

FABRICATION D'UNE BRIQUE LEGERE ET  
ISOLANTE A PARTIR D'ARGILE, DE SCIURES  
DE BOIS ET DE DECHETS DE VERRE.

PIERRE GUITÉ

A thesis  
in  
The Centre for Building Studies  
Faculty of Engineering

Presented in partial fulfilment of the requirements  
for the degree of Master of Engineering (Building)

at

Concordia University  
Montréal, Québec, Canada

January 1983

© Pierre Guité, 1983

**RÉSUMÉ****FABRICATION D'UNE BRIQUE LÉGÈRE ET ISOLANTE  
A PARTIR D'ARGILE, DE SCIURES DE BOIS  
ET DE DÉCHETS DE VERRE**

Pierre Guité  
Maîtrise en Génie

Des mélanges de sciures de bois d'érables et d'argile ainsi que des mélanges de sciures, d'argile et de déchets de verre broyés, ont été préparés, pressés et cuits de façon à produire des briques légères et poreuses. En ce qui a regard aux briques d'argile-sciures, plusieurs paramètres de fabrication ont été étudiés séparément: le taux de cuisson, la température maximale de cuisson, la dimension des grains d'argile et de sciures, la proportion de sciures incorporée aux mélanges ainsi que la pression exercée lors du moulage. Il fut démontré que la variation de ces paramètres, sans exception, modifie de façon sensible les propriétés physiques et mécaniques des briques cuites. Les résultats expérimentaux établissent, entre autre, que la conductibilité thermique et la résistance en compression des produits d'argile-sciures cuits diminuent, alors que les taux d'absorption dans l'eau froide et bouillante s'accroissent, lorsque la quantité de sciures incorporée aux mélanges augmente. Toutefois, il fut possible d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des briques d'argile-sciures en remplaçant une portion de l'argile par des particules de verre recyclé de dimensions semblables. Afin d'optimiser les propriétés physiques et mécaniques des briques d'argile-verre-sciures, la température de cuisson, la proportion de déchets de verre broyés et la quantité de sciures ajoutées furent

modifiés. Des briques légères d'une densité apparente de 1.19 gr/cc furent ainsi fabriquées. Leur résistance en compression excède 21 MPa, leur conductibilité thermique est d'environ 0.26 W/m°C, leur coefficient de saturation est d'environ 0.72, et leurs taux d'absorption dans l'eau froide et bouillante sont respectivement de 30 et 41%. Les produits d'argile fabriqués présentent des potentiels intéressants comme matériaux de construction à cause de leur légèreté et des économies d'énergie qui peuvent être réalisées lors de leur production et de leur utilisation.

## ABSTRACT

FABRICATION OF A LIGHTWEIGHT AND  
INSULATING BRICK FROM CLAY, SAWDUST  
AND WASTE GLASS

Pierre Guité

Master of Engineering

Mixtures of maple-wood sawdust and local gray burning clay, and mixtures of sawdust-clay and soda-lime glass grains prepared from recycled waste glass have been fabricated into lightweight clay products with various physical, mechanical and thermal properties by a simple dry-pressing and sintering process. With regard to the clay-sawdust system, several parameters have been studied separately: firing rate, maximum firing temperature, clay and sawdust particle size, proportion of sawdust and molding pressure. It has been shown that all these parameters significantly modify the physical and mechanical properties of fired bricks. The studies show that both thermal conductivity and compressive strength of the sintered sawdust-clay products decreased while cold water absorption increased, as the content of the sawdust particles incorporated into the clay body was increased up to 15 wt%. However, it was found possible to improve these inferior properties of the clay products by replacing portions of the clay particles with soda-lime glass grains of similar size. The studies also show that very lightweight composite clay products with bulk density of 1.19 gr/cc, compressive strength in excess of 31 MPa, thermal conductivity value of 0.26 W/m<sup>o</sup>C and water saturation coefficient of about 0.72 can be readily fabricated from the glass-sawdust-clay mixtures.

