

2/92

MINISTERE AUX UNIVERSITES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



THÈSE

Présentée par : M. CHENNIT MOHAMED

Ingénieur d'Etat

Pour l'obtention du diplôme de Magister

en Génie Civil

SUJET

BETON EXPANSE A BASE DE LAITIER

Soutenue le

1992 devant le jury suivant:

A. CHARIF	Professeur E.N.P.	Président
R. BOUTEMEUR	Chargé de cours	Examineur
M. T. ABADLIA	Ph.D. I.N.M.C. (Boumerdès)	Examineur
S. BELKACEMI	Maître de conférences E.N.P.	Examineur
A. BALI	Professeur E.N.P.	Rapporteur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE AUX UNIVERSITES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THESE

Présentée par : M. CHENNET MOHAMED

Ingénieur d'Etat

Pour l'obtention du diplôme de Magister

en Génie Civil

SUJET

BETON EXPANSE A BASE DE LAITIER

Soutenue le

1992 devant le jury suivant:

A. CHARIF	Professeur E.N.P.	Président
R. BOUTEMEUR	Chargé de cours	Examineur
M. T. ABADLIA	Ph.D. I.N.M.C. (Boumerdès)	Examineur
S. BELKACEMI	Maître de conférences E.N.P.	Examineur
A. BALI	Professeur E.N.P.	Rapporteur

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEDICACE

JE DEDIE CETTE THESE DE MAGISTER

A ma femme, ASSIA, qui a su m'épaulé jusqu'à l'aboutissement

A mes parents

A mes frères

A ma soeur, Samira

A mon grand-père, Amara

ainsi qu'à toute ma famille

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au laboratoire de Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je remercie Monsieur A.CHARIF, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir bien voulu accepter de présider le jury d'examen.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur M.T.ABADLIA, Ph.D, et à Monsieur R.BOUTEMEUR, Chargé de Cours à l'Ecole Nationale Polytechnique, dont les suggestions ont permis de parfaire ce document et je remercie Monsieur S.BELKACEMI, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, de s'être joints au jury.

J'exprime également, ma gratitude à Monsieur N.EDEN, Ph.D, enseignant à l'Ecole Polytechnique de LIVERPOOL pour l'orientation du sujet de cette thèse de Magister.

Enfin, la réalisation de ce document n'aurait été possible sans les conseils et l'encadrement étroit de Monsieur A.BALI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, que ce document témoigne de ma reconnaissance qui lui est due. Qu'il veuille bien accepter toute ma gratitude et mon respect.

Je tiens, également, à remercier la Direction du Projet ENP/PNUD, ALG. 86/005, d'avoir permis le bon déroulement de ce modeste travail.

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE PREMIER : INTRODUCTION	1
1.1 GENERALITE	2
1.2 LE LAITIER	3
1.3 LE BETON EXPANSE	3
1.4 BUT DE LA RECHERCHE	5
1.5 EXPOSE DE LA RECHERCHE	6
CHAPITRE DEUXIEME : RECHERCHE ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	9
2.1. LE LAITIER DE HAUTS FOURNEAUX	10
2.1.1 LE LAITIER CRISTALLISE	10
2.1.1.1. MODE D'OBTENTION	10
2.1.1.2 COMPOSITION CHIMIQUE	11
2.1.1.3 UTILISATION DU LAITIER CRISTALLISE	12
2.1.2 LE LAITIER GRANULE	13
2.1.2.1 MODE D'OBTENTION	13
2.1.2.2 COMPOSITION CHIMIQUE	13
2.1.2.3 ACTIVITE DES LAITIERS GRANULES	15
2.1.2.4 CINETIQUE ET MECANISME D'HYDRATATION DU LAITIER GRANULE	16
2.1.2.5 UTILISATION DU LAITIER GRANULE	17
2.1.2.5.1 LE LAITIER BOULETE	17
2.1.2.5.2 LE LAITIER VITRIFIE	17
2.1.2.5.2.1 UTILISATION COMME SABLE	17
2.1.2.5.2.2 UTILISATION EN CIMENTERIE	18
2.2 BETON EXPANSE	19
2.2.1 INTRODUCTION	19
2.2.2 BETON AERE AUTOCLAVE	19
2.2.2.1 HISTORIQUE	19
2.2.2.2 DESCRIPTION ET MODE DE FABRICATION	21
2.2.3 PROPRIETES DU BETON AERE AUTOCLAVE	24
- DENSITE ET RESISTANCE	24
- MODULE D'ELASTICITE	24
- LE RETRAIT	26

- ISOLATION THERMIQUE	26
- RESISTANCE AU FEU	26
- ISOLATION ET ABSORPTION PHONIQUE	26
- RESISTANCE AU GEL	28
- DECOUPAGE ET FIXATION	28
- AUTRES PROPRIETES	28
2.2.4 COMPOSITION CHIMIQUE DU BETON EXPANSE AUTOCLAVE	28
2.2.5 PROCESSUS DE DURCISSEMENT	30
2.2.6 RELATION ENTRE LES PROPRIETES STRUCTURELLES ET MECANQUES	32
2.2.7 LE PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUE DE L'AUTOCLAVAGE	34
2.2.8 INFLUENCE DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'AUTOCLAVAGE SUR LE BETON EXPANSE AUTOCLAVE	36
2.2.9 FABRICATION ET PROPRIETES DES BETONS CELLULAIRES AUTOCLAVES EN ALGERIE	37
2.3 BUT ET JUSTIFICATION DE LA RECHERCHE	38
CHAPITRE TROISIEME : EXPERIMENTATION	40
3.1 LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU D'EL-HADJAR	41
3.1.1 DESCRIPTION	41
3.1.2 COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR	41
3.1.3 ANALYSE PHYSIQUE	42
3.1.4 UTILISATION DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR	42
3.2 MATIERES PREMIERES	43
3.2.1 LE LAITIER	43
3.2.2 LA CHAUX	45
3.2.3 LA POUDRE D'ALUMINIUM	45
3.2.4 LA SOUDE CAUSTIQUE	46
3.3 EQUIPEMENTS D'ESSAIS	46
3.3.1 BROYEUR A BOULETS	46
3.3.2 DENSIMETRE LE CHATELIER	47
3.3.3 APPAREIL DE BLAINE	47
3.3.4 AUTOCLAVE	48
3.4 MODE OPERATOIRE	48
3.5 ESSAIS PHYSIQUES ET MECANIQUES	49

3.5.1	ESSAIS PHYSIQUES	49
3.5.1.1	MASSE VOLUMIQUE DES ECHANTILLONS	49
3.5.1.2	CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU	50
3.5.1.3	COEFFICIENT DE RAMOLLISSEMENT	51
3.5.2	ESSAIS MECANIQUES	51
3.5.2.1	RESISTANCE A LA FLEXION	51
3.5.2.2	RESISTANCE A LA COMPRESSION	53
3.6	ANALYSE PAR DIFFRACTION X	54
3.6.1	INTRODUCTION	54
3.6.2	PREPARATION DE L'ECHANTILLON	55
CHAPITRE QUATRIEME : INFLUENCE DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES		
	SUR LES PROPRIETES DU BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE	56
4.1	COMPOSITION DU MELANGE	57
4.2	VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE ET DU POURCENTAGE DE LAITIER	59
4.2.1	MODE OPERATOIRE	59
4.2.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	61
4.2.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	61
4.3	VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE A CONSISTANCE CONSTANTE (BETON NON EXPANSE)	66
4.3.1	MODE OPERATOIRE	66
4.3.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	66
4.3.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	67
4.4	VARIATIONS DU RAPPORT E/S ET DU POURCENTAGE D'ALUMINIUM	70
4.4.1	MODE OPERATOIRE	70
4.4.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	71
4.4.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	71
4.5	VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE (BETON EXPANSE)	75
4.5.1	MODE OPERATOIRE	75
4.5.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	75
4.5.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	75
4.6	VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE A FLUIDITE CONSTANTE	77

4.6.1	MODE OPERATOIRE	77
4.6.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	78
4.6.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	78
4.7	VARIATION DU POURCENTAGE DE LAITIER (BETON EXPANSE)	81
4.7.1	MODE OPERATOIRE	81
4.7.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	81
4.7.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	81
4.8	VARIATION DE LA TEMPERATURE DU PALIER ISOTHERMIQUE	84
4.8.1	MODE OPERATOIRE	84
4.8.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	85
4.8.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	85
4.9	VARIATION DE LA DUREE DU PALIER ISOTHERMIQUE	88
4.9.1	MODE OPERATOIRE	88
4.9.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	88
4.9.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	89
4.10	VARIATION DU POURCENTAGE DE SOUDE	91
4.10.1	MODE OPERATOIRE	91
4.10.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	92
4.10.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	92
4.11	INFLUENCE DE LA FINESSE DE LA POUDRE D'ALUMINIUM	95
4.11.1	MODE OPERATOIRE	95
4.11.2	RESULTATS DE L'EXPERIENCE	95
4.11.3	INTERPRETATION DES RESULTATS	96
	CHAPITRE CINQUIEME : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	98
	ANNEXES	105
	ANNEXE A: TABLEAUX DES RESULTATS D'ESSAI	106
	ANNEXE B: DIFFRACTOGRAMMES	111
	REFERENCES	119

CHAPITRE PREMIER: INTRODUCTION

CHAPITRE PREMIER

1 INTRODUCTION

1.1 GENERALITE

La formidable expansion de la construction en Algérie durant cette dernière décennie, nécessite une plus grande disponibilité des matériaux de construction, induisant l'importation, en particulier, du ciment à coût de devises fortes. Afin de remédier à une telle situation, il est nécessaire de fabriquer de nouveaux types de liants et de matériaux, susceptibles d'être élaborés à partir de déchets et sous-produits industriels tel le laitier de hauts fourneaux, disponible en très grande quantité. Cette initiative permettra non seulement d'alléger la demande sur le ciment, mais aussi de fabriquer des produits durables possédant des propriétés mécaniques satisfaisantes.

L'étude présentée dans cette thèse permet, en outre, de résoudre un problème écologique important. Effectivement l'utilisation de ces sous-produits entraîne leur élimination du milieu naturel, sachant que le complexe SIDER d'El-Hadjar (Annaba) produit 660000 tonnes par an de laitier, développant ainsi d'énormes crassiers [1].

Le travail effectué comporte deux grandes parties, portant notamment sur les études du laitier et du béton expansé.

1.2 LE LAITIER

Les laitiers de hauts fourneaux sont des sous-produits de l'industrie métallurgique. Le ciment au laitier a été utilisé en Allemagne dès 1822. La laine de verre à base de laitier a été pour la première fois utilisée au pays de Galles en 1840 [2]. Le plus important des laitiers, utilisé dans les matériaux de construction, est le laitier de hauts fourneaux de fonte. Le laitier peut se présenter sous forme d'une roche cristalline stable si le refroidissement est lent à l'air libre. Il est utilisé comme agrégat après concassage. Si le laitier est passé à travers un courant d'eau à haute pression, le refroidissement est brusque procurant au laitier un aspect granulaire à grains déchiquetés. Le laitier granulé est utilisé essentiellement en cimenterie. Il a un intérêt considérable; il est connexe à la fabrication de la fonte et, à ce titre, il n'entraîne donc aucune dépense d'énergie pour sa fabrication tandis que la clinkérisation nécessite plus de 106 kg de fuel par tonne de clinker [3].

Notre recherche est orientée vers l'utilisation du laitier granulé dans le béton expansé autoclavé.

1.3 LE BETON EXPANSE

La présence d'air à l'intérieur du béton, entraîne une diminution de sa densité, permettant ainsi, d'obtenir un béton léger. Il existe plusieurs procédés pour générer de l'air occlus dans le béton. Il s'en suit, de ce fait une classification des

bétons légers en trois principaux groupes:

- a- béton cellulaire autoclavé ou béton gaz.
- b- béton caverneux.
- c- béton à base d'agréats légers.

Notre travail portera essentiellement sur l'utilisation du laitier granulé dans la fabrication du béton cellulaire autoclavé.

Il est toutefois nécessaire de noter que le terme "béton" dans le béton cellulaire autoclavé est une appellation exagérée. En réalité, on confectionne des blocs de mortier qui sont ensuite utilisés dans le cloisonnement des bâtiments.

Les bétons légers présentent par rapport aux bétons ordinaires les avantages suivants:

- légèreté
- facilité des conditions de manutention et de mise en œuvre
- économie du point de vue de structure et de fondation
- bonne isolation phonique, acoustique et thermique.

1.3.1 BETON AERE

Le béton aéré est fabriqué par introduction d'air ou un autre gaz dans la gâchée composée de ciment et de sable. Cependant en pratique commerciale, le sable est souvent remplacé par les cendres volantes ou par un autre matériau siliceux, alors que la chaux peut être substituée au ciment.

Il existe deux formes de béton aéré, l'in-situ et le préfabriqué. Ce dernier est traité dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau à hautes pression et température.

Le béton aéré a une densité comprise entre 500 et 1000 kg/m³ et est, en général, employé dans le cloisonnement. Il est utilisé dans la construction depuis plus d'un demi-siècle et est fabriqué de nos jours dans plusieurs pays [4].

Le gonflement du béton gaz se fait par réaction chimique de l'aluminium, en faible quantité, avec l'hydroxyde de calcium produisant ainsi du gaz d'hydrogène.

L'Algérie compte deux usines de béton cellulaire, construites par la firme "SIPOREX". Cependant la consommation excessive de ciment, fait de ce matériau un produit, relativement cher, en comparaison avec le matériau à base de laitier.

1.4 BUT DE LA RECHERCHE

Ce travail vise à explorer deux domaines. L'un concernant le laitier et l'autre le béton aéré autoclavé. Cette initiation à la recherche permettra de développer et d'ouvrir les voies pour des investigations plus approfondies ainsi que de recueillir toutes les informations relatives aux propriétés physiques et mécaniques et structurelles de ce matériau.

L'objectif de la présente recherche est de contribuer à améliorer les propriétés physiques et mécaniques du béton cellulaire autoclavé produit en Algérie. Il s'agit aussi de rentabiliser les unités de production du béton cellulaire, en diminuant le prix de revient du produit fini. Cela est possible en remplaçant le ciment par le laitier dans la fabrication du béton cellulaire. Cette opération permettra de réduire la

consommation en ciment et économiser, ainsi les devises nécessaires à son importation.

Cette étude permet également, l'élimination des crassiers et de résoudre ainsi un problème écologique posé par le stockage du laitier.

1.5 EXPOSE DE LA RECHERCHE

La faible hydraulicité du laitier nécessite une activation chimique, avec de la soude et l'hydroxyde de calcium, ou physique par un traitement à hautes température et pression dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau.

L'étude se fera sur la pâte laitier-chaux, en observant l'influence des paramètres, entrant dans la fabrication du béton cellulaire, sur les propriétés physiques et mécaniques.

Le travail traitera l'influence des paramètres suivants:

- la surface spécifique Blaine à rapport E/S constant
- la surface spécifique Blaine à consistance constante
- le rapport laitier/chaux
- le rapport E/S
- le pourcentage d'aluminium
- le pourcentage de soude NaOH(activant chimique)
- finesse de mouture de la poudre d'aluminium
- température de traitement
- durée de traitement

Cette étude a permis de constater que la soude, utilisée comme accélérateur de prise, influençait positivement les propriétés physiques et mécaniques. Effectivement, l'augmentation de la quantité de soude, non seulement, décroît la densité mais en même temps améliore la résistance mécanique, ce qui représente un résultat très recherché.

Cette recherche a permis aussi, de se rendre compte de l'importance que représente la fluidité d'un mélange sur les résultats d'essais. Il est recommandé de s'assurer que la variation d'un paramètre donné n'influe pas sur la consistance du mélange. Dans le cas contraire les résultats obtenus seront erronés, comme il a été constaté lors de la variation de la surface spécifique Blaine.

L'utilisation de la formule de G.Gorbounov [5] pour la détermination de la composition du mélange nécessaire au remplissage du moule, a permis de constater des défaillances dans cette formule. Une solution de remplacement a été donnée et vérifiée et s'est avérée probante.

La finesse de la poudre d'aluminium influe significativement sur les propriétés physiques et mécaniques. Il a été montré que plus la finesse de la poudre d'aluminium est élevée plus important est le gonflement, induisant une diminution de la densité. De plus, pour une même densité, le matériau dont l'expansion a été effectuée avec une poudre plus fine présente une plus grande résistance mécanique. Il apparaît clairement qu'il est plus économique d'utiliser une poudre d'aluminium la plus fine possible car elle produit le gonflement

le plus important. De plus et du fait de la structure cellulaire du béton, expansé avec de la poudre fine, la résistance se trouve, dans ce cas, la plus élevée.

Il est vivement recommandé d'utiliser une poudre d'aluminium la plus fine possible.

CHAPITRE DEUXIEME: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 LE LAITIER DE HAUTS FOURNEAUX.

Le laitier de hauts fourneaux est le principal sous-produit de l'industrie sidérurgique. Il est en effet constitué de la matière stérile du minerai, des cendres volantes (coke) et des charges minérales (fondants).

Le laitier de hauts fourneaux résulte donc de la réduction du minerai de fer dans le processus de fabrication de la fonte.

La flottaison du laitier au dessus de la fonte, à l'intérieur du haut fourneau, permet sa séparation à la sortie basse.

Selon le mode de refroidissement, il existe deux grandes sortes de laitier, comme indiqué sur la figure 2-1 [6].

2.1.1 LE LAITIER CRISTALLISE.

2.1.1.1. MODE D'OBTENTION.

Le refroidissement lent du laitier en fosse, permet à celui-ci de cristalliser et de prendre l'aspect d'une roche. La cristallisation est d'autant meilleure que le processus de refroidissement est lent. Le produit se présente en une masse plus ou moins fracturée, qui peut être ensuite concassée et utilisée comme agrégat.

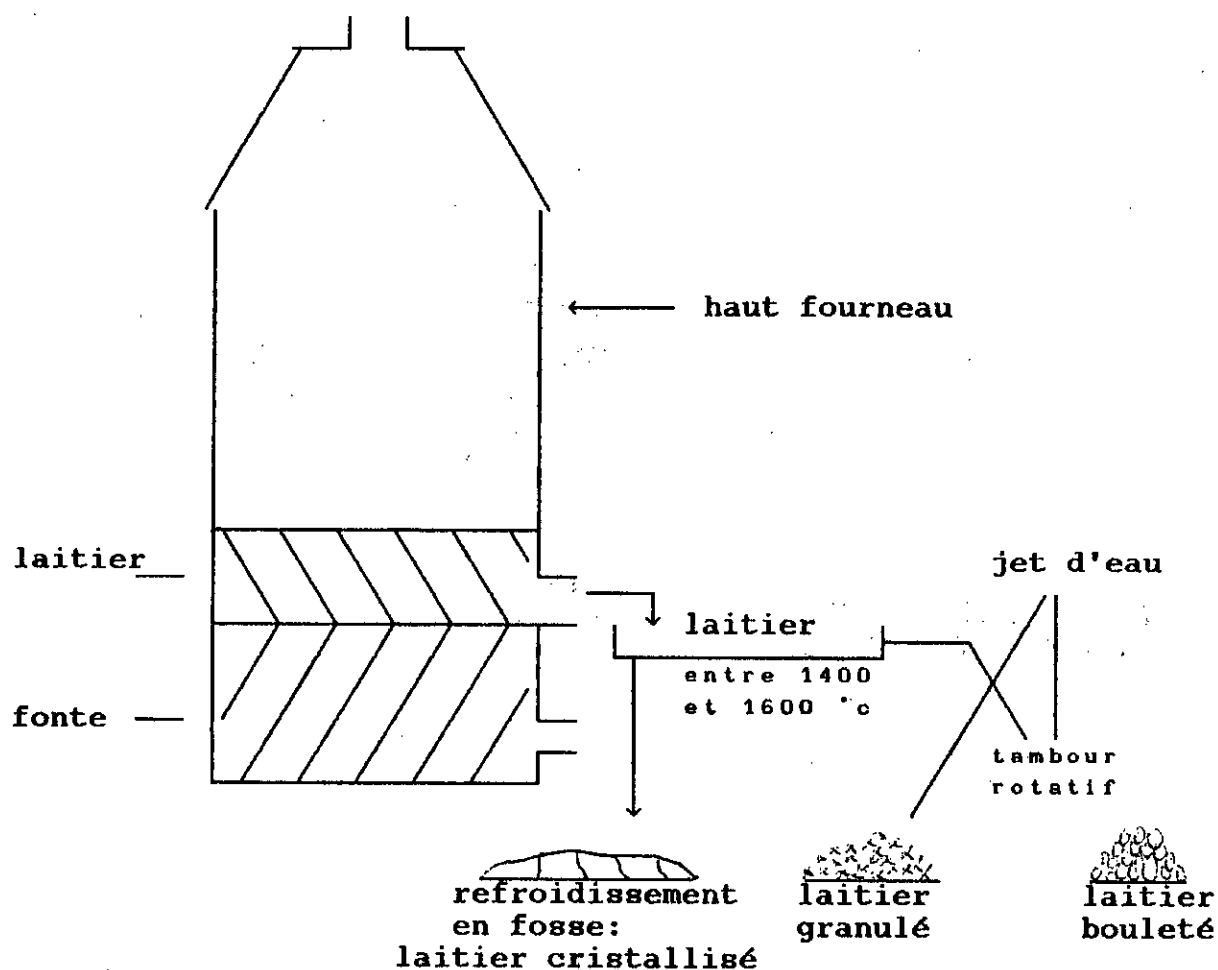


Figure 2-1: Modes d'obtention du laitier [6]

2.1.1.2 COMPOSITION CHIMIQUE.

Un refroidissement lent du laitier en fusion transforme celui-ci en un solide stable formé de silicates de calcium (Ca), d'aluminium (Al) et de magnésium (Mg), principalement de mélikite, qui est une solution solide de gehlenite ($(CaO)_2 Al_2O_3 SiO_2$) et d'akermanite ($(CaO)_2 MgO (SiO_2)_2$). Le laitier cristallin a des propriétés mécaniques similaires à celles du basalte et est utilisé comme agrégat. Il

contient aussi de la merwinite ($(\text{CaO})_3\text{MgO}(\text{SiO}_2)_2$) pour les laitiers basiques et la diopside (CMS_2) pour les laitiers acides. En ce qui concerne les composants mineurs, le laitier contient de la rankinite (C_3S_2), de la pseudo-wallastonite (CS_2), de l'oldamite (CaS), de la monticellite (CMS) et du silicate dicalcique (C_2S), où C, M et S représentent les oxydes CaO , MgO et SiO_2 . Il est à noter que les deux composants mineurs, la monticellite et le silicate dicalcique, sont présents uniquement dans les laitiers acides [6].

2.1.1.3 UTILISATION DU LAITIER CRISTALLISE.

Le concassage de cette roche plus ou moins poreuse et fragmentée permet d'obtenir un granulats. Afin que celui-ci fasse partie des granulats lourds, il faut que sa porosité soit inférieure à 10%. Cette porosité est due au fait que le laitier contient toujours de l'air, occlus lors du refroidissement [7].

Ce granulats peut être utilisé dans la construction de bâtiments ou de chaussées ou tout simplement comme remblais.

Il est à noter que l'altération des granulats pourrait se produire si le soufre des sulfures, dosé en S et le manganèse des oxydes de manganèse, dosé en MnO , étaient supérieurs à 2%. L'ingénieur Luxembourgeois DUBUISSOM a, en effet montré, que de tels laitiers subissent une désagrégation ultérieure [7].

Le granulats de hauts fourneaux ne doit pas être employé pour la base de ciment alumineux. Ceci résulte du fait qu'en présence d'eau le laitier s'hydrolyse légèrement, marquant ainsi une réaction basique, qui représente une cause profonde

d'altération du ciment alumineux [7].

2.1.2 LE LAITIER GRANULE

2.1.2.1 MODE D'OBTENTION

Le refroidissement brusque du laitier par jet d'eau, permet de freiner le processus de cristallisation et d'obtenir ainsi, un matériau vitrifié et granulé. Ce dernier pouvant se cristalliser ultérieurement comme le ferait un liant hydraulique. Il existe deux modes essentiels de granulation:

a- Si le refroidissement est direct par jet d'eau, on obtient un laitier granulé présentant l'aspect d'un sable à grains déchiquetés de dimensions inférieures à 4 mm.

b- Le refroidissement peut se faire dans un tambour rotatif tout en arrosant le laitier. On obtient ainsi du laitier bouleté, qui a l'aspect d'un sable à grains arrondis de dimensions de 0 à 15mm. Cette opération est appelée bouletage [6]. Les boulets dont les dimensions sont inférieures à 4mm sont utilisés en cimenterie tandis que les autres servent de granulats.

2.1.2.2 COMPOSITION CHIMIQUE.

La composition chimique du laitier de hauts fourneaux est proche de celle du ciment, comme on peut le constater sur le tableau 2-1 [8]. On constate que les principaux oxydes présents dans le laitier le sont également dans le ciment portland. On en déduit que le laitier peut aussi bien être utilisé dans la fabrication du ciment.

Composant Chimique %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
Laitier	38-44	34-39	08-14	06-10
Ciment Portland	64-66	19-22	05-07	01-01.5

Tableau 2-1: Composition chimique du laitier et du ciment portland.

Ce rapprochement peut être observé sur le diagramme de Rankine de la figure 2-2, en considérant les trois principaux constituants, la chaux (CaO), la silice (SiO₂) et l'alumine (Al₂O₃) [8].

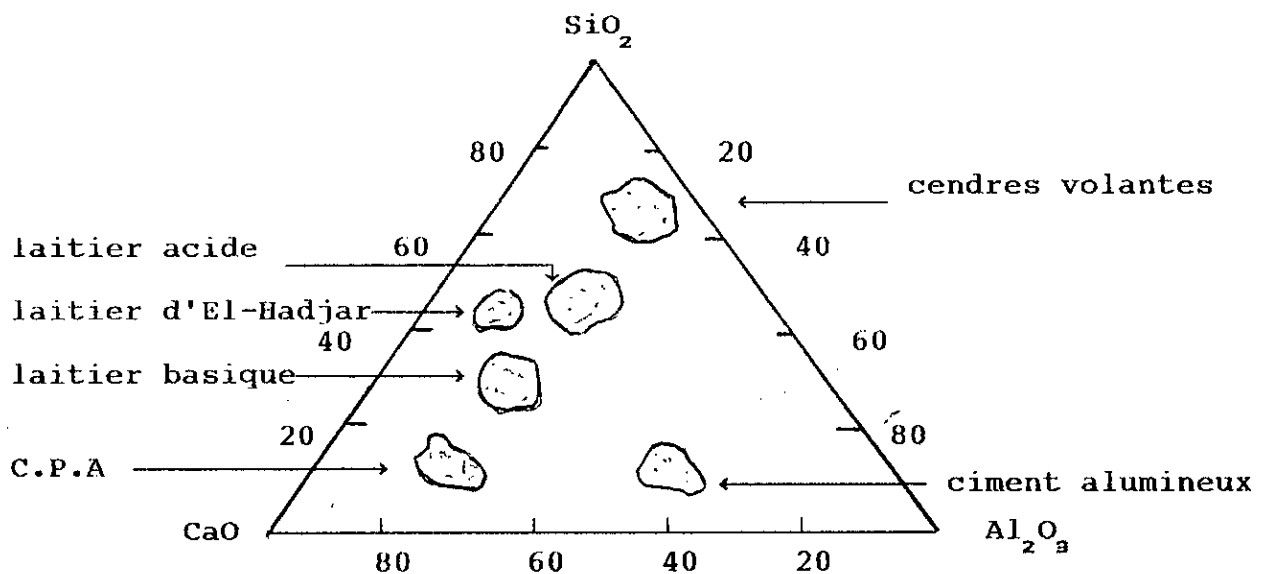


Figure 2-2: Diagramme de Rankine [9]

2.1.2.3 ACTIVITE DES LAITIERS GRANULES.

Le refroidissement du laitier, arrête le processus de cristallisation dans une configuration désordonnée, d'où la formation d'oxydes amorphes, exactement similaires aux silicates.

C'est cette cristallisation, figée dans le temps, qui confère au laitier des propriétés hydrauliques [6].

La composition chimique est importante dans l'évaluation des propriétés hydrauliques, elle détermine la basicité du laitier ainsi que sa structure vitreuse. Il est à préciser que plus le laitier est basique plus son pouvoir hydraulique est élevé [7].

La basicité et l'acidité d'un laitier sont déterminées par les proportions d'oxydes acides (SiO_2 , Al_2O_3) et d'oxydes basiques (CaO , MgO) présents dans le laitier.

Afin d'évaluer l'activité des laitiers, plusieurs indices hydrauliques notés "i" ont été définis dans différents pays. Ce module détermine la qualité du laitier. Les plus utilisés sont les suivants [6]:

$i = \frac{C + M + A}{S}$ qui doit être supérieur à 1.4 au Japon et à 1.6 en RFA pour constituer un bon laitier entrant dans la fabrication du ciment.

Aux U.S.A. le rapport est défini comme suit:

$i = \frac{C + M + 2/3 A}{S + 1/3 A}$ qui doit être supérieur à 1.

En U.R.S.S., l'indice est :

$$i = \frac{C + M}{S + A}$$

si $47\% \leq S \leq 60\%$ alors i doit être inférieur à 0.1.
si $33\% \leq S \leq 46\%$ alors $0.6 \leq i \leq 0.9$.
si $25\% \leq S \leq 33\%$ alors i doit être proche de 1.

où $C \equiv \text{CaO}$; $S \equiv \text{SiO}_2$; $M \equiv \text{MgO}$; $A \equiv \text{Al}_2\text{O}_3$.

2.1.2.4 CINETIQUE ET MECANISME D'HYDRATATION DU LAITIER GRANULE

L'hydratation des laitiers granulés conduit à leur dissolution et à la précipitation C-S-H.

Dans la phase initiale, ce sont les éléments structuraux les plus basiques qui passent en solution, $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ ou $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ [6]. Le rapport C/S du C-S-H étant plus faible que celui du laitier, la solution devient plus riche en chaux. L'alcalinité du milieu et la concentration en ion Ca^{++} entraînent l'hydratation des silicates, des aluminosilicates et des aluminates de calcium. De plus, elles entraînent l'intensification du processus de destruction des liaisons covalentes [9].

L'étude thermodynamique du système quaternaire $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ a montré que les phases hydratées qui coexistent avec la phase aqueuse dans la pâte de laitier, sont limitées à trois: C-S-H, C_2ASH_8 et C_4AH_n ($n=13+19$) [6].

le degré d'hydratation du laitier en fonction du temps, peut être mesuré par différentes méthodes :

-dissolution des produits hydratés dans une solution d'acide organique.

-détermination de l'eau non évaporée.

-mesure de la chaleur d'hydratation.

2.1.2.5 UTILISATION DU LAITIER GRANULE

2.1.2.5.1 LE LAITIER BOULETE

Le laitier vitrifié bouleté est le plus souvent mélangé avec des granulats. Il est ainsi utilisé pour le traitement des graves et des sables destinés à la confection des assises de chaussées.

2.1.2.5.2 LE LAITIER VITRIFIE

2.1.2.5.2.1 UTILISATION COMME SABLE

Le sable de laitier granulé est extrêmement intéressant du fait de son hydraulité naturelle. Celle-ci donne des accroissements de résistance importants.

Afin de rendre plus actif le sable de laitier granulé, en permettant des liaisons épitaxiales avec le ciment et accélérant le durcissement, il n'est nullement nécessaire de le concasser. Il suffit de modifier l'état de surface des grains par "attrition" (frottement réciproque), ce qui décape la surface en éliminant le film de gel aluminosilicique qui entoure le grain. On peut aussi éliminer ce film isolant par des moyens chimiques, telles que des solutions très diluées de soude (NaOH) ou de potasse (KOH), dissoute dans l'eau de gâchage à raison de 0.5% du poids du ciment [7].

2.1.2.5.2.2 UTILISATION EN CIMENTERIE

Le laitier granulé de hauts fourneaux utilisé en cimenterie doit avoir la composition suivante [7]:

SiO ₂ -----	29 à 36 %
Al ₂ O ₃ -----	13 à 19 %
CaO -----	40 à 48 %
MgO -----	< 6 %
FeO -----	< 4 %
MnO -----	< 2 %
Soufre des sulfures ,exprimé en S -----	< 2 %
Soufre des sulfates ,exprimé en SO ₃ -----	< 0.5 %

Notons que le laitier granulé destiné principalement à la cimenterie et qui est utilisé comme sable pour le béton d'une manière efficace, est un laitier dans lequel le rapport CaO/SiO₂ est compris entre 1.30 et 1.50.

Indiquons, toutefois, qu'il est possible d'utiliser, comme agrégats, des laitiers granulés contenant plus de 15% de MgO, à condition de satisfaire la règle suivante de Parker et Nurse [7]:

-Si le laitier granulé contient moins de 15 % de magnésie MgO ,il est à la fois bon comme sable et utilisable en cimenterie, à condition de satisfaire la règle pondérale suivante :

$$\% \text{ CaO} > 1.20(\% \text{ SiO}_2) + 0.39(\% \text{ Al}_2\text{O}_3) + 1.75(\% \text{ S}) - 0.80(\% \text{ MgO})$$

-Si le laitier contient plus de magnésie MgO, il peut encore servir à condition de satisfaire la règle pondérale

suivante:

$$\% \text{CaO} > 0.93(\% \text{SiO}_2) + 0.95(\% \text{Al}_2\text{O}_3) + 1.75(\% \text{S})$$

Il est à noter que le soufre dans ces laitiers se trouve sous forme de sulfure de calcium .

2.2 BETON EXPANSE

2.2.1 INTRODUCTION

Les bétons aérés, produits par incorporation de gaz ou d'air, sont de deux types, classés selon le mode de fabrication. Le béton aéré n'est pas, comme son appellation l'indique, un béton mais plutôt un mortier; Il n'est effectivement formé que de liants et de matériaux siliceux. Les deux types de béton expansé sont les suivants:

1-Béton gaz : dans lequel le gaz est formé par réaction chimique à l'intérieur de la masse durant la phase liquide ou plastique [10]. Les blocs de béton ainsi formés sont traités dans des chambres à haute pression sous une ambiance saturée de vapeur d'eau, opération appelée autoclavage .

2-Béton mousse : l'air y est introduit par un appareil générateur d'air. C'est un béton produit in-situ utilisé comme matériau d'isolation, sa prise se fait à l'air libre et n'est jamais autoclavé [10].

2.2.2 BETON AERE AUTOCLAVE

2.2.2.1 HISTORIQUE.

Les principes de base de fabrication du béton aéré sont connus et compris depuis le début de ce siècle. Mais la

production commerciale n'a commencé qu'en 1929, quand une usine, en Suède, commença à produire ce matériau en utilisant un procédé basé sur les travaux du chercheur Axel Erikson. A partir de cette date, d'énormes progrès ont été enregistrés dans le développement du béton aéré. En Suède, c'est le matériau le plus utilisé dans tout type de construction. L'utilisation du béton aéré, de l'arctique à l'équateur, montra son adaptation à tout type de climat. A présent, aussi bien les pays développés ou en voie de développement fabriquent le béton aéré. Il est évident que l'utilisation du béton aéré présente des avantages économiques et techniques certains. Il est à noter, qu'en Suède, son pays d'origine, certaines conditions ont été particulièrement favorables à son développement. Premièrement, dans ce pays, il n'y a aucune production de briques comparables à celle de "English fletton Briques" qui produit de très grandes quantités de briques et à bas prix. Deuxièmement, le climat en Suède est suffisamment rude pour justifier l'utilisation d'un matériau ayant une bonne isolation thermique, ce dont est doté le béton aéré. Troisièmement, le bois, matériau traditionnel suédois, était devenu plus cher, favorisant ainsi l'utilisation du béton aéré qui possède la plupart des propriétés du bois. Il est aussi léger que le bois, il peut être scié, troué, vissé ou cloué. Il est toute fois moins résistant à la traction que le bois. Cet inconvénient est compensé par un grand avantage par rapport au bois; il est incombustible [10,11].

Des licences de compagnies Suédoises sont utilisées dans, environ, trente pays, mieux encore, quelques pays

travaillent indépendamment. En Grande Bretagne, treize usines produisent environ deux millions de mètres cubes de béton aéré annuellement, et l'U.R.S.S en fabrique 5 millions de mètres cubes par ans [11]. En Algérie, deux usines, seulement, fabriquent le béton aéré autoclavé, quand on sait que tout le sud de l'Algérie pourrait bénéficier des avantages de ce matériau, particulièrement, du point de vue isolation thermique.

2.2.2.2 DESCRIPTION ET MODE DE FABRICATION.

Le béton aéré autoclavé est un produit cellulaire uniforme comme le montre la figure (2-3), fabriqué à partir de matériaux siliceux (sable et/ou cendres volantes) et de liants (ciment, chaux et/ou laitier). La structure cellulaire, procurant une bonne isolation thermique, est obtenue par addition de la poudre d'aluminium dans le mélange qui réagit avec l'hydroxyde de calcium (formé lors de la prise du ciment ou de la chaux) pour produire des bulles d'hydrogène. Ce gaz s'échappe entièrement de la structure durcie avant que l'unité préfabriquée n'ait quitté l'usine, écartant tout risque d'incendie.

La nature du matériau siliceux utilisé est généralement déterminée par la couleur du produit fini, le sable broyé donne une coloration blanche au matériau tandis que les cendres volantes donne un matériau gris [12].

Le traitement à haute pression sous atmosphère saturée de vapeur d'eau (autoclavage) est nécessaire à la fabrication d'un béton aéré de première qualité quand le ciment est utilisé

comme liant, et absolument nécessaire quand c'est la chaux qui est utilisée [11].

La formation de gaz peut être illustrée par l'équation suivante simplifiée. D'autres aluminates peuvent aussi se former [11,12]:

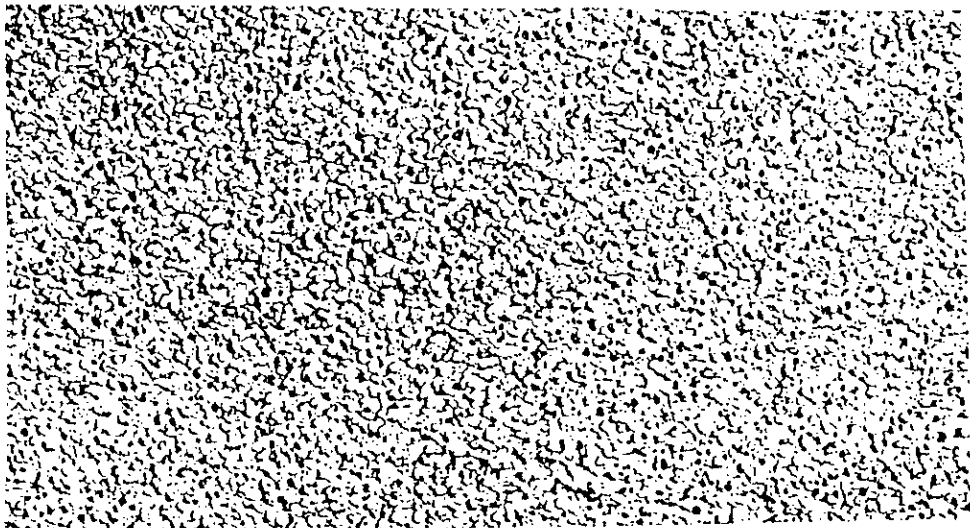
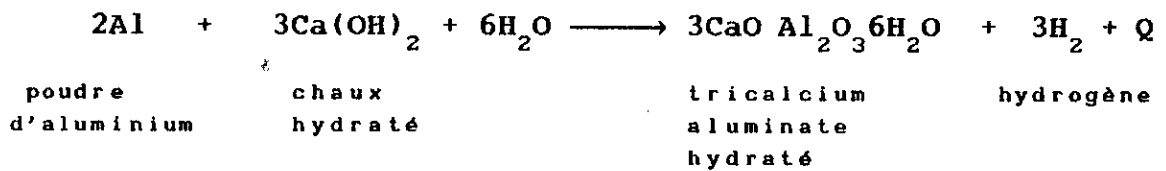


Figure 2-3: Coupe de béton cellulaire autoclavé

La poudre d'aluminium peut être remplacée par de la poudre de zinc, qui donnera lieu à la formation du zincate de calcium et de l'hydrogène.

En plus du liant, du matériau siliceux et de la poudre d'aluminium, d'autres ingrédients sont ajoutés pour

diverses raisons. Par exemple, du sucre est parfois ajouté afin de permettre la solubilité totale de la chaux. Les solutions alcalines, comme la soude caustique sont ajoutées afin d'accélérer la prise et initier la réaction entre la poudre d'aluminium et la chaux.

La production commerciale des unités préfabriquées est assez élaborée en pratique. Le sable, ou autre matériau siliceux, est d'abord passé dans un broyeur à boulets jusqu'à atteindre la finesse désirée. Certaines firmes utilisent les cendres volantes à la place du sable, évitant ainsi le broyage. Si celui-ci s'avère nécessaire, il peut se faire par voie sèche, mais, le plus souvent, le broyage par voie humide est employé. Le sable ainsi broyé et mouillé est introduit dans le malaxeur, le ciment ou autre liant, ainsi que les autres ingrédients sont ensuite ajoutés. La gâchée ainsi obtenue est coulée dans un moule, rempli partiellement [11].

Dans le cas d'un broyage par voie sèche la procédure est la même sauf que le mélange sec de sable et de liant est introduit dans le malaxeur en même temps que l'eau et les autres ingrédients [13].

Le mélange rempli entièrement le moule après 5 à 20 minutes de gonflement. La vitesse d'expansion dépend de la composition du mélange [11].

Après 5 à 6 heures, la prise de la coulée sera suffisante pour que celle-ci soit découpée en unités de dimensions désirées. Des fils de fer parallèles sont enfoncés dans la coulée et découpent ainsi la masse. Cette opération se

fait suivant deux directions [11].

Ces moules sont, ensuite, transportés à l'autoclave et introduits pour le traitement du béton.

Les autoclaves sont, souvent, de dimensions de 2.4 m de diamètre et plus de 24 m de long, et peuvent prendre 12 moules suivant quatre rangées superposées [11].

Le béton aéré, à l'intérieur des moules, est maintenu dans l'autoclave pendant 10 à 18 heures, sous une pression de 9 à 15 atmosphères correspondant à une température de 180 à 210 °c. Après ce cycle de traitement, les moules sont retirés, et on procède au démoulage, le produit subit des tests physico-mécaniques puis il est emballé [13].

La figure 2-4 montre le diagramme de fabrication du béton expansé autoclavé.

2.2.3 PROPRIETES DU BETON AERE AUTOCLAVE.

- DENSITE ET RESISTANCE.

Le béton aéré autoclavé a une densité comprise entre 500 et 1000 Kg/m³. Le tableau (2-2) donne la résistance à la compression en fonction de la densité. Le poids réduit du béton expansé autoclavé, permet de faire des économies aussi bien en ce qui concerne l'ossature que les fondations d'une construction.

- MODULE D'ELASTICITE

Le module d'élasticité est d'environ 1/10^{ème} de celui du béton dense. Des valeurs du module d'élasticité sont données

en fonction de la densité dans le tableau (2-2).

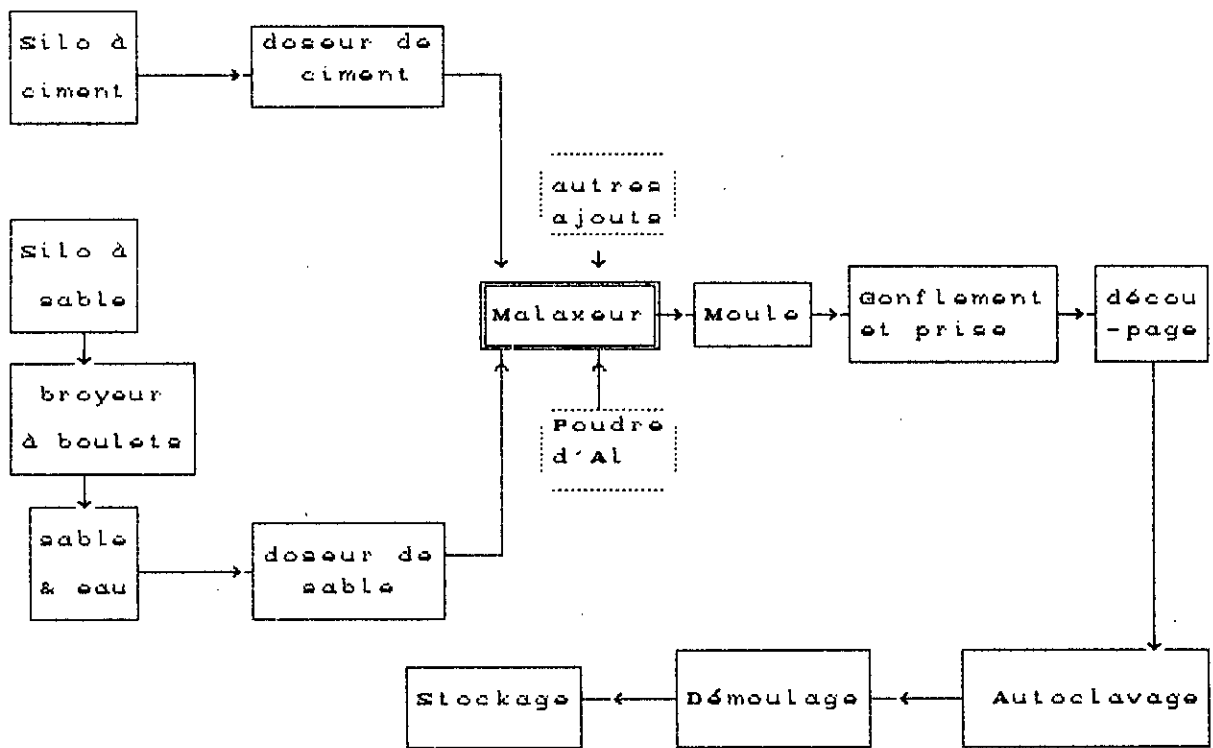


Figure 2-4: Diagramme de fabrication du béton aéré [13]

Densité à sec [Kg/m ³]	Résistance à la compression [MPa]	Module d'élasticité [MPa]
500	2.8	1400
600	3.5	1800
750	3.5	2800
800	4.2	3200
830	4.5	3200
880	6.0	3200

Tableau 2-2: Résistance et module d'élasticité du béton aéré autoclavé [12].

- LE RETRAIT

Le béton expansé, produit avec prise à air ambiant, a un retrait très élevé. Cependant, si le même produit est traité sous une atmosphère saturée de vapeur d'eau à hautes pression et température (autoclavage), un changement fondamental a lieu dans la constitution minérale, réduisant ainsi, le retrait du 1/4 parfois du 1/5 de ce qu'il devrait être avec une prise à air ambiant [14].

- ISOLATION THERMIQUE

La faible conductivité thermique de ce matériau est sa plus importante propriété. Elle est approximativement proportionnelle à la densité comme le montre la courbe de la figure 2-5 [11]. Le tableau 2-3 compare la conductivité de quelques bétons légers avec celle d'un béton dense.

- RESISTANCE AU FEU.

Un mur, de 100mm d'épaisseur, constitué de blocs de béton expansé autoclavé, sans enduit, a une résistance au feu dépassant les deux heures s'il est sollicité par des charges verticales, et quatre heures s'il ne l'est pas. Ces performances peuvent être améliorées par l'application d'enduit adéquat tel que le plâtre de vermiculite de gypse [15].

- ISOLATION ET ABSORPTION PHONIQUE.

L'isolation phonique d'une cloison de béton aéré dépend de la densité et de l'épaisseur. Le plâtrage des deux

côtés du mur améliore son isolation. L'absorption phonique est plus élevée que celle du béton dense mais la différence est peu significative si les surfaces sont plâtrées [12].

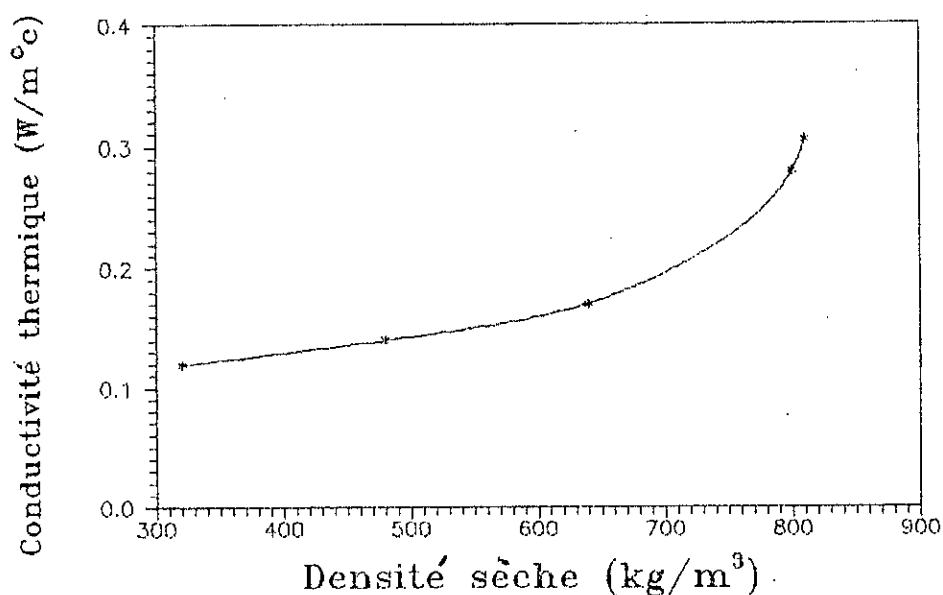


Figure 2-5: Relation entre la densité et la conductivité thermique

Matériau	Densité à sec [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/m °C]
Béton aéré	320	0.11
Béton aéré	480	0.14
Béton aéré	640	0.17
Béton aéré	800	0.23
Béton ordinaire	2100	1.30

Tableau 2-3: Conductivité thermique du béton aéré [10].

- RESISTANCE AU GEL.

Le béton aéré, est sujet à quelques limitations d'utilisation au niveau de la couche isolante du rez de chaussée. Le matériau est considéré résistant au gel [11,12].

- DECOUPAGE ET FIXATION.

Le matériau est aisément scié et percé avec des outils à mains, il présente les mêmes possibilités de façonnage que le bois [12].

- AUTRES PROPRIETES.

-Résistivité à la vapeur: 60 MNs/gm.

-Capacité spécifique de chaleur: 1.0 Kj/Kg°C.

-Coefficient de dilatation thermique: $8.10^{-6}/^{\circ}\text{c}$.

2.2.4 COMPOSITION CHIMIQUE DU BETON EXPANSE AUTOCLAVE.

Les produits de réaction du béton expansé autoclavé sont les hydrosilicates de calcium. Le système $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ a beaucoup de phases instables, causées par la variation de la pression et de la température à l'intérieur de l'autoclave [16].

Taylor [17] a classé les groupes d'hydrosilicates comme suit:

1- Les combinaisons proches à la walastonite, xonolite, hillebrandite et la girolite.

2- Les tobermorites.

3- Les combinaisons proches au $\gamma\text{-C}_2\text{S}$.

4- Autres hydrosilicates.

La xonolite C_6S_6H $Ca_6(Si_6O_{17})(OH)_2$ est obtenue par traitement thermique à une température comprise entre 150 et 400 °c, à partir d'un mélange $CaO/SiO_2 = 1$ [18].

L'hillebrandite C_2SH $[Ca_{12}Si_6O_{17}(OH)_4]$ peut être obtenu à partir d'un mélange de chaux et de silice à une température comprise entre 150 et 250°c en autoclave [16].

L'hillebrandite est stable à une température plus basse avec un excès de $Ca(OH)_2$ [16].

Kalousek et Nelson [19] affirment que, la formation de gyrolite par autoclavage d'une pâte de $\gamma-C_2S$ et de quartz microcristallin ayant pour rapport $CaO/SiO_2 = 0.83$, a lieu après sept jours à une température de 200°c. Selon Leusmann et Mortel [20] la réaction de $Ca(OH)_2$ et SiO_2 avec un faible rapport molaire CaO/SiO_2 donne de la gyrolite après 48 heures et à 135°c.

Les principaux produits de réaction sont, cependant, les tobermorites $(Ca_5(Si_3O_9H).4H_2O)$ [21], se formant à des températures comprises entre 120 et 140 °c à partir d'un mélange ayant pour rapport compris entre 1 et 5/4 [22]. Ce groupe peut se présenter sous forme cristalline, semi-cristalline et amorphe.

Selon le rapport moléculaire C/S, on définit deux types de tobermorites semi-cristallisées, le C-S-H(I) et le C-S-H(II). Le premier a un rapport C/S inférieur à 1.5 et le second environ égal 1.5 [17].

Une phase intermédiaire C-S-H, similaire à la "phase

Z" d'Asserson [23], se forme quand $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ou $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ réagit avec la silice (rapport molaire $\text{CaO/SiO}_2 = 0.28+0.5$) pendant huit heures à 190 °c. Cette phase intermédiaire C-S-H se transforme en gyrolite si on prolonge le traitement hydrothermique [24].

2.2.5 PROCESSUS DE DURCISSEMENT

Il est généralement admis que la réaction chaux-quartz-eau continue après la formation initiale de C-S-H de rapport C/S élevé, celui-ci réagit progressivement avec plus de silice. On peut supposer qu'à tout stade de cette réaction, il y a une compétition pour les ions Ca^{++} entre OH^- et les ions silicates. La diminution du rapport C/S des C-S-H se produit de différentes façons où les deux extrêmes sont, une totale dissolution et une précipitation des particules. Les ions OH^- sont graduellement remplacés par les ions silicates [25].

Le durcissement se produit dans l'autoclave à une température variable entre 174 et 203 °c sous une pression comprise entre 9 et 16 bars.

Ce traitement hydrothermique comprend trois stades, comme indiqué sur la figure 2-6.

-a Elévation de la température et de la pression jusqu'à une grandeur désirée.

-b Palier isothermique.

-c Refroidissement.

température (°c)

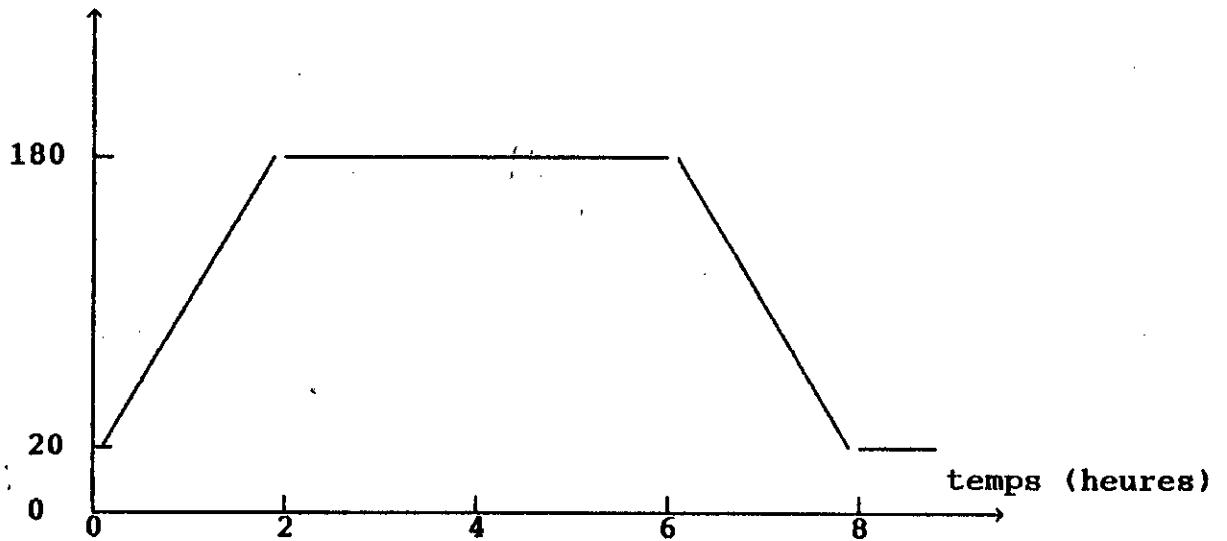


Figure 2-6: Allure de la courbe de traitement thermique

Au cours de la première phase, la pression dans les pores, dissout entièrement l'hydroxyde de calcium et partiellement la silice. Les ions OH^- obtenus par dissolution de l'hydroxyde de calcium créent un milieu alcalin qui contribue à la dissolution de la silice qui, ensuite, entre en interaction avec les ions Ca^{++} [16].

Au cours du second stade, la saturation de la solution en hydroxyde de calcium et la faible vitesse de dissolution de la silice, favorisent la formation de l'hydrosilicate de calcium de type basique C-S-H (I). La diminution progressive de la dissolution de l'hydroxyde de calcium, réduit sa concentration dans la solution, alors que celle de la silice augmente. Il se forme, ainsi, un hydrosilicate de calcium moins basique du type C-S-H (II). les hydrosilicates faiblement basiques sont

caractérisés par leurs résistances élevées (par rapport aux hydrosilicates fortement basiques) [16].

La quantité de formation de l'hydrosilicate de calcium et sa basicité dépendent du rapport des composants du liant, de la finesse de mouture, de la silice, de la température et de la durée du traitement isothermique [16].

L'augmentation de la durée du traitement isothermique et de la concentration de la silice dans la solution, entraînent l'hydrolyse des hydrosilicates fortement basiques, formant ainsi des hydrosilicates faiblement basiques [16].

Durant le refroidissement, qui est le stade final, l'évaporation de l'eau contenue dans le béton provoque une augmentation de la concentration de la solution en Ca(OH)_2 entraînant une formation supplémentaire d'hydrosilicates fortement basiques. Une certaine quantité de Ca(OH)_2 peut rester libre à la fin du traitement. Le durcissement s'effectuera à l'air libre par carbonatation de Ca(OH)_2 sous l'action du gaz carbonique [16].

2.2.6 RELATION ENTRE LES PROPRIETES STRUCTURELLES ET MECANIQUES.

Comme il a été examiné précédemment, les produits de réaction dans les bétons expansés autoclavés sont essentiellement les hydrosilicates de calcium. Une caractéristique importante de ces produits a été définie. Il s'agit de la cristallinité, qui est le rapport entre la quantité de tobermorite 11.3 \AA formée et la quantité totale des

hydrosilicates de calcium.

Il a été prouvé que le retrait décroît avec l'augmentation de la cristallinité, tandis que la résistance mécanique atteint un optimum après quoi elle décroît comme indiqué sur les figures 2-7 et 2-8 [26].

Il a été montré que le retrait était indépendant de la quantité totale de C-S-H tandis que la résistance augmente avec l'accroissement de la quantité de C-S-H [26].

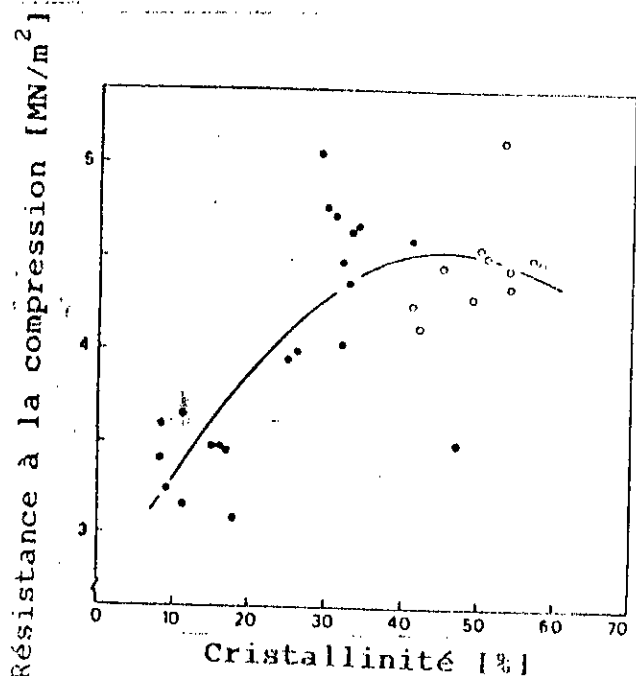


Fig 2-7: Relation entre la cristallinité et la résistance à la compression

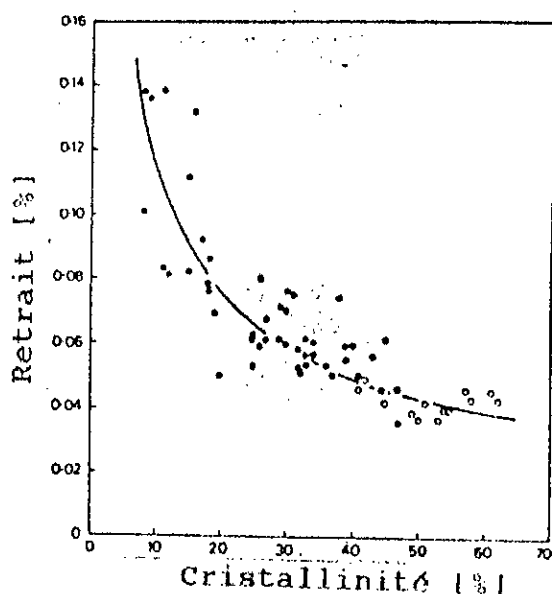


Fig 2-8: Relation entre la cristallinité et le retrait.

La résistance du béton cellulaire autoclavé dépend principalement de la porosité totale et de la distribution de la taille des pores. La résistance à la compression décroît quand la porosité augmente. Schiller [27] a indiqué qu'il existe une porosité critique pour laquelle la résistance à la compression est nulle. Cette porosité est d'environ 92% . La résistance à la compression décroît aussi quand la proportion des pores les plus larges augmente [27]. La meilleure représentation de la résistance à la compression en fonction de la porosité est celle donnée par la relation (1) rapportée par Bal'Shin [28], ou celle (2) énoncée par Ryshkewitch [29].

$$R_c = R_{c0} (1-\epsilon)^m \quad [1]$$

$$R_c = R_{c0} e^{-b\epsilon} \quad [2]$$

où:

R_c : résistance du matériau poreux

R_{c0} : résistance théorique à la compression du matériau non poreux.

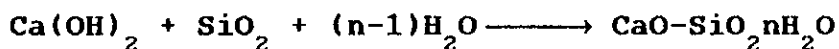
ϵ : porosité.

m et b sont des constantes empiriques.

2.2.7 PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUE DE L'AUTOCLAVAGE.

A l'air ambiant, le durcissement du mélange chaux-silice est très lent. Les résistances mécaniques ainsi obtenues sont faibles (de 1 à 2 MPa). Mais en présence d'une vapeur d'eau et à une température supérieure à 170 °c, la silice devient chimiquement active et réagit avec la chaux, suivant la

réaction ci- dessous [16].



L'élévation de la température accroît la dissolution de la silice et donc la vitesse de réaction [16], comme l'indique la figure 2-10.

Les ions hydroxydes qui se forment après dissolution de Ca(OH)_2 dans l'eau, entrent en réaction chimique en premier lieu en hydratant les molécules SiO_2 rendant possible une réaction ultérieure avec l'ion calcium Ca^{++} , donnant naissance à l'hydrosilicate de calcium.

Le mécanisme de formation des matériaux autoclavés peut être présenté comme l'ensemble de deux processus [16]:

- Processus destructif, comprenant la réaction chimique entre les composants initiaux et la recristallisation des nouveaux produits.

- Processus de formation d'une nouvelle structure.

La résistance mécanique des matériaux autoclavés, dépend non seulement de la composition chimique des produits nouvellement obtenus mais aussi du régime de traitement thermique.

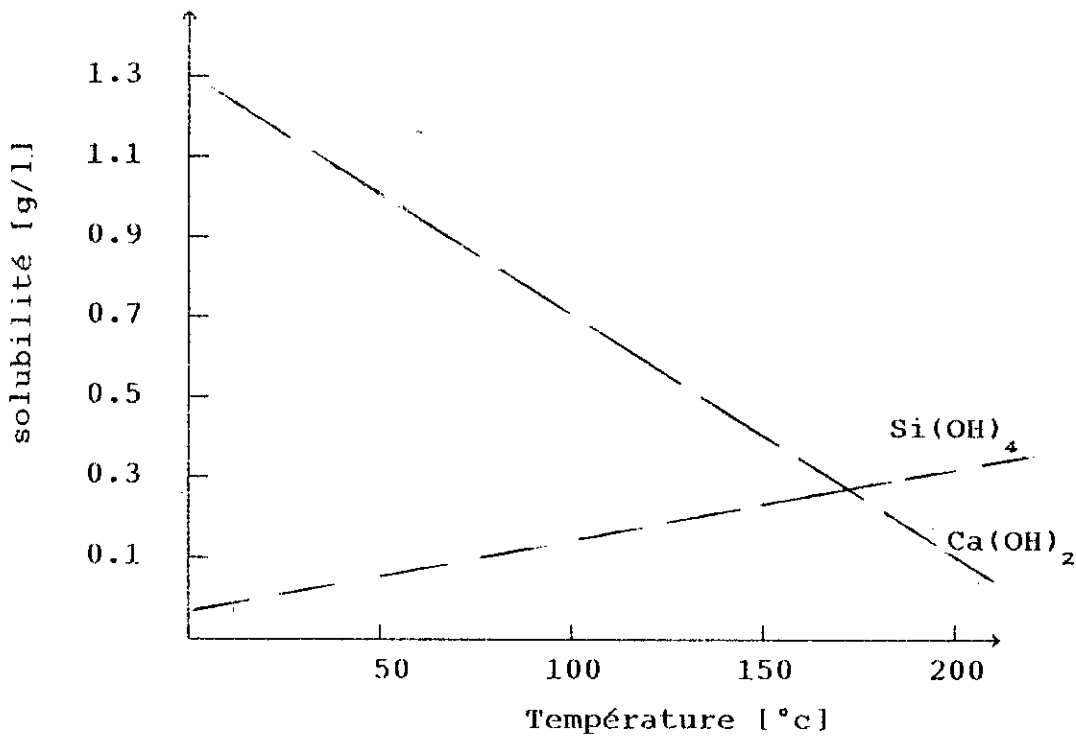


Figure 2-10: Solubilité de la chaux et de la silice en fonction de la température

2.2.8 INFLUENCE DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'AUTOCLAVAGE SUR LE BETON EXPANSE AUTOCLAVE.

L'évacuation de l'air, de l'autoclave, à une température d'environ 95 °c permet de saturer l'intérieur de vapeur d'eau, malgré la température élevée. En absence de vapeur d'eau, le matériau sèche et entraîne de ce fait l'arrêt des réactions chimiques [30].

L'étude de l'influence de la pression sur la résistance a révélé l'existence d'une valeur optimale aux environs de 1.3 MPa [30].

L'augmentation de la durée du palier isothermique permet d'augmenter la résistance. Le traitement thermique au

delà d'une durée optimale entraîne une augmentation des cristaux rendant le matériau fragile, diminuant, ainsi, la résistance mécanique [31].

L'augmentation de la durée de traitement à une pression de 0.9 MPa assure un accroissement de la résistance, tandis qu'à une pression de 5 Mpa, le prolongement du traitement isothermique influe négativement sur la résistance. L'augmentation rapide de la pression accroît la résistance de 30 à 40% . A 1.6 Mpa, après une augmentation rapide de la pression (45 mn) suivie d'une dépression lente (4 à 5 heures) permet d'éviter le maintien isothermique sans chute de la résistance mécanique [31].

La diminution du temps de chauffage et l'augmentation du temps de refroidissement influent positivement sur les propriétés mécaniques [31].

2.2.9 FABRICATION ET PROPRIETES DES BETONS CELLULAIRES AUTOCLAVES EN ALGERIE.

L'Algérie dispose de deux unités de béton cellulaire, construites par la firme "SIPOREX", le schéma de fonctionnement est représenté sur la figure (2-4).

Le béton cellulaire autoclavé produit en Algérie a une masse volumique variant entre 500 et 600 Kg/m³. La résistance mécanique quand à elle, varie de 3 à 3.5 MPa.

Les résistances mécaniques à la compression et les masses volumiques apparentes du béton cellulaire produit par les

unités d'Oum-Teboul et Meftah sont présentées dans le tableau 2-9.

Masse Volumique [Kg/m ³]	résistance à la compression "Oum-Teboul" [Mpa]	résistance à la compression " Meftah " [Mpa]
499	-	3.34
506	-	3.45
518	-	3.30
520	-	3.51
560	3.12	-
558	3.05	-
590	3.35	-
595	3.40	-

Tableau 2-4: Masse volumique et résistance à la compression du béton cellulaire des unités Algériennes.

Notons que les essais ont été effectués sur des cubes (10×10×10)cm³.

2.3 BUT ET JUSTIFICATION DE LA RECHERCHE.

La consommation du ciment Portland pour la fabrication du béton cellulaire constitue une demande supplémentaire sur ce liant, lequel est importé en devises fortes. Notre but est donc de substituer le ciment par d'autres liants (chaux et laitier) disponibles en quantités considérables. Nous essayerons, aussi, d'optimiser l'utilisation de la poudre d'aluminium également

importée.

Afin de mieux connaître les propriétés du béton cellulaire autoclavé, nous étudierons d'autres paramètres influençant la résistance ou la densité de ce matériau de construction.

Nous orienterons notre étude vers les points suivants:

- a* - Influence de la composition chaux-laitier sur les propriétés physico-mécaniques.
- b* - Influence du rapport E/C sur les propriétés mécaniques.
- c* - Influence de la S.S.B. à fluidité constante sur les propriétés mécaniques et physiques.
- d* - Influence du pourcentage d'aluminium.
- e* - Influence de la finesse de la poudre d'aluminium sur le gonflement.
- f* - Influence de la surface spécifique Blaine du laitier sur les propriétés mécaniques.
- g* - Influence du pourcentage de soude (NaOH) sur les propriétés physico-mécaniques.
- h* - Influence du palier isothermique sur la résistance mécanique.
- i* - Influence de la température sur la résistance mécanique.

CHAPITRE TROISIEME: EXPERIMENTATION

CHAPITRE TROISIEME

3. EXPERIMENTATION

3.1 LE LAITIER DE HAUT FOURNEAU D'EL-HADJAR

3.1.1 DESCRIPTION

Le complexe sidérurgique d'El-Hadjar comporte deux hauts fourneaux, un de conception Soviétique, l'autre plus récent de conception Française, produisant 600000 t/an de laitier.

Le laitier d'El-Hadjar se présente sous deux aspects selon le mode de refroidissement adopté:

-Le laitier est coulé dans un bassin et refroidi à l'air ambiant prenant, ainsi, l'aspect d'une roche plus ou moins fracturée pouvant être utilisée, après concassage, comme granulats dans les bétons, routes etc ...

- Le laitier est vitrifié brutalement par un courant d'eau et transformé en grains déchiquetés de dimensions inférieures à 1.6mm, utilisé, après broyage comme liant hydraulique.

3.1.2 COMPOSITION CHIMIQUE DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR

L'analyse chimique de ce laitier a été faite par diffraction-X au laboratoire de chimie de l'U.R.E.G (Boumèrdès). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3-1.

composition chimique	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO
teneur [%]	42.21	42.22	5.85	4.75	1.90	1.54	0.47	0.13	1.80

Tableau 3-1: Composition chimique du laitier

Les teneurs en oxydes basiques (CaO et MgO) et en oxydes acides (SiO₂ et Al₂O₃) sont sensiblement égales. Ainsi, le laitier d'El-Hadjar se trouve à la limite des laitiers basiques, il est considéré de ce fait comme un laitier de qualité moyenne.

Le manganèse, dosé en MnO, étant inférieur à 2%, évite une désagrégation ultérieure du laitier d'El-Hadjar, selon les travaux de l'Ingénieur Luxembourgeois Dubuissom [7].

3.1.3 ANALYSE PHYSIQUE

Le laitier granulé est vitrifié à 98%, sa densité est relativement élevée environ 1.20. La courbe granulométrique est donnée à la figure 3-1.

3.1.4 UTILISATION DU LAITIER GRANULE D'EL-HADJAR

Actuellement, le laitier granulé est principalement utilisé dans la fabrication des ciments, ajouté uniquement à 20% à la cimenterie de Hadjr-Soud (wilaya d'Annaba). Il est également utilisé dans la construction et le renforcement des routes (exemple: autoroute Annaba-Berrahal 30 km).

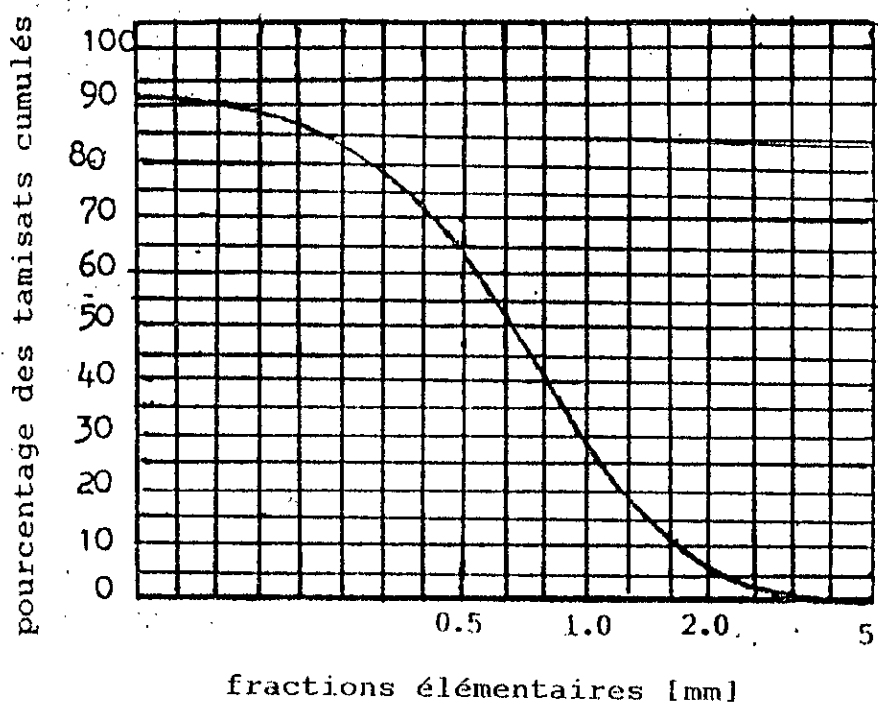


Figure 3-1: Courbe granulométrique du laitier

3.2 MATIERES PREMIERES

3.2.1 LE LAITIER

Le laitier utilisé est un laitier granulé provenant du complexe sidérurgique (SIDER) d'El-Hadjar (Annaba) avec un taux d'humidité d'environ 20%. Il a été séché puis broyé à différentes finesses de mouture, 1500, 2000 et 2500 cm^2/g . Le broyage a été effectué dans un broyeur à boulets. Le séparateur magnétique a été utilisé pour extraire, du laitier, l'excédent de fer provenant de la fonte. Les analyses chimiques effectuées au laboratoire de l'U.R.E.G. (Boumèrdès) ont donné les résultats suivants présentés au tableau 3-2:

Composant chimique	Teneur [%]
SiO ₂	42.21
CaO	42.22
Al ₂ O ₃	5.85
MgO	4.75

Tableau 3-2: Composition chimique du laitier d'El-Hadjar

Les différentes valeurs du module hydraulique sont:

$$i = \frac{C+M+2/3A}{S + 1/3 A} = 1.15$$

aux USA. Etant supérieur à 1, il est considéré comme étant un bon laitier dans ce pays.

$$i = \frac{C + M}{S + A} = 0.98$$

en URSS, qui doit être inférieur à 0.9 car S est compris entre 37 et 46 %. Il est considéré de qualité moyenne dans ce pays.

$$i = \frac{C + M + A}{S} = 1.25$$

en RFA. Etant inférieur à 1.4, il est considéré de qualité médiocre.

3.2.2 LA CHAUX

La chaux est obtenue par la cuisson du calcaire à une température supérieure à 1000°C. La cuisson décompose le carbonate de calcium, constituant principal du calcaire, pour libérer le gaz carbonique, et laisser la chaux vive (CaO), qui se présente sous forme d'une poudre blanche possédant les propriétés d'un liant [32].

La propriété de la chaux de faire prise, où hydraulité, provient du fait que le calcaire utilisé contient une certaine proportion d'argile, qui par cuisson, donne naissance au silicate et à l'aluminate de chaux. La chaux pure où chaux grasse, ne fait pas prise avec l'eau, mais durcit lentement à l'air, par absorption du gaz carbonique, et reconstitution d'un carbonate de calcium [32].

La chaux hydraulique utilisée dans cette recherche a une masse volumique d'environ 3 g/cm³ et une surface spécifique Blaine égale à 3000 cm²/g.

3.2.3 LA POUDRE D'ALUMINIUM

La poudre d'aluminium est utilisée comme générateur de gaz. Elle a été importée de Grande Bretagne. Nous avons utilisé deux sortes de poudre d'aluminium, l'une de mouture très fine et l'autre se présente sous forme de grains déchiquetés de dimensions inférieures à 1 mm.

3.2.4 LA SOUDE CAUSTIQUE

La soude caustique utilisée se présente sous forme de pastilles qui sont dissoutes dans l'eau de gâchage avant de la verser dans le malaxeur. Elle est utilisée comme accélérateur de prise, afin de réduire le temps de stockage du béton frais.

3.3 EQUIPEMENTS D'ESSAIS

L'étude expérimentale entreprise a nécessité l'utilisation des équipements suivants:

- Broyeur à boulets
- Séparateur magnétique
- Densimètre Le Chatelier
- Appareil de Blaine
- Malaxeur de capacité 2 litres
- Autoclave verticale de laboratoire
- Etuve
- Machine d'essai de flexion
- Machine hydraulique de compression

3.3.1 BROEUR A BOULETS

Il est composé d'un tambour rotatif, à l'intérieur duquel, des boules, de différents diamètres, effectuent le broyage du grain se trouvant entre deux boules. Sa capacité est de 2 kg.

3.3.2 DENSIMETRE LE CHATELIER

Cet appareil sert à mesurer la masse volumique des poudres. Le principe consiste à remplir le récipient de benzène jusqu'à un niveau bien déterminé puis on introduit, progressivement, 60g du matériau poudreux et on relève le volume de benzène déplacé, correspondant au volume absolu des 60g de matériau. Le récipient est partiellement immergé dans un bain thermostatique afin de garder la température constante aux environs de 20 °c. La masse volumique se détermine comme suit :

$$\rho = \frac{60}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]} \text{ où } V : \text{ volume de benzène déplacé [cm}^3\text{]}$$

La détermination de la masse volumique du matériau est nécessaire à l'évaluation de la surface spécifique Blaine.

3.3.3 APPAREIL DE BLAINE

La surface spécifique Blaine est définie, comme étant la surface totale des grains (exprimée en cm²) contenue dans un gramme de matériau poudreux.

La surface spécifique Blaine détermine la finesse de mouture du matériau. Elle est déterminée grâce à un perméabilimètre. Le principe consiste à mesurer le temps de passage d'une quantité d'air à travers un lit de poudre.

La surface spécifique Blaine est donnée par la formule suivante:

$$S = K \frac{\sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho (1-e) \sqrt{\eta}}$$

où : S : surface spécifique Blaine [cm^2/g].
K : constante de l'appareil.
 ρ : masse volumique absolue du matériau poudreux [g/cm^3].
 η : viscosité de l'air à la température de l'essai [poise].
e : porosité (dans le cas d'un essai à porosité constante $e=0.5$).
t : temps mesuré en secondes.

3.3.4 AUTOCLAVE

L'autoclave utilisé est vertical et a une capacité de 10 litres. Son diamètre est de 20 cm et à une hauteur de 50cm. L'autoclave peut supporter une pression de 21 bars à une température de 220 °c. Il comporte un thermorégulateur dont le rôle est de varier la vitesse de chauffage et de maintenir la température constante. Il comporte aussi un système de refroidissement avec la possibilité de varier le temps de refroidissement en changeant l'ouverture des volets d'admission d'air. La quantité d'eau introduite doit être supérieure à 1.5 litres.

3.4 MODE OPERATOIRE

Une fois les proportions des composants secs (laitier et chaux) déterminées, le mélange est introduit dans le malaxeur, qui est alors mis en marche pendant trois minutes. Après avoir dissout les pastilles de soude (NaOH) dans l'eau, on verse la solution dans le malaxeur, qui est maintenu en marche pendant une minute. L'aluminium est finalement ajoutée et le

malaxeur est remis en marche pendant deux minutes.

Le mélange, ainsi obtenu, est versé dans les moules préalablement nettoyés et huilés. Le remplissage est partiel afin de permettre à la masse de se gonfler sans débordement. Après environ cinq minutes les moules sont entièrement remplis. Le gonflement est dû à la réaction chimique entre l'aluminium (Al) et l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2).

Les échantillons sont conservés à l'air libre pendant 24 heures si la soude est utilisée, et 48 heures dans le cas contraire. Après ce temps le mélange aura suffisamment durci, rendant possible le démoulage. Les échantillons sont ensuite introduits dans l'autoclave. La durée de l'autoclavage dépend du régime de traitement désiré.

Après le traitement à l'autoclave, les échantillons sont retirés et séchés jusqu'à une masse constante. Ces éprouvettes sont, ensuite soumises aux différents essais mécaniques et physiques.

3.5 ESSAIS PHYSIQUES ET MECANIQUES

3.5.1 ESSAIS PHYSIQUES

3.5.1.1 MASSE VOLUMIQUE DES ECHANTILLONS

Le séchage des éprouvettes de béton cellulaire autoclavé se fait à une température n'excédant pas 70 °c. Elles sont ensuite laissées à l'air libre pendant plus de cinq heures, temps nécessaire pour qu'il y ait équilibre avec l'humidité extérieure. Les échantillons sont ensuite pesés. Du fait de

leurs formes géométriques prismatiques, le volume est déterminé simplement, en mesurant les côtés de ces parallélépipèdes rectangles. Ces deux informations, masse et volume, permettent l'évaluation de la masse volumique de ce béton cellulaire autoclavé comme suit.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$$

où: ρ : masse volumique du béton cellulaire durci $[\text{kg/m}^3]$
M : masse de l'éprouvette sèche [kg]
V : volume de l'éprouvette $[\text{m}^3]$

3.5.1.2 CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU

Le béton cellulaire autoclavé absorbe une partie de l'eau dans laquelle il est immergé. Le rapport entre la masse d'eau absorbée, pendant une durée déterminée, et la masse de béton à l'état sec, définit la capacité d'absorption de ce béton. Ce rapport est exprimé en pourcentage.

L'immersion des éprouvettes se fait dans une eau propre dont la température est comprise entre 18 et 20 °c, pendant au moins 48 heures. Les éprouvettes doivent rester dans l'eau jusqu'à ce que la différence entre deux pesées successives à 24 heures d'intervalle, soit inférieure à 0.2 % de la masse de l'éprouvette humide. Le coefficient d'absorption est déterminé par la relation suivante:

$$C_{ab} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad [\%]$$

C_{ab} : coefficient d'absorption

M_h : masse de l'éprouvette Après immersion [kg]

M_s : masse de l'éprouvette à l'état sec [kg]

3.5.1.3 COEFFICIENT DE RAMOLLISSEMENT

Le coefficient de ramollissement est le rapport entre les résistances à la compression à l'état saturé et à l'état sec du béton. Il est noté " C_{ram} ".

$$C_{ram} = \frac{R_{c \text{ hum}}}{R_{c \text{ sec}}}$$

Où: C_{ram} : coefficient de ramollissement.

$R_{c \text{ hum}}$: résistance à la compression à l'état saturé d'eau.

$R_{c \text{ sec}}$: résistance à la compression à l'état sec.

3.5.2 ESSAIS MECANIQUES

3.5.2.1 RESISTANCE A LA FLEXION

L'essai mécanique de flexion a été effectué sur une machine spécialement conçue pour deux essais, traction et flexion des éprouvettes 4x4x16 cm.

l'essai de flexion consiste à placer l'éprouvette dans un dispositif comprenant deux galets de support, distants de 100 mm, et un de chargement. Le diamètre des galets est de 10 mm (voir figure 3-2). Une fois l'éprouvette mise en place, la

machine est activée. Le chargement se fait de façon lente jusqu'à la rupture, à ce moment, la machine s'arrête automatiquement, permettant ainsi la lecture de la charge de rupture.

La résistance à la flexion est déterminée par la formule suivante:

$$R_f = \frac{3}{2} \frac{F_R \cdot L}{b \cdot h^2}$$

où:

R_f : contrainte de rupture [MPa]

F_R : charge de rupture [N]

b : largeur du prisme [mm]

h : hauteur du prisme [mm]

L : distance séparant les deux appuis [mm]

Notons que $1\text{N/mm}^2 = 1\text{MPa}$.

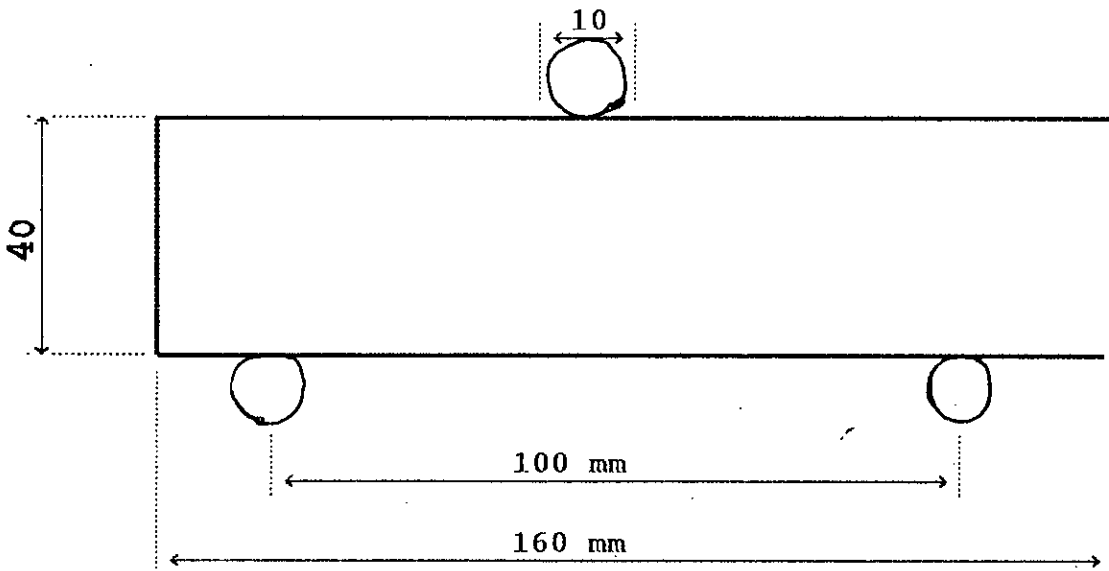


Figure 3-2: Schéma de l'essai de flexion

3.5.2.2 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La résistance mécanique à la compression est déterminée sur des éprouvettes ayant subies l'essai de flexion.

L'essai s'effectue avec une presse hydraulique. Le chargement se fait en intercalant des plaques métalliques carrées de 40 mm de côtés, entre les mâchoires de la presse et l'échantillon comme indiqué sur la figure 3-3. La résistance à la compression est donnée par la relation suivante:

$$R_c = \frac{F_R}{S}$$

Où:

R_c : résistance à la compression [MPa]

F_R : charge de rupture [N]

S : surface de chargement [mm²]

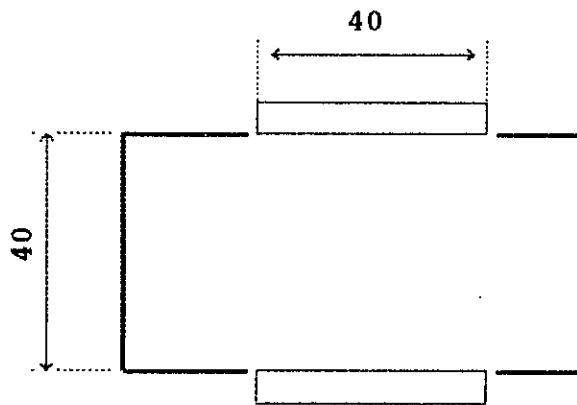


Figure 3-3: Schéma de l'essai de compression

3.6 ANALYSE PAR DIFFRACTION X

3.6.1 INTRODUCTION

La matière se présente sous forme cristalline où amorphe. Dans un cristal, les atomes sont disposés dans des réseaux tridimensionnels de différentes géométries. Les atomes occupent les nœuds des réseaux. Ces nœuds sont regroupés en familles de plans parallèles distants de "d".

Toute matière cristalline est caractérisée par cette distance entre plans réticulaires. Il est, donc, possible d'identifier une matière cristalline quand sa distance entre plans parallèles est connue.

L'analyse par diffraction X, consiste à faire cette détermination. En 1912 Vonlane montra que les plans réticulaires des cristaux pourraient diffracter un faisceau de rayons X, mais seulement sous une certaine incidence [33]. La diffraction est possible car les distances entre plans réticulaires sont de même ordre de grandeur que les longueurs d'ondes des rayons X.

Les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques de courte longueur d'onde, entre 0.1 et 10 Å.

En 1913, W.L.Bragg [33] trouva la relation:

$$2.d.\sin(\theta) = N.\lambda$$

Où:

d : distance entre plans réticulaires

θ : angle entre le faisceau et les plans réticulaires

λ : longueur d'onde du rayon X (λ doit être inférieure à 2.d)

N : nombre entier représentant l'ordre de la réflexion

La longueur d'onde du faisceau est déduite de la nature du métal de l'anticathode, quand à l'angle de diffraction θ , il est donné par le diffractomètre.

The American Society for Testing Materials (A.S.T.M) donne, pour chaque composant chimique, la distance réticulaire ainsi que l'intensité relative.

3.6.2 PREPARATION DE L'ECHANTILLON

Après écrasement à la presse, l'échantillon est broyé dans un récipient en porcelaine jusqu'à une finesse de mouture correspondant au tamisat 0.075 mm.

On charge cette poudre sur une plaque métallique puis on presse le tout à l'aide d'une plaque de verre. L'échantillon est mis ensuite dans l'accessoire rotatif du diffractomètre. Les différents paramètres de l'essai ont été fixés comme suit:

- L'anticathode est constituée de cuivre dont la longueur d'onde des rayons X émis est de $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$.
- La différence de potentiel est de 35 KV.
- L'intensité du courant est de 40 mA.
- La vitesse du goniomètre est de 4°/min.
- La vitesse d'enregistrement est de 1cm/min.

Huit échantillons ont été analysés. Il s'agit des échantillons relatifs aux expériences consistant à observer l'influence du régime de traitement sur les propriétés physiques et mécaniques du béton cellulaire autoclavé.

CHAPITRE QUATRIEME
INFLUENCE DES PARAMETRES THECHNOLOGIQUES SUR
LES PROPRIETES DU BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE

CHAPITRE QUATRIEME

4. INFLUENCE DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES SUR LES PROPRIETES DU BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE

4.1 COMPOSITION DU MELANGE

Les matériaux entrant dans la composition du mélange sont le laitier, la chaux, l'eau, l'aluminium et la soude.

Avant de déterminer la composition du mélange, nous voudrions faire une remarque concernant la formule (4-1) donnée par G.Gorbounov [4], qui permet d'évaluer la masse des composants secs:

$$M_{sec} = \frac{\rho_b}{K_c} \cdot V \quad [\text{kg}] \quad (4-1)$$

Où

ρ_b :masse volumique apparente du béton cellulaire à l'état sec [kg/m³]

K_c :coefficient d'augmentation du volume de béton $K_c=1.1$

V :volume du béton après prise [m³]

M_{sec} :masse des composants secs [kg]

La remarque porte sur le coefficient K_c , qui caractérise le gonflement du béton. Il dépend de la finesse de mouture de la poudre d'aluminium et de la fluidité du mélange. En effet, après utilisation de deux poudres d'aluminium de finesses différentes, une différence de gonflement importante a été constatée.

C'est la raison pour laquelle une divergence importante apparaissait entre la quantité de mélange calculée par cette formule et celle nécessaire pour remplir le moule.

Nous préconisons, avant la détermination de la masse des composants secs par la formule (4-1), d'évaluer d'abord, par un essai, dans un tube gradué, le coefficient K_c qui est le rapport entre le volume final, après gonflement, et le volume initial. Il est à noter que ce rapport dépend de la quantité d'aluminium et de la fluidité du mélange.

Pour une masse volumique désirée on détermine par la formule (4-2), le rapport K_c correspondant. Ceci permet d'évaluer expérimentalement la quantité d'aluminium nécessaire pour un gonflement donnant cette masse volumique.

$$K_c = \frac{1}{\rho_b \left(\frac{E/S}{\rho_e} + \sum \frac{\alpha_i}{\rho_{si}} \right)} \quad (4-2)$$

où: ρ_b :masse volumique du béton à l'état sec [kg/m³].

ρ_{si} :masse volumique du composant sec "i" [kg/m³]

α_i :pourcentage massique du composant "i" par rapport à la masse totale des composants secs

ρ_e :masse volumique de l'eau [kg/m³]

E/S :rapport massique entre l'eau et le composant solide

Une fois le rapport K_c déterminé par la formule (4-2) on calcule la masse des composants solides par la relation (4-1).

Après avoir déterminé la masse des composants secs, on calcule le volume d'eau correspondant au rapport E/S imposé. Il est à préciser que la fluidité du mélange est un paramètre influençant significativement le gonflement.

$$M_e = (E/S) \cdot M_s$$

Où M_e : masse d'eau [kg]

M_s : masse des composants solides

E/S : rapport massique entre l'eau et les composants solides

La masse d'aluminium dépend du pourcentage fixé lors d'une expérience donnée.

4.2 VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE ET DU POURCENTAGE DE LAITIER

4.2.1 MODE OPERATOIRE

Dans un premier temps des échantillons de béton autoclavé non expansé ont été confectionnés afin d'examiner, ultérieurement, l'influence du gonflement sur la résistance mécanique.

Pour cet essai un rapport E/S égal à 0.5 a été adopté. Le régime de traitement est de $2^h_{20}-4^h-2^h_{20}$ à une température de 170°C sous une pression de 8 bars. La masse des matériaux secs (chaux et laitier) est de 1000g. La composition du mélange est donnée dans le tableau 4-1.

Pourcentage de laitier	Pourcentage de chaux	masse de laitier [g]	masse de chaux [g]	volume d'eau [cm ³]
65	35	650	350	500
75	25	750	250	500
85	15	850	150	500

Tableau 4-1: quantités des constituants pour différentes compositions.

Les masses volumiques de la chaux et du laitier sont prises égales à 3 g/cm³, compte tenu du fait que les valeurs de ces masses volumiques sont proches l'une de l'autre. Il s'en suit la détermination de la masse totale des composants secs:

$$V = V_e + V_s = \frac{M_e}{\rho_e} + \frac{M_s}{\rho_s} = \frac{E/S \cdot M_s}{\rho_e} + \frac{M_s}{\rho_s} = M_s \left(\frac{E/S}{\rho_e} + \frac{1}{\rho_s} \right)$$

$$M_s = \frac{V}{\frac{E/S}{\rho_e} + \frac{1}{\rho_s}}$$

Où V: volume d'une coulée 4x4x16 cm

E/S: rapport massique, eau sur solide (0.5)

ρ_e : masse volumique de l'eau (1g/cm³)

ρ_s : masse volumique du composant solide (3g/cm³)

$$M_s = \frac{4 \times 4 \times 16 \times 10^{-6}}{\frac{0.5}{10^3} + \frac{1}{3 \times 10^3}} = 307 \text{g}$$

Comme pour chaque expérience nous avons testé trois

éprouvettes, la masse de matériaux secs (chaux et laitier) nécessaire pour une gâchée est de $3 \times 307 = 921\text{g}$. Compte tenu des pertes de matière qui pourraient se produire lors du coulage nous avons pris 1000g de matériaux secs.

4.2.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

Lors de cet essai, 27 échantillons ont été confectionnés et les résultats des tests sont donnés au tableau 4-2 (annexe A).

4.2.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

L'augmentation du pourcentage de laitier réduit les résistances mécaniques à la flexion et à la compression comme le montrent les figures 4-1 et 4-2. Cette décroissance est due au faible pouvoir hydraulique du laitier, comparé à celui de la chaux. Effectivement la formation d'hydrosilicates de calcium se trouve d'autant plus importante que le pourcentage de chaux est élevé.

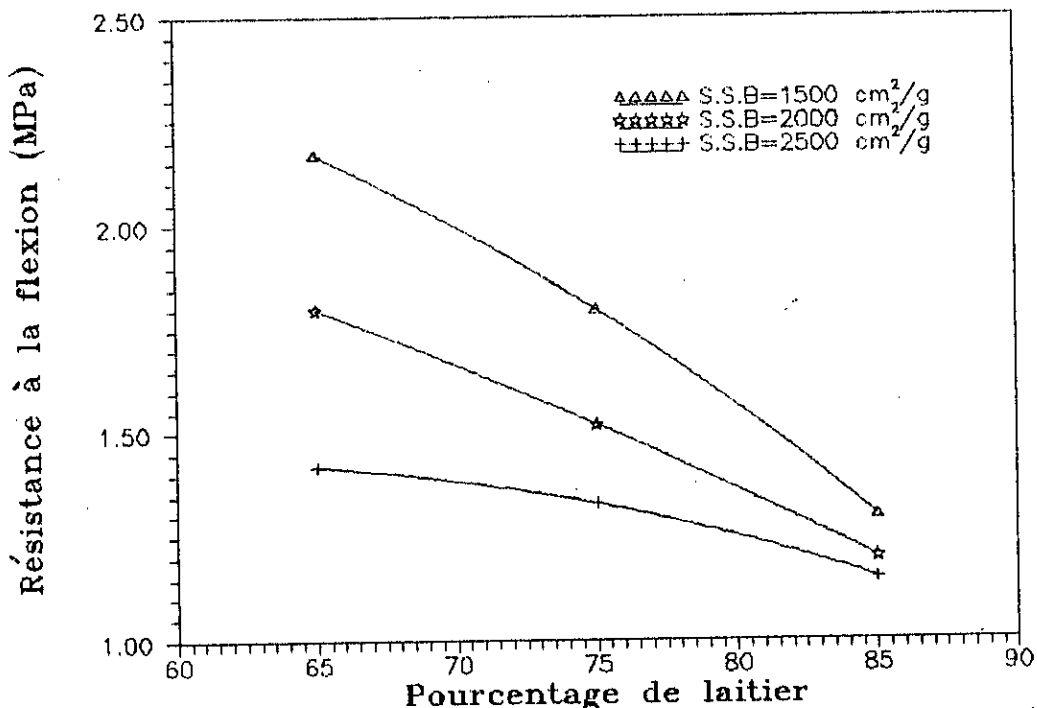


Fig. 4-1: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage de laitier

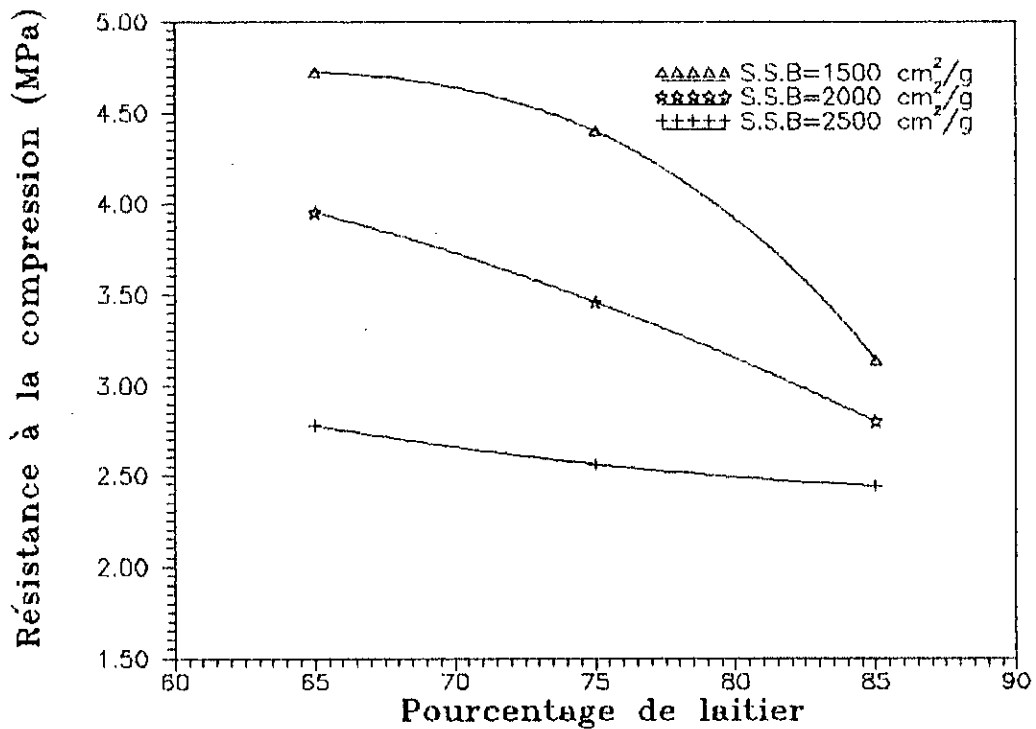


Fig. 4-2: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de laitier

La masse volumique diminue également avec l'augmentation du pourcentage de laitier (Fig. 4-3). Ceci s'explique par le fait que, la masse volumique du laitier est plus faible que celle de la chaux, donc plus la proportion de cette dernière est importante dans le mélange plus la densité du matériau est élevée.

On note, par contre que le coefficient de ramollissement croit avec l'augmentation du pourcentage de laitier. Ce qui confirme que, le laitier utilisé comme liant, constitue un matériau durable et résistant aux milieux agressifs. C'est la raison pour laquelle le ciment au laitier est utilisé dans les ouvrages maritimes.

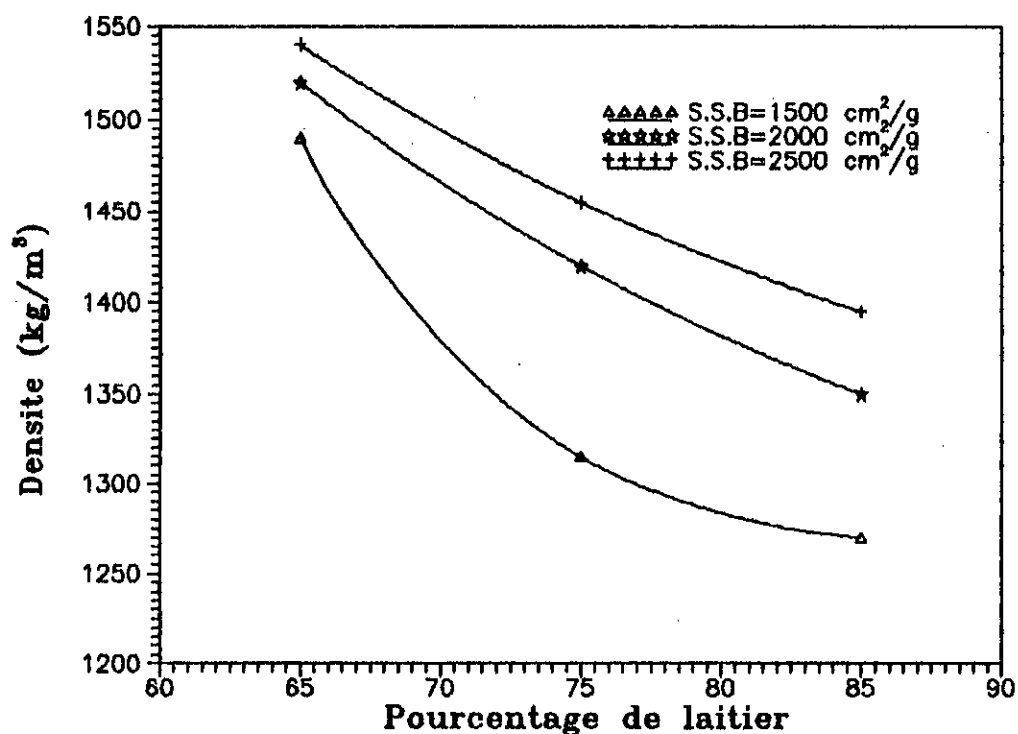


Fig. 4-3: Variation de la densité en fonction du pourcentage de laitier

Un résultat inattendu est obtenu lors de cette expérience (variation de la S.S.B à rapport E/S constant). En effet, on a remarqué que les résistances mécaniques à la flexion et à la compression diminuaient lorsque la surface spécifique Blaine augmentait (Fig. 4-4 et Fig 4-5), alors que l'hydraulicité d'un liant croit, normalement avec sa finesse de mouture. Ce résultat est rendu plus complexe par le fait que la résistance diminue d'autant plus que la densité augmente comme le montre les graphes des figures 4-6 et 4-7 alors que, pour un même matériau, l'inverse devrait se produire. Nous pensons que cela est dû probablement à la consistance de la pâte. Il a été effectivement remarqué lors du coulage, que pour un même rapport E/S, la consistance de la pâte diminuait avec l'augmentation de de la surface spécifique Blaine.

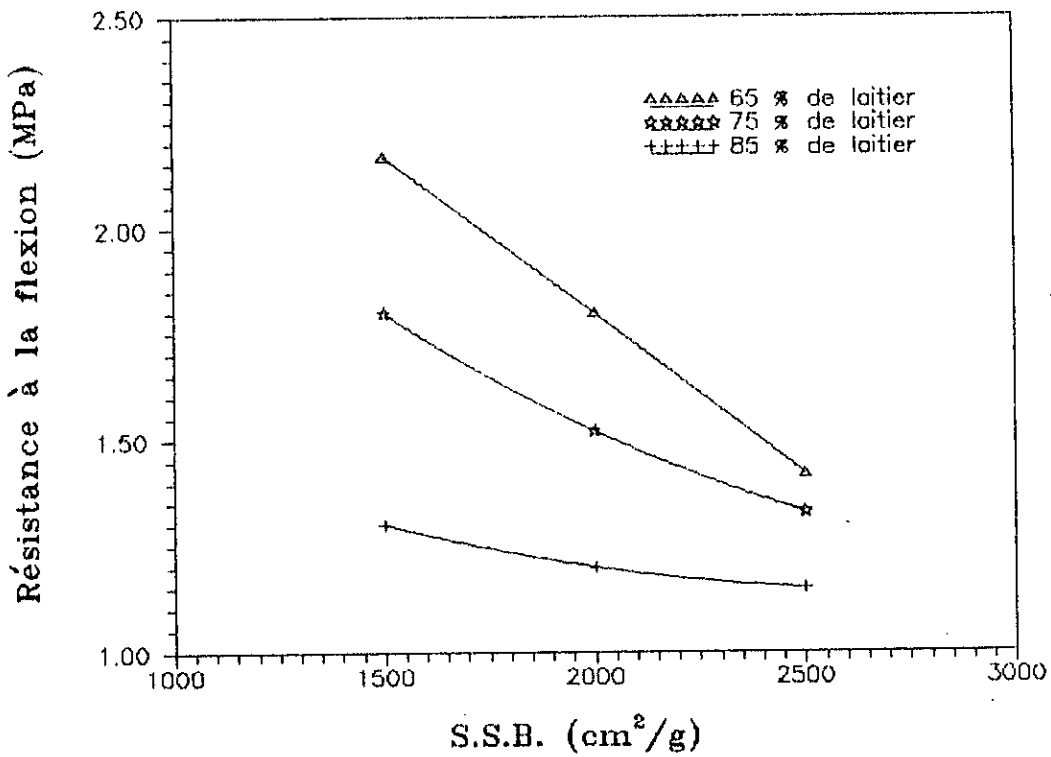


Fig. 4-4: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la surface spécifique Blaine (à E/S constant)

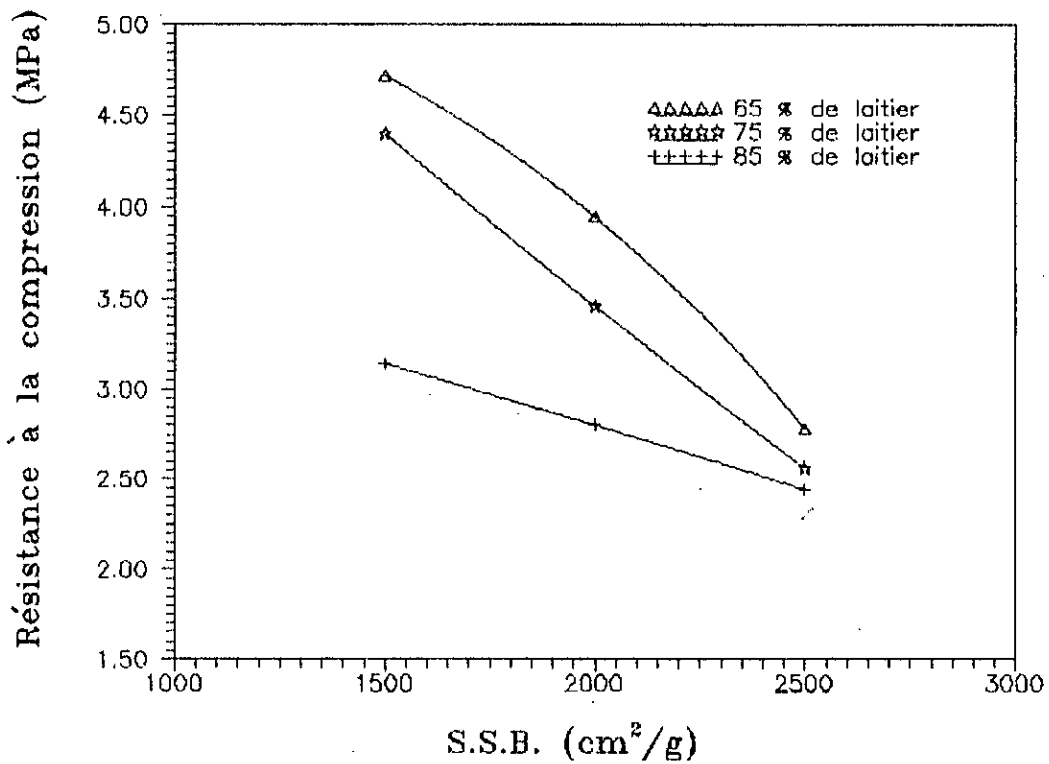


Fig. 4-5: Variation de la résistance à la compression en fonction de la surface spécifique Blaine (à E/S constant)

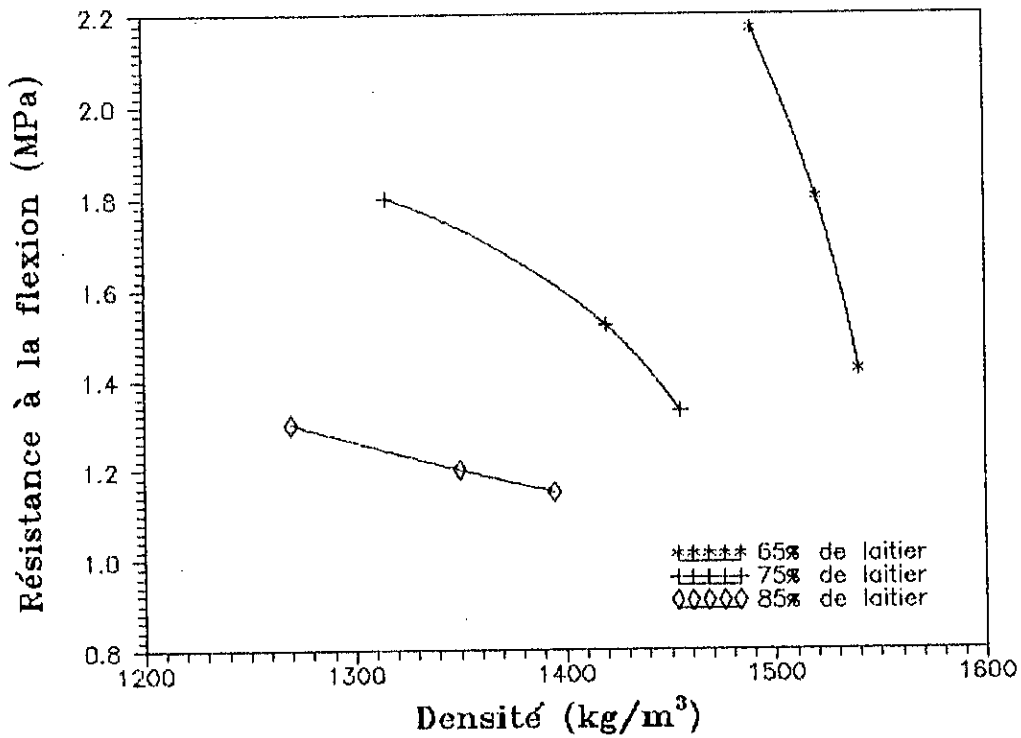


Fig 4-6: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la densité

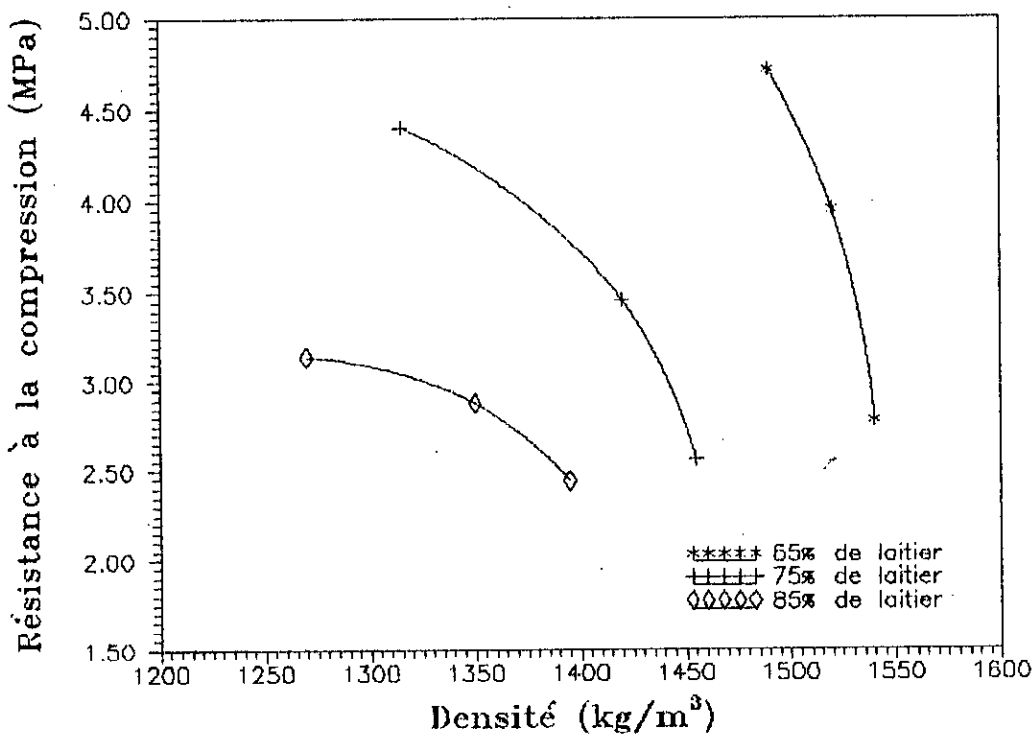


Fig 4-7: Variation de la résistance à la compression en fonction de la densité

Afin d'étayer cette affirmation, un essai faisant varier la finesse de mouture a été effectué, en maintenant une fluidité constante plutôt qu'un rapport E/S constant.

La consistance de la pâte a été déterminée par l'appareil de Vicat. Une consistance équivalente a été imposée pour les trois surfaces spécifiques Blaine. La détermination du rapport E/S a donné les valeurs suivantes; 0.44, 0.40 et 0.36 pour 1500, 2000 et 2500 cm²/g, respectivement.

4.3 VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE A CONSISTANCE CONSTANTE (BETON NON EXPANSE)

4.3.1 MODE OPERATOIRE

La masse de liants utilisée (pour un moule de 3 éprouvettes) est de 760g dont 50% de laitier. Le pourcentage de soude, utilisée comme accélérateur de prise, est de 5% de la masse de laitier. Etant donné que l'essai est réalisé à fluidité constante le rapport E/S varie d'une surface spécifique à une autre. Afin de garder une consistance unique pour les trois essais (3 S.S.B), les rapports E/S suivants, 0.44, 0.40 et 0.36, ont été déterminés par l'appareil de Vicat pour les surfaces spécifiques respectives 1500, 2000 et 2500 cm²/g.

4.3.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

Lors de cet essai neuf échantillons ont été confectionnés. Trois pour chaque surface spécifique Blaine. Les résultats de cette expérience sont donnés au tableau 4-3 (annexe A).

4.3.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus dans cet essai, confirment que la fluidité est la cause des résultats incohérents enregistrés à l'essai précédent. Il apparaît sur les graphes des figures 4-8 et 4-9 que les résistances mécaniques à la flexion et à la compression augmentent avec la finesse de mouture du laitier, ce qui représente un résultat prévisible si on se réfère à la littérature spécialisée. De plus, l'augmentation des résistances mécaniques avec la densité (Fig. 4-10 et Fig. 4-11) représente un second résultat correct qui n'a pas été obtenu lors de l'essai précédent.

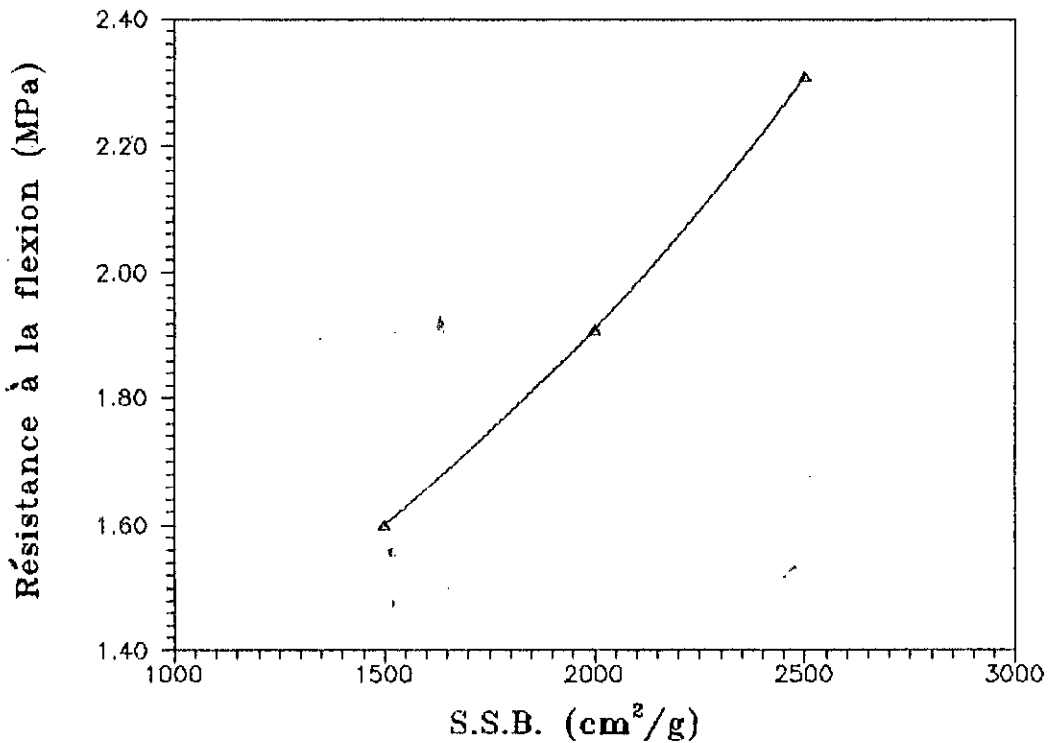


Fig. 4-8: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la surface spécifique Blaine (à fluidité constante)

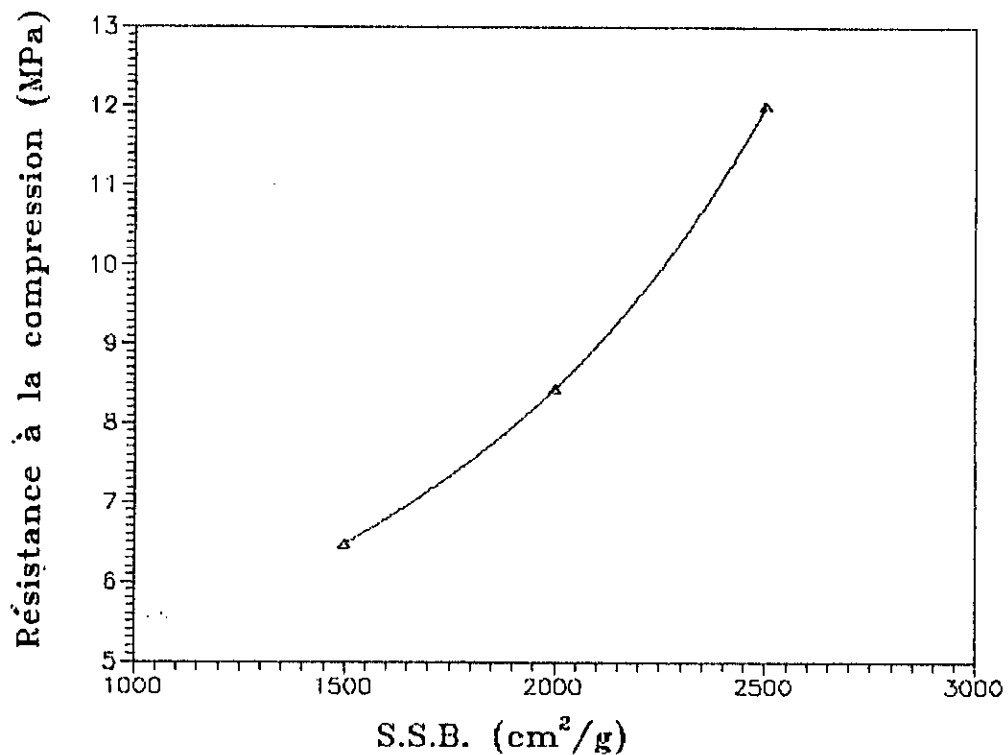


Fig. 4-9: Variation de la résistance à la compression en fonction de la surface spécifique Blaine (à fluidité constante)

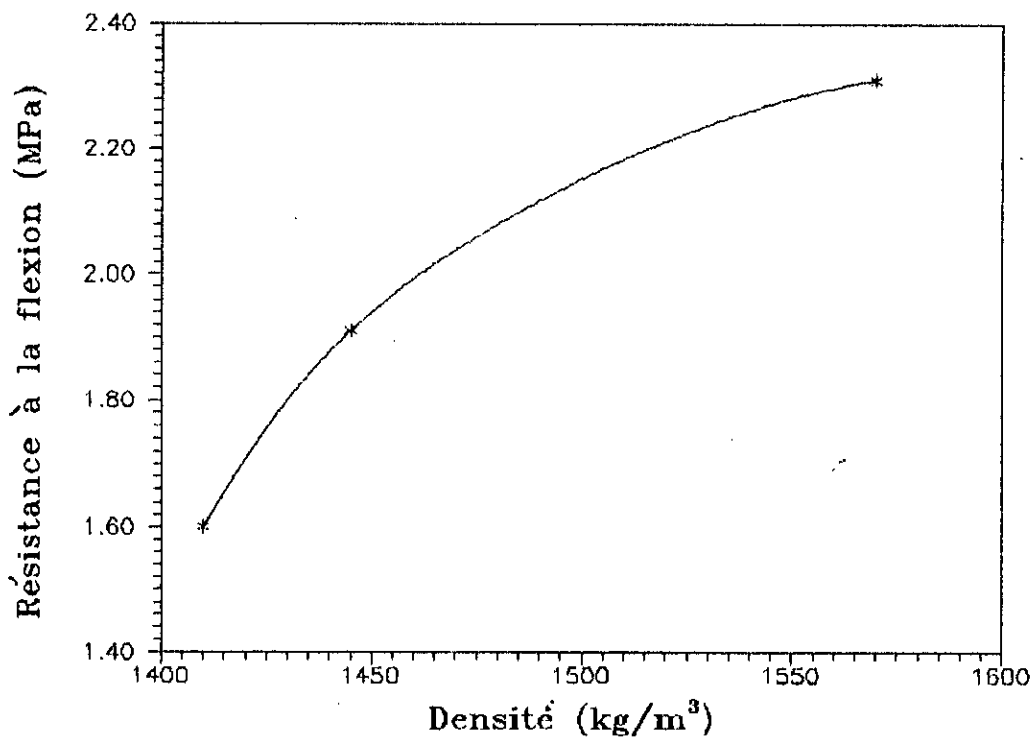


Fig 4-10: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la densité

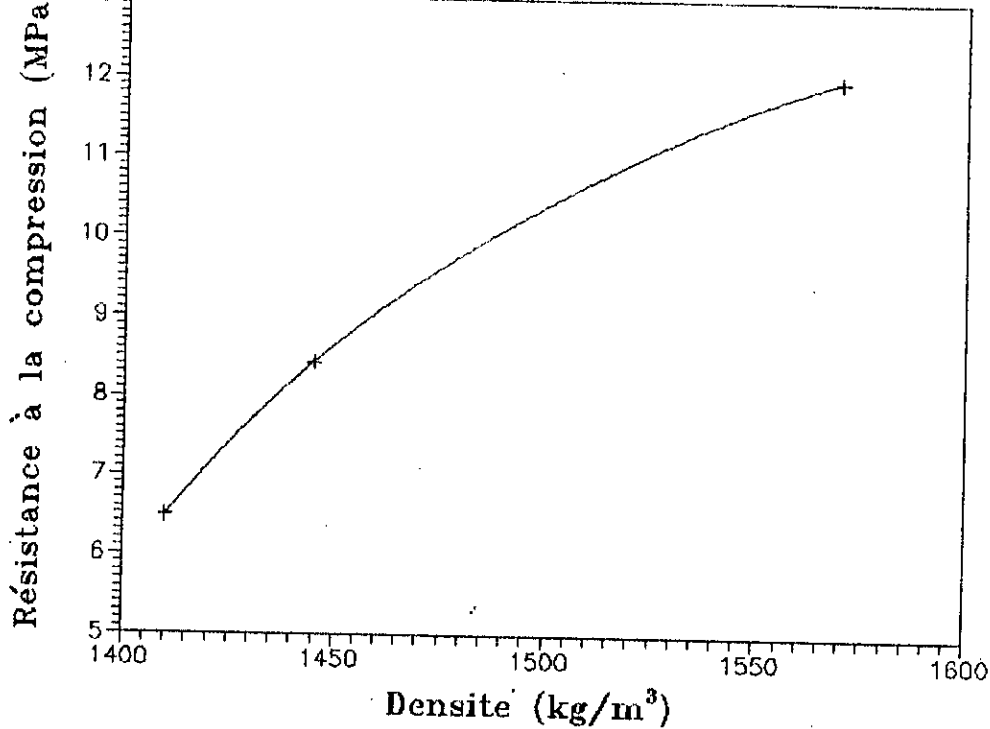


Fig 4-11: Variation de la résistance à la compression en fonction de la densité

La masse volumique de la pâte sèche non expansée, augmente avec l'élévation de la surface spécifique Blaine (Fig. 4-12), qui résulte, du fait que, la densité du laitier croît d'autant plus que sa finesse de mouture est élevée.

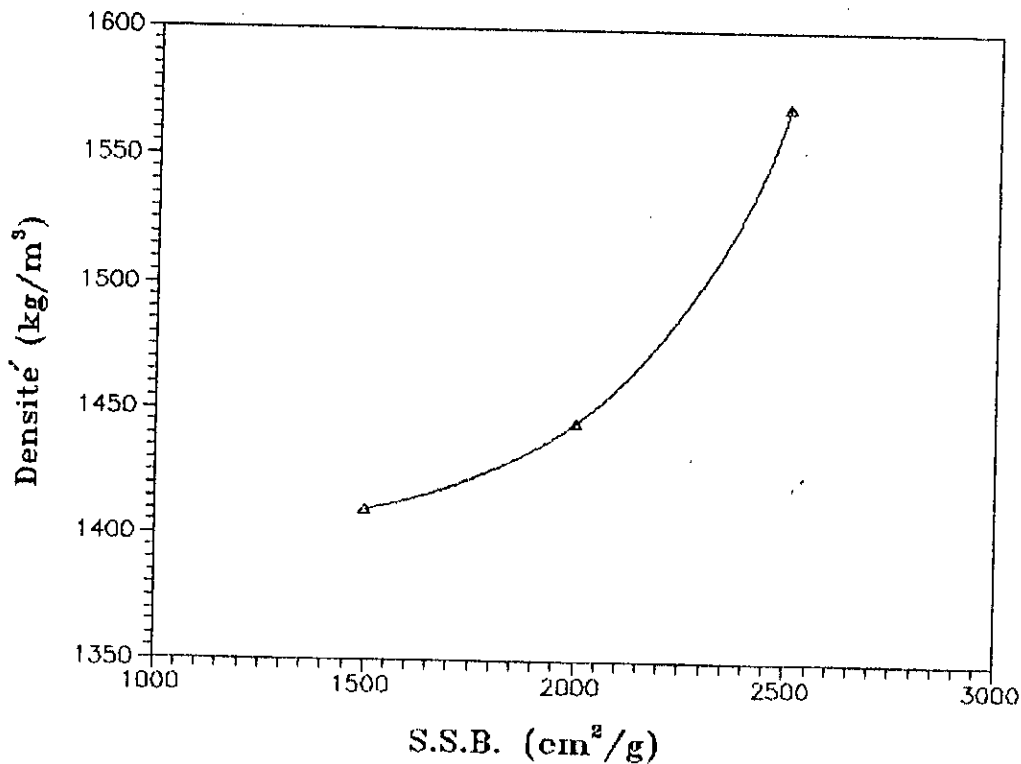


Fig. 4-12: Variation de la densité en fonction de la surface spécifique Blaine (à fluidité constante)

Le coefficient d'absorption est plus élevé lorsque la surface spécifique Blaine est plus faible. Cette relation est indirecte, ayant pour paramètre intermédiaire, la densité. En effet le coefficient d'absorption d'un matériau dépend essentiellement de sa densité. On constate que plus faible sera sa densité plus grand sera le volume des vides et par conséquent, la quantité d'eau pouvant être absorbée sera plus élevée, entraînant ainsi une augmentation du coefficient d'absorption.

L'enseignement que nous avons pu tirer des deux expériences précédentes, est que, la consistance constitue un facteur important dont il est impératif de tenir compte. Si la variation d'un paramètre donné, entraîne la modification de la consistance, les résultats obtenus seront erronés car ils seront faussés par le changement de la fluidité.

4.4 VARIATIONS DU RAPPORT E/S ET DU POURCENTAGE D'ALUMINIUM

4.4.1 MODE OPERATOIRE

Le laitier utilisé pour cette expérience à une surface spécifique Blaine égale à $2000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le pourcentage de laitier est de 75%. Le régime de traitement est un régime $2^{\text{h}}20-4^{\text{h}}-2^{\text{h}}20$ à une température de 170°C sous une pression de 15 bars. La masse des matériaux secs est de 850g soit 638g de laitier et 212g de chaux. Le pourcentage d'aluminium, entrant dans la composition du mélange, est donné par rapport à la masse totale des matériaux secs, il est de l'ordre du millième (0.14 à 0.42 %).

4.4.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

L'expérience consiste à faire varier le pourcentage d'aluminium et le rapport E/S. Dans cet essai 27 échantillons ont été confectionnés. Les résultats de l'expérience sont donnés au tableau 4-4 (annexe A).

4.4.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résistances mécaniques à la flexion et à la compression de ce matériau décroissent quand le rapport E/S augmente comme le montrent les figures 4-13 et 4-14.

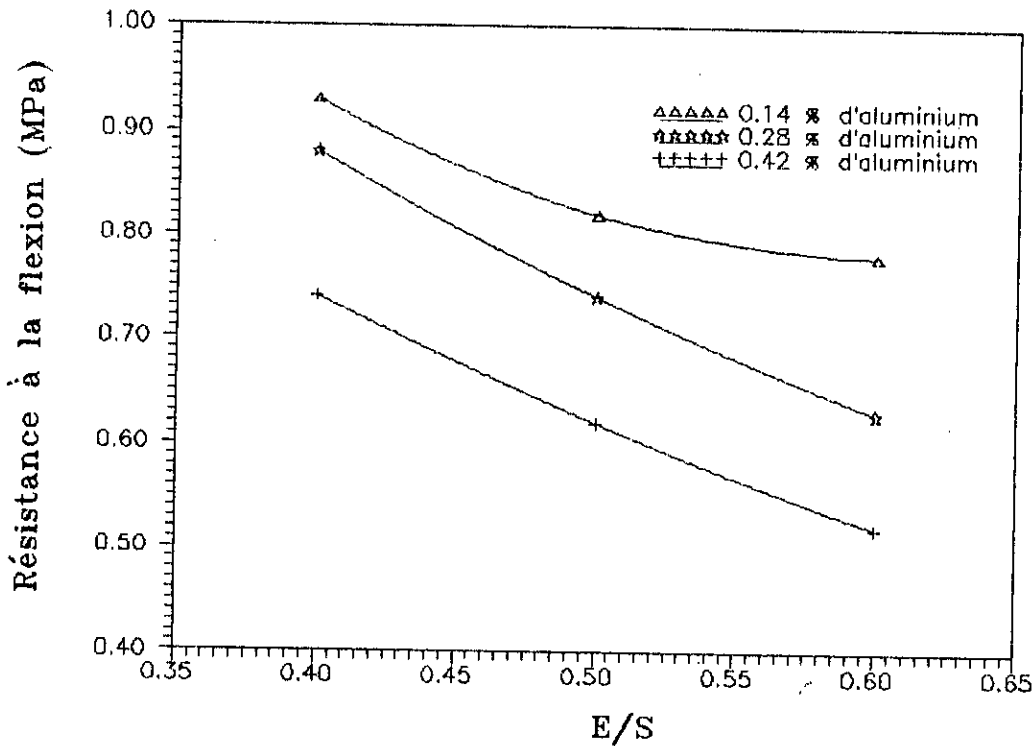


Fig. 4-13: Variation de la résistance à la flexion en fonction du rapport E/S

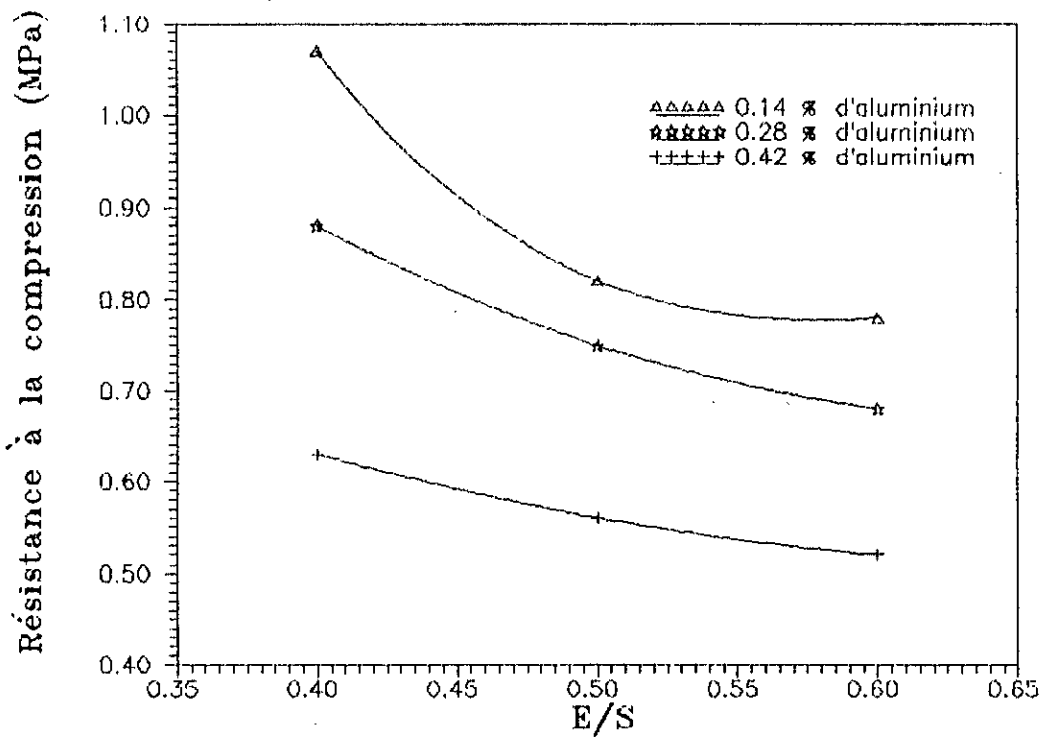


Fig. 4-14: Variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/S

La masse volumique diminue également avec l'augmentation du rapport E/S (Fig. 4-15). Ceci s'explique par le fait que, plus l'eau est en excès dans le matériau, plus élevé sera le volume des vides laissé après évaporation de cette eau, entraînant par conséquent une plus faible densité du béton.

On constate sur la courbe de la figure 4-15 que la masse volumique subit une variation plus importante, quand le rapport E/S passe de 0.4 à 0.5, que lorsque ce dernier oscille entre 0.5 et 0.6. Ceci démontre qu'il existe un volume d'eau limite (Où E/S limite), à partir duquel la masse volumique ne subit pas de variation significative. En d'autres termes, on peut dire que la masse volumique converge vers une valeur optimale.

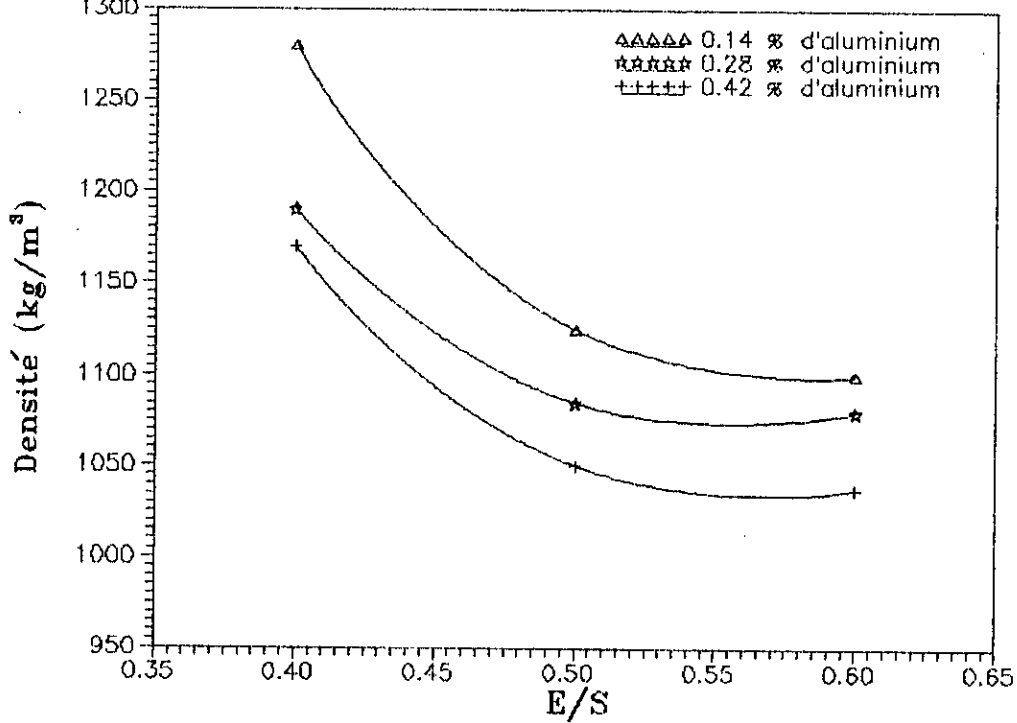


Fig. 4-15 : Variation de la densité en fonction du rapport E/S

Afin de pouvoir expliquer ce qui précède il est nécessaire de mentionner que le volume d'eau entrant dans le mélange se décompose en deux parties. Un volume d'eau entrant dans les combinaisons chimiques et un autre qui s'évapore après un certain temps jouant le rôle de catalyseur. Effectivement, le volume des vides laissé après évaporation de l'eau est constant. L'augmentation de la quantité d'eau déjà en excès ne fera qu'augmenter la quantité d'eau évaporée sans affecter la variation du volume des vides.

L'augmentation du pourcentage d'aluminium entraîne également une diminution de la résistance mécanique (fig.4-16 et 4-17). Ceci s'explique par le fait que, plus la quantité d'aluminium est élevée, plus important sera le volume de gaz, généré par réaction chimique de l'aluminium avec l'hydroxyde de calcium.

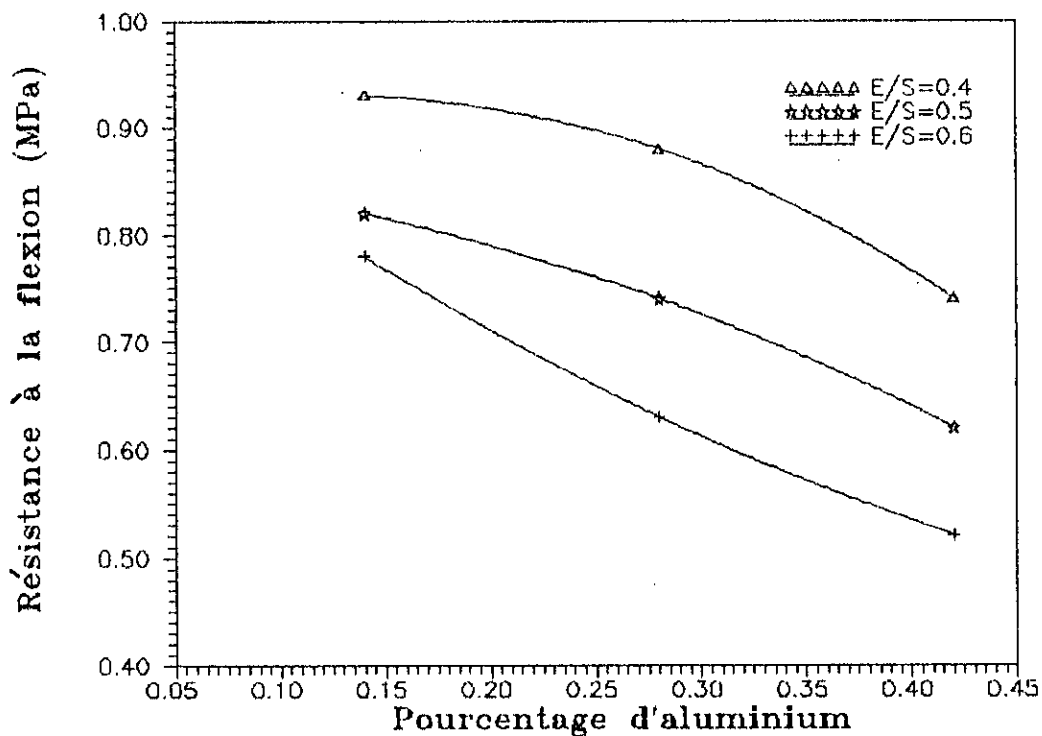


Fig. 4-16: Variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage d'aluminium

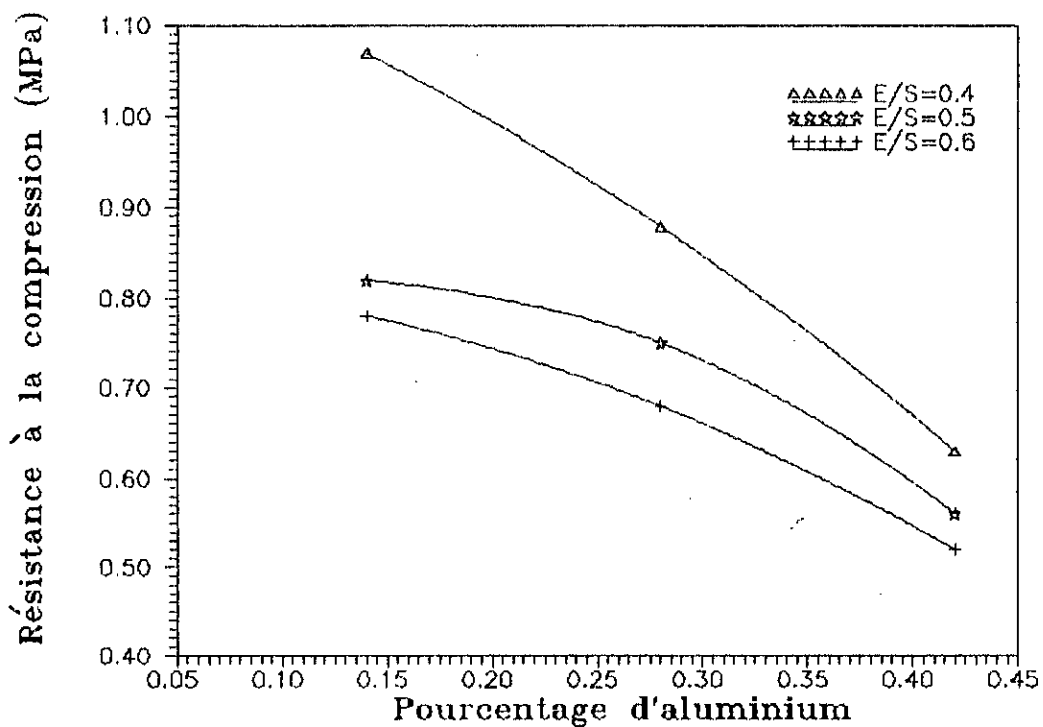


Fig. 4-17: Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'aluminium

L'accroissement du volume de gaz entraîne un plus grand volume des vides et par conséquent une réduction de la densité. Nous pouvons donc conclure que la relation entre le pourcentage d'aluminium et la résistance est une relation indirecte qui a pour paramètre intermédiaire la densité.

4.5 VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE (BETON EXPANSE)

4.5.1 MODE OPERATOIRE

Le pourcentage de laitier fixé dans cette expérience est de 50%, soit 425g étant donné que la masse totale des matériaux secs est de 850g. Le rapport E/S est de 0.5, le pourcentage d'aluminium (type 1) imposé est de 0.1%. Le régime de traitement est de 2^h20-4^h-2^h30 à une température de 170 °c sous une pression de 10 bars.

4.5.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

Trois échantillons ont été façonnés pour chaque surface spécifique, soit neuf échantillons ont été testés pour cette expérience dont les résultats sont donnés au tableau 4-5 (annexe A).

4.5.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

La constatation faite dans l'essai 4.2 apparaît une fois de plus dans cette expérience. C'est à dire que les résistances mécaniques à la flexion et à la compression décroissent quand la finesse de mouture du laitier augmente (Fig. 4-18 et Fig 4-19), alors que, le contraire devrait se

produire, quand on sait que l'hydraulicité d'un liant augmente avec sa finesse de mouture. De plus, la résistance mécanique diminue quand la densité augmente, ceci est en contradiction avec les résultats connus de la relation densité- résistance.

Ce problème, comme il a été préalablement signalé, est dû au fait, que, la consistance du mélange change avec la variation de la surface spécifique Blaine. Le béton autoclavé est d'autant plus fluide que sa finesse de mouture est élevée. Afin de vérifier cette constatation, un essai dans lequel on fait varier la surface spécifique Blaine à fluidité constante a été effectué (voir chapitre 4-6).

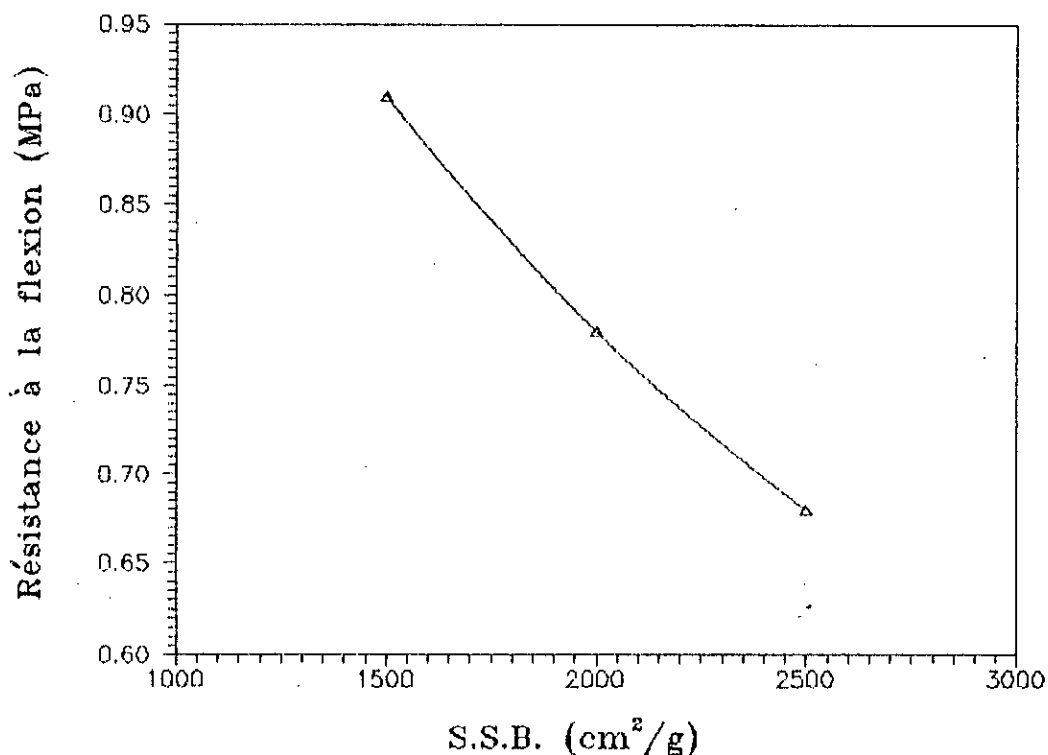


Fig. 4-18: Variation de la résistance à la flexion du béton expansé en fonction de la surface spécifique Blaine (à E/S constant)

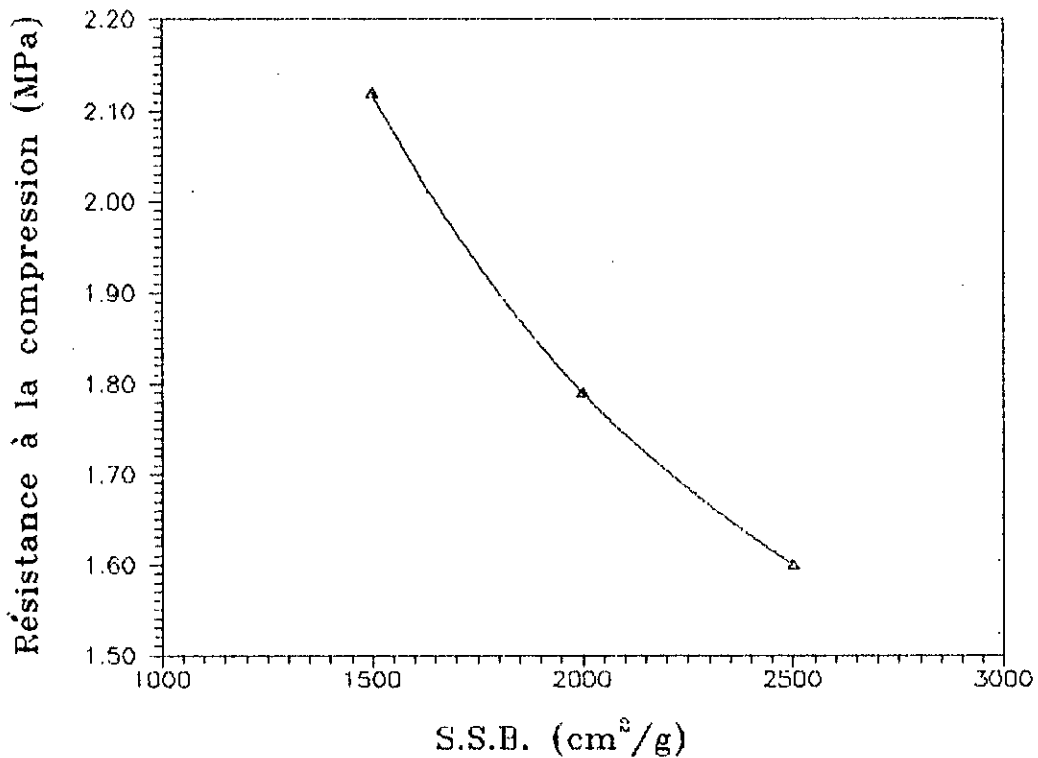


Fig. 4-19: Variation de la résistance à la compression du béton expansé en fonction de la surface spécifique Blaine (à E/S constant)

4.6 VARIATION DE LA SURFACE SPECIFIQUE BLAINE A FLUIDITE CONSTANTE

4.6.1 MODE OPERATOIRE

Le pourcentage de laitier imposé dans cet essai est de 50%. Les pourcentages d'aluminium et de soude sont respectivement 0.2% par rapport à la masse des composants secs et 5% par rapport à la masse de laitier. L'aluminium utilisée est du type (2) (poudreuse). Pour une fluidité constante les rapport E/S sont 0.38, 0.42 et 0.46 pour les surfaces spécifiques respectives 2500, 2000 et 1500 cm²/g.

4.6.2 RESULTAT DE L'EXPERIENCE

Dans cette expérience le béton a été expansé en utilisant une poudre d'aluminium du type granulaire. Neuf échantillons ont été réalisés. Les résultats de l'expérience sont présentés dans le tableau 4-6 (annexe A).

4.6.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

Il apparait sur les courbes des figures 4-20 et 4-21 que les résistances mécaniques croissent avec l'augmentation de la surface spécifique Blaine. Ce résultat concorde avec celui reproduit dans la littérature sur la relation: pouvoir hydraulique-résistance. L'hydraulicité ou pouvoir hydraulique augmente avec l'accroissement de la finesse de mouture.

On constate, aussi, que la résistance mécanique augmente avec la densité (Fig. 4-22 et Fig. 4-23). Ce résultat était prévisible, ce qui n'était pas le cas dans l'essai précédent.

Cet essai de la variation de la S.S.B à fluidité constante a montré, qu'effectivement la fluidité était la cause des résultats incohérents avec ceux de la littérature spécialisée.

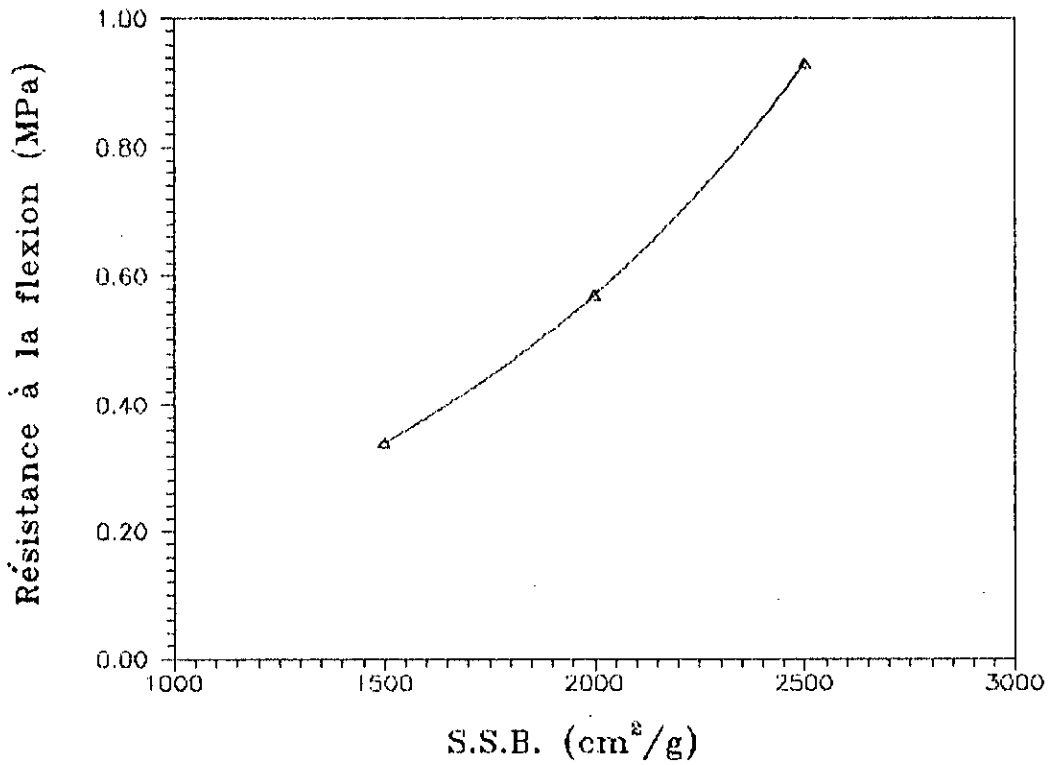


Fig. 4-20: Variation de la résistance à la flexion du béton expansé en fonction de la surface spécifique Blaine (à fluidité constante)

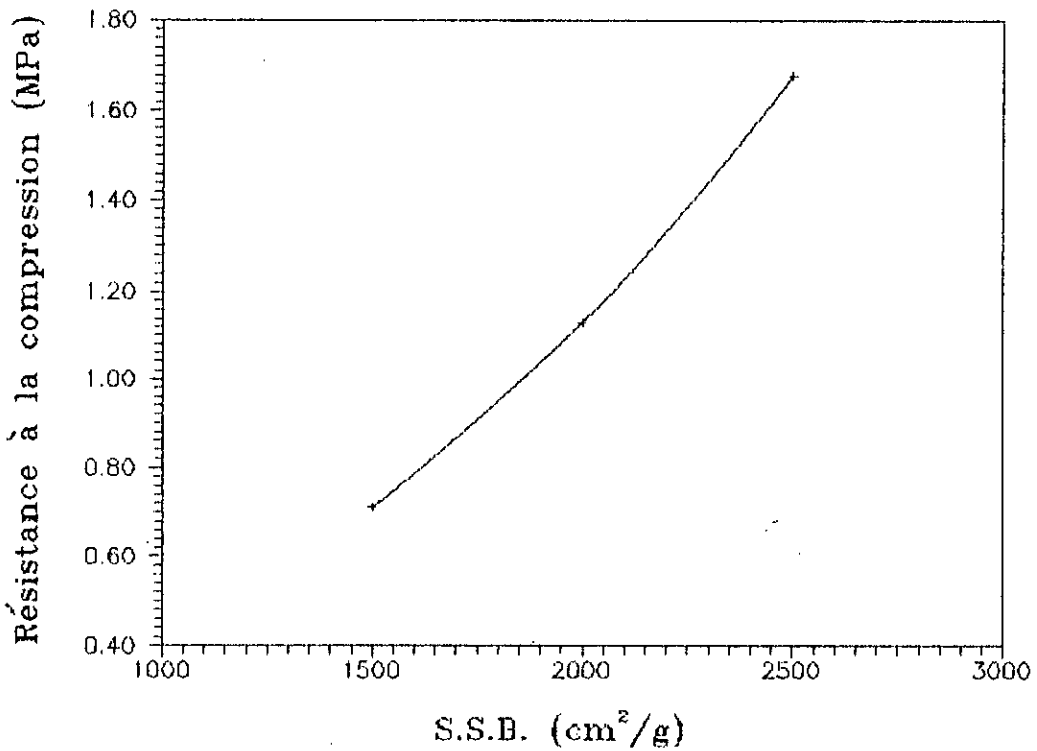


Fig. 4-21: Variation de la résistance à la compression du béton expansé en fonction de la surface spécifique Blaine (à fluidité constante)

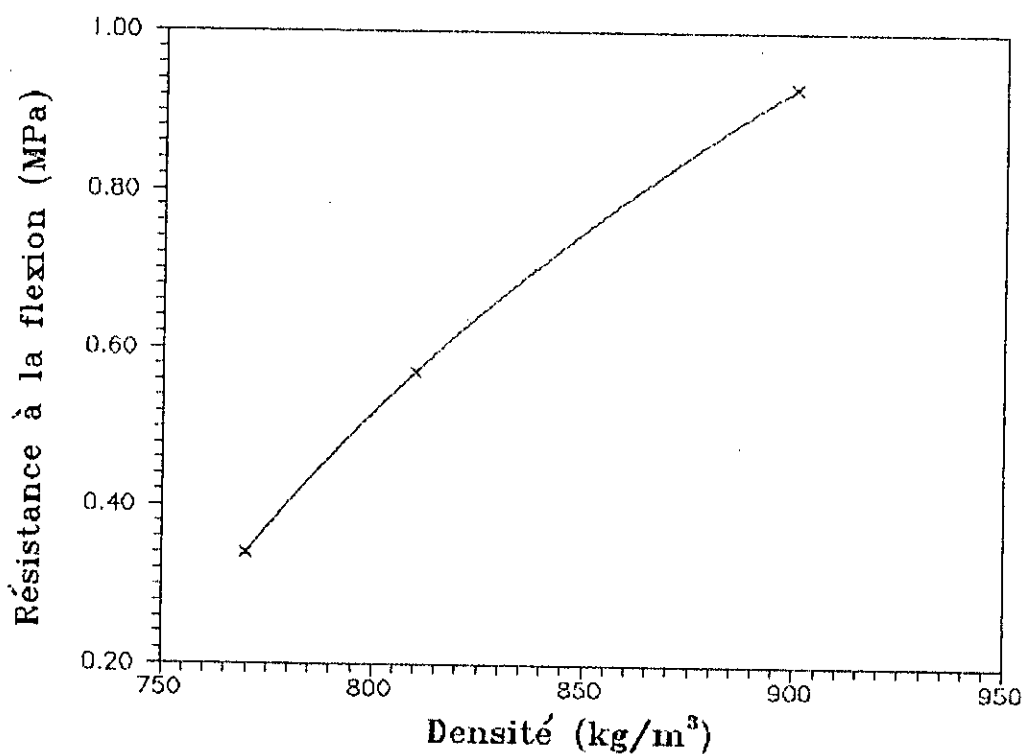


Fig 4-22: Variation de la résistance à la flexion en fonction de la densité

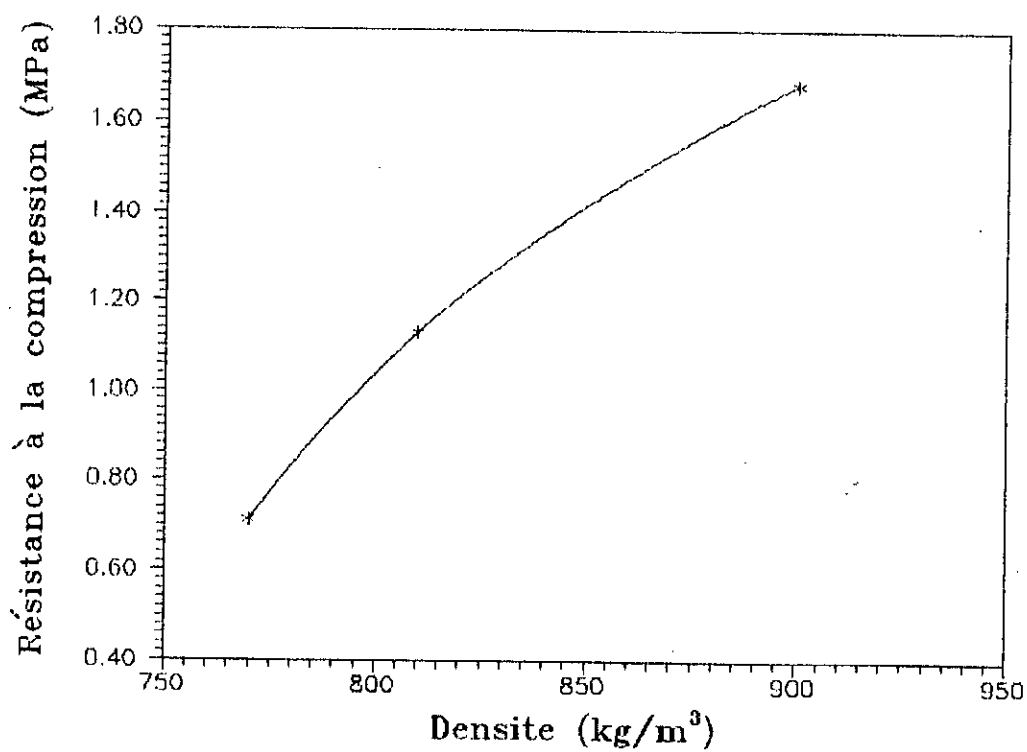


Fig 4-23: Variation de la résistance à la compression en fonction de la densité

4.7 VARIATION DU POURCENTAGE DE LAITIER (BETON EXPANSE)

4.7.1 MODE OPERATOIRE

Le laitier utilisé pour cette expérience a une surface spécifique Blaine égale à $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le rapport E/S est de 0.5, le pourcentage d'aluminium est de 0.1%. La masse totale du matériau sec (chaux et laitier) est de 850g. Le régime de traitement est ; $2^{\text{h}}20-4^{\text{h}}-2^{\text{h}}20$ à une température de 170°c sous une pression de 9 bars.

Pour la composition ci-dessus nous avons fait varier le pourcentage de laitier. Le procédé de fabrication des échantillons est celui cité dans la partie expérimentale.

4.7.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

La poudre d'aluminium utilisée dans cette essai est granulaire. C'est la raison pour laquelle le gonflement n'a pas été important. Neuf échantillons ont été nécessaires à cette expérience dont les résultats sont donnés au 4-7.

4.7.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

L'augmentation du pourcentage de laitier entraîne une diminution des résistances mécaniques à la flexion et à la compression (Fig. 4-24 et Fig. 4-25), et ce, malgré l'augmentation de la densité. Ce phénomène est dû au fait que le laitier a un pouvoir hydraulique plus faible que celui de la chaux, impliquant que, le liant chaux-laitier aura un pouvoir hydraulique d'autant plus important que la quantité de chaux est élevée dans le mélange et par conséquent la résistance mécanique

sera plus élevée.

Par ailleurs, l'augmentation du pourcentage de chaux (donc diminution du pourcentage de laitier) entraîne un accroissement de la quantité d'hydrosilicates de calcium ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), augmentant ainsi la résistance mécanique comme il a été indiqué au chapitre 2.

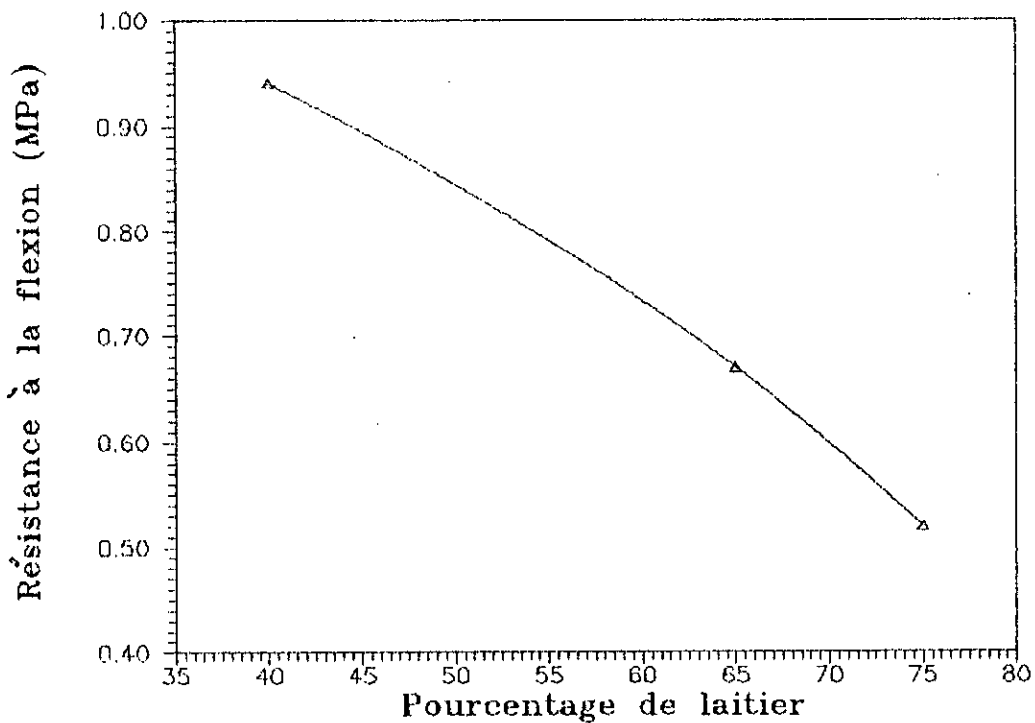


Fig. 4-24: Variation de la résistance à la flexion du béton expansé en fonction du pourcentage de laitier

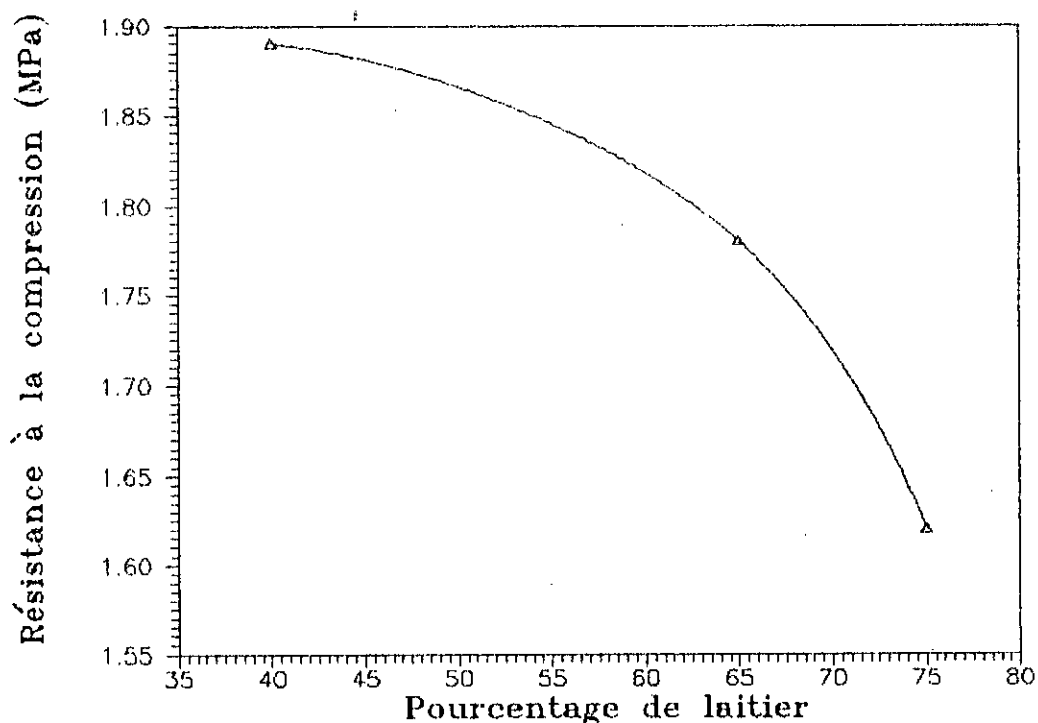


Fig. 4-25: Variation de la résistance à la compression du béton expansé en fonction du pourcentage de laitier

Contrairement à ce qui a été obtenu dans l'expérience 2, la masse volumique dans ce cas, augmente d'autant plus que le pourcentage de laitier est élevé (Fig. 4-26). L'interprétation à cela est la suivante:

L'augmentation du pourcentage de laitier dans la composition réduit celui de la chaux. Le défaut de chaux défavorise la réaction chimique de l'hydroxyde de calcium avec l'aluminium pour la production du gaz d'hydrogène. Le faible dégagement d'hydrogène diminue le volume des vides, entraînant une augmentation de la densité.

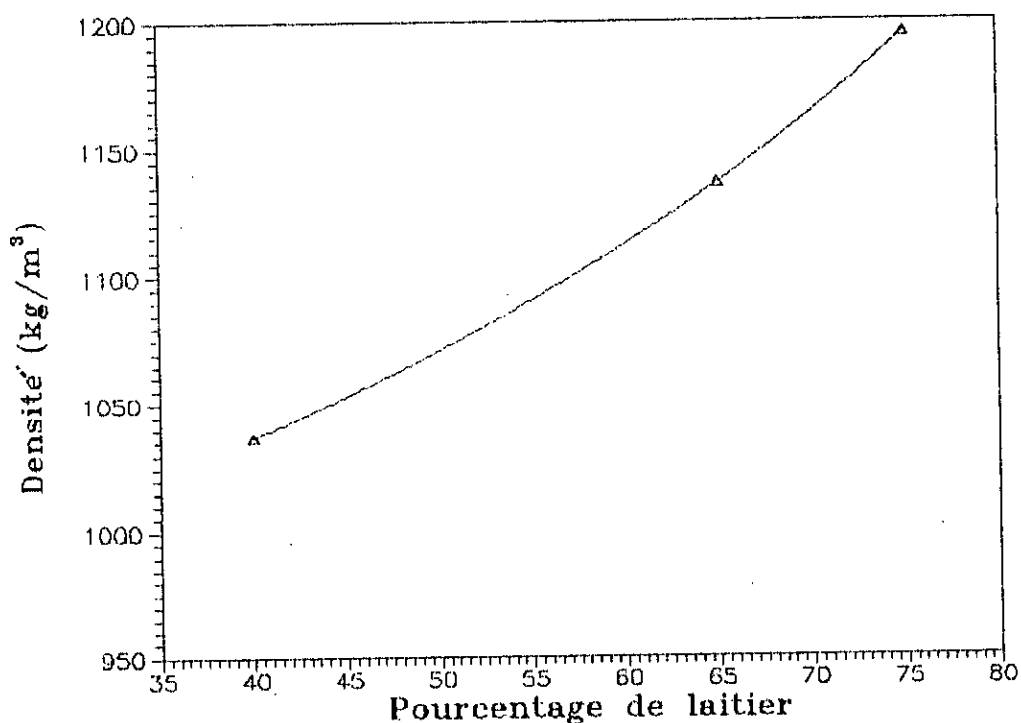


Fig. 4-26: Variation de la densité du béton expansé en fonction du pourcentage de laitier

4.8 VARIATION DE LA TEMPERATURE DU PALIER ISOTHERMIQUE

4.8.1 MODE OPERATOIRE

La surface spécifique Blaine du laitier utilisé pour cette expérience est de $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le rapport E/S a été fixé à 0.48 et le pourcentage d'aluminium est de 0.2% de la masse des composants secs. Il est à noter que pour cette expérience nous avons utilisé de la poudre d'aluminium très fine ayant un coefficient d'absorption C_{ab} plus élevé que celui de la poudre utilisée ultérieurement. De plus nous avons activé le béton avec de la soude caustique (NaOH), utilisée à 3% de la masse de

laitier dont le pourcentage est de 50%. La masse totale des matériaux secs est de 700g. Le régime de traitement est un régime 2^h20-4^h-2^h30.

Pour la composition du mélange décrite ci-dessus la température de traitement a été modifiée pour chaque cas. Le mode de confectionnement des échantillons est celui décrit dans le chapitre 3. Trois échantillons ont été introduits dans l'autoclave pour chaque température fixée.

4.8.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

La poudre d'aluminium utilisée lors de cette expérience est très fine. Un gonflement significatif plus important a été constaté en comparaison avec la poudre d'aluminium granulaire. Le nombre d'échantillons est de 12. les résultats de cette expérience sont représentés au tableau 4-8 (annexe A).

4.8.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

On constate que la résistance mécanique augmente avec l'élévation de la température (Fig. 4-27 et Fig. 4-28), alors que la densité, reste par contre, inchangée.

La valeur constante de la densité en fonction de la température s'explique par le fait que, la poudre d'aluminium réagit dès qu'elle entre en contact avec l'hydroxyde de calcium. Une fois cette réaction effectuée, le béton ne subit plus de gonflement, puisque l'agent responsable (l'aluminium) se trouve, alors, entièrement consommé.

La relation entre la résistance mécanique et la température, obtenue lors de ce test, peut être interprétée comme suit.

L'élévation de la température entraîne une augmentation de la solubilité de la silice qui réagit avec la chaux. En conséquence, la quantité d'hydrosilicates de calcium formée sera plus importante, engendrant ainsi, une plus grande résistance mécanique du produit fini. On constate donc, que ce résultat confirme ce qui a été énoncé dans le paragraphe 2-2-6.

Il faut toutefois noter, que l'augmentation de la température diminue la solubilité de la chaux. Cela, n'influe aucunement sur la quantité d'hydrosilicates de calcium formée et donc sur la résistance, car la chaux se trouve en excès dans le mélange.

On constate que la température du palier isothermique n'a aucune influence sur les coefficients de ramollissement et d'absorption.

Il apparaît, sur les quatre diffractogrammes des figures 4-34, 4-35, 4-37 et 4-38 (annexe B), que les pics influençant la résistance mécanique sont ceux ayant pour distances réticulaires 3.03 et 2.03 Å.

Après investigations bibliographiques, nous avons identifié ces deux composants. Il s'agit de la chaux ($d=3.03 \text{ \AA}$) et de la tobermorite (CSH, $d=2.03 \text{ \AA}$). On constate que plus la température est élevée plus l'intensité correspondant à la chaux diminue alors que celle de la tobermorite augmente.

L'explication à cette constatation est la suivante:

A la température de 170°C la chaux est dissoute en quantité importante, ce qui n'est pas le cas pour la silice ($d=2.28 \text{ \AA}$) d'où la faible formation de tobermorite. En augmentant la température, la dissolution de la chaux diminue, alors que celle de la silice augmente, mais cette dernière entre en réaction avec la chaux pour former de la tobermorite. C'est la raison pour laquelle les intensités de la chaux et de la silice diminuent alors que l'intensité de la tobermorite augmente. L'augmentation de la quantité de tobermorite entraîne un accroissement de la résistance mécanique.

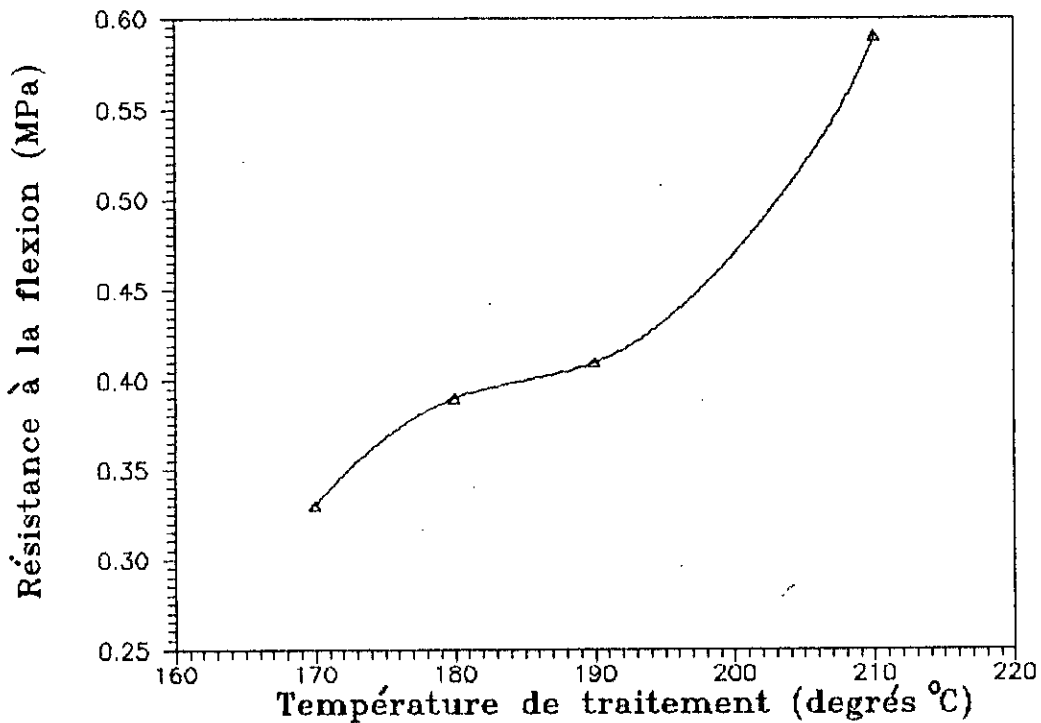


Fig. 4-27: Variation de la résistance à la flexion du béton expansé en fonction de la température de traitement isothermique

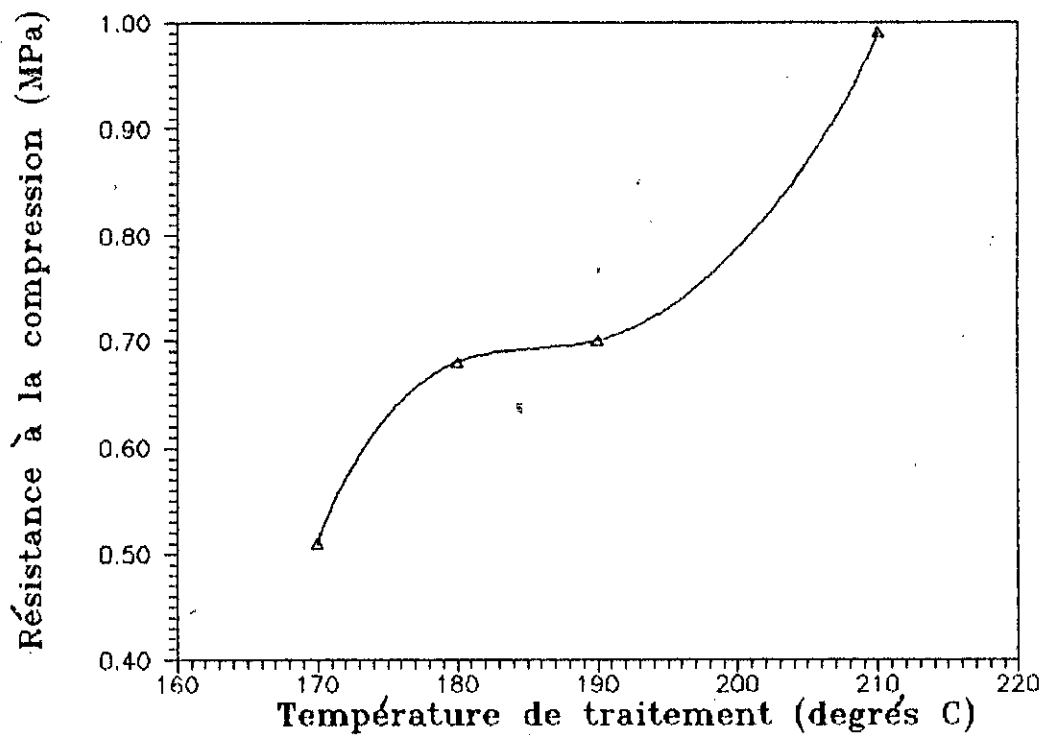


Fig. 4-28: Variation de la résistance à la compression du béton expansé en fonction de la température de traitement isothermique

4.9 VARIATION DE LA DUREE DU PALIER ISOTHERMIQUE

4.9.1 MODE OPERATOIRE

La surface spécifique Blaine du laitier utilisé pour cette expérience est égale à $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le rapport E/S est fixé à 0.43. Le pourcentage d'aluminium est de 0.2% de la masse des composants secs. Le pourcentage de soude est de 3% de la masse de laitier. Le pourcentage de laitier est de 50% de la masse totale des composants secs qui est de 700g. La température de traitement est fixée à 180 °c.

Après que les échantillons soient confectionnés selon le procédé décrit au chapitre 3, ils sont alors introduits dans l'autoclave afin d'être traités thermiquement. Pour chaque durée du palier isothermique fixée, trois échantillons ont été testés.

4.9.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

Dans cet essai, une poudre d'aluminium très fine a été

utilisée. C'est la raison pour la quelle on obtient des masses volumiques plus faibles que celles obtenues avec la poudre d'aluminium granulaire. Les résultats de l'expérience sont présentés au tableau 4-9 (annexe A).

4.9.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après les résultats obtenus, on constate que la durée du palier isothermique n'influe ni sur la densité ni sur les coefficients de ramollissement et d'absorption.

Par contre, on observe une augmentation des résistances mécaniques à la flexion et à la compression avec le prolongement de la durée du traitement isothermique (Fig. 4-29 et Fig. 4-30). L'augmentation de la résistance mécanique, alors que la densité reste constante, confirme que cette croissance est due à la composition chimique du matériau. Ceci permet d'affirmer que l'augmentation de la durée du traitement isothermique favorise la formation des hydrosilicates de calcium, induisant une résistance mécanique plus élevée.

On observe une faible augmentation de la résistance (13%), en passant d'une durée de palier de 4^h à 6^h30 et une élévation plus importante de la résistance (26%) en passant d'une durée de palier de 6^h à 12^h.

On peut donc, conclure qu'avec le prolongement de la durée du palier isothermique les composants du matériau auront suffisamment de temps pour former plus d'hydrosilicates de calcium et par conséquent, la résistance sera plus élevée.

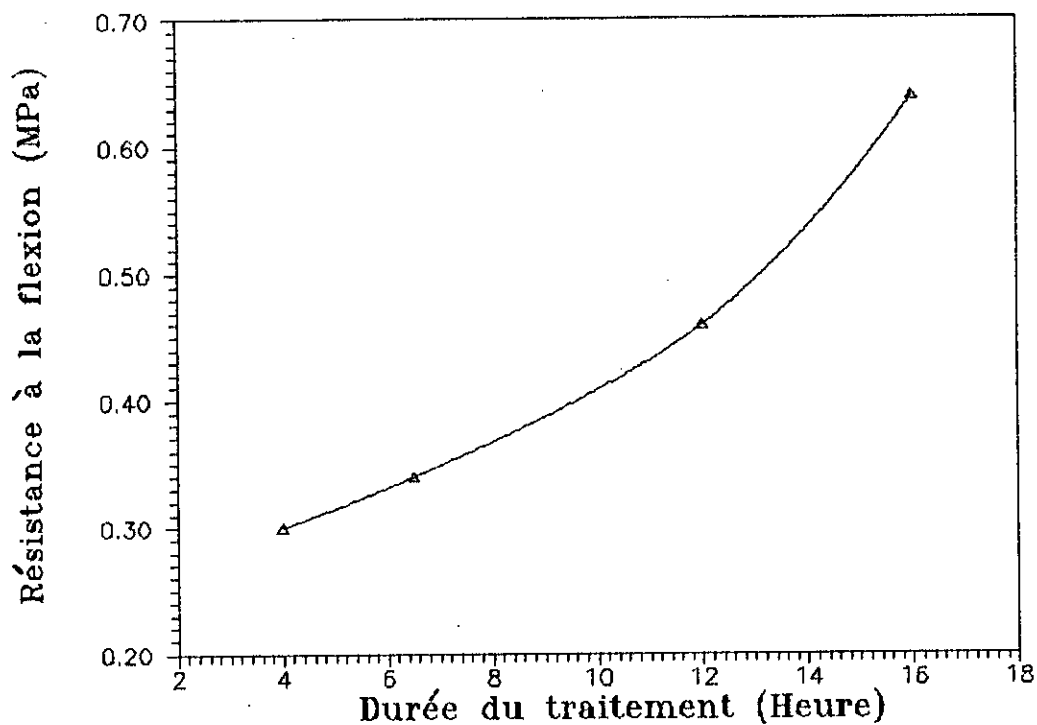


Fig. 4-29: Variation de la résistance à la flexion du béton expansé en fonction de la durée du traitement isothermique

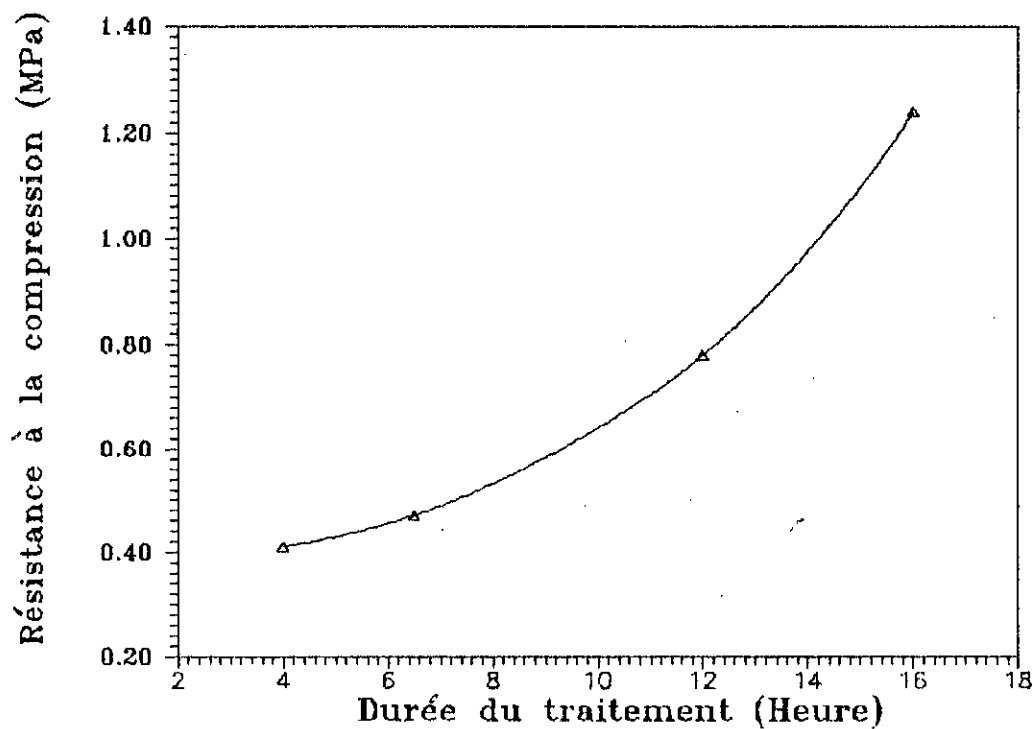


Fig. 4-30: Variation de la résistance à la compression du béton expansé en fonction de la durée du traitement isothermique

On constate là aussi sur les figures 4-38, 4-39, 4-40 et 4-41 (annexe B), que les pics ayant pour distances réticulaires 2.03 et 3.03 Å, ont un effet prépondérant sur la résistance mécanique.

Le prolongement de la durée du palier isothermique de 4 heures à 6 heures 30 minutes, entraîne une dissolution plus importante de la silice qui réagit avec la chaux pour former de la tobermorite. C'est la raison pour laquelle on constate sur ces deux diffractogrammes (Fig. 4-38 et 4-39) une diminution des intensités de la chaux et de la silice alors que celle de la tobermorite augmente.

Le prolongement de la durée du palier isothermique à 12 heures, nous permet de constater que la quantité de tobermorite diminue jusqu'à disparaître comme on peut le constater sur le diffractogramme (Fig. 4-41) correspondant à un traitement de 16 heures. L'explication à ce phénomène, est que, le prolongement de la durée du palier isothermique au-delà de 8 heures, transforme la tobermorite en gyrolite. Ceci confirme le résultat obtenu par Sauman Z. [24] en 1983. La transformation de la tobermorite en gyrolite libère de la chaux, ce qui explique le pic d'intensité élevé de la chaux, apparu sur le diffractogramme de la figure 4-41 correspondant à un traitement thermique de 16 heures.

4.10 VARIATION DU POURCENTAGE DE SOUDE

4.10.1 MODE OPERATOIRE

La surface spécifique Blaine et le pourcentage de

laitier utilisé sont respectivement de 2500 cm²/g et 50%. Le rapport E/S est fixé à 0.44. Le pourcentage d'aluminium est de 0.2% de la masse des composants secs. Le régime de traitement est 2^h30-4^h-2^h40 à une température de 180 °c. Le pourcentage de soude est donné par rapport à la masse de laitier.

Pour chaque pourcentage de soude imposé trois échantillons ont été confectionnés, et ce, en utilisant le procédé décrit au chapitre 3.

4.10.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

La soude est utilisée comme accélérateur de prise. Dans cet essai, nous avons voulu étudier l'influence de la quantité de soude sur les propriétés physiques et mécaniques du béton expansé. Neuf échantillons ont été utilisés dans cette expérience dont les résultats sont présentés au tableau 4-10 (annexe A).

4.10.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

L'augmentation de la quantité de soude entraîne une élévation des résistances mécaniques à la flexion et à la compression (Fig. 4-31 et Fig. 4-32), malgré la diminution de la densité.

Cette constatation laisse supposer que l'augmentation de la quantité de soude contribue à accroître la quantité d'hydrosilicates de calcium. Cette accroissement entraîne l'élévation des résistances mécaniques à la flexion et à la compression.

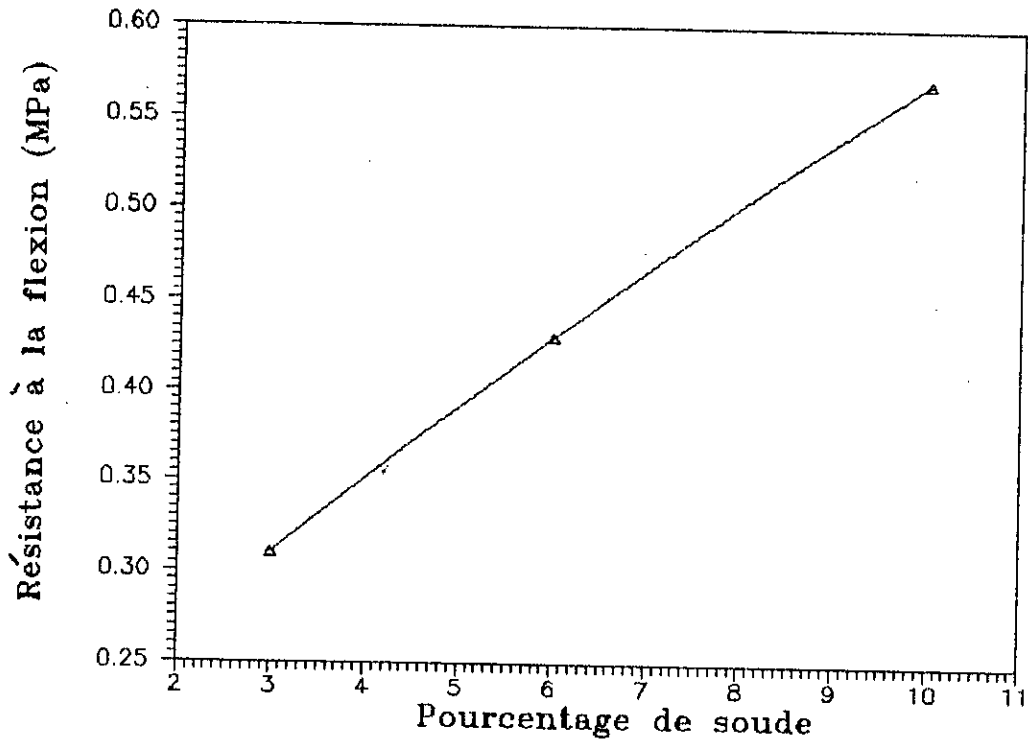


Fig. 4-31: Variation de la résistance à la flexion du béton expansé en fonction du pourcentage de soude

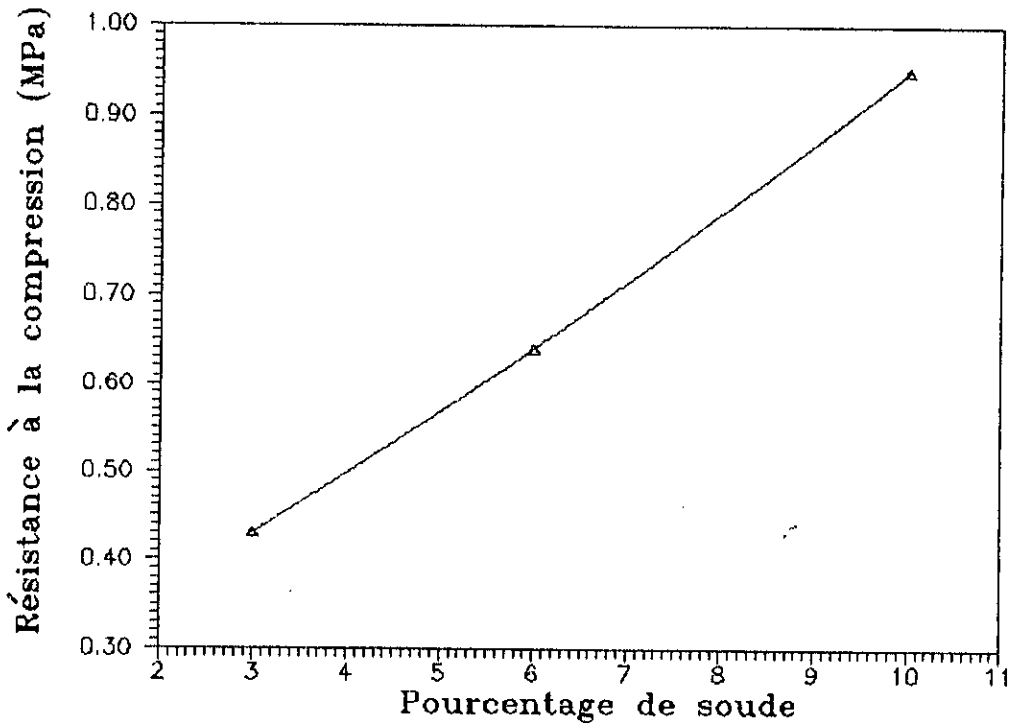


Fig. 4-32: Variation de la résistance à la compression du béton expansé en fonction du pourcentage de soude

L'explication du phénomène décrit précédemment réside dans le fait que, l'augmentation de la quantité de soude entraîne une présence plus abondante des ions hydroxydes (OH^-) qui se combinent à l'ion calcium (Ca^{++}) pour donner de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ce composé chimique réagit avec l'aluminium (Al) pour produire du gaz d'hydrogène, engendrant un gonflement du béton frais, qui entraîne ainsi une diminution de la densité (Fig 4-33).

De plus, l'excès d'ions hydroxydes (OH^-) crée un milieu alcalin favorisant la dissolution de la silice. Celle-ci entre en interaction avec les ions calcium (Ca^{++}), d'où une formation plus importante d'hydrosilicates de calcium, augmentant ainsi, la résistance mécanique.

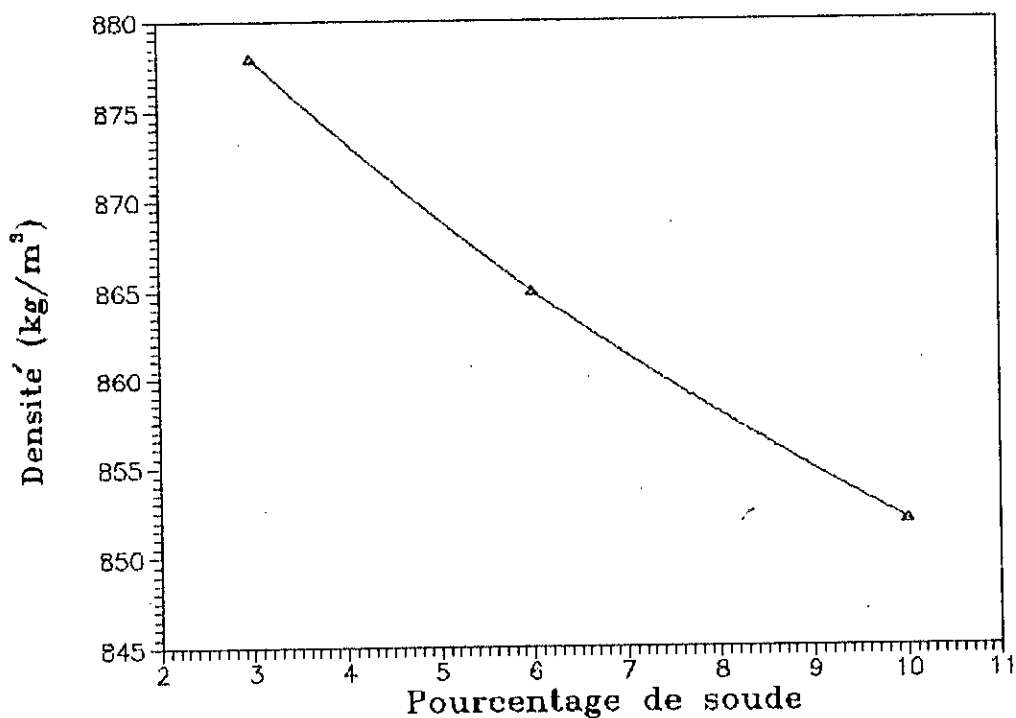


Fig. 4-33: Variation de la densité du béton expansé en fonction du pourcentage de soude

On remarque donc, que la soude contribue, non seulement, à augmenter la résistance mécanique, mais aussi, à réduire, en même temps, la densité. De plus, la soude accélère la prise initiale, ce qui diminue le temps de stockage du béton cellulaire frais.

4.11 INFLUENCE DE LA FINESSE DE LA POUDRE D'ALUMINIUM

4.11.1 MODE OPERATOIRE

Le pourcentage de la poudre d'aluminium a été fixé à 0.2% de la masse totale des composants solides, dont 50% de laitier de surface spécifique Blaine égale à 1500 cm²/g. Le rapport E/S est de 0.46. Le pourcentage de soude est pris égal à 5% de la masse de laitier. Le régime de traitement est de 2^h30-4^h-2^h30.

Deux types de poudres d'aluminium ont été utilisés, afin d'examiner l'influence de la poudre d'aluminium sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau. Pour chaque type de poudre, trois échantillons ont été confectionnés selon le procédé décrit au chapitre 3.

4.11.2 RESULTATS DE L'EXPERIENCE

Comme il a été indiqué précédemment, le gonflement est différent selon la finesse de la poudre d'aluminium. Dans cette expérience nous avons essayé d'examiner l'influence de la finesse de la poudre sur les propriétés physiques et mécaniques du béton expansé. Nous avons utilisé deux types de poudres d'aluminium. Six échantillons ont été confectionnés. Les

résultats de l'expérience sont donnés au tableau 4-11 (annexe A).

4.11.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après les essais entrepris, il apparaît que le gonflement est plus important quand la poudre la plus fine est utilisée. Cette constatation s'explique par le fait que, les cellules d'air formées lors du gonflement sont de volume plus important dans le cas de la poudre d'aluminium du type "granulaire", car le grain de cette dernière a des dimensions plus importantes que celles du grain de l'autre type de poudre. Cela entraîne un volume de gaz dégagé plus élevé autour du grain. Du fait du volume important de ces cellules, il se produit des interconnexions entre elles, ce qui rend possible l'acheminement du gaz à la surface libre de l'échantillon. Ce gaz, par la suite, s'échappe dans l'atmosphère, empêchant ainsi, un gonflement significatif et induit une densité élevée.

Afin de pouvoir comparer les résistances mécaniques du béton cellulaire selon le type de la poudre d'aluminium utilisé, il faut que ces deux bétons cellulaires aient la même densité. C'est la raison pour laquelle nous avons confectionné des échantillons avec la poudre la plus fine. Le pourcentage d'aluminium donnant la masse volumique de 1040 kg/cm^3 est de 0.25%. La résistance mécanique à la compression dans ce cas est de 1.67 MPa. Il apparaît donc clairement que pour une même densité, c'est le béton expansé avec de la poudre fine qui a la résistance la plus élevée. Ce résultat était prévisible car la

structure cellulaire du béton expansé avec la poudre la plus fine a un plus grand pourcentage de pores de faibles dimensions.

On constate donc d'après ce qui vient d'être précédemment affirmé, que l'utilisation de la poudre d'aluminium la plus fine permet non seulement d'économiser 75% d'aluminium mais aussi d'augmenter la résistance mécanique de plus de 90%.

Il est par conséquent recommandé d'utiliser de la poudre d'aluminium la plus fine possible, pour la confection du béton cellulaire.

CHAPITRE CINQUIEME: CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE CINQUIEME

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude sur le béton cellulaire autoclavé en Algérie contribue à améliorer les propriétés générales du matériau et à valoriser certains sous-produits industriels entrant dans sa fabrication. Parmi ces sous-produits, le laitier granulé, qui présente une composition chimique presque analogue à celle du ciment, a été retenu.

Les travaux de recherche ont été effectués sur la pâte chaux-laitier. Nous avons étudié l'influence de certains paramètres, entrant dans la fabrication du béton cellulaire, sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau.

Lors de ce travail, nous avons été confrontés à un problème, posé par l'utilisation d'une formule donnant la masse des composants secs. Nous avons constaté que cette masse, donnée par la relation de G.Gorbounov [5], était insuffisante pour remplir le moule.

L'anomalie relevée dans cette relation, est liée à la valeur du facteur de gonflement K_c qui est de 1.1. Ce coefficient dépend cependant de la finesse de mouture de la poudre d'aluminium et de la fluidité du mélange. Afin de remédier à ce problème nous préconisons de procéder comme suit:

Pour une masse volumique désirée, à l'état sec, on détermine le rapport K_c correspondant en utilisant la formule (5-1) proposée. On évalue ensuite, le pourcentage d'aluminium donnant ce rapport K_c , en faisant l'essai dans un tube gradué.

$$K_c = \frac{1}{\rho_b \left(\frac{E/S}{\rho_e} + \sum \frac{\alpha_i}{\rho_{s_i}} \right)} \quad (5-1)$$

où ρ_b : masse volumique du béton à l'état sec [kg/m³].

ρ_{s_i} : masse volumique du composant sec "i" [kg/m³]

α_i : pourcentage massique du composant "i" part rapport
à la masse totale des composants secs

ρ_e : masse volumique de l'eau [kg/m³]

E/S : rapport massique de l'eau sur les composants secs

Cette méthode a été vérifiée et a donné des résultats satisfaisants.

L'essai qui a consisté à faire varier la finesse de mouture du laitier avec un rapport E/S constant, nous a donné des résultats erronés. La résistance mécanique obtenue du matériau diminuait quand la surface spécifique Blaine augmentait, et ce, en dépit de l'accroissement de la densité.

La cause de ce problème est certainement liée à la fluidité. Effectivement, nous avons constaté lors de la préparation des échantillons, que la variation de la finesse de mouture du laitier, à rapport E/S constant, entraînait un changement de la fluidité, modifiant ainsi la résistance mécanique finale et altérant les résultats. Afin d'éviter que les résultats ne soient fausses, nous recommandons de s'assurer que la variation d'un paramètre donné n'affecte pas la fluidité.

La variation de la surface spécifique Blaine à

fluidité constante a révélé que la résistance mécanique augmentait avec l'élévation de la finesse de mouture du laitier. Nous avons aussi constaté que la résistance diminuait quand le pourcentage de laitier augmentait du fait de sa faible hydraulité comparée à celle de la chaux.

Nous avons mis en évidence dans ce travail, l'existence d'une valeur limite E/S proche de 0.6, pour laquelle la masse volumique converge vers une valeur fixe dépendant du pourcentage d'aluminium utilisé.

Il a été prouvé que la densité chutait avec l'augmentation du volume des vides occlus dans le matériau. Consécutivement une diminution de la résistance a été enregistrée quand le pourcentage d'aluminium augmentait. Effectivement, l'aluminium par sa réaction avec l'hydroxyde de calcium entraîne un dégagement d'hydrogène générant ainsi un gonflement la pâte. On peut en déduire, que la densité est d'autant plus faible que le pourcentage d'aluminium est important, entraînant de ce fait une chute de la résistance mécanique à la flexion et à la compression.

L'étude du régime de traitement a permis de constater que le prolongement de la durée du palier isothermique avait un effet bénéfique sur la résistance mécanique finale du béton cellulaire autoclavé. L'élévation de la température du palier isothermique améliorerait la résistance mécanique du matériau.

La soude (NaOH), utilisée comme accélérateur de prise, influe également positivement sur les propriétés physiques et mécaniques de ce matériau. Effectivement, l'augmentation du

pourcentage de soude, non seulement accroît la résistance mécanique mais, diminue aussi la densité du béton, ce qui représente un résultat très intéressant.

Lors de cette étude nous avons constaté que la finesse de mouture de la poudre d'aluminium, influait considérablement, non seulement, sur le gonflement, donc sur la densité, mais aussi sur la structure cellulaire du béton, donc sur la résistance mécanique. Le gonflement est d'autant plus important que la poudre d'aluminium est fine. La distribution des tailles des pores serait dans ce cas, en majorité constituée de pores de tailles faibles améliorant ainsi la résistance mécanique.

D'après ce qui vient d'être démontré, il est vivement recommandé d'utiliser une poudre d'aluminium la plus fine possible.

Vu l'intérêt porté à l'utilisation du laitier dans le béton cellulaire autoclavé, il serait utile de poursuivre ce modeste travail en introduisant d'autres procédés qu'il faudrait déterminer par des essais au laboratoire. Ainsi nous recommandons d'entreprendre deux expériences particulières:

La première expérience concerne le béton expansé. Il s'agit d'exploiter l'augmentation de volume de l'eau en se solidifiant aux basses températures.

Le procédé consiste à mettre le mortier frais dans un congélateur. L'eau, dans la composition, augmente de volume après congélation, entraînant un gonflement du matériau. A la fin de ce gonflement l'échantillon est introduit dans l'autoclave. La décongélation de l'eau et son évaporation

laisseraient un volume important de vides, diminuant ainsi la densité. Nous pensons que le mortier ne devrait être ni dans un état liquide ni solide, mais plutôt à l'état plastique avant d'être congelé. Car s'il est liquide, après décongélation, il retrouvera son état initial et s'il est solide il se fissurera et le matériau risque de s'effriter. Par contre s'il est à l'état plastique, la déformation est possible et irréversible, permettant ainsi à l'échantillon de garder le volume occupé lors de la congélation.

Nous pensons qu'il existe une maturité optimale du béton frais à l'état plastique pour laquelle le gonflement est le plus important.

Dans le cas où le gonflement n'est pas assez important pour atteindre la densité voulue, il faudra alors ajouter de la poudre d'aluminium. Néanmoins, dans ce cas, une économie sur la poudre d'aluminium sera faite, réduisant ainsi le prix de revient du matériau.

Nous pensons qu'un tel traitement (congélation) permettrait, d'obtenir un matériau résistant au gel du fait de sa prédéformation à ce dernier. Une étude dans ce sens devrait être envisagée.

La deuxième expérience concerne le laitier cristallisé. Elle consiste à exploiter les propriétés mécaniques de ce laitier qui sont semblables à celles du basalte. Le laitier cristallisé est coulé dans un bassin subissant un lent refroidissement, lui conférant une structure cristalline, il prend alors l'aspect d'une roche.

L'idée est de couler ce matériau en fusion dans des moules spéciaux résistants aux hautes températures, dans lesquels des armatures en acier (ferrailage) sont placées. Une fois le matériau solidifié on obtient ainsi des poutrelles préfabriquées pouvant être utilisées dans le bâtiment. Une étude plus poussée permettra la préfabrication des poutres précontraintes. Il est à noter que dans ce cas, l'énergie nécessaire pour tendre les armatures serait réduite du fait de la dilatation thermique de l'acier.

Nous estimons que ce travail apporte une contribution, aussi modeste soit-elle, à la connaissance du laitier et du béton cellulaire. Les travaux entrepris ont été effectués, surtout pour nous initier à la recherche scientifique appliquée, dont l'Algérie a fortement besoin.

ANNEXES

ANNEXE A

TABLEAUX DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

S.S.B [cm ² /g]	pourcentage de laitier	R _f [MPa]	R _c [MPa]	C _{ab} [%]	C _{ram}	ρ [kg/m ³]
1500	65	2.17	4.72	35.58	0.62	1490
	75	1.80	4.4	37.14	0.67	1315
	85	1.30	3.14	35.97	0.68	1270
2000	65	1.80	3.95	36.45	0.63	1520
	75	1.52	3.46	37.12	0.67	1420
	85	1.20	2.88	36.31	0.69	1350
2500	65	1.42	2.78	38.39	0.73	1540
	75	1.33	2.56	37.25	0.75	1455
	85	1.15	2.44	35.48	0.78	1395

Tableau 4-2: variation de la S.S.B et du pourcentage de laitier.

S.S.B [cm ² /g]	R _f [MPa]	R _c [MPa]	C _{ab} [%]	C _r	ρ [kg/m ³]
1500	1.60	6.48	32	0.73	1410
2000	1.91	8.43	29	0.78	1445
2500	2.31	12.00	22	0.77	1570

Tableau 4-3: variation de la surface spécifique
Blaine à fluidité constante.

E/S	Al [%]	R _f [MPa]	R _c [MPa]	C _{ab} [%]	C _r	ρ [kg/m ³]
0.4	0.14	0.93	1.07	35.61	0.96	1280
	0.28	0.88	0.88	35.58	0.80	1190
	0.42	0.74	0.63	35.00	0.78	1170
0.5	0.14	0.82	0.82	42.62	0.85	1125
	0.28	0.74	0.75	42.51	0.75	1085
	0.42	0.62	0.56	42.01	0.69	1050
0.6	0.14	0.78	0.78	43.30	0.76	1100
	0.28	0.63	0.68	42.96	0.72	1060
	0.42	0.52	0.52	42.00	0.63	1037

Tableau 4-4: variations du rapport E/S et du pourcentage
d'aluminium.

S.S.B [cm ² /g]	R _f [MPa]	R _c [MPa]	C _{ab} [%]	C _r	ρ [kg/m ³]
1500	0.91	2.12	45.46	0.72	1106
2000	0.78	1.79	46.92	0.77	1134
2500	0.68	1.60	48.15	0.69	1148

Tableau 4-5: variation de la surface spécifique Blaine
(béton expansé).

S.S.B [cm ² /g]	R _f [MPa]	R _c [MPa]	ρ [kg/m ³]
1500	0.34	0.71	770
2000	0.57	1.13	810
2500	0.93	1.68	900

Tableau 4-6: variation de la surface spécifique Blaine
à fluidité constante (béton expansé).

laitier [%]	R _f [MPa]	R _c [MPa]	C _{ab} [%]	C _r	ρ [kg/m ³]
40	0.94	1.89	48.61	0.85	1037
65	0.67	1.78	44.82	0.83	1136
75	0.52	1.62	45.04	0.83	1195

Tableau 4-7: variation du pourcentage de laitier
(béton expansé).

température [°c]	R_f [MPa]	R_c [MPa]	C_{ab} [%]	C_r	ρ [kg/m ³]
170	0.33	0.51	59.51	0.78	843
180	0.39	0.68	58.32	0.74	840
190	0.41	0.70	55.47	0.71	845
210	0.59	0.99	57.74	0.80	841

Tableau 4-8: variation de la température de traitement.

durée du palier iso- thermique [heure]	R_f [MPa]	R_c [MPa]	C_{ab} [%]	C_r	ρ [kg/m ³]
4	0.30	0.41	52.17	0.63	880
6.50	0.34	0.47	53.43	0.61	880
12	0.46	0.78	49.10	0.62	885
16	0.64	1.24	49.04	0.61	885

Tableau 4-9: Variation de la durée du palier isothermique.

pourcentage de soude [%]	R_f [MPa]	R_c [MPa]	C_{ab} [%]	C_r	ρ [kg/m ³]
3	0.31	0.43	55	0.80	878
6	0.43	0.64	54	0.87	865
10	0.57	0.95	53.5	0.90	852

Tableau 4-10: Variation du pourcentage de soude.

finesse de la poudre d'aluminium	R_f [MPa]	R_c [MPa]	C_{ab} [%]	C_r	ρ [kg/m ³]
poudreuse	0.31	0.39	58	0.91	830
granulaire	0.74	0.89	39	0.57	1042

Tableau 4-11: influence de la finesse de la poudre d'aluminium.

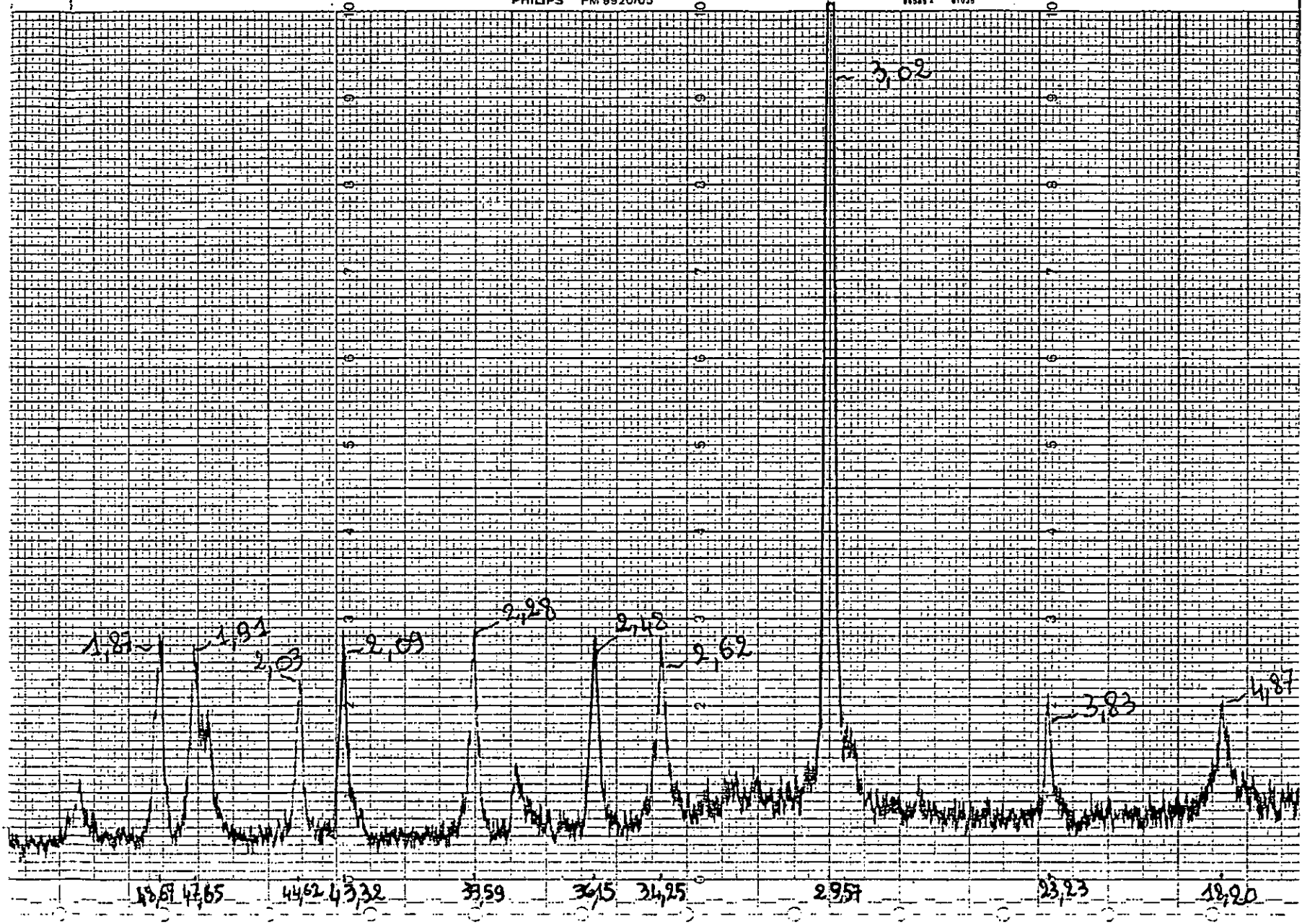


Fig. 4-34: diffractogramme du béton autoclavé à une température de 170°C

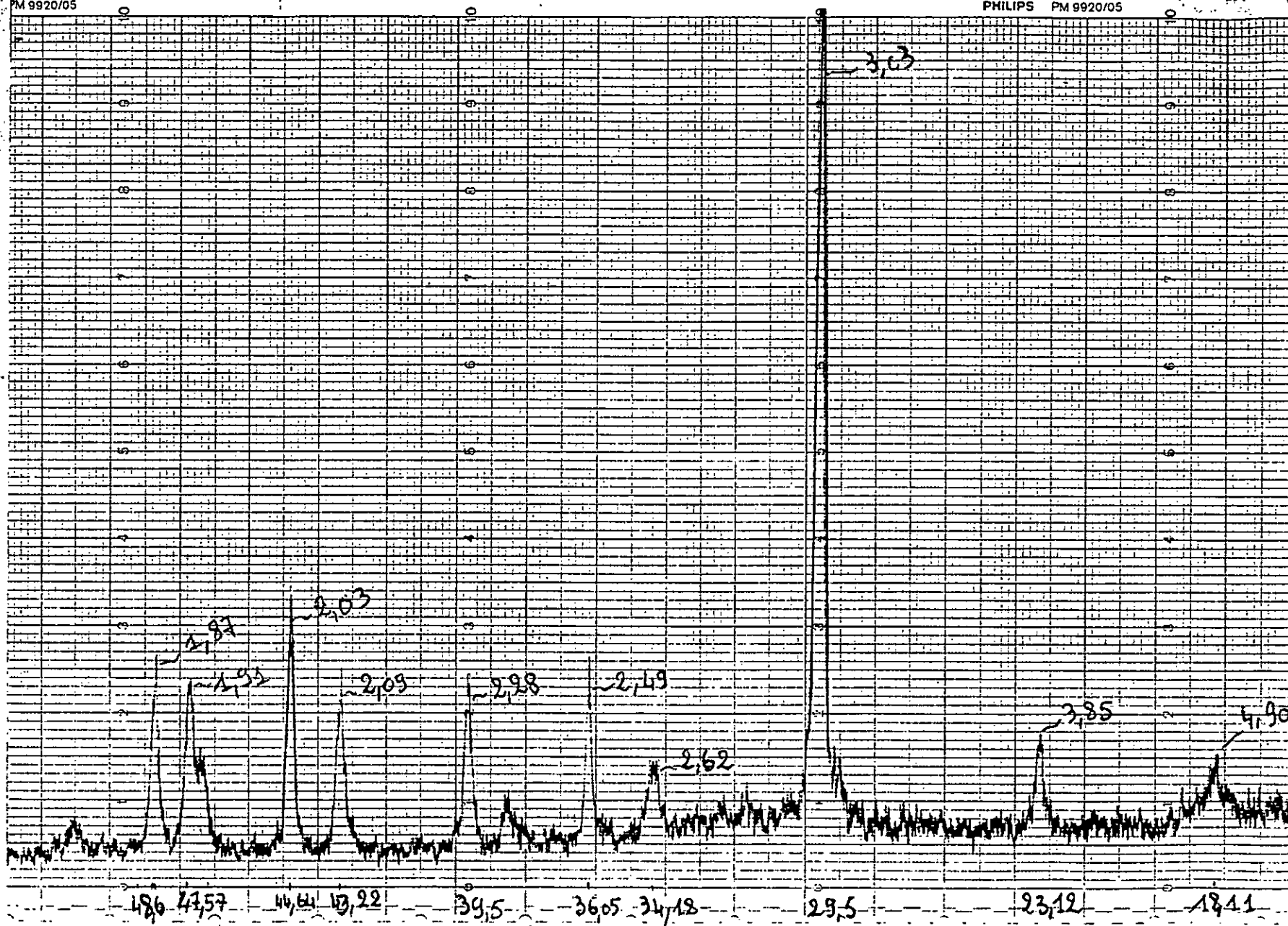


Fig. 4-35: diffractogramme du béton autoclavé à une température de 180°C

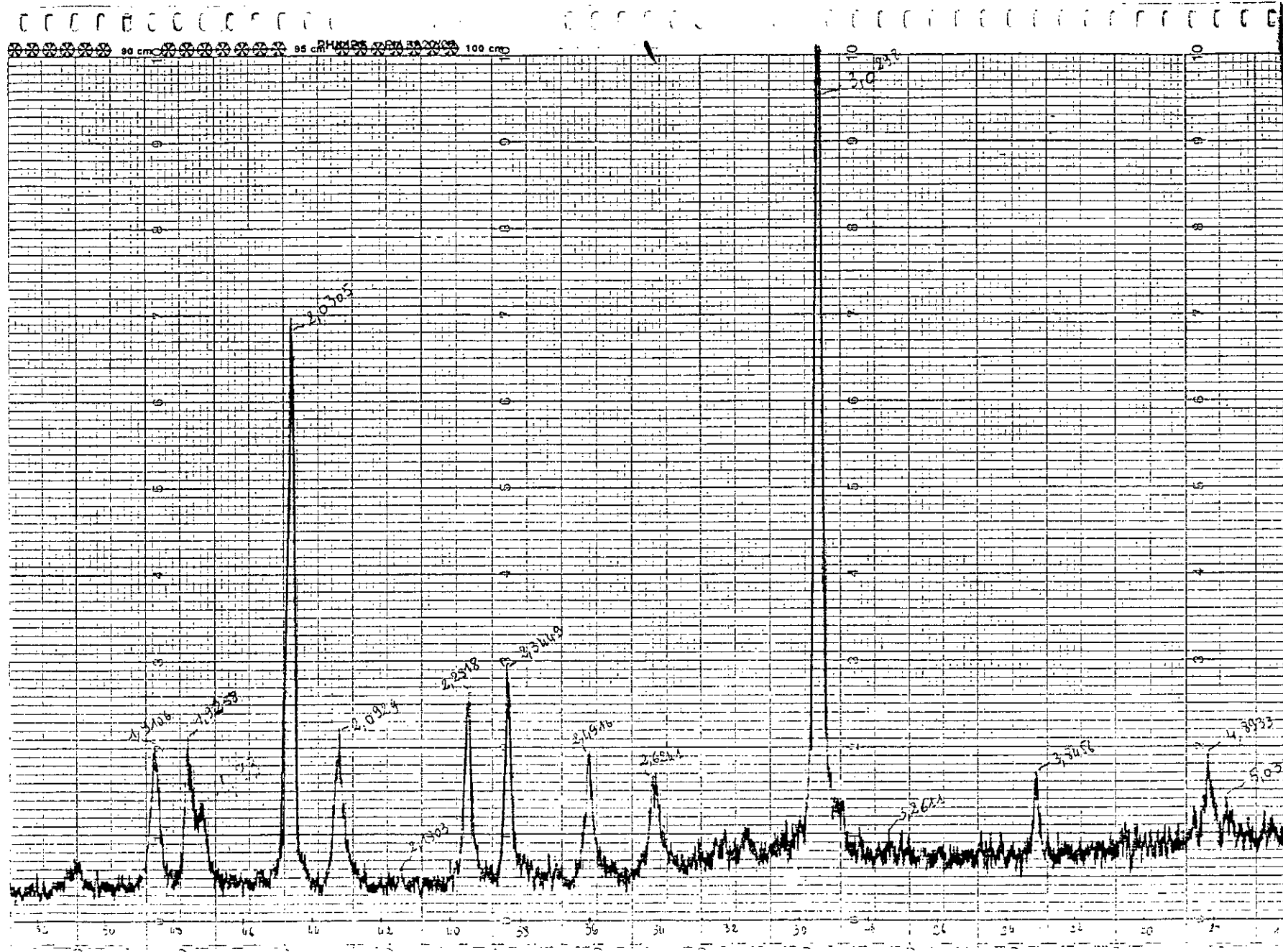


Fig. 4-36: diffractogramme du béton autoclavé à une température de 190°C

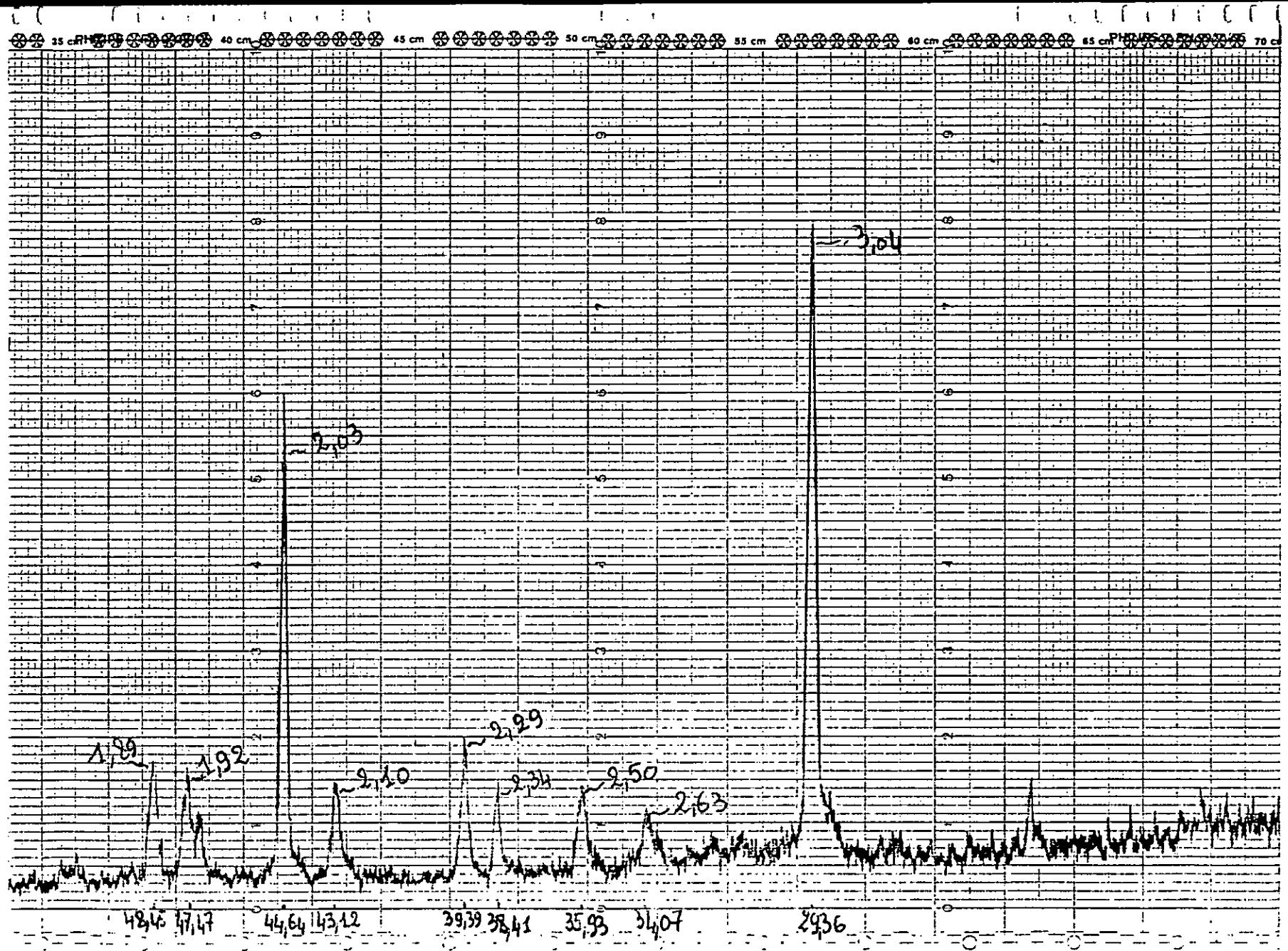


Fig. 4-37: diffractogramme du béton autoclavé à une température de 210°C

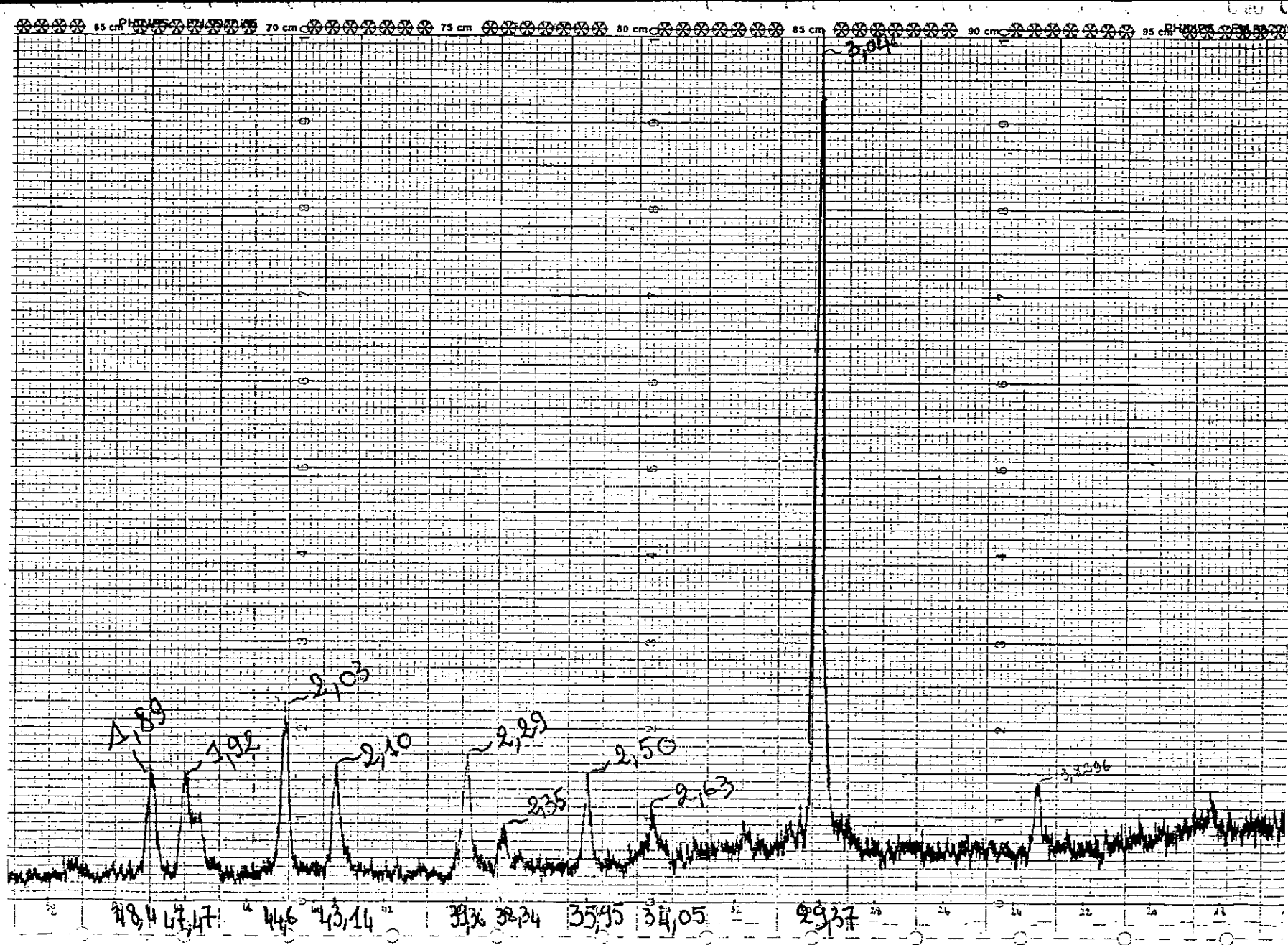


Fig. 4-38: diffractogramme du béton autoclavé pendant 4^h

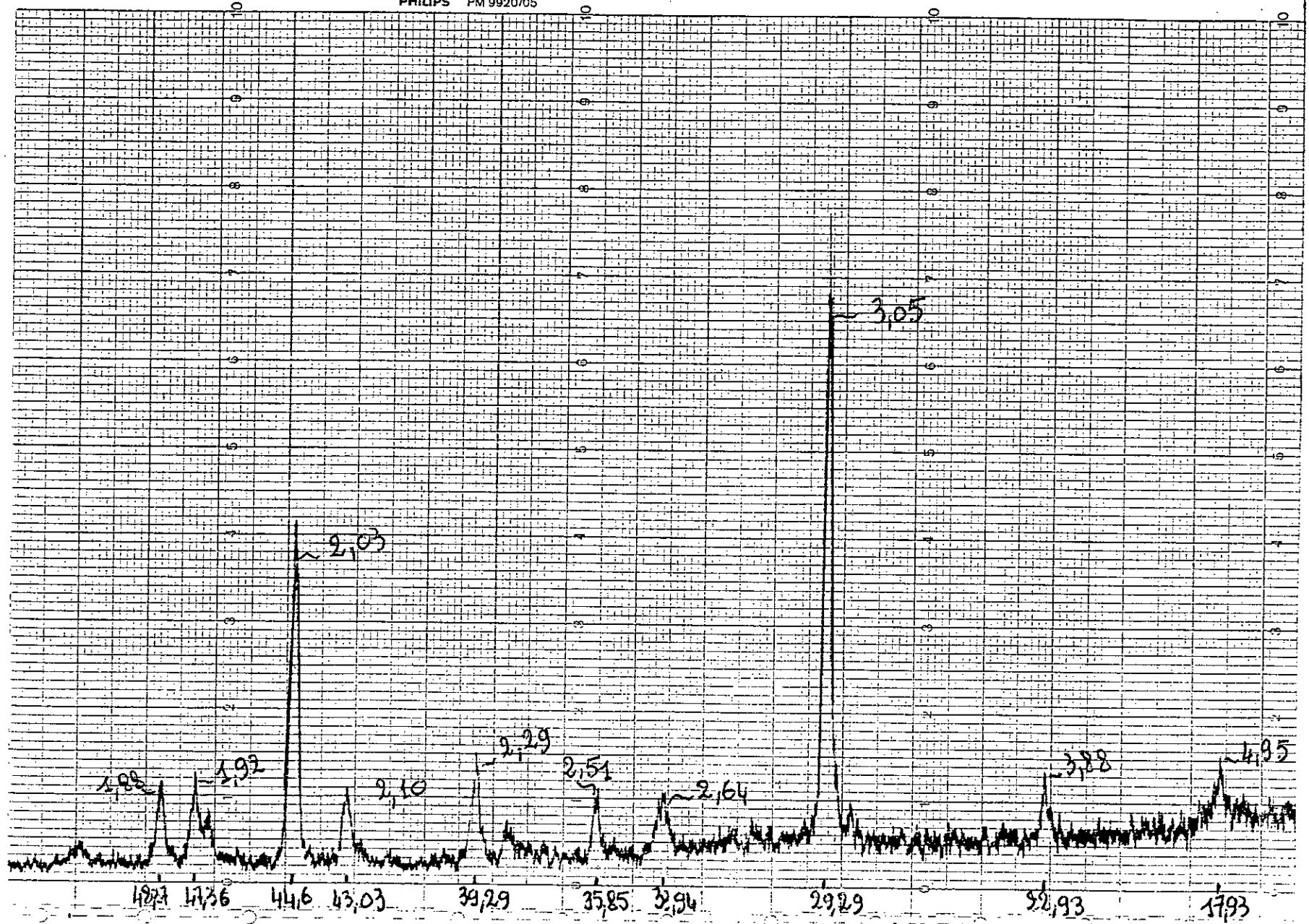


Fig. 4-39: diffractogramme du béton autoclavé pendant 6^h30^{mn}

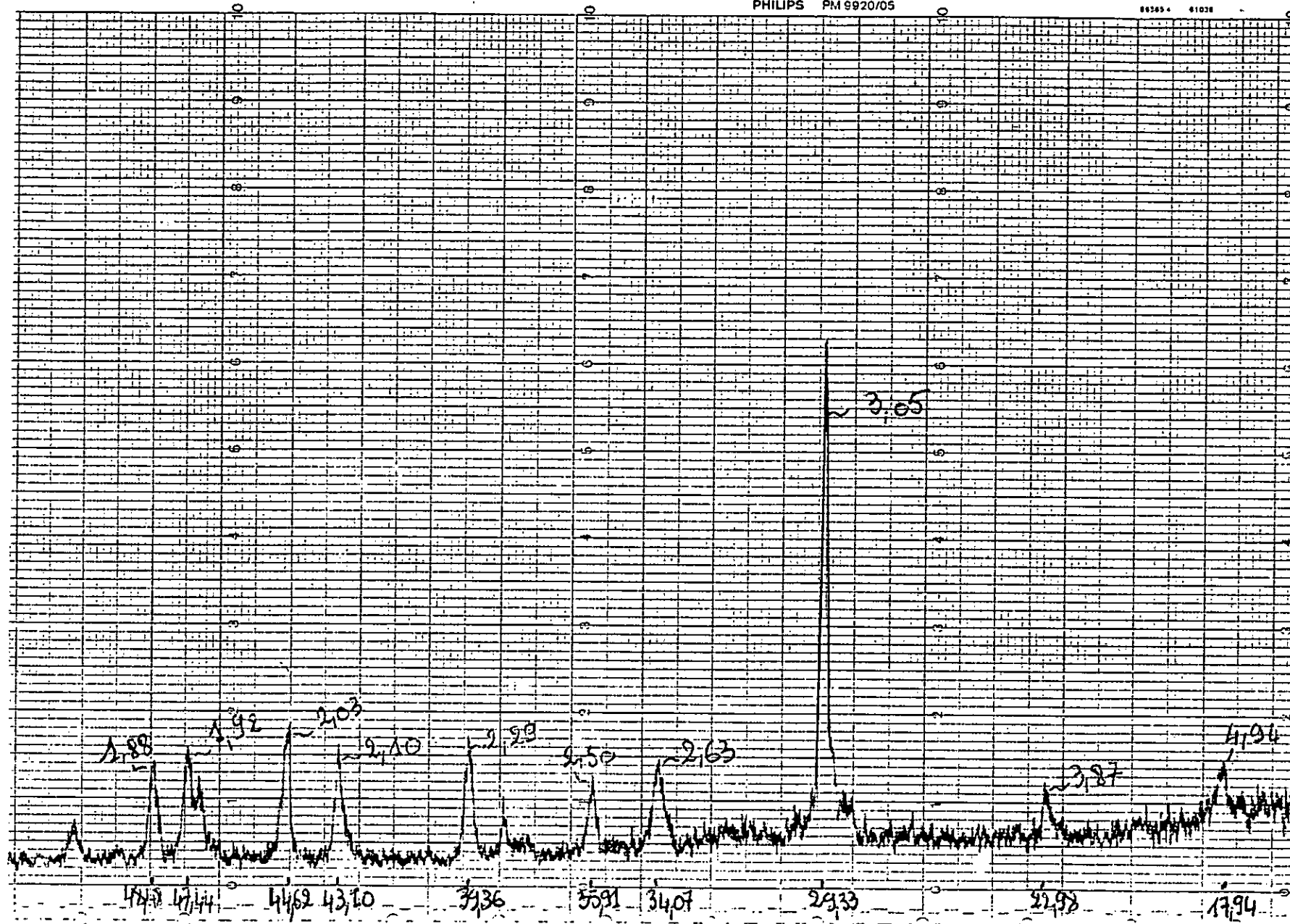


Fig. 4-40: diffractogramme du béton autoclavé pendant 12^h

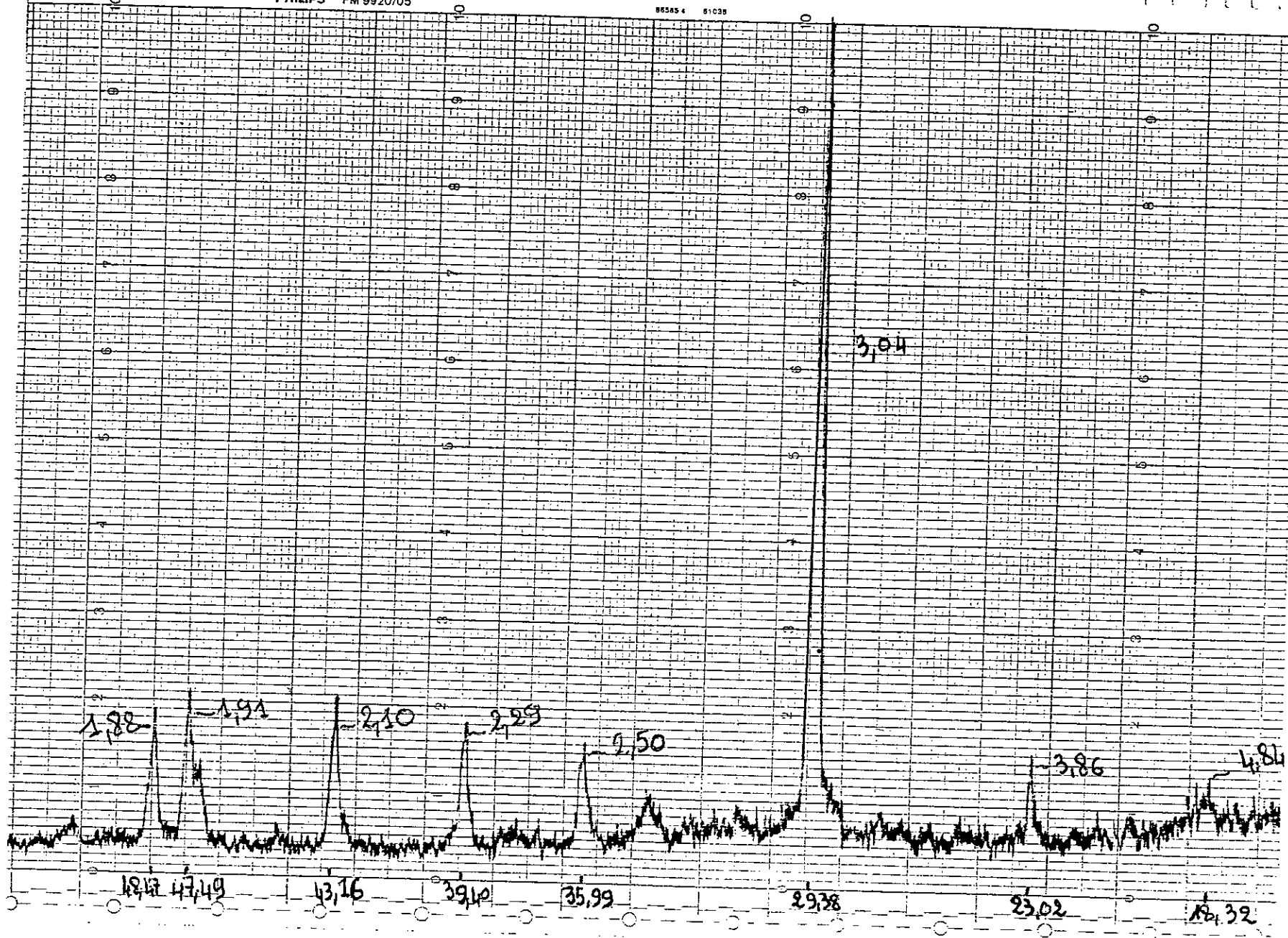


Fig. 4-41: diffractogramme du béton autoclavé pendant 16^h

REFERENCES

REFERENCES

- [1] Abadlia Med. Tahar, "Fabrication des blocs de laitier et étude de leurs propriétés d'exploitation", Institut de Genie Civil, université d'Annaba, Algérie 1989.
- [2] Emery J.J., "Laitiers", Mc Master, Canada 1988.
- [3] Dubosc A., " Avantages techniques et économiques de l'utilisation du laitier granulé en cimenterie", C.R.Conf.Int., Sous-produits et déchets dans le génie civil Paris 1978.
- [4] Short A. and Kinniburgh W., "Lightweight concrete", Third édition Formerly, Building Research Establishment, Garston, Watford, U.K., 1981.
- [5] Gorbounov G., "Matériaux calorifuges", Cours de laboratoire, Université d'Annaba 1978.
- [6] Swamy R.N., "Cement replacement materials", England 1982.
- [7] Duriez M. et Arrambide J., Nouveau traité de M.D.C, tome 1.
- [8] Reeves C.M., The use of granulated blastfurnace slag to produce durable concrete, Siminar on "How to make today's concrete durable for tomorrow", the Istitute of Civil Engineers, London 1985.
- [9] Abadlia M.T., "Etude et propriétés des blocs de laitier", Journées scientifiques, E.P.A.U., El-Harrach, Alger 1989.
- [10] Spratt B.H., "An introduction to lightweight concrete", England 1978 .
- [11] Short A. et Kinniburgh W., "lightweight concrete", third

edition, Building Research Establishment, Garston, Watford, U.K 1973

- [12] Departement of the environment, "Autoclaved aerated concrete", Building Research Establishment Digest, Garston, Watford, U.K., juin 1975.
- [13] Shaffer H., "Steam curing", Symposium on steam cured lightweight concrete, Gothenburg 1960.
- [14] Kinniburgh W., "Comparison of drying shrinkage of autoclaved and air-cured concrete at different humidities", RILEM Symposium on steam cured lightweight concrete, Gothenburg 1960.
- [15] Engwall A., "Fire RESISTANCE OF Siporex products", RILEM symposium on steam-cured lightweight concrete, Gothenburg 1960.
- [16] Bojenov P.I., "Technologie des matériaux autoclavés", Leningrad, 1978.
- [17] Taylor H.F., "Les hydrosilicates de calcium", 4^{eme} congrés international sur la chimie du ciment, Moscou 1974.
- [18] Majindar A., " Chimie des hydrosilicates", journal Américain SOC 12, n°12, 1956.
- [19] Kalousek G.L. et Nelson E.B., "Hydrothermal relations of dicalcium silicate and silica", Cement and concrete research, 8, 283, 1978.
- [20] Leusmann U. et Mortel H., "Autoclaved reactions" Tonindustrie Zeitung" 103, 524 (1979).
- [21] Jernijic J. et Jelenic I., "Les tobermorites", Cement and concrete research" 4, 123, 1974.

- [22] Hara N., Chan C.F. et Mitsuda T., "Synthesis of normal and anomalous tobermorites", Cement and concrete research, 7, 429, 1977.
- [23] Assarson G.O., J.Phys.chem. 62, 223, 1958.
- [24] Sauman Z., "Formation of an intermediate C-S-H phase during the hydrothermal Synthesis of gyrolite", Cement and concrete research, 13, 684, 1983.
- [25] S.A.S. El-Hemaly, Mohan K., et Taylor H.F.W., "autoclaved lime-quartz materials II. Thermogrametry", Cement and concrete research, 8, 671, 1978.
- [26] Alexanderson J., "Relation between structure and mechanical properties of autoclaved aerated concrete", Cement and concrete research, 9, 507, 1979.
- [27] Mindess S., "Relationship between the strenght and microstructure of autoclaved calcium silicate materials" Ph.D Thesis, Stanford university, Stanford, Calif., 1970.
- [28] Bal'Shin M.YU., "Relation of mechanical properties of powder and their porosity", Dokl. Akad. Nauk USSR, 65 [5] 831-34.
- [29] Ryshkewitch E., "Compression strenght of porous sintered alumina and zirconia", Ibid 36 [2] 65-68 1953.
- [30] Mironov S.A. et Malinina L.A., "Accélération du durcissement du béton", Moscou 1964.
- [31] Bojenov, "Les matériaux autoclavés", 1980.
- [32] Lacroix R., Fuentes A. et Thonier H., "Traité de béton armé", cours de l'E.N.P.C., Paris 1982.