $w_p < w < w_L$; c'est un essai non destructif. Le viscosimètre et le cône suédois sont mieux adaptés dans le cas $w > w_p$.

L'augmentation de la résistance sur un mélange à faible pourcentage de chaux (0,5%) peut quand même être importante si la teneur en eau est très élevée ($w \approx 2 w_L$): à 100 jours, la résistance peut être multipliée par 2 ou 3.

Certaines argiles réagissent mieux que d'autres, certaines à basse teneur en eau, d'autres à haute teneur en eau, certaines rapidement, d'autres plus tard dans le temps.

La chaux agricole n'a pas d'effet; celui de la chaux vive est bien sûr supérieur (de 25% environ) à celui de la chaux éteinte (ou chaux hydratée).

2.1.3 Applications

Le pourcentage de chaux idéal semble être compris entre 3 et 7%. Il n'est pas toujours facile de respecter cette teneur in situ, car elle dépend de la réelle profondeur traitée et de l'homogénéité du mélange obtenue. L'efficacité du traitement peut être variable sur le terrain, selon les variations de facies, de teneurs en eau, etc. La profondeur à traiter doit être définie au coup par coup, selon la nature du sol et du projet à réaliser.

Etant donné la complexité des réactions physico-chimiques, il est quasiment impossible de prévoir les modifications des différents paramètres et donc de proposer un mode d'emploi type. On ne peut que constater que le traitement est plus efficace pour une argile plastique située au-dessus de la ligne A du diagramme de Casagrande.

Si on utilise de la chaux plus un autre additif, les réactions et interprétations seront a fortiori plus complexes à définir. En définitive, il ne faut pas tenter d'expliquer les phénomènes susceptibles de se produire, mais plutôt savoir constater les résultats obtenus et relever les tendances.

Ainsi, par exemple, si cette étude permet de dégager puis d'adopter certains additifs et certaines proportions d'additifs plus performants, il suffira de quelques essais de laboratoire pour préciser dans chaque cas de projet, une teneur en eau idéale, ou un degré de compactage idéal, ou un temps de mûrissement idéal, la sensibilité au gel, etc. Il s'avère cependant que le traitement à la chaux conduit à de moins bonnes performances que le traitement à la chaux et au ciment; ce mélange est ainsi davantage privilégié en France.

2.2 TRAITEMENT AU CIMENT

Le traitement des sols au ciment présente de nombreux avantages: accroissement de la résistance avec l'âge, grande capacité portante,

possibilité de traiter une gamme très variée de sols.

Il est possible de cerner la teneur optimum de ciment en faisant des essais de "mouillage-séchage" (ASTM D-559) et gel-dégel (ASTM D-560). Le pourcentage optimum (en poids) se situe entre 3 et 5% pour un sol du groupe A.1.a (classification AASHTO); ce pourcentage augmente régulièrement avec la teneur en argile, et vaut entre 10 et 16% pour un sol de la catégorie A7. Le pourcentage d'humidité optimum, la densité du sol-ciment, le degré de pulvérisation du sol, l'homogénéité et la profondeur du mélange, sont tous des paramètres à préciser.

Le traitement au ciment est en général précédé d'un traitement à la chaux; cette pratique est en particulier mise au point et utilisée par les laboratoires des Ponts et Chaussées en France. On peut se référer au Bulletin de liaison n° 133 "Sols fins traités en assises de chaussées" pour connaître tous les aspects de la méthode. Il est question en particulier du rôle de la chaux vive (dosée souvent à 1,5%), et de l'influence de divers paramètres:

- la nature du ciment: influence relativement faible;
- le dosage en ciment: 7% est l'ordre de grandeur adopté;
- le délai de compactage (entre le malaxage et la fin du compactage): il doit être inférieur à 24 heures;
- la teneur en eau de compactage et la densité sèche: influence marquée sur les caractéristiques mécaniques du mélange (notamment aux jeunes âges); les études en laboratoire doivent donc être faites dans des conditions réalistes (se rapprochant de celles du terrain);
- les conditions climatiques: l'immersion dans l'eau diminue les résistances mécaniques. Le gel est préjudiciable surtout aux jeunes âges; il vaut mieux attendre 7 jours pour un traitement à 6% de ciment, 180 jours pour un traitement à 4% de ciment. Les dosages choisis devront donc permettre au sol traité d'atteindre les performances mécaniques minimales requises avant d'être affecté par le gel;

- le chargement répété: il faut faire un essai de fatigue pour apprécier le comportement à long terme, car il est impossible à prévoir à partir de la résistance au premier chargement; il est par contre envisagé de le prévoir à l'aide du coefficient λ , qui donne une estimation de la vitesse de propagation des fissures dans le matériau. Le chargement répété a un effet destructeur sur un matériau immergé (chute de 30% de la résistance). Si le matériau n'est pas immergé, les sols-chaux-ciment présentent de bonnes performances en fatigue, en tout cas pour les spécimens malaxés et compactés en laboratoire.

Les études de laboratoire ont montré la supériorité des mélanges sols-chaux-ciment par rapport aux mélanges sols-chaux. Pour s'assurer du succès des opérations in situ, il serait important de doser les additifs dans une centrale de malaxage, et de réunir le maximum de bonnes conditions pour mettre en place et densifier le matériau de façon homogène.

2.3 AUTRES TRAITEMENTS

2.3.1 Expériences étrangères

Il existe de nombreux sous-produits industriels sur le marché, mais peu d'études semblent avoir été menées au Québec et au Canada sur l'utilisation de ces additifs dans le traitement des infrastructures routières. Nous n'avons pas cependant effectué de recherche bibliographique complète; l'ARTC entre-autres aurait pu être consulté.

Les américains utilisent parfois des cendres volantes pour diminuer la plasticité et le gonflement dans les sols, sans trop diminuer la résistance au cisaillement. Les cendres volantes ou autres pouzzolanes sont aussi utilisées dans les sables et les granulats, avec addition de chaux, ainsi que dans les mortiers. Des spécifications assez précises existent pour certaines utilisations, comme le témoignent par exemple les normes ASTM C-593-81, C-311-85 et ACNOR CAN/CSA-A23.5-M86. Rappelons que la cendre volante (type F) est un résidu pulvérulent provenant de la combustion du charbon pulvérisé et contenu dans les gaz s'échappant de la chambre de combustion d'un fourneau.

Une étude synthèse des développements américains devrait être réalisée.

Nous savons par ailleurs que quelques expériences ont été tentées en Ontario (Quigley et al), mais il n'a pas été possible de prendre connaissance du rapport.

La documentation française du LCPC est davantage disponible et montre que divers liants hydrauliques et pouzzolaniques sont assez fréquemment utilisés dans les fondations de route. Ces liants sont surtout employés pour la stabilisation des granulats, mais aussi pour les sables de la sous-fondation. On rapporte peu de cas de traitement d'assises argileuses avec des pouzzolanes naturelles (type N), ou des cendres volantes silicoalumineuses de centrales thermiques, ou des laitiers de haut-fourneau. Les laitiers sont des silico-aluminates de calcium et autres éléments basiques, qui se forment en fusion avec le fer dans un haut-fourneau; en les refroidissant brusquement, on obtient des laitiers granulés (type G ou H).

Ces trois sortes de liants, à caractère pouzzolanique, sont en général mélangés avec de la chaux, pour faire prise en présence d'eau. Notons que le caractère pouzzolanique est quantifié en général par un indice d'activité pouzzolanique, qui précise la sorte ou l'intensité de la réaction chimique, en présence d'eau, entre les matériaux siliceux ou alumino-siliceux du sous-produit et de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, réaction qui forme des composés possédant des propriétés de liant hydraulique (propriétés cimentaires). Notons aussi que tout additif hydraulique susceptible d'être utilisé dans un béton doit répondre à certaines spécifications physiques et chimiques (CSA standard A 363-M 1983; CAN/CSA-A 23.5-M86). Il existe par ailleurs en France, une autre sorte de cendre volante de lignite (type C, produite aussi par des centrales thermiques), à forte teneur en chaux et en sulfate, qui fait prise spontanément avec de l'eau, et qui s'apparente au ciment. Les liants les plus employés sont les laitiers et les cendres silico-alumineuses, et le ciment bien sûr.

Le dimensionnement et les performances des graves et des sables traités en France font l'objet d'études et de normes bien spécifiées; les techniques de mise en place sont bien rodées. Les sables, par exemple, sont

traités en corrigeant la courbe granulométrique par ajout d'un autre sable ou laitier ou cendre volante, de granularité choisie, puis en ajoutant un des liants cités plus haut. Les dosages sont généralement compris dans les limites suivantes (en pourcentage de poids total sec): 4 à 7% de ciment, ou 15 à 25% de laitier granulé, ou 10 à 20% de laitier prêbroyé, ou 15 à 20% de pouzzolanes-chaux; ou 15 à 20% de cendres volantes-chaux; dans les deux derniers cas, 3 à 5% de chaux sont prévus. Ces pourcentages peuvent parfois être réduits.

2.3.2 Application pour le Québec

Le Québec doit développer ses propres techniques dans le cadre des politiques définies, selon les matériaux et les additifs disponibles, selon le coût des matériaux, de la fabrication, de la mise en oeuvre et de l'entretien, selon les conditions climatiques, les conditions de support, les conditions de trafic.

Le Québec dispose en particulier de sous-produits métallurgiques (voir étude expérimentale réalisée au Laboratoire central en 1982 et 1984, sur des résidus de l'usine Union Carbide de Chicoutimi), de fumées de silice (Chromasco, SKW) qui sont des sous-produits de la production de ferrosilicium et de silicium métallique, de poussières de Cottrel (sous-produits du ciment), et enfin de filler minéral en provenance de diverses carrières. Cette liste n'est sans doute pas complète.

Les États-Unis produisent aussi des résidus de la combustion et pulvérisation du charbon dans les centrales thermiques, analogues aux cendres volantes européennes. Elles contiennent en moyenne de 42 à 50% de SiO_2 , de 16 à 30% de Al_2O_3 , 5 à 10% de Fe_2O_3 + FeO , 2 à 4% de CaO , et 5% d'alcalis; elles ont un diamètre compris entre 1 et 150 μm ; leur surface spécifique varie entre 0,400 et 0,700 m^2/g . leur masse volumique entre 540 et 860 kg/m^3 . Même si l'utilisation des cendres volantes dans les bétons commence à se développer, il reste que les Américains n'en utilisent pour l'instant que 2,5%, sur les 62 millions de tonnes produites annuellement; il est sans doute possible d'en acheter à prix compétitif.

Le Canada produit annuellement environ 4 millions de tonnes de laitiers non ferreux, provenant du traitement des minerais de cuivre, nickel, plomb. Ces additifs sont probablement moins dispendieux que les fumées de silice, et devraient donc être testés pour les traitements d'infrastructures ou de fondations. Leur composition chimique moyenne est de 30 à 40% de SiO_2 , 8 à 18% de Al_2O_3 , 40 à 50% de CaO , 0 à 8% de MgO , 0 à 1% de FeO , 0 à 2% de Mn_2O_3 , 0 à 2% de S. Ils doivent être broyés en général et améliorent sans doute moins les résistances que la même proportion de cendres volantes, ou de fumées de silice.

La chaux et le ciment restent les liants de base utilisables dans la plupart des mélanges.

Les essais réalisés sur des mélanges de sols et certains additifs dont dispose le Québec, font l'objet de ce compte rendu.

CHAPITRE III

DESCRIPTION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

3.1 ADDITIFS

En plus des liants hydrauliques classiques, chaux et ciment, nous avons travaillé avec de la fumée de silice silico-alumineuse produite par SKW, et avec une fumée de silice beaucoup moins siliceuse, abusivement nommée carborundum, produite par Chromasco; nous avons utilisé aussi une poussière de cimenterie, appelée poussière de Cottrel, produite par Miron. En dernier lieu a été testé un filler minéral, en provenance de l'Union des Carrières à Charlesbourg. Leurs caractéristiques physiques et chimiques principales sont présentées aux tableaux 1 et 2 et à la figure 1.

D'autres sous-produits n'ont pu être testés, faute de temps, et pourront faire l'objet d'une étude ultérieure. Il s'agit, par exemple, de fillers minéraux de qualité minérale différente ou de fillers fabriqués et non plus récupérés; il s'agit aussi des poussières d'aciérie, comme celles produites à Contrecoeur par Sidbec-Dosco, ou de poussières de carbure de silicium (véritable carborundum), comme celles produites par Northern Cie à Cap-de-la-Madeleine; il peut s'agir enfin de cendre volante de classe "F" (Houde 1986) ou autre (produite au Canada ou aux États-Unis), ainsi que d'émulsion de bitume.

3.1.1 Chaux

C'est une chaux hydratée standard qui contient 61,3% de CaO , 1% de SiO_2 , 0,4% de MgO , 0,2% de Fe_2O_3 . Sa perte au feu à 1000°C est de 35,9%.

3.1.2 Ciment

C'est un ciment Portland normal de type 10 (de la Compagnie Ciment St-Laurent), conforme à la norme ACNOR A5.

3.1.3 Fumée de silice

Elle résulte de la réduction du quartz pur, en présence de charbon, dans les fours à arcs des industries SKW de Bécancour. Les vapeurs de silice qui s'échappent des fours se condensent pour former des microscopiques sphères de verre de silice, récupérées sous forme de poussières par des filtres. Leurs caractéristiques moyennes sont connues (Durand 1985): diamètre moyen inférieur à 1 micron, soit environ $1/100^e$ de celui du ciment; surface spécifique de $20 \text{ m}^2/\text{g}$; densité de 2,2, masse volumique non densifiée de 250 à 300 kg/m^3 ; couleur gris pâle; pourcentage de silice selon le type d'alliage fabriqué compris entre 85 et 98%, (quelques pour-cent de carbone et de produits combustibles, et quelques dixièmes de pour-cent de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O et S; seul le pourcentage de F_2O augmente jusqu'à 2 à 4% aux dépens de SiO_2 , si c'est du ferrosilicium qui est fabriqué); production annuelle sans doute supérieure à 15 000 tonnes au Québec; prix à la tonne: 40,00 \$ à 90,00 \$, selon la quantité et le transport.

La poussière de silice est couramment utilisée pour réduire les réactions alcali-silice dans les bétons, et pour en augmenter les résistances en compression. La poussière utilisée commercialement est légèrement hydratée, ce qui permet de la manipuler sans danger; cette eau de cristallisation fait partie de la particule.

En présence de chaux et d'eau, la surface des particules de fumée de silice est dissoute par l'ion OH^- (Houde 1986). Il se forme un gel de silice qui, précipité sur la surface de la particule, réagit avec l'ion Ca^{++} , pour former un hydrate (silicate de calcium hydraté CSH), dont le rapport Ca/Si varie de 1,0 à 1,3. C'est sans doute le CSH qui est responsable de l'augmentation de résistance, dans les bétons mais aussi dans les sols, tel que déjà signalé au paragraphe 2.1.1. En définitive, la tenue aux essais de réactivité pouzzolanique avec la chaux (ASTM C-953) et le ciment (ASTM C-618) est très bonne, ce qui fait de la fumée de silice un précieux additif, mais sans doute trop dispendieux.

3.1.4 Carborundum ou fumée de silice secondaire.

C'est aussi une fumée de silice, mais beaucoup moins riche en silice, et d'un coût plus abordable, 10 \$ à 25 \$ la tonne environ. Elle se présente sous forme de boulettes, ou en poussière. Nous avons utilisé des boulettes que nous avons broyées; la granulométrie obtenue est beaucoup moins fine que celle de la poussière (95% de passant 80 μm , 78% de passant 5 μm , 70% de passant 1 μm).

3.1.5 Poussière de Cottrel

Ce résidu de cimenterie est recueilli dans les précipitateurs, et recyclé au four à température plus faible que pour le ciment (900°C maximum, au lieu de 1400°C). Il contient beaucoup d'alcalis (SiO_2 , Fe, bauxite) et coûte environ de 10 \$ à 15 \$ la tonne.

3.1.6 Filler minéral

C'est un sous-produit des usines de concassage des carrières. Il peut être récupéré par un dépoussiéreur pendant le concassage de la pierre au calibre désiré, ou fabriqué en concassant complètement la pierre. Le filler fabriqué est beaucoup plus pur, tandis que le filler récupéré peut être pollué par d'autres poussières, minérales ou autres.

De tous les additifs employés, le filler est celui qui est le moins amorphe, qui présente sans doute la plus grande surface spécifique, pour lequel il a été possible de trouver un indice de plasticité, si faible soit-il, et qui coûte le moins cher (de 4 \$ à 8 \$ la tonne environ).

3.2 CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

3.2.1 Argile de Saint-Vallier

C'est une argile marine de l'ancienne mer Champlain, située près du village de Saint-Vallier dans le comté de Bellechasse (figure 2). Elle a été prélevée à la pelle dans un fossé, à 1,5 m de profondeur environ. Elle est de couleur gris-bleu pâle, et contient un peu de matières organiques, quelques racines ou coquillage.

Un certain nombre de caractéristiques physiques et mécaniques sont répertoriées aux tableaux 3 et 4. C'est une argile collante et très plastique, très peu ferme à l'état intact (environ 20 kPa), molle à l'état remanié (environ 3 kPa), de faible sensibilité (7), de 60% de teneur en eau. Sa préconsolidation est voisine de 75 kPa, son indice des vides initial de 1,7, sa perméabilité de $3,5 \cdot 10^{-6}$ cm/s (essai de perméabilité à l'oedomètre). L'allure de sa courbe granulométrique sur la figure 3 indique que l'argile de Saint-Vallier est moyennement sensible au gel.

Le tableau 4 donne les valeurs trouvées par les essais Proctor, de perméabilité et de compression simple ainsi que la résistance au cisaillement remaniée; ce sont les essais qui seront effectués pour apprécier l'influence de l'ajout d'additifs, et qui s'ajouteront à l'étude de l'évolution des limites.

3.2.2 Argile de Saint-Thuribe

C'est aussi une argile de l'ancienne mer Champlain située dans le comté de Portneuf. Elle a été prélevée il y a neuf années, près de la rivière Blanche, à une profondeur de 5 m. Elle est de couleur grise foncée et marbrée, et contient des traces de matières organiques et de coquillages.

Les propriétés physiques et mécaniques se retrouvent aux tableaux 3 et 4, et à la figure 3. C'est un sol moins argileux (environ 50% de silt) qu'à Saint-Vallier (environ 25% de silt) avec une teneur en eau moindre (42% au lieu de 60%), d'une plasticité moyenne, d'un indice de liquidité assez élevé. Son indice d'activité $A_c = \frac{I_p}{\% < 2 \mu m} = 0,4$ en fait une argile peu active, tout comme celle de Saint-Vallier d'ailleurs ($A_c \sim 0,5$).

A l'état intact, sa résistance au cisaillement approche les 50 kPa; c'est donc une argile bien ferme; par contre, sa résistance remaniée est faible (inférieure à 0,5 kPa), ce qui confère au spécimen une sensibilité très élevée. Sa pression de préconsolidation est de l'ordre de 175 kPa.

3.2.3 Sable PEB

Il provient de la carrière PEB à Lac Saint-Charles. Il comprend 60% de particules comprises entre 5 mm et 80 μm , et 30% entre 80 μm et 5 μm . C'est un sable silteux relativement sale (sa valeur de bleu est voisine de 0,2), même s'il comprend peu de particules fines argileuses. Sa courbe granulométrique (figure 3), très étalée, permet de trouver un coefficient d'uniformité de 419, un coefficient de courbure de 0,1, un module de finesse de 1,4. C'est donc un sable sale non plastique qui ne satisfait pas les exigences pour la fondation routière. Ses caractéristiques sont présentées aux tableaux 3 et 4.

CHAPITRE IV

ESSAIS

4.1 DESCRIPTION DES ESSAIS

Les essais ont tous été réalisés en suivant les normes et procédures le plus fidèlement possible. Les étapes de séchage, broyage, pesée ont été menées avec soin; les échantillons ont été conservés dans des sacs étanches, avant et après mélange, tant que l'essai n'a pas été effectué.

Les échantillons sont toujours préparés de la même façon. Le sol de base est séché et broyé; le pourcentage d'additif requis (5% en général) est pesé en termes de proportion de masse sèche; les ingrédients sont préalablement mélangés à sec. La masse d'eau équivalente pour la plupart des essais à la teneur en eau optimum Proctor, est ensuite rajoutée; l'échantillon est mélangé à nouveau; le mélange est conservé dans un sac étanche pour que l'humidité se répartisse, en général pendant 3 heures pour le spécimen sableux, 24 heures pour le spécimen argileux. Quand il est prévu d'ajouter un liant hydraulique au mélange, chaux ou ciment, celui-ci n'est rajouté qu'après le curage, 5 minutes avant la confection de l'échantillon. On procède alors au compactage Proctor modifié, puis on respecte un temps d'attente d'une heure ou deux (dans un sac scellé) avant de faire l'essai, sauf dans le cas des essais de compression simple sur un mélange sable-ciment avec ou sans additif minéral, où l'attente est de 24 heures. On a attendu 7 jours pour une série d'essais (compression simple); dans ces cas-là, quelques gouttelettes d'eau se sont formées sur la surface intérieure du sac, et ont été perdues.

Les normes et procédures utilisées sont énumérées dans les lignes qui suivent, pour chaque essai adopté:

- L'analyse granulométrique et sédimentométrique est régie par le projet de norme BNQ 2501-025.
- Les limites w_L , w_p et I_p sont réalisées à l'aide du cône suédois, en suivant la norme BNQ 2501-092. Le cône permet aussi de donner la résistance au cisaillement Cu_r (BNQ 2501-110). La masse volumique humide est mesurée sur l'échantillon remanié (ρ_h rem.).
- L'essai de valeur de bleu (VB) est aussi normalisé (BNQ 2560-255).
- La densité des grains solides (G_s) a été déterminée sur le sable, les deux argiles, les additifs, séparément avant mélange (BNQ 2501-070). La densité des mélanges a été calculée de manière pondérée à partir de la densité de chacun des constituants du mélange. Sur le sable lui-même, la densité résulte d'un calcul entre le sable 0 à 2 mm ($G_s = 2,73$) et le sable 2 à 5 mm ($G_s = 2,60$); on a trouvé $G_s = 2,68$. Dans le mélange sable + additif, le résultat dépend donc aussi de la proportion du sable fin à moyen et du sable grossier. Quelques essais de vérification ont montré que la méthode de calcul de pondération (ASTM D854) était très bonne.
- Des essais Proctor modifié ont été réalisés sur tous les spécimens selon la norme BNQ 2501-255; la teneur en eau optimum w_{opt} est celle qui sera adoptée pour confectionner les échantillons servant aux essais de perméabilité, de susceptibilité au gel, de compression simple, compactés à l'énergie Proctor modifié.
- Le coefficient de perméabilité est déterminé à l'aide d'un moule de 10,16 cm (4") de diamètre sur 11,64 cm (4,58") de hauteur pour les mélanges sableux, et d'un mini moule de 3,34 cm (1,3") de diamètre sur 7,15 cm (2,8") de hauteur pour les mélanges argileux. L'écoulement ascendant est imposé par une charge hydraulique constante de 1 à 2 m. Les procédures sont celles du Laboratoire central du M.T.Q. (LC 23-322 et LC 23-323). Le degré de saturation (S_r), correspondant à la mesure de la perméabilité en fin d'essai, est calculé à partir de la densité des grains, de l'indice des vides ($S_r = \frac{wG_s}{e}$).

- La procédure de l'essai de susceptibilité au gel a été mise au point en 1981 à l'Université de Sherbrooke. C'est une mesure de soulèvement de la tête de l'échantillon soumise à deux cycles de gel et dégel. Comme c'est un essai long (2 semaines), quatre éprouvettes seulement ont pu être testées, sur les spécimens sableux.
- Les essais de compression simple sont réalisés sur une presse Instron TTD modèle 1115. Aucune norme en particulier ne régit cette procédure. Il existe tout de même des normes ASTM équivalentes, D1074-80 sur les mélanges bitumineux, D1633-79 sur les sols ciment, ou des normes d'essais triaxiaux sur petits échantillons de sol (D2166-79, D2850-70) ou de roc (D2664-80, D2938-79). Certaines procédures seront écrites au Laboratoire central.

L'échantillon (diamètre de 10,16 cm et hauteur de 11,64 cm) est placé entre deux plaques de chargement rondes (diamètre de 15,2 cm en haut, plus large en bas) qui sont attachées au bâti de la presse par une rotule en haut, un lien rigide en bas. Le taux de déformation adopté est de 0,5 mm/min pour les sables, et 2 mm/min pour les argiles; le premier taux (sable) correspond à 0,43% de déformation par minute, le deuxième taux (argile) à 1,72%/min. Ces taux sont assez rapides, et aucun suintement n'apparaît sur l'échantillon en cours d'essai ou après, ce qui laisse penser que le cisaillement s'effectue en conditions non drainées. La résistance en compression q_u est enregistrée automatiquement sur graphe en fonction du temps; on peut donc donner la résistance à la rupture, ainsi que le pourcentage de déformation (ϵ) correspondant.

- Certains essais spéciaux auraient dû être réalisés, comme ceux qui sont effectués sur les ajouts cimentaires utilisés dans les bétons (ASTM C331 et C311, ACNOR CSA A23.5-M86).

4.2 RÉSULTATS DES ESSAIS

4.2.1 Généralités

Les résultats ont été compilés sous la forme des tableaux 5 à 9. On y trouve certaines caractéristiques physiques et mécaniques des

mélanges, des résultats d'essais Proctor et d'essais de perméabilité, et deux tableaux réservés aux essais de compression simple. Les divers constituants du mélange sont identifiés par des lettres majuscules: S^tVAL pour l'argile de Saint-Vallier, S^tTHU pour l'argile de Saint-Thuribe, PEB pour le sable de la carrière PEB, SIL pour la fumée de silice, FIL pour le filler minéral, COT pour la poussière de Cottrel, CAR pour le carborundum.

Les mélanges réalisés sont à base d'argile ou de sable (95%), avec 5% d'additif minéral. D'autres mélanges ont été préparés (pour S^tVAL et PEB), en ajoutant 3% de chaux, ou 2% de ciment, ou avec l'un de ces deux liants hydrauliques auquel on a rajouté 5% d'additif minéral (SIL, FIL, COT, CAR).

4.4.2 Propriétés physiques (tableau 5)

La présence d'additif minéral a tendance à faire diminuer la limite de liquidité w_L et l'indice de plasticité I_p , selon la plasticité initiale de l'argile. Dans le cas de Saint-Vallier, w_L décroît de 9% (FIL) à 18% (CAR), I_p de 9% (FIL) à 43% (CAR) en valeur relative; par contre, dans le cas de Saint-Thuribe, w_L reste plus ou moins stable, et I_p diminue légèrement. Il apparaît donc que l'ajout d'additif n'améliore pas les caractéristiques physiques, tout au moins la consistance ou la maniabilité d'une argile très plastique à forte teneur en eau (S^tVAL); la diminution de w_L et I_p provoque une augmentation de la sensibilité du sol aux conditions atmosphériques. Pour une argile à teneur en eau et plasticité moyenne (S^tTHU), l'ajout d'additif semble avoir beaucoup moins d'effet sur les limites.

La moindre traficabilité du matériau s'évalue en constatant l'augmentation de l'indice de liquidité ou la diminution de l'indice de consistance, lequel était déjà très faible dans le cas des argiles (tableau 5).

Le sable étant soumis à de plus faibles réactions physico-chimiques que l'argile, en présence d'additif, on en examinera les propriétés mécaniques pour apprécier l'influence des additifs.

Les argiles utilisées sont moyennement susceptibles au gel d'après la figure 3. L'ajout d'additif change sans doute peu de chose; tout au plus, l'ajout de particules fines (SIL) pourrait-elle augmenter légèrement la susceptibilité, l'ajout de particules plus grosses (FIL et CAR) pourrait-elle la diminuer. La valeur de bleu (VB) un peu plus élevée pour FIL et un peu plus faible pour CAR, laisse présager un surplus d'activité dans le premier cas, une diminution d'activité dans le deuxième cas.

Pour le sable PEB, VB tend à augmenter en ajoutant du filler FIL ou davantage de fumée de silice (10% SIL). La moyenne de susceptibilité au gel du sable (tableau 5 et figures 4 à 7) semble diminuer en présence de silice SIL, et augmenter en présence de filler FIL.

4.2.3 Propriétés mécaniques

La résistance au cisaillement remaniée Cu_r (tableau 5) déterminée au cône, montre une diminution notable pour l'argile Saint-Vallier dès qu'elle est mélangée avec un additif; par contre, peu de changement est observé pour l'argile Saint-Thuribe.

A l'essai Proctor (tableaux 6 et 7 et figures 8 à 14), l'idéal est que la teneur en eau optimum soit rehaussée dans le cas des argiles, où la teneur en eau naturelle est bien souvent beaucoup plus élevée que w_{opt} ; dans le cas des sables, elle devra être plus ou moins stable, dépendamment de la teneur en eau in situ. Le tableau 6 et les figures 8, 11 et 12 indiquent que les caractéristiques Proctor sont relativement peu modifiées par l'ajout d'additif minéral, à l'exception du cas PEB + SIL (figures 12 et 13), qui accuse une diminution de w_{opt} de 25% et une augmentation de la masse volumique sèche de 5%. Pour l'argile S^tVAL , seul le FIL n'influence pas les valeurs de l'essai Proctor. Les autres ont tendance à augmenter w_{opt} et diminuer $\rho_d \max$, surtout en présence de chaux (figure 10): w_{opt} augmente de 15% pour CAR, et $\rho_d \max$ diminue de 5%. Aucun effet n'est observé sur l'argile S^tTHU (figure 11). La silice est tout de même l'additif qui fait diminuer ρ_d un peu plus que les autres, sans modifier w_{opt} ; comme c'est le cas pour les deux sortes d'argile, il semble que SIL ne soit pas le meilleur additif pour traiter les argiles.

Notons aussi qu'il est préférable d'ajouter de la chaux plutôt que du ciment à l'argile S^tVAL (figure 9), du ciment plutôt que de la chaux au sable PEB (figure 13). Remarquons enfin que le mélange PEB + SIL, avec ou sans ciment, fait croître ρ_d et diminuer w_{opt} sensiblement (figure 14). L'examen des courbes montre par ailleurs une certaine uniformité de l'allure des courbes, avec une cloche relativement aiguë: le mélange est sensible à l'eau, la densification maximum est difficile à obtenir, comme le montre par exemple le côté sec des courbes PEB + SIL (figures 12, 13, 14).

Les échantillons soumis à l'essai de perméabilité sont densifiés à un degré indiqué dans les tableaux 6 et 7 proche du compactage Proctor; on y présente aussi les degrés de saturation avant et après essai; ces derniers sont de l'ordre de 95% pour les argiles + additifs (17 jours de saturation), de 89% pour les sables + additifs (8 jours de saturation), de 82% pour les sables + ciment (26 jours de saturation). Les teneurs en eau qui apparaissent dans les tableaux ont été mesurées avant essai de perméabilité, sur un restant de matériau. Le coefficient de perméabilité est lui aussi peu influencé par l'ajout des additifs, que le sol de base soit de l'argile ou du sable, sauf si le mélange sableux contient du ciment (2%); on comprend dans ce cas-ci que la perméabilité diminue de 10^{-6} cm/sec à 10^{-8} cm/sec, jusqu'à ne plus être mesurable, pour 93% PEB + 2% ciment + 5% SIL; les particules très fines de SIL font en effet diminuer la perméabilité encore plus.

Les résultats des essais de compression simple sont présentés aux tableaux 8 (avec un additif) et 9 (avec deux additifs), et à la figure 15. Le spécimen a été consolidé à une teneur en eau (obtenue d'un restant de matériau) et une énergie égale à celle du Proctor modifié. L'analyse des tableaux, en termes de pourcentage d'augmentation de résistance en compression (par rapport au sol de base, à 0 jour de curage ou plus exactement de 1 heure ou 24 heures, et à 7 jours de curage), permet de faire ressortir les points suivants:

- Parmi les quatre additifs minéraux, SIL, FIL, COT et CAR, la fumée de silice SIL se distingue pour augmenter notablement la résistance en compression q_u , de l'argile plastique S^tVAL et du sable PEB; son action sur l'argile S^tTHU est beaucoup moins évidente. SIL fait croître q_u de 36% (0 jour) à 63% (7 jours) pour S^tVAL , de 34% (0 jour) à 69% (7 jours) pour PEB, de 12% (0 jour) et 0% (7 jours) pour S^tTHU .
- L'action du carborundum CAR vient en deuxième position, avec 11% et 44% (S^tVAL), 16% et 35% (PEB) d'augmentation, respectivement à 0 jour et à 7 jours de curage.
- Le filler minéral FIL et la poussière de Cottrel COT ont un effet relativement négligeable, voire négatif dans le cas des argiles.
- Il est utile en laboratoire de réaliser des essais après 0 puis 7 et 28 jours de curage, pour mieux apprécier l'augmentation des propriétés mécaniques à long terme, de façon à optimiser la période d'attente sur le chantier.
- Ajouter deux fois plus de SIL (10% au lieu de 5%) de sable PEB, n'améliore pas q_u ; il est préférable de rechercher la bonne teneur en eau optimum, car la silice rend le mélange sableux sensible à l'eau (la courbe Proctor est pointue).
- S^tVAL a été combiné avec 3% de chaux; sans additif minéral, q_u croît de 36% à 0 ou 7 jours. En présence de SIL (5%) q_u décroît curieusement à 0 jour, mais croît de 59% à 7 jours; de la même façon, les trois autres additifs n'ont pas d'effet si l'essai est réalisé peu de temps après le compactage; par contre, en attendant 7 jours, la résistance est pratiquement doublée. Il faut donc laisser la chaux agir au moins 7 jours; les mélanges S^tVAL + chaux + additifs deviennent alors très performants. Une expérience a été tentée en ajoutant 2% de ciment à S^tVAL + 3% chaux et à S^tVAL + 3% chaux + 5% FIL: le résultat est très concluant à 7 jours puisque q_u augmente de 230 à 260%, respectivement.

- PEB a été combiné à 2% de ciment (figure 15); sans additif minéral, q_u croît de 350% après 1 jour de curage, 360% après 7 jours. L'amélioration est encore plus notoire en présence d'additif, à 24 heures mais surtout à 7 jours, davantage pour SIL puis pour CAR; FIL n'apporte pas de résistance supplémentaire. On peut ainsi calculer que q_u est multiplié par 6 quand on passe de 100% PEB à 93% PEB + 2% ciment + 5% SIL, pour 1 jour de curage, et par 10 pour 7 jours de curage; dans ce dernier cas, la progression de l'augmentation de résistance s'est faite en 3 paliers; la déformation à la rupture a doublé. Dans le cas de CAR, le coefficient multiplicateur est 5 et 7,8.
- La rupture des échantillons argileux se produit entre 3,8 et 8,9% de déformation (S^{tVAL}) et entre 2,7 et 4% (S^{tTHU}); la présence d'additif les fait rompre en général un peu plus tôt, surtout pour SIL, 3,8% par rapport à l'argile S^{tVAL} (qui rompt elle-même à 6,8% de déformation), 2,7% par rapport à l'argile S^{tTHU} (rupture à 3,4%). Dans le cas du sable PEB (rupture à 1,7% de déformation), l'ajout d'additif fait aussi provoquer la rupture plus tôt (jusqu'à 1,2%). Si le mélange réalisé présente l'avantage d'améliorer la valeur de la résistance du sol initial, il est en contrepartie plus fragile.

CHAPITRE V

C O N C L U S I O N

5.1 RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE

Il est possible de dégager de cette étude les points généraux suivants:

- L'amélioration des propriétés du sol à traiter dépend éminemment de ses caractéristiques initiales: le sable silteux PEB et l'argile très plastique S^tVAL sont beaucoup plus susceptibles de se faire traiter que l'argile peu plastique S^tTHU.
- Le genre d'additif influence énormément le traitement: SIL a relativement beaucoup d'effets, CAR moyennement, COT et FIL peu ou pas du tout. Il est donc essentiel de caractériser l'additif, connaître son potentiel de réactivité (CAN/CSA - A23.5 - M86).
- Les liants hydrauliques, chaux ou ciment, améliorent sensiblement les sols s'ils sont employés seuls, mais sont plus efficaces s'ils sont mélangés avec un autre additif.
- La chaux semble plus utile dans un mélange argileux, et le ciment dans un mélange sableux. Un faible pourcentage des deux liants dans un mélange S^tVAL + FIL, a été encore plus concluant.
- Il s'agit en fait de rechercher en laboratoire la meilleure combinaison possible, à partir de différents matériaux qu'il faut caractériser précisément, sols et additifs. Il faut aussi s'assurer que ces derniers sont disponibles en grande quantité et à moindre coût.

Les résultats d'essais réalisés pour cette étude peuvent être interprétés sous certains aspects particuliers:

- a) Il est toujours préférable de densifier les mélanges à une teneur en eau w voisine de l'optimum Proctor. L'ajout d'additif ne fait

pratiquement pas modifier l'optimum. Il est donc plus facile de ramener les mélanges sableux à la bonne teneur en eau w_{opt} , que les mélanges argileux. Les mélanges argileux les moins plastiques sont les plus maniables, car l'ajout d'additif dans les mélanges très plastiques et à forte w , semble empirer certaines propriétés physiques; l'argile est en particulier moins consistante et plus sensible aux conditions atmosphériques. Ce problème cause des difficultés de mise en oeuvre, mais sera compensé à long terme par l'augmentation de la résistance. Pour diminuer l'impact de cet inconvénient, il est nécessaire de trouver les bonnes périodes de curage. Il sera néanmoins envisagé au Laboratoire central de réaliser la prochaine série d'essais dans des conditions proches de celles in situ, c'est-à-dire à une teneur en eau plus élevée que la teneur en eau optimum.

- b) Il est bien sûr important d'attendre suffisamment longtemps avant de mettre en service la section traitée: 7 jours paraît essentiel, il se peut que 28 jours soit mieux dans plusieurs cas. Les tableaux 8 et 9 indiquent que q_u est plus fort avec additif que sans additif à 0 comme à 7 jours; à 28 jours, on ne sait pas si cette tendance se serait maintenue avec additif. Dans les essais avec additif, la rupture est atteinte pour une déformation moindre que sans additif, mais la résistance atteinte est plus élevée. Le matériau traité est donc plus fragile, et il faut attendre suffisamment longtemps pour qu'il atteigne la résistance escomptée, d'autant plus si la charge est importante.

On doit observer un curage avant la densification, du mélange sol + additif minéral, de l'ordre de 3 heures pour les mélanges sableux pollués, 24 heures pour les mélanges argileux. Par contre, il semble que le liant hydraulique, s'il est prévu d'en ajouter, devrait l'être juste avant la densification, surtout pour le ciment, mais peut-être pas pour la chaux, de façon à ce que les liaisons hydrauliques viennent consolider la densification, plutôt que d'être irrémédiablement détruites par un compactage tardif (ciment), ou plus ou moins précoce (chaux). Si l'on doit jouer sur la teneur en eau, c'est donc au

moment du mélange avec additif qu'il faut le faire, de façon à respecter le curage. Il faut donc aussi assurer une bonne coordination des opérations.

- c) Parmi les 4 additifs minéraux étudiés, seule la fumée de silice est performante, si utilisée sans liant hydraulique. C'est cependant celui qui coûte le plus cher. Par contre, avec de la chaux ou du ciment, voire les deux dans certains cas, les autres additifs font très bonne figure: il faudra orienter les études dans ce sens, pour préciser ces tendances. Il est clair en tout cas que la présence du ciment dans le mélange sableux est prépondérante pour accroître la résistance à l'essai de compression simple.

5.2 SUITE DE L'ÉTUDE

Il apparaît que l'étude de l'influence de différents additifs minéraux, hydrauliques ou autres, combinés de plusieurs façons, sur les argiles ou les sables, est très vaste. Suite aux travaux menés en 1982, 1984, puis 1986 au Laboratoire central, l'expérience québécoise de l'étude des traitements des infrastructures ou sous-fondations routières par des sous-produits industriels a augmenté, tout en essayant de s'adapter et de compléter la recherche pour chaque additif mis sur le marché. Il sera important d'autre part de réaliser la prochaine série d'essais à des teneurs en eau proches de celles in situ.

Il est clair que les quantités optimales d'additifs à rajouter dépendront beaucoup du coût relatif des matériaux et des propriétés recherchées. Si on fixe le gain de résistance (en compression simple par exemple) que l'on veut obtenir, on peut au préalable réaliser une série d'essais pour tracer la relation résistance versus pourcentage d'additif ou pourcentage eau/additif; le dosage est lu en fonction de la résistance voulue; cette série d'essais peut être reprise pour plusieurs échéances, et pour différents mélanges.

Ce travail devra donc être poursuivi, par d'autres séries d'essais, et par l'augmentation de la prise de connaissance de l'expérience étrangère. Nous conseillons en particulier l'analyse des comptes rendus de l'Ashtech 84, 2^e conférence internationale sur la technologie des cendres volantes en Septembre 1984, et des cours donnés en Mars 1987 à Las Vegas sur la stabilisation des sols et des fondations de route avec des additifs.

RÉFÉRENCES

- . AITCIN, P.C. et AL, 1981. Utilisation de la poussière de silice submicroscopique des usines de silicium et de ferrosilicium dans les bétons. Symp. Progress in Concrete Technol.
- . ASHTECH 84. Proceedings. Second International Conference on Ash Technology and Marketing. Barbican Centre, London, Sept. 16th - 21st 1984.
- . ASTM C 593.76a (Reapprouvé 1981). Fly ash and other pozzolans for use with lime.
- . CAN/CSA-A23.5 - M86 et ASTM C311-85. Norme sur les ajouts cimentaires.
- . DURAND, Benoît, 1985. Le rôle des additifs minéraux dans les réactions alcalis-granulats. Thèse M.Sc. Dépt. Génie minéral. École polytechnique.
- . FERDY, C. 1983. Utilisation des cendres volantes hydrauliques de Gardanne en technique routière. Bull. de liaison de P. et C. n° 126. 1983.
- . FLON, P., 1985. Traitement des infrastructures de chaussées par des sous-produits métallurgiques chaux-ciment. Rapport interne Laboratoire Central et Coup d'Oeil, vol. 10 n° 2, février 1986.
- . HOUDE, Robert, 1986. Étude des granulats à béton réactifs aux alcalis de la région de Trois-Rivières. Thèse M.Sc. dépt. génie minéral, École polytechnique.
- . La technique Française des chaussées traitées aux liants hydrauliques et pouzzolaniques. SETRA - LCPC 1979.
- . LOCAT, J. et AL. 1980 à 1985. Le rôle de la nature du sol sur son comportement à la stabilisation à la chaux. Université Laval dépt. de Géologie, rapports GLG 84-13, GLG 84-40, GLG 85-07, GLG 85-08.

- . Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic. SETRA LCPC 1981.
- . QUIGLEY, R.M., DIELEMANS, H.J.. Aims stabilization of water surface clays in south western Ontario, aids with fly ash additives. Projects 22301, report to the ministry of Transportation and Communications Ontario.
- . Sols fins traités en assises de chaussées. Bul. de liaison des P. et C. n° 133. Sept. - Oct. 1984 (5 articles).
- . WRONG, G.A., 1971. Stabilized or treated Bases in Canada. Proceedings ARTC, Vancouver.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques physiques des additifs

	fumée de silice	carbo- rundum	poussière de Cottrel	filler minéral
w_L/I_p	64/20	N.P.	42,3/16,6	27/8
Densité	2,26	2,83	3,00	2,74
Valeur de Bleu	0,32	0,24	0,11	0,78
Indices des vides Rigden				42,1
Granulométrie (% passant)	2 mm	100		
	1,25 mm	93		
	630 μm	83		
	400 μm	100		
	315 μm	99,9		100
	160 μm	99,5	100	98
	80 μm	99	99,9	97
	56 μm	97	98	90
	36 μm	93,5	94	82
	10 μm	85	73	22
	5 μm	82	50	7
	2 μm	76,5	24	3,5
	1 μm	74	8	3

Tableau 2: Caractéristiques chimiques des additifs

	fumée de silice	carbo- rundum	poussière de Cottrel	filler minéral	chaux
SiO ₂	93,5	52,4	9,6		1,0
Al ₂ O ₃	0,09	1,83	2,9		
Fe ₂ O ₃	0,30	4,70	1,3		0,2
CaO	0,32	1,12	39,6		61,3
MgO	0,13	1,81	1,6		0,4
K ₂ O	0,49	9,33	5,5		
Na ₂ O	0,30	0,99	0,9		
SO ₃	(0,13)	1,2	7,2		
C	1,5	2,1			
PAF	1,99	7,49	27,8	1,1	35,9

Tableau 3: Caractéristiques physiques des sols

	St-Vallier	St-Thuribe	PEB
w (%) (teneur en eau)	60,9	42	-
w _L (%) (limite de liquidité)	56,6	38,3	NP
I _P (indice de plasticité)	30,0	19,1	NP
G _s (densité des grains)	2,79	2,79	2,68
ρ _{hrem.} (kg/m ³) (masse vol. hum. remaniée)	1604	1763	-
VB (400 μm) (valeur de bleu)	1,61	1,21	0,18
√I (I = indice de gel)	-	-	0,49
I _L (indice de liquidité)	1,0	1,2	-
I _c (indice de consistance)	~ 0	-0,2	-
granulométrie (% passant)	5 mm		100
	2 mm		63
	630 μm	100	49
	80 μm	98,4	40
	20 μm	84	27
	5 μm	76	11
	2 μm	67	6
	1 μm	58	2
Classification unifiée	CH	CL	SM _d

Tableau 4: Caractéristiques mécaniques des sols

	St-Vallier	St-Thuribe	PEB
Cône : Cu_r (kPa)	2,4 à 3,1	1,0	
Proctor { $w_{opt}(\%)$	22,4	18,4	7,6
	$\rho_d max. (kg/m^3)$	1657	1753
k (cm/s)	1,1 10^{-8} (sur mini moule)	2,5 10^{-8} (sur mini moule)	0,7 10^{-6} (sur moule 4")
ρ_d (kg/m ³)	-	1700	2144
w (avant perm.)	-	17,5	7,1
w (après perm.)	25,8	21,6	8,0
S_r (après perm.)		94,4	86,6
q_u (kPa) (rés. en compression)	1053	1367	523
ϵ (%) (déformation)	6,8	3,4	1,7
w (%) (teneur en eau)		15,3	7,5
ρ_d (kg/m ³) (masse volumique)		1798	2118
$\dot{\epsilon}$ (mm/min) (vitesse de déform.)	2	2	0,5

NOTE:

Temps d'attente entre le mélange et le compactage (norme d'essai Proctor)

3 h pour le sable
~24 h pour les argiles

Temps d'attente entre le compactage et l'essai (curage) de compression simple

1 h environ

Tableau 5: Caractéristiques de mélanges sol + un additif

	w (%)	ρ_h rem. (kg/m ³)	w _L (%)	w _p (%)	I _p	I _L /I _c	VB (au 400 μ m)	G _s	Cu _r (kPa)
100% St-VAL	60,9	1604	56,6	26,6	30,0	1,1/-0,1	1,61	2,79	3,1
100% St-VAL+5% SIL	59,8	1633	50,9	25,1	25,8	1,3/-0,3	1,66	2,75	0,4
100% St-VAL+5% FIL	59,3	1619	51,7	24,3	27,4	1,3/-0,3	1,85	2,78	0,3
100% St-VAL+5% COT	59,7	1646	48,4	28,6	19,8	1,6/-0,6	1,84	2,80	0,3
100% St-VAL+5% CAR	60,6	1631	46,3	29,1	17,2	1,8/-0,8	1,60	2,79	0,2
100% St-THU	42,0	1763	38,3	19,2	19,1	1,2/-0,2	1,21	2,79	1,0
100% St-THU+5% SIL	42,6	1709	37,8	20,1	17,8	1,3/-0,3	1,18	2,76	1,1
100% St-THU+5% FIL	42,7	1749	36,1	17,9	18,2	1,4/-0,4	1,43	2,79	0,9
100% St-THU+5% COT	42,3	1789	39,1	21,7	17,4	1,2/-0,2	1,00	2,80	1,5
100% St-THU+5% CAR	42,1	1768	39,4	23,6	15,8	1,2/-0,2	0,85	2,79	1,5
100% PEB						0,49*	0,18	2,68	
95% PEB + 5% SIL						0,17*	0,25	2,65	
95% PEB + 5% FIL						0,59*	0,27	2,68	
95% PEB + 5% COT							0,10	2,69	
95% PEB + 5% CAR							0,13	2,69	
97% PEB + 3% CHAUX						0,32*	0,10	2,66	
90% PEB + 10% SIL							0,47	2,62	

* Susceptibilité au gel = gonflement / $\sqrt{\text{indice de gel en mm} / \sqrt{^\circ\text{C} \times \text{h}}}$

Tableau 6: Essais Proctor et de perméabilité
sur les mélanges sol + un additif

	w_{opt} (%)	$\rho_{d,max}$ (kg/m ³)	k (cm/sec)	$k/k(sol)$	w(%) avant essai	ρ_d (kg/m ³) avant essai	S_r (%) avant essai	S_r (%) après essai
100% St-VAL	22,4	1657	$1,1 \cdot 10^{-8}$	1				
95% St-VAL+5% SIL	22,4	1604	$1,5 \cdot 10^{-8}$	1,3	21,3	1562	77,2	95,0
95% St-VAL+5% FIL	22,2	1665	$1,2^5 \cdot 10^{-8}$	1,1	21,7	1613	83,7	96,5
95% St-VAL+5% COT	23,5	1637	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,3^5$	23,2	1586	85,4	97,1
95% St-VAL+5% CAR	22,0	1698	$2,3 \cdot 10^{-8}$	2,1	22,9	1547	79,6	92,4
100% St-THU	18,4	1753	$2,5 \cdot 10^{-8}$	1	17,5	1700	76,4	94,4
95% St-THU+5% SIL	18,5	1735						
95% St-THU+5% FIL	18,2	1760	$2,2 \cdot 10^{-8}$	0,9	17,6	1725	79,7	95,9
95% St-THU+5% COT	18,8	1772						
95% St-THU+5% CAR	19,0	1758						
100% PEB (moule 10,16 cm)	7,6	2118	$0,7 \cdot 10^{-6}$	1	7,1	2144	76,5	86,6
100% PEB (moule 3,34 cm)			$1,8 \cdot 10^{-6}$	2,6	7,1	2124	73,0	94,1
95% PEB+5% SIL	5,6	2216	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,2^5$	5,4	2156	63,2	87,1
95% PEB+5% FIL	7,2	2128	$1,1 \cdot 10^{-6}$	1,5	$6,8^5$	2118	69,8	93,0
95% PEB+5% COT	7,0	2138	$1,1 \cdot 10^{-6}$	1,6	6,5	2112	64,6	95,0
95% PEB+5% CAR	7,6	2127	$0,9 \cdot 10^{-6}$	1,3	8,2	2058	72,6	87,5
97% PEB+3% CHAUX	7,3	2144	$0,4 \cdot 10^{-6}$	0,6	$7,0^5$	2141	78,1	85,6
98% PEB+2% CIMENT	7,1	2196	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$0,0^5$	7,7	2142	81,8	81,1
90% PEB+10% SIL	5,5	2224						

Tableau 7: Caractéristiques de mélanges sol + deux additifs

	G_s	VB	ESSAI PROCTOR		ESSAI DE PERMÉABILITÉ				
			w_{opt} (%)	$\rho_{d,max}$ (kg/m ³)	k (cm/sec)	w (%)	ρ_d (kg/m ³)	S_r (%) avant	S_r (%) après
97% St-VAL+3% CHAUX	2,77	1,75	24,1	1611	$3,9 \cdot 10^{-8}$ ($7,4 \cdot 10^{-8}$ avec CP)	23,7 (26,5)	1522 (1518)	80,5 (90,1)	90,4 (95,9)
92% St-VAL+3% CHAUX +5% SIL	2,74		23,6	1611					
+5% FIL	2,77		22,3	1660					
+5% COT	2,78		24,6	1601					
+5% CAR	2,77		25,5	1576					
95% St-VAL+3% CHAUX +2% CIMENT	2,78	1,19	23,8	1621					
90% St-VAL+3% CHAUX 2% CIMENT+5% FIL	2,77		21,5	1673					
98% PEB+2% CIMENT	2,69	0,17	7,1	2196	$3,2 \cdot 10^{-8}$	7,7	2142	81,8	81,1
93% PEB+2% CIMENT +5% SIL	2,66		5,5	2230	~ imperm.	7,1	2181	86,8	84,5
+5% FIL	2,69		7,0	2189	$1,0 \cdot 10^{-8}$	7,7	2147	82,1	84,1
+5% COT	2,70		7,7	2114					
+5% CAR	2,70		8,2	2147	$2,6 \cdot 10^{-9}$	9,2	2070	82,0	78,4

NOTE:

- Les ingrédients sol + additif minéral + eau subissent le curage normal de 3 heures (mélange sableux) ou 24 heures (mélange argileux), et le liant hydraulique, chaux ou ciment, est ajouté au mélange juste avant la confection du spécimen (5 minutes d'attente).

Tableau 8: Essais de compression simple sur les mélanges sol + un additif

	Essais après 1 heure				Essais après 7 jours			
	q_u (kPa)	ϵ (%)	ω (%)	ρ_d (kg/m ³)	q_u (kPa)	ϵ (%)	ω (%)	ρ_d (kg/m ³)
100% St-VAL	1053	6,79	22,4	1657	1150* (8 j.)	7,90	22,9	1648
95% St-VAL+5% SIL	1428	3,78	19,9	1653	1876*	3,52	21,6	1629
95% St-VAL+5% FIL	924	7,22	20,2	1718	708*	7,73	22,2	1665
95% St-VAL+5% COT	756	8,93	24,0	1635	1561 (14 j)	3,69	22,8	1629
95% St-VAL+5% CAR	1174	4,81	23,0	1622	1658	2,84	23,1	1621
100% St-THU	1367	3,3 ⁵	~15,3	~ 1798	1954	2,36	~15,6	~ 1779
95% St-THU+5% SIL	1537	2,71	~16,4	~ 1748	1960	2,23	~16,3	~ 1746
95% St-THU+5% FIL	1470	3,99	~14,3	~ 1836	1997	2,88	~15,7	~ 1805
95% St-THU+5% COT	1265	2,71	18,1	1697	1736	2,1 ⁵	18,0	1690
100% PEB	523	1,72	7,5	2118	617	1,33	7,6	2089
95% PEB+5% SIL	702	1,29	5,3	2208	1041	1,33	5,6	2138
95% PEB+5% FIL	563	1,20	6,8	2117	653	1,2 ⁵	7,1	2071
95% PEB+5% COT	581(3h) 641(24h)	1,33 1,42	6,9	2138	703	1,40	7,2	2085
95% PEB+5% CAR	605 (24h)	1,20	8,4	2056	835	1,29	7,6	2122
97% PEB+3% CHAUX	774	1,52	7,9	2119	1174	1,98	7,4	2143
90% PEB+10% SIL	{ 732 315	{ 1,31 5,33	{ 5,1 5,7	{ 2182 2218	932	3,6 ⁵	5,4	2221

* Ce matériel a subi un curage de 7 jours au lieu des 24 heures prévues, entre le mélange et la confection du spécimen.

Tableau 9: Essais de compression simple sur les mélanges sol + deux additifs

	Essais après 2 ou 24 heures*				Essais après 7 jours			
	q_u (kPa)	ϵ (%)	ω (%)	ρ_d (kg/m ³)	q_u (kPa)	ϵ (%)	ω (%)	ρ_d (kg/m ³)
97% St-VAL+3% CHAUX	1440	1,20	20,1	1522	1561	1,5 ⁵	22,9	1639
92% St-VAL+3% CHAUX +5% SIL	859	2,66	23,8	1609	1827	1,72	23,5	1611
+5% FIL	1482	1,46	21,3	1586	2227	1,63	22,4	1627
+5% COT	1119	3,61	24,8	1593	2154	2,23	24,9	1591
+5% CAR	1174	2,58	25,4	1560	2408	1,29	24,1	1509
95% St-VAL+3% CHAUX +2% CIMENT	1470	1,98	23,8	1600	3812 (8 j)	1,42	23,9	1598
90% St-VAL+3% CHAUX +2% CIMENT+5% FIL	1870	1,80	22,0	1599	4163 (8 j)	1,33	22,5	1609
98% PEB+2% CIMENT	2360	1,50	7,6	2110	2856	2,56	7,1	2196
93% PEB+2% CIMENT +5% SIL	3781	1,57	6,3	2153	6825	4,1 ⁵	5,4	2230
+5% FIL	2420	1,76	7,7	2141	2916	2,66	7,0	2189
+5% CAR	3237	1,70	9,5	2047	5445	2,71	8,3	2147

NOTE:

- Les ingrédients sol + additif minéral + eau subissent le curage normal de 3 heures (mélange sableux) ou 24 heures (mélange argileux) et le liant hydraulique, chaux ou ciment, est ajouté au mélange juste avant la confection du spécimen (5 minutes d'attente).

- * - On a attendu 2 heures après compactage pour casser les échantillons argile avec chaux, et 24 heures pour casser l'échantillon sable avec ciment.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Courbe granulométrique des additifs.

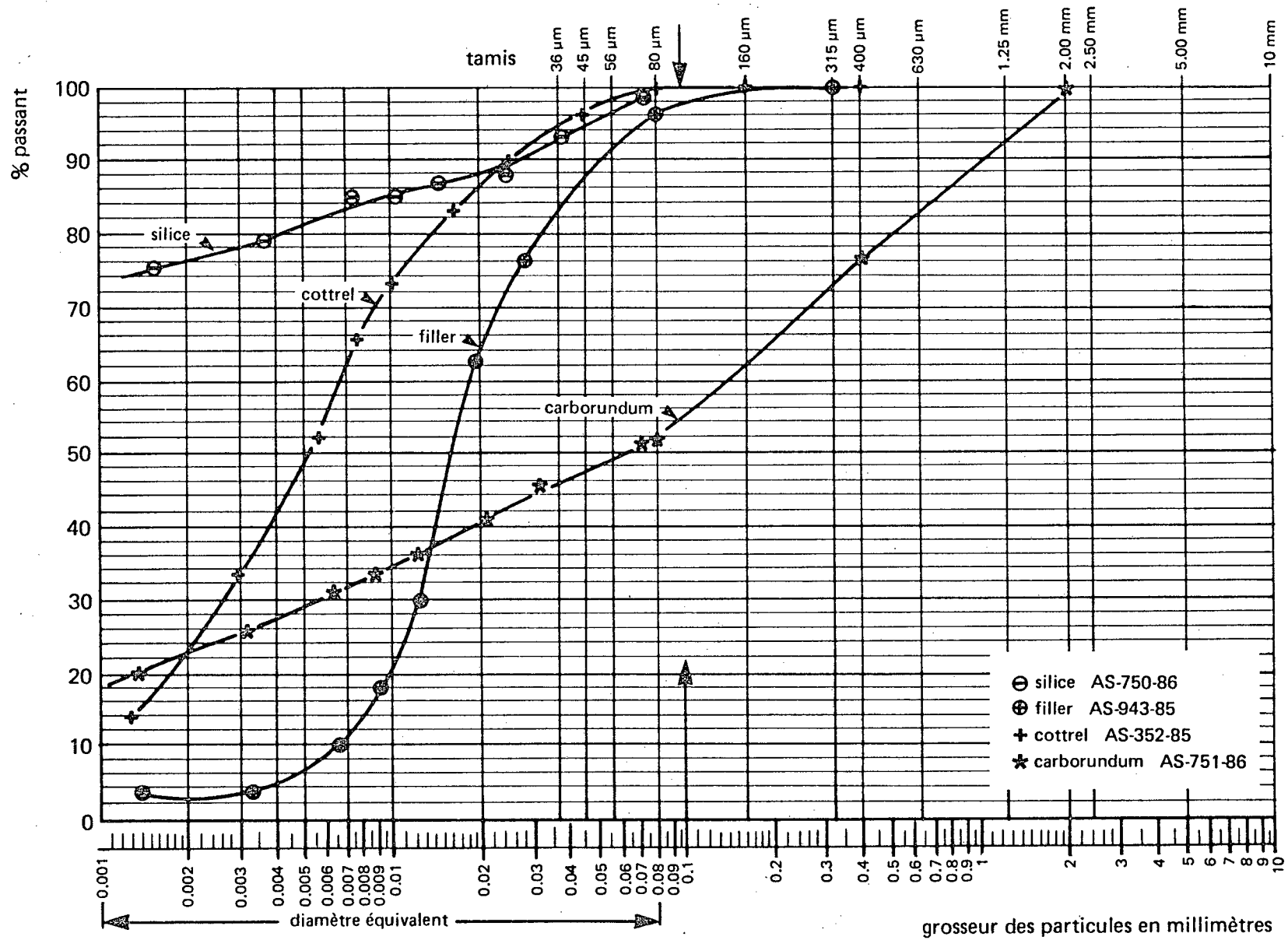


Figure 3 Courbe granulométrique des sols et susceptibilité au gel.

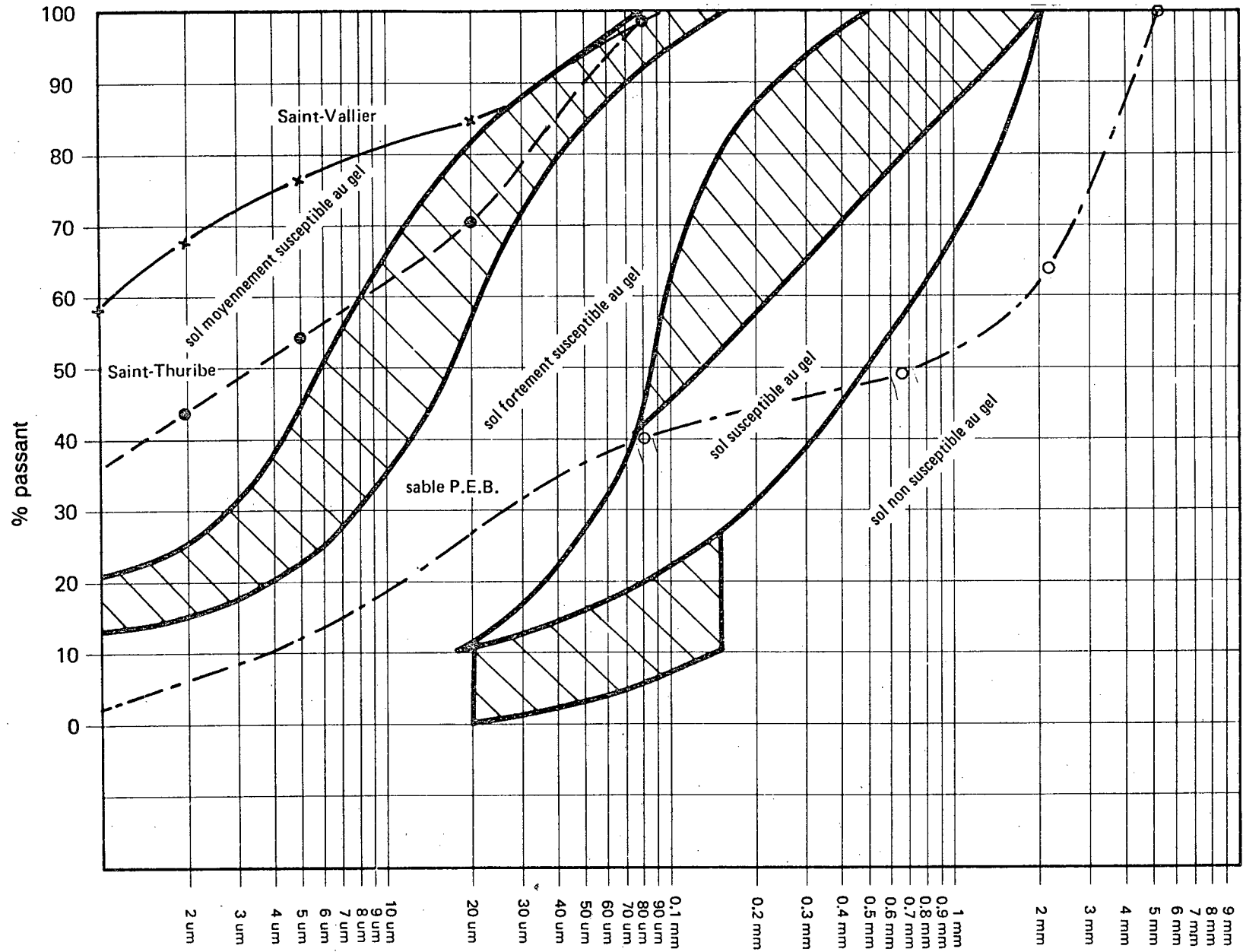


Figure 4 Soulèvement par le gel (100% P.E.B.)

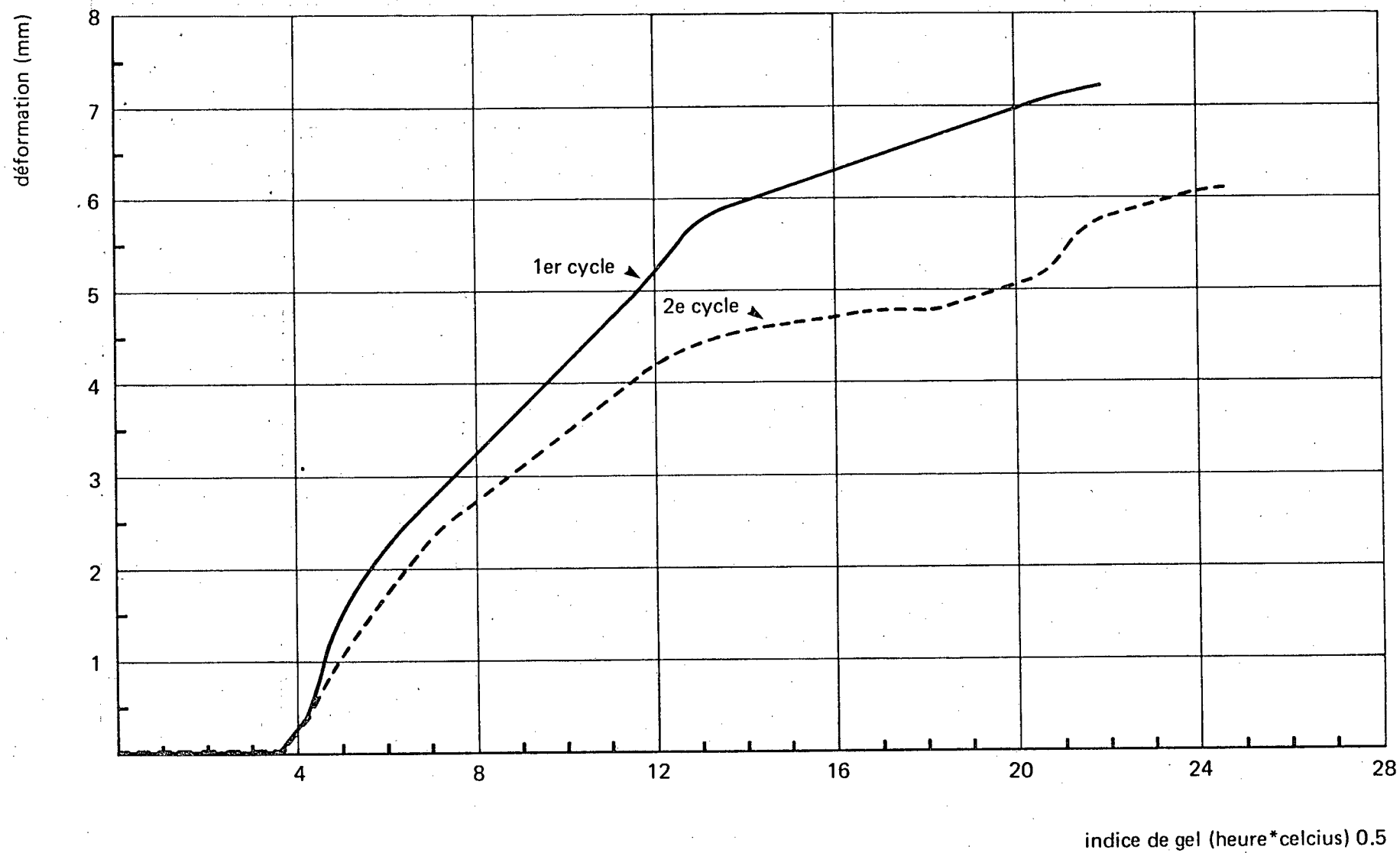


Figure 5 Soulèvement par le gel (95% P.E.B. + 5% silice).

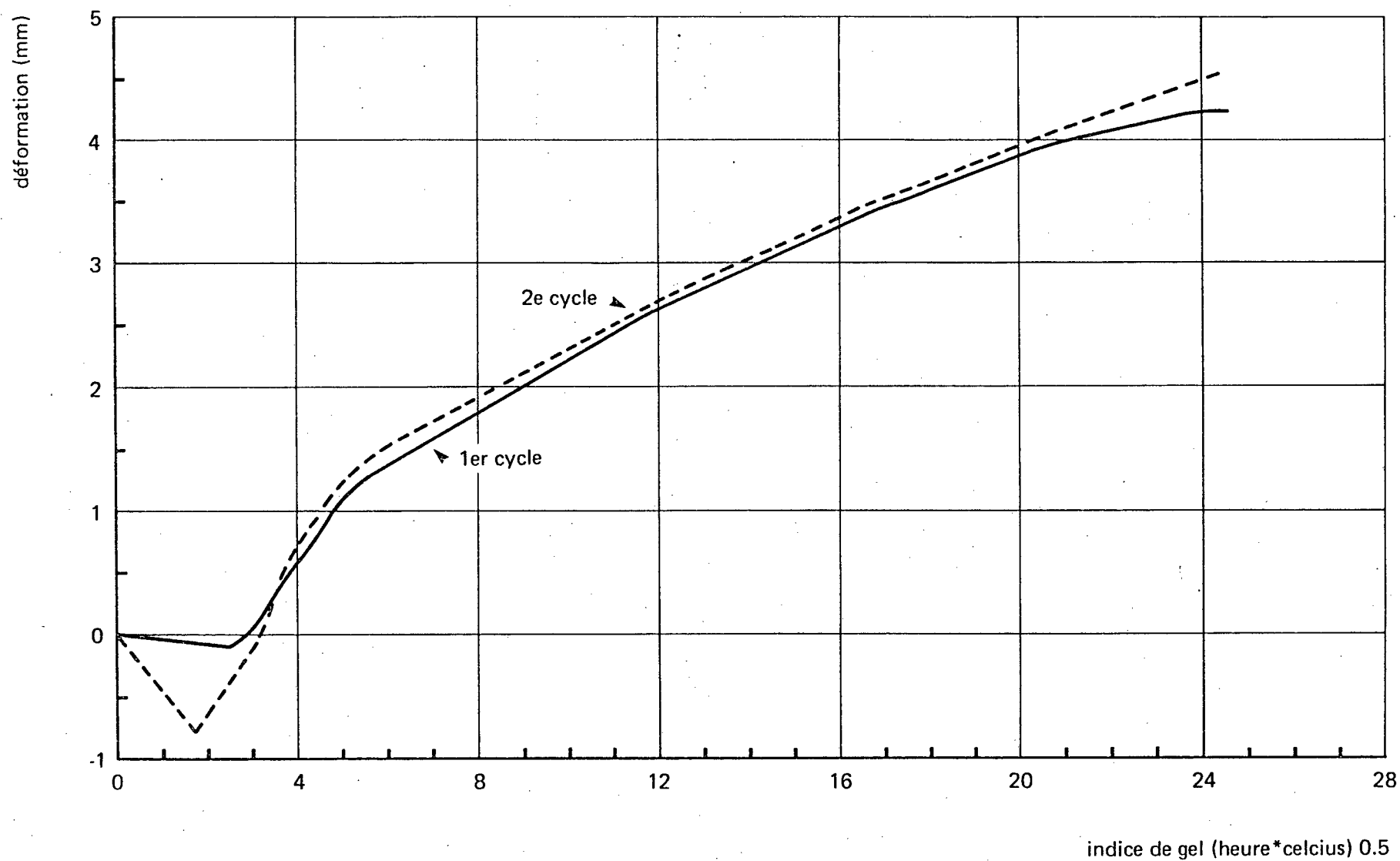


Figure 6 Soulèvement par le gel (95% P.E.B. + 5% filler).

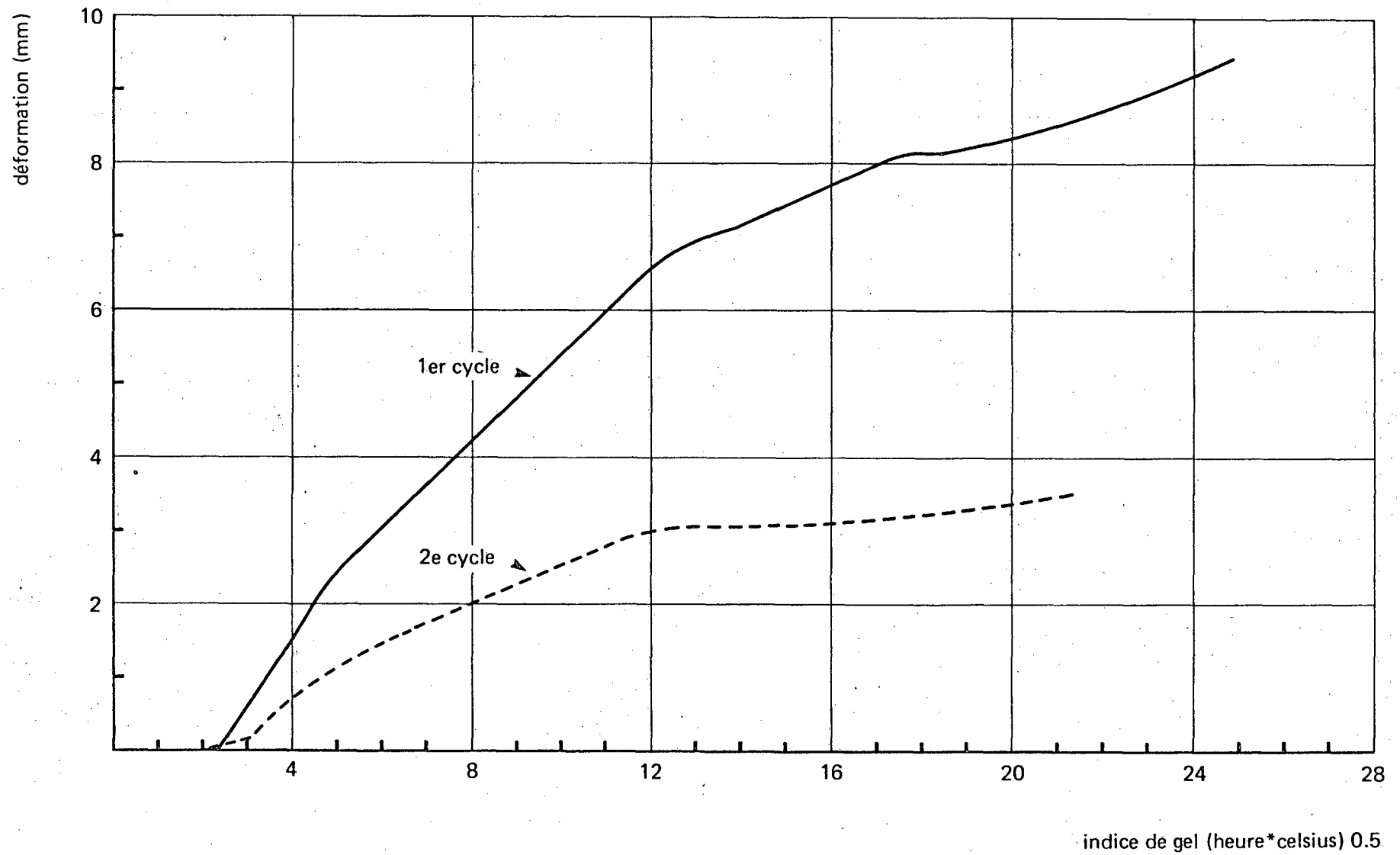
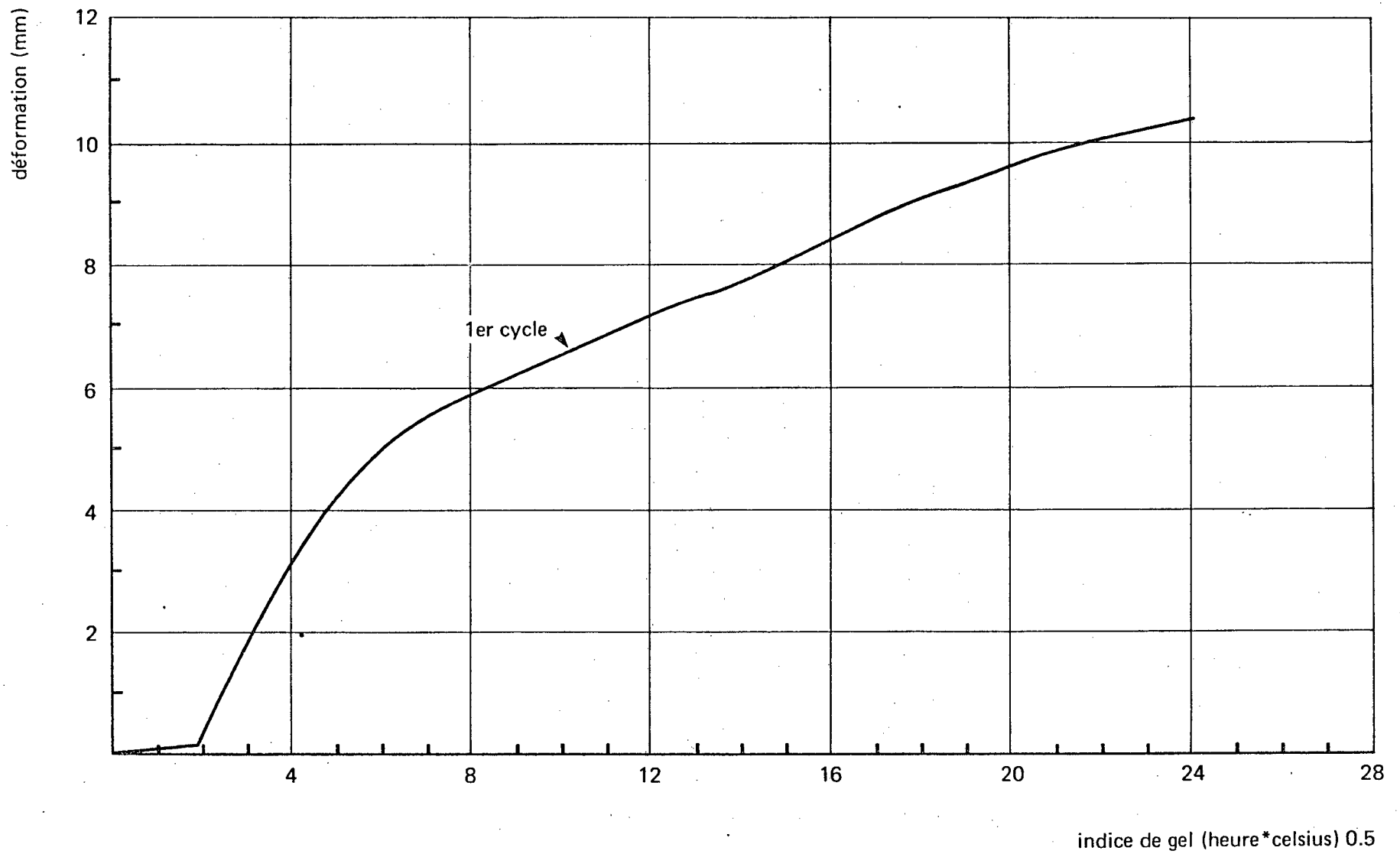
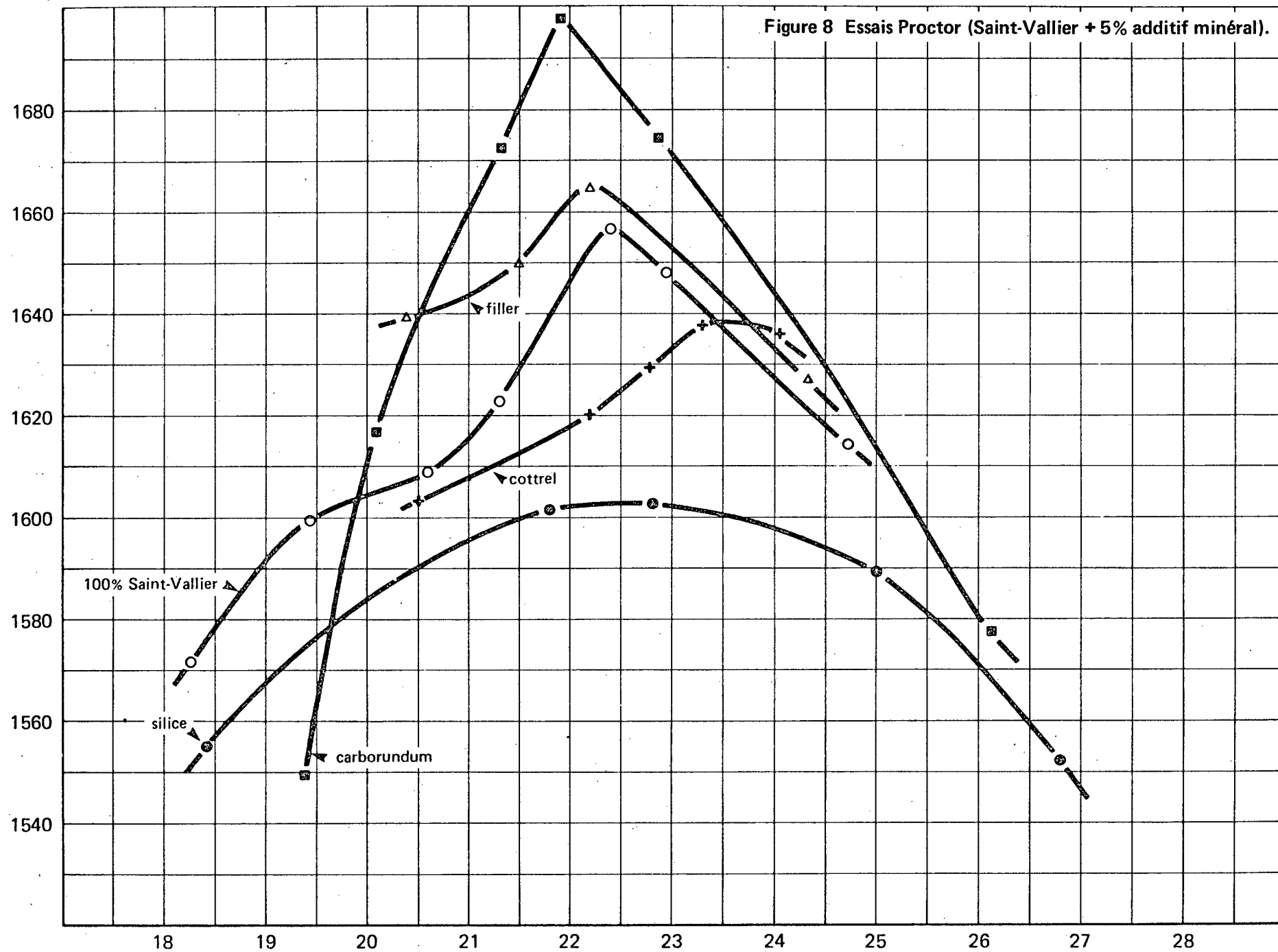


Figure 7 Soulèvement par le gel (97% P.E.B. + 3% chaux).



masse volumique (kg/m³)

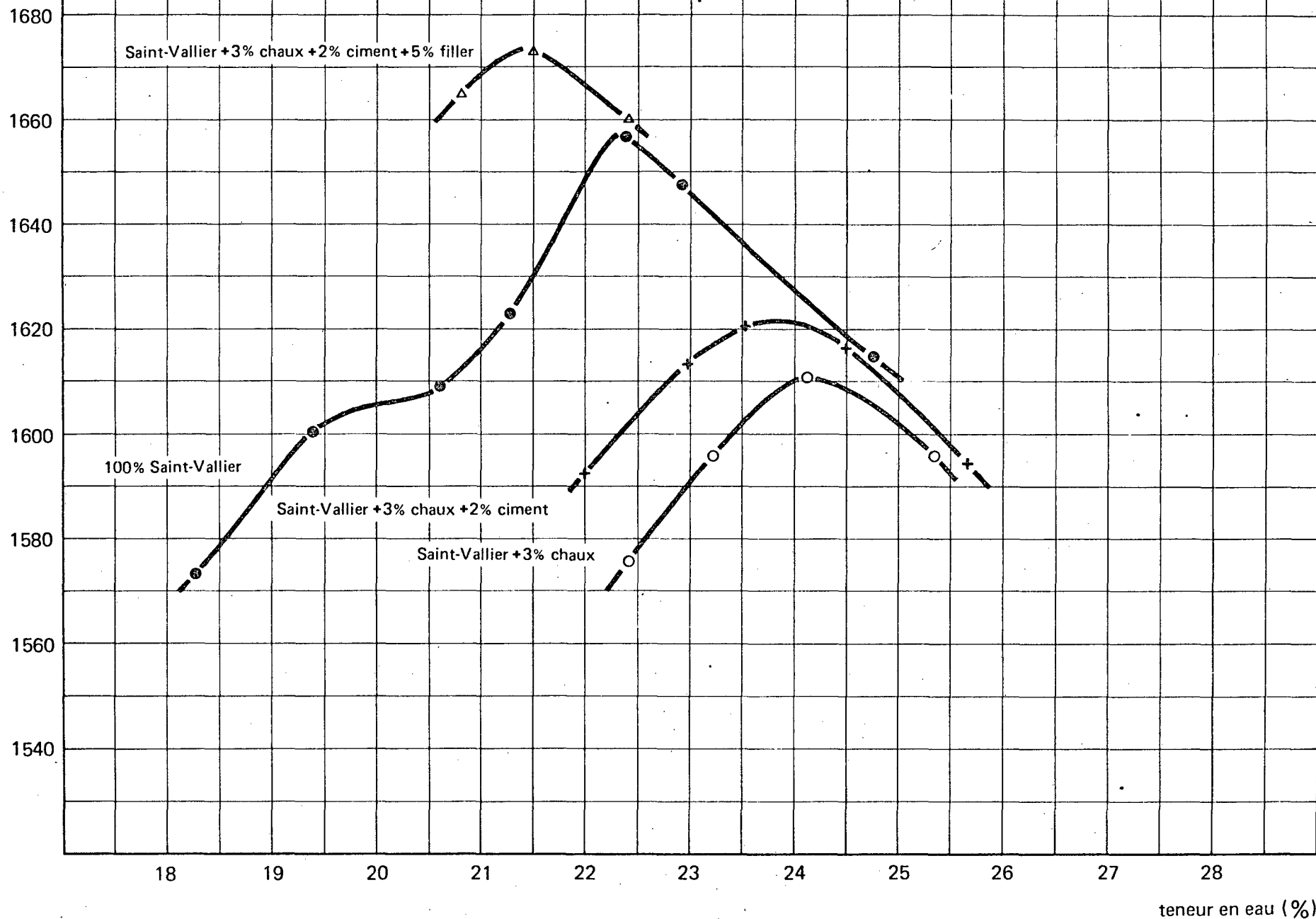
Figure 8 Essais Proctor (Saint-Vallier + 5% additif minéral).



teneur en eau (%)

masse volumique (kg/m³)

Figure 9 Essais Protor (Saint-Vallier + liant hydraulique).



masse volumique (kg/m³)

Figure 10 Essais Proctor (Saint-Vallier +3% chaux +5% additif minéral).

1680
1660
1640
1620
1600
1580
1560
1540

100% Saint-Vallier

filler

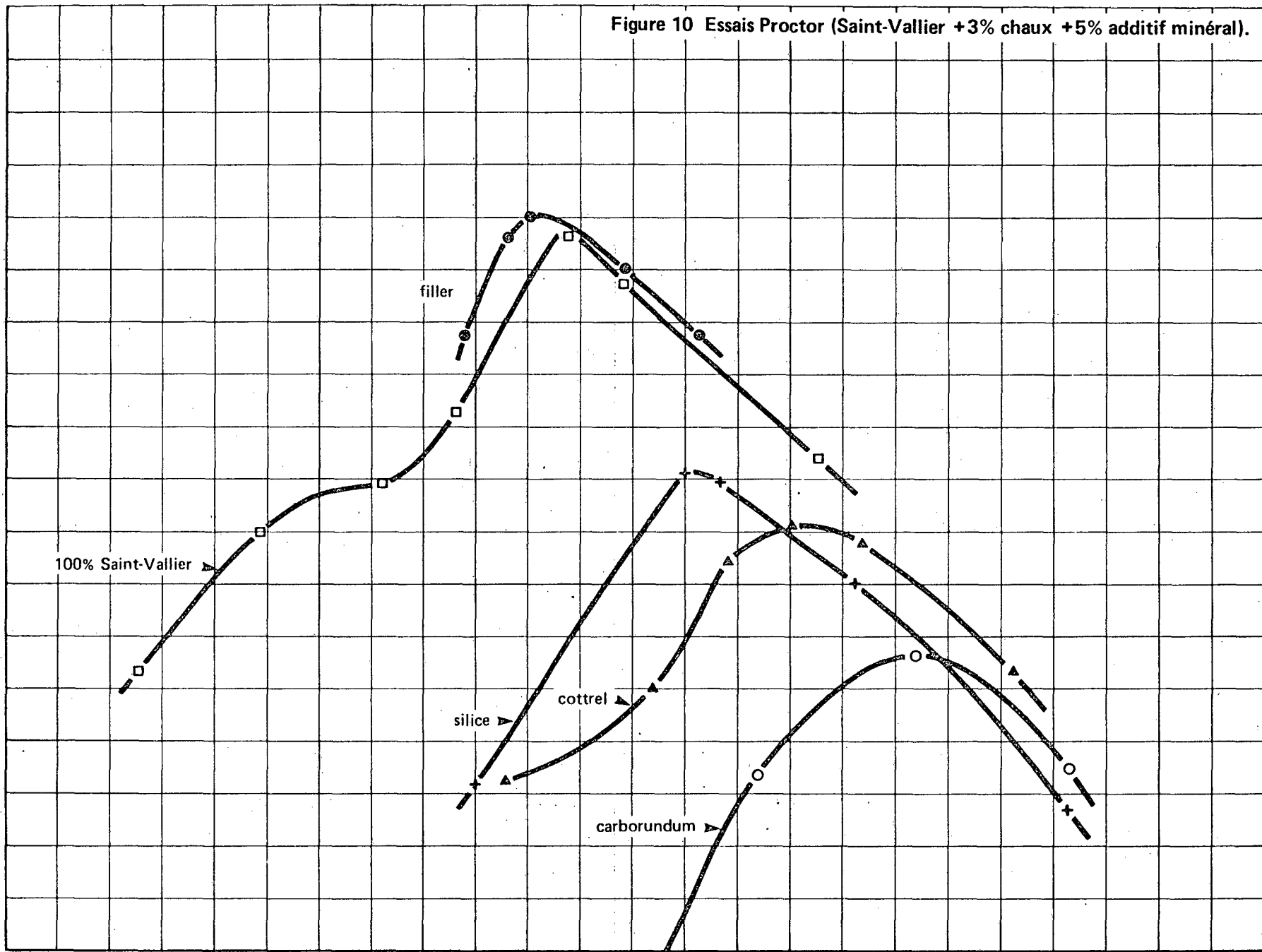
silice

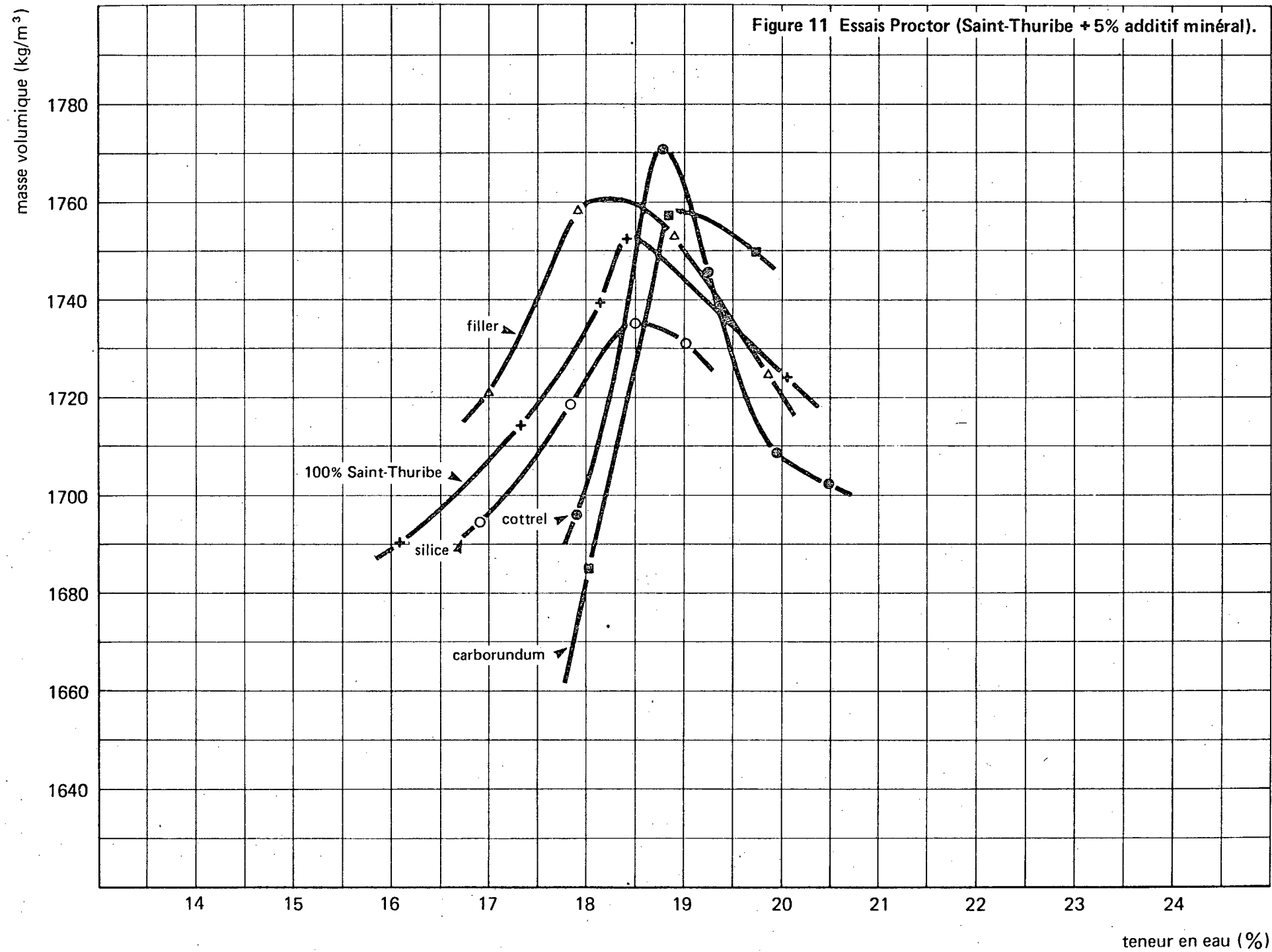
cottrel

carborundum

18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

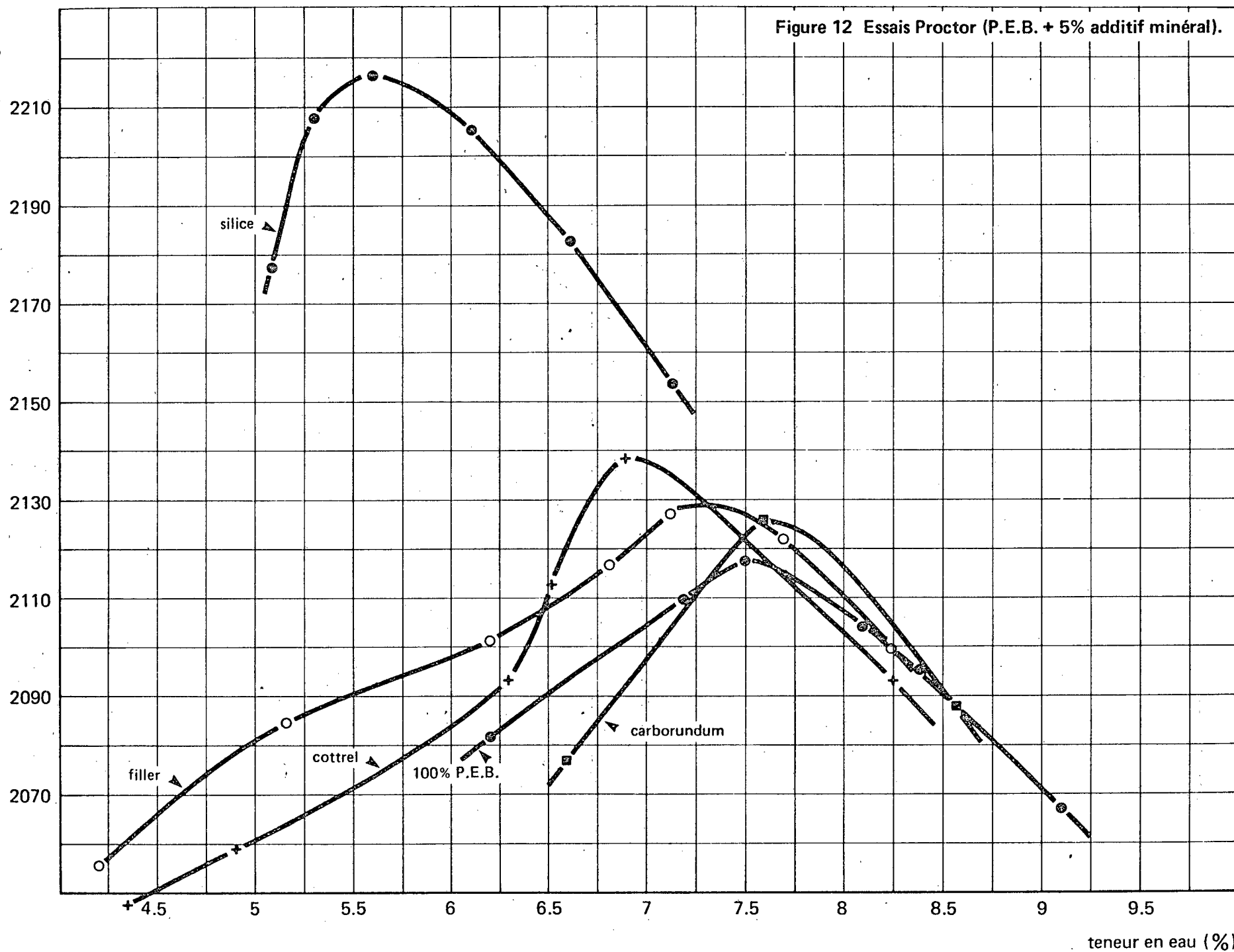
teneur en eau (%)

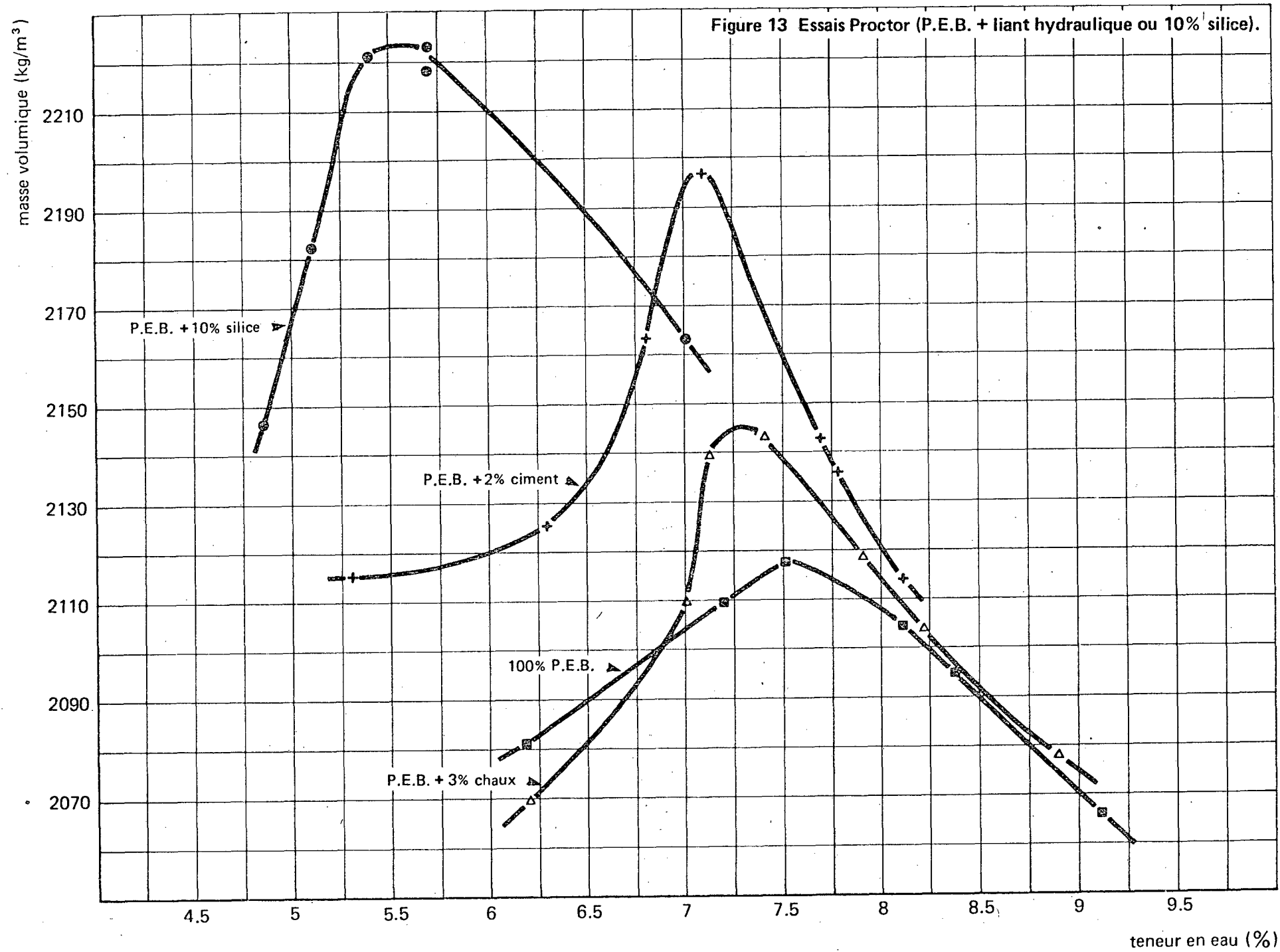




masse volumique (kg/m³)

Figure 12 Essais Proctor (P.E.B. + 5% additif minéral).





masse volumique (kg/m³)

Figure 14 Essais Protor (P.E.B. + 2% ciment + 5% additif minéral).

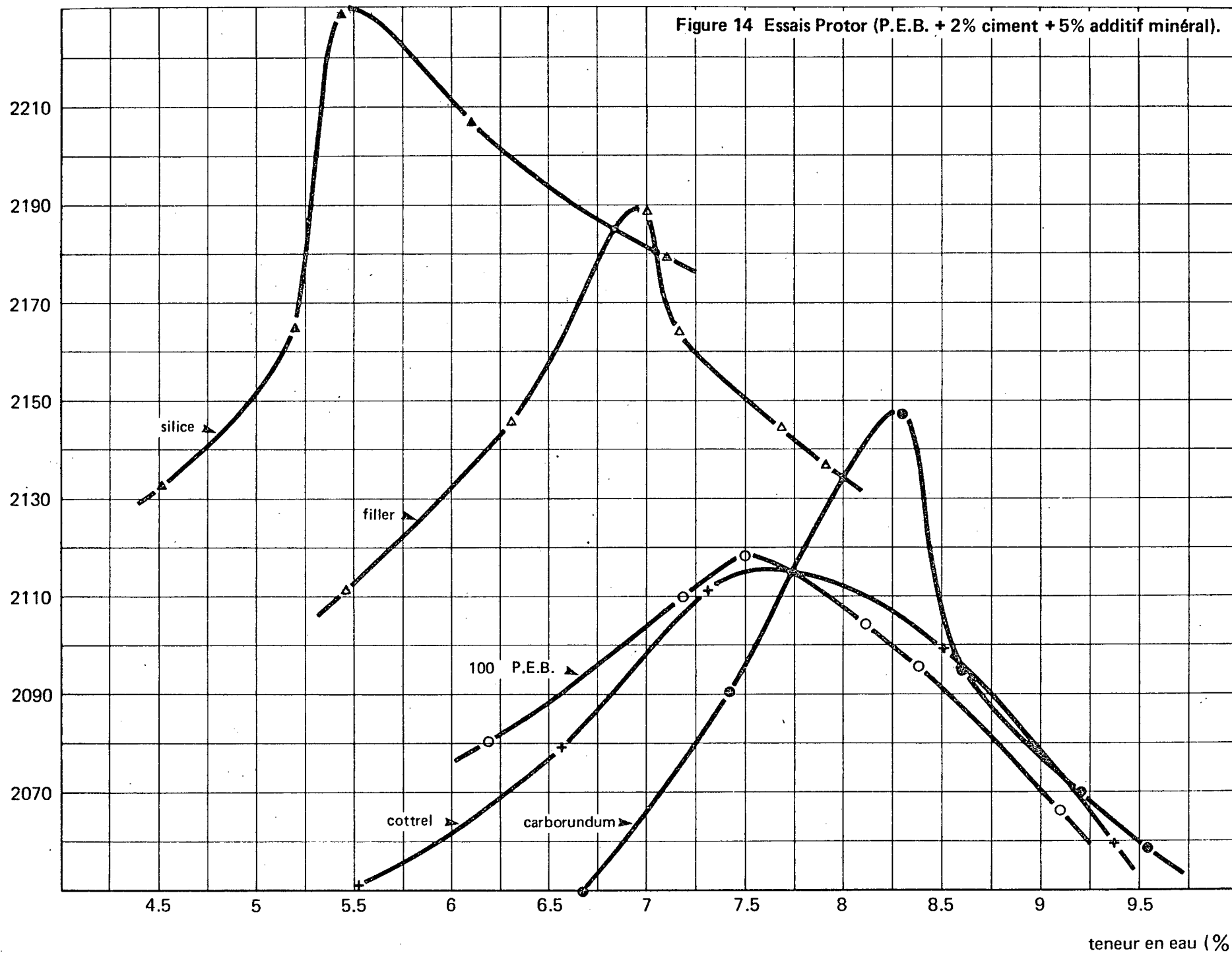
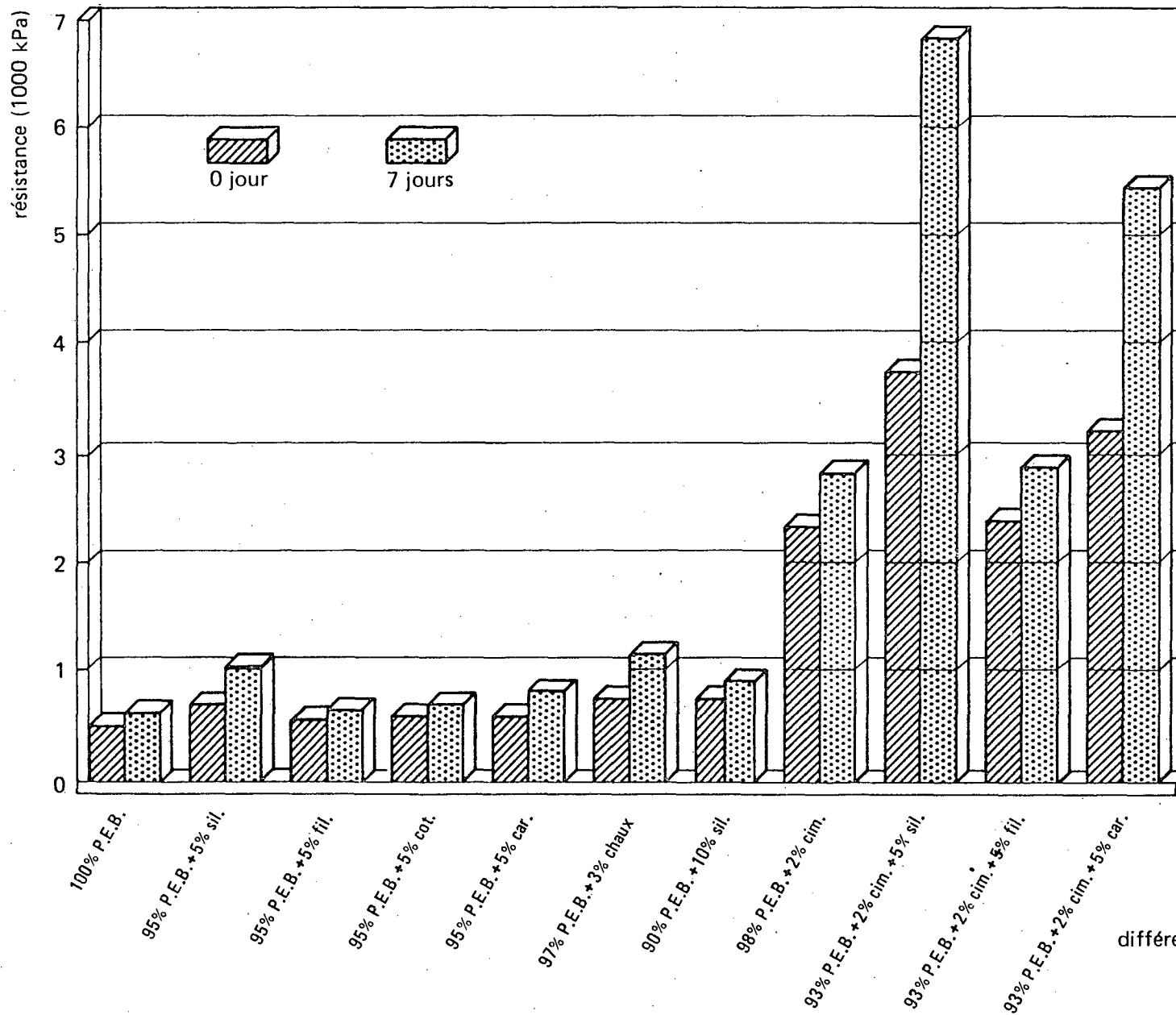


Figure 15 Essais de compression simple à 0 et 7 jours (sable P.E.B.).



NOTE: Les résultats de 0 jour pour les mélanges avec ciment, ont été obtenus, en fait, après un curage de 1 jour.

MINISTERE DES TRANSPORTS



QTR A 104 550