**REMERCIEMENTS**

Je désire remercier Monsieur Norman-Low et le Dr. Paul Fazio, mes directeurs de thèse, pour les conseils qu'ils ont su me prodiguer et l'aide financière qu'ils m'ont accordé en puisant dans leurs fonds du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie.

Je suis reconnaissant envers le gouvernement du Québec (Formation des chercheurs et action concertée) pour les bourses de maîtrise qu'ils m'ont octroyées.

J'aimerais aussi remercier la compagnie Domtar (Monsieur Wilfred R. Reedijk), qui m'a fourni l'argile nécessaire pour la poursuite de mes expériences, et Processed Wood Inc. (Monsieur Pierre J. Samson) de qui j'ai pu me procurer les sciures de bois nécessaires.

L'aide technique de Joseph Zilkha fut grandement appréciée pour la calibration et la réparation des fours à céramiques.

J'exprime enfin ma reconnaissance à Mlle Connie Anania pour le temps qu'elle a consentie pour la dactylographie de ma thèse.

## TABLE DES MATIERES

<u>TITRE</u>	<u>PAGE</u>
Resumés (français et anglais)	i
Remerciements	iv
Tables des matières	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des photographies	xi
Liste des annexes	xii
	xiii
<u>CHAPITRE 1: INTRODUCTION</u>	
1.1 Matériaux de construction et déchets solides	1
1.2 Quantités de déchets solides produits	9
1.2.1 Quantités totales produites	9
1.2.2 Sciures de bois	11
1.2.3 Déchets de verre	14
1.3 Matériaux de construction fabriqués à partir de déchets solides: synthèse des recherches antérieures	17
<u>CHAPITRE 2: BRIQUES DE CONSTRUCTION LEGERES ET ISOLANTES</u>	
2.1 Briques de construction: définition	18
2.2 Procédés de fabrication	20
2.3 Emploi de sciures de bois	22
2.4 Emploi de déchets de verre broyé	26
2.5 Objectifs de la présente étude	30
<u>CHAPITRE 3. EXPERIENCE</u>	
3.1 Matières premières	32
3.1.1 Argile	32
3.1.2 Sciures de bois	33
3.1.3 Déchets de verre	
3.2 Procédé de fabrication	36
3.2.1 Description du procédé de fabrication	36
3.2.2 Equipements	37
3.3 Plan d'expérimentation	40
3.4 Essais	45

**CHAPITRE 4: RESULTATS ET DISCUSSION**

4.1	Système à une composants: argile	49
4.2	Système à deux composants: argile et sciures	60
4.2.1	Variation de la température de cuisson avant l'élimination des sciures	60
4.2.2	Variation du taux de cuisson pour obtenir une combustion complète des sciures	68
4.2.3	Variation de la température et du temps de cuisson après l'élimination des sciures	75
4.2.4	Variation de la grosseur des particules d'argile	82
4.2.5	Variation de la grosseur des particules de sciures	92
4.2.6	Variation de la pression lors du moulage	100
4.2.7	Variation de la quantité de sciures	107
4.2.8	Optimisation	115
4.2.9	Conclusion	135
4.3	Système à trois composants: argile, sciures et déchets de verre	141
4.3.1	Variation de la proportion de déchets de verre	143
4.3.2	Variation de la température de cuisson	152
4.3.3	Variation de la quantité de sciures	161
4.3.4	Conclusion	167
4.4	Conductibilité thermique des systèmes à une, deux et trois composants	173

**CHAPITRE 5: CONCLUSION**

RECHERCHES FUTURES	180
BIBLIOGRAPHIE	188
ANNEXES	192

## LISTE DES FIGURES

Figure

1. Utilisation des matériaux (per capita, par année).
2. Recyclage des matériaux.
3. Variation de la température de cuisson en fonction de la proportion de déchets de verre ajoutée aux mélanges d'argile.
4. Pertes de poids en fonction de la température de cuisson.
5. Variations de volume en fonction de la température de cuisson.
6. Densité apparente en fonction de la température de cuisson.
7. Taux d'absorption en fonction de la température de cuisson.
8. Coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson.
9. Résistance en compression en fonction de la température de cuisson.
10. Module de rupture en fonction de la température de cuisson.
11. Pertes de poids en fonction de la température de cuisson.
12. Variations de volume en fonction de la température de cuisson.
13. Résistance en compression en fonction de la température de cuisson.
14. Poids restant des sciures en fonction de la température de cuisson.
15. Pertes de poids en fonction du temps de cuisson.
16. Variations de volume en fonction du temps de cuisson.
17. Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction du temps de cuisson.

18. Résistance en compression en fonction du temps de cuisson.
19. Densité apparente en fonction de la dimension des particules d'argile.
20. Variations de volume en fonction de la dimension des particules d'argile.
21. Taux d'absorption en fonction de la dimension des particules d'argile.
22. Coefficient de saturation en fonction de la dimension des particules d'argile.
23. Propriétés mécaniques en fonction de la dimension des particules d'argile.
24. Densité apparente en fonction de la dimension des particules de sciures.
25. Variations de volume en fonction de la dimension des particules de sciures.
26. Taux d'absorption en fonction de la dimension des particules de sciures.
27. Coefficient de saturation en fonction de la dimension des particules de sciures.
28. Propriétés mécaniques en fonction de la dimension des particules de sciures.
29. Densité apparente en fonction de la pression de moulage.
30. Taux d'absorption en fonction de la pression de moulage.
31. Coefficient de saturation en fonction de la pression de moulage.
32. Propriétés mécaniques en fonction de la pression de moulage.
33. Densité apparente en fonction de la quantité de sciures.
34. Taux d'absorption en fonction de la quantité de sciures.
35. Coefficient de saturation en fonction de la quantité de sciures.
36. Propriétés mécaniques en fonction de la quantité de sciures.

37. Densité apparente en fonction de la température de cuisson.
38. Densité apparente en fonction du temps de cuisson.
39. Variations de volume en fonction de la température de cuisson.
40. Variations de volume en fonction du temps de cuisson.
41. Taux d'absorption en fonction de la température de cuisson.
42. Taux d'absorption en fonction du temps de cuisson.
43. Coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson.
44. Coefficient de saturation en fonction du temps de cuisson.
45. Propriétés mécaniques en fonction de la température de cuisson.
46. Propriétés mécaniques en fonction du temps de cuisson.
47. Densité apparente en fonction de la pression de moulage.
48. Taux d'absorption en fonction de la densité apparente.
49. Coefficient de saturation en fonction de la densité apparente.
50. Résistance en compression en fonction de la densité apparente.
51. Module de rupture en fonction de la densité apparente.
52. Densité apparente en fonction de la proportion de déchets de verre.
53. Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la proportion de déchets de verre.
54. Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la proportion de déchets de verre.
55. Coefficient de saturation en fonction de la proportion de déchets de verre.
56. Propriétés mécaniques en fonction de la proportion de déchets de verre.

57. Densité apparente en fonction de la température de cuisson
58. Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la température de cuisson.
59. Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la température de cuisson.
60. Coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson.
61. Résistance en compression en fonction de la température de cuisson.
62. Module de rupture en fonction de la température de cuisson.
63. Densité apparente en fonction de la quantité de sciures.
64. Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la quantité de sciures.
65. Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la quantité de sciures.
66. Coefficient de saturation en fonction de la quantité de sciures.
67. Résistance en compression en fonction de la quantité de sciures.
68. Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la densité apparente.
69. Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la densité apparente.
70. Coefficient de saturation en fonction de la densité apparente.
71. Résistance en compression en fonction de la densité apparente.
72. Conductibilité thermique en fonction de la quantité de sciures (25°C).
73. Conductibilité thermique en fonction de la quantité de sciures (100°C).
74. Conductibilité thermique en fonction de la densité apparente (25°C).

**LISTE DES TABLEAUX****Tableau**

1. Déchets solides produits (1970) (Québec, Canada, Etats-Unis).
2. Déchets résiduels après incinération (Québec 1970).
3. Estimation des quantités de matières ligneuses produites aux usines de transformation première (mars 1979, Québec).
4. Statistique Canada, statistique forestières du Canada numéro 25-202; livraisons de copeaux de bois, toutes industries (Québec).
5. Spécifications de la norme CSA A82.1 et A82.7.
6. Plan d'expérimentation.
7. Lignes directrices pour la fabrication, par pressage, de briques d'argile en utilisant des sciures de bois d'érable anhydre et une argile grise séchée et broyée.
8. Propriétés comparées: systèmes à 1 et 2 composantes.
9. Résultats optimaux obtenus avec les systèmes à 1, 2, et 3 composantes.

## LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographies

1. Formation de coeurs noirs.
2. Formation de coeurs noirs.
3. Elimination du carbone en fonction de la temperature.
4. Elimination du carbone en fonction du temps.
5. Grosseurs des particules d'argile.
6. Echantillons cuits agrandis 7 fois.
7. Grosseur des particules de sciures.
8. Echantillons cuits agrandis 7 fois.
9. Variation de la pression.
10. Echantillons cuits agrandis 7 fois.
11. Variation de la quantite de sciures.
12. Variation de la temperature maximale de cuisson.
13. Effet de surface.
14. Variation de la proportion de dechets de verre, cuisson à 900°C.
15. Variations de volume.
16. Fissuration de la surface.

**LISTE DES ANNEXES**

**Annexes**

- A. Revue des matériaux de construction fait à partir de déchets solides.
  - A.1 Matériaux de construction fabriqués à partir de déchets solides.
  - A.2 Processus de moulage des déchets pour la fabrication de matériaux de construction.
  - A.3 Processus de traitement.
- B. Avantages et inconvénients des sciures de bois et des déchets de verre broyés lorsqu'ajoutés à des mélanges d'argile.
  - B.1 Liste comparée des avantages et désavantages de l'ajout de sciures de bois à une pâte d'argile.
  - B.2 Liste comparée des avantages et désavantages de l'ajout de déchets de verre broyé à une pâte d'argile.
- C. Description des réactions chimiques se produisant à l'intérieur des briques au cours de la cuisson.
- D. Composition chimique typique du verre au sodium.
- E. Variation des pertes d'eau (en poids) en fonction du temps.
- F. Analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures.
- G. Variations combinées de la pression de moulage et de la quantité de sciures.

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

#### 1.1 MATERIAUX DE CONSTRUCTION ET DECHETS SOLIDES

La fabrication de matériaux de construction à partir de déchets solides récupérés (déchets miniers, industriels ou urbains) suscite et suscitera un intérêt accru. Plusieurs raisons peuvent être invoquées (1):

1. Le coût de plus en plus élevé des ressources énergétiques augmente les frais de fabrication et de transport de plusieurs matériaux de construction. C'est le cas, en particulier des agrégats et des matières plastiques. Cette augmentation nous oblige en quelque sorte à réviser les processus de fabrication actuels ou à en développer de nouveaux, mais elle nous incite aussi à envisager en guise d'alternatives l'utilisation de déchets solides: une source de matières premières abondante et peu coûteuse.

2. La préservation de notre environnement rural et urbain jouit de plus en plus de la faveur populaire. Les législations gouvernementales dans le domaine des déchets solides se font plus restrictives. Le Québec produit environ 218 millions de tonnes de déchets solides par an, soit près de 73 kg par personne par jour (2): une quantité colossale qui par surcroît coûtera de plus en plus cher à enfouir ou à incinérer. Dans un tel contexte, récupérer ces ressources potentielles et les réintégrer dans le cycle de production économique pour les transformer en biens utiles, constitue une voie intéressante

à explorer.

3. Les matières premières solides (minéraux, etc.) ne sont pas inépuisables. Au contraire, des études américaines nous laissent même entrevoir la possibilité de pénuries de minéraux et de non-métaux vers l'an 2,000 (3). A l'opposé, la production de déchets solides, elle, ne cesse de croître et au Québec elle dépasserait même dans 20 ans les 300 millions de tonnes (2).

Dès 1920, le Gouvernement Américain par l'entremise du Bureau des Mines fit oeuvre de pionnier en mettant sur pied un programme de recherche et de développement dans le domaine des matériaux de construction fabriqués à partir de déchets solides (4). Les responsables de ce projet firent cavaliers seuls pendant plusieurs décades car il fallut attendre le début des années 60 avant que d'autres organismes emboîtent le pas. Dès lors, les efforts de recherches se sont multipliés, tant aux Etats-Unis (U.S. Federal Highway Administration, Transportation Research Board, etc.), qu'au Canada (Centre for Mineral and Energy Technology, McMaster University, etc.). Quelques revues spécialisées ont vu le jour: "Resources Policy" et "Resource Recovery and Conservation" et des banques de données ont été mises sur pied, telle La Bourse Canadienne des Déchets.

Ce nouveau champs d'étude éveille l'attention des différents palliers de gouvernements et canalise l'énergie de plusieurs chercheurs. Examinons plus en détail les arguments qui peuvent être invoqués pour justifier le bien fondé de ces recherches:

1. L'importance de l'industrie de la construction: En 1972, au cours de cette seule année, le nord-américain moyen utilisa plus de 21 tonnes de matériaux (5): 9 tonnes de matériaux combustibles, plus d'une demie tonne de métaux, 10 tonnes de matériaux non métalliques, et environ 1.5 tonne de différents matériaux organiques. Dans cet ensemble imposant, les matériaux de construction constituèrent plus de 55% de tous les matériaux consommés, soit 11,7 tonnes par année per capita (voir Fig. 1).

Les matériaux de construction constituent donc un élément-clé de notre système économique. Ce sont d'ailleurs dans des industries fortement liées aux matériaux, de souligner J. Hode-Keyser (5), que se trouvent les entreprises à plus fort taux de croissance et à plus grande valeur ajoutée.

Sur le plan de la consommation de l'énergie ces affirmations ne se démentissent pas; les matériaux de construction continuent d'occuper une place prépondérante. Les coûts de construction et d'opération représentent 32% de la facture énergétique totale que doivent payer les Etats-Unis Chaque année (6). Le Canada est dans une position similaire.

Devant l'importance de l'industrie des matériaux de construction, il serait donc logique de considérer, en priorité, cette industrie comme débouché possible pour la réutilisation éventuelle des quelques 180 millions de tonnes de déchets miniers, industriels et urbains que produisit le Québec en 1980.

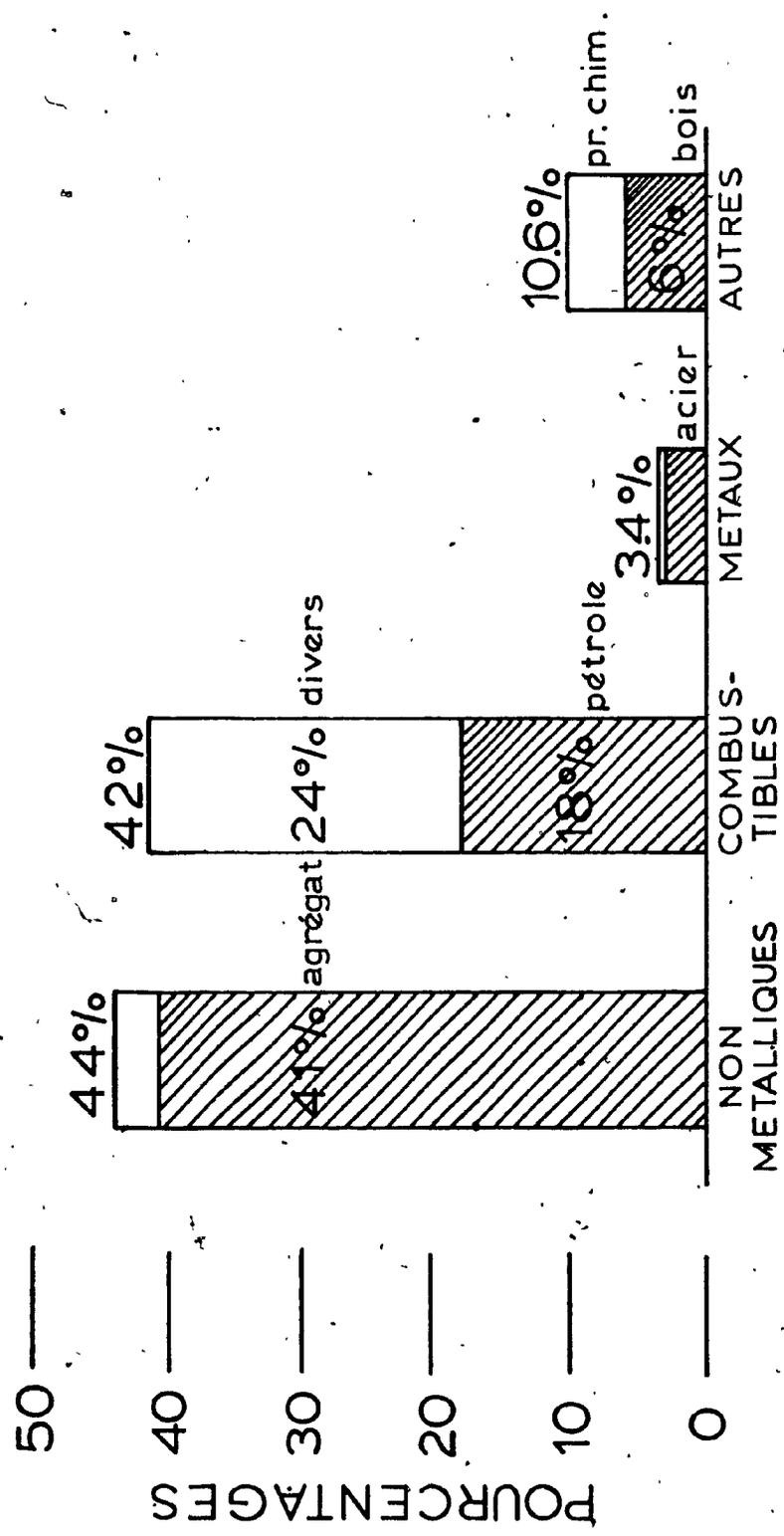


FIGURE 1 = UTILISATION DES MATERIAUX (per capita, par année)

2. Les efforts accrus de recyclage: Le recyclage n'en est qu'à ses débuts, mais dans un avenir plus ou moins rapproché, nos systèmes de production, cédant à des impératifs d'économie d'énergie et de protection de l'environnement, traduiront ce concept en une pratique répandue et nécessaire.

Jusqu'ici dans le domaine de l'industrie de la construction, les efforts de recyclage se sont surtout concentrés sur la récupération des métaux et sont demeurés timides quant à la fraction restante. 88% des matériaux recyclés sont de nature métallique et seul 12% des agrégats, bétons, produits céramiques et autres sont réutilisés (5) (voir Fig. 2).

La demande en matériaux de construction de toutes sortes va en progressant suivant la croissance de la population. Il semble bien que cette demande à la hausse se maintiendra en dépit des fortes pressions que nous exerçons d'ores et déjà sur nos stocks limités de matières premières (7). Dans une telle situation, les déchets solides seront probablement perçus différemment. Ils seront vraisemblablement considérés comme une source alternative de matières premières. Le recyclage jouera un rôle économique plus important et bouclera dans certains cas le cycle production-consommation.

3. Le coût élevé de l'élimination des déchets solides: Eliminer les déchets solides coûte cher (8). En contrepartie des marchés existents déjà pour un certain nombre de déchets solides traités, les poudres métalliques en occurrence. Une étude américaine effectuée à Chicago (9) démontre que dans certains cas les bénéfices résultant de

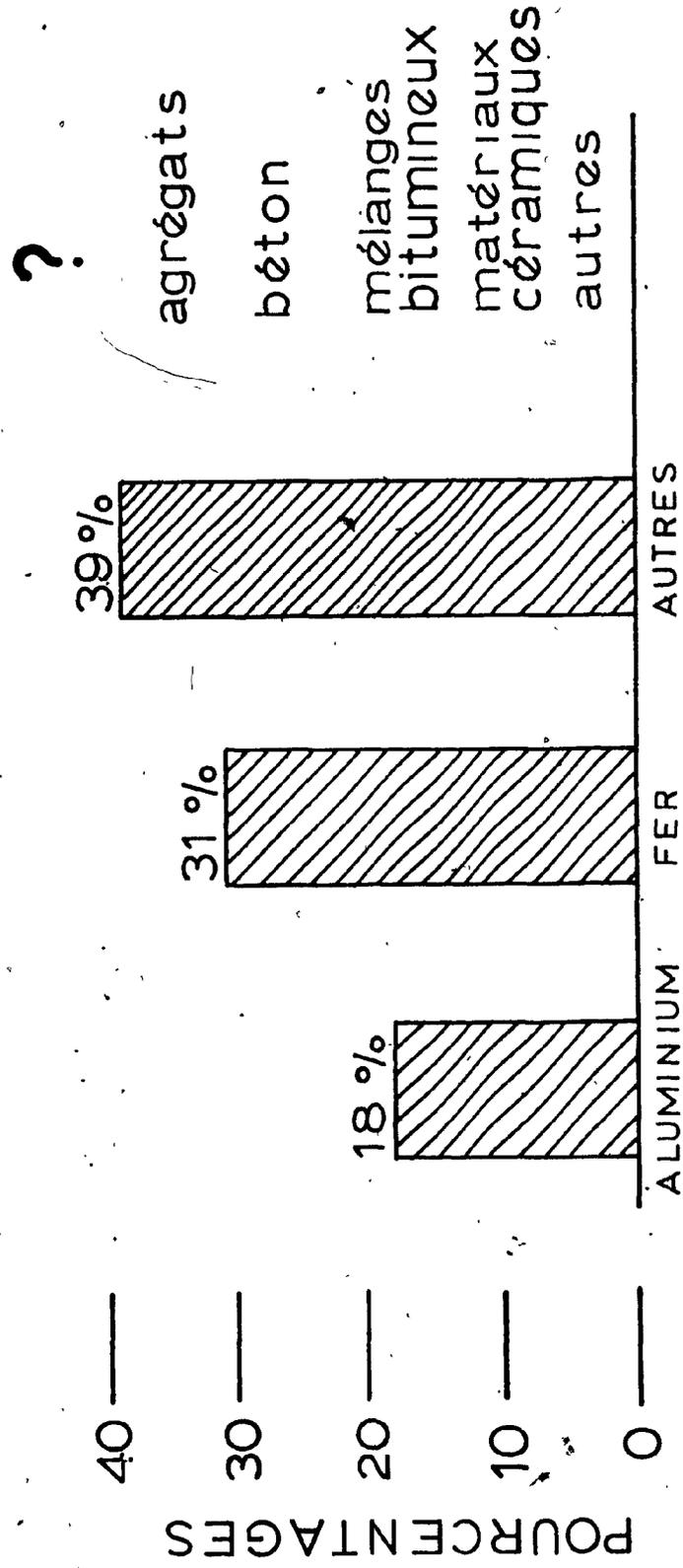


FIGURE 2 = RECYCLAGE DES MATÉRIAUX

ventes de déchets solides traités pourraient être appréciables. Des trois méthodes de traitement étudiées: l'enfouissement, l'incinération conventionnelle et celle à haute température, c'est cette dernière qui présente les plus hauts bénéfices potentiels. Qui plus est, cette méthode de traitement constitue une source de matériaux bruts dont l'utilisation éventuelle pour la fabrication de matériaux de construction n'a pas été comptabilisée dans cette étude.

La découverte de nouveaux usages possibles de résidus solides dans l'industrie des matériaux de construction pourrait développer un marché des déchets et éventuellement défrayer le coût de leur traitement.

4. La production croissante de déchets solides: L'augmentation progressive de la production de déchets est intimement liée à une caractéristique fondamentale de notre système économique: maintenir et si possible améliorer notre niveau de vie matériel en consommant et en produisant un maximum de biens et services de toutes sortes. Les prévisions du Comité d'Etude sur la Gestion des Déchets Solides (2) se révèlent donc peu encourageantes. Le Québec en 1980 produisit environ 180 millions de tonnes de déchets miniers, industriels et urbains. Cette quantité d'ici l'an 2000 atteindra plus de 270 millions de tonnes, soit une augmentation de près de la moitié. Les chiffres issus d'une étude menée pour le compte de la Communauté Urbaine de Montréal (8) ne sont guère plus optimistes: du 1.5 millions de tonnes de déchets produits sur le territoire de la Communauté en 1976, cette quantité passera à 2.8 millions en 1996: une progression de près de

65%.

5. La rareté croissante des matières premières: Aux Etats-Unis, le Bureau des Mines a publié plusieurs rapports faisant état des demandes actuelles et futures de matières premières. Les résultats surprennent: les minéraux et les non-métaux, des ressources qui aujourd'hui encore sont considérées comme abondantes, viendront à manquer de façon alarmante d'ici l'an 2000 (3). Pourquoi s'étonner: le Nord-américain utilise 15 tonnes de minéraux chaque année. Actuellement, à l'échelle de la planète cette consommation s'accroît annuellement de 7%. Si cette progression se maintient à ce rythme il ne suffirait que de 50 ans pour que nous employons 32 fois plus de minéraux (10):

Désormais ce ne seront plus seulement les frais de transport qui dicteront les politiques de fixation des prix des minéraux et matériaux non-métalliques mais aussi leur rareté relative.

Il est probable que dorénavant les matières premières seront consommées avec retenue, les déchets seront produits en plus faibles quantités et seront recyclés sous une forme ou sous une autre et finalement réutilisés.

## 1.2 QUANTITES DE DECHETS SOLIDES PRODUITS

### 1.2.1 Quantités totales produites

Selon leurs origines, les déchets solides peuvent être subdivisés en quatre grandes catégories (2):

- les déchets d'exploitation minière;
- les déchets industriels;
- les déchets urbains (rebut domestiques et commerciaux);
- les déchets agricoles.

Les quantités de résidus produites dans chacun de ces secteurs ont fait l'objet d'enquêtes au début des années 70 (1,2). Ces données sont colligées au Tableau 1.

En regard de la production de sciures de bois et de déchets de verre, quelques commentaires s'imposent pour mettre en relief leur importance parmi l'ensemble des déchets solides.

Premièrement, en ce qui concerne les déchets industriels, les résidus du traitement du bois viennent en tête de liste, suivis des déchets des usines de pâtes et papiers et des industries sidérurgiques. Deuxièmement, on distingue trois types de déchets urbains: les déchets domestiques, les déchets commerciaux (déchets commerciaux et de démolition), et les déchets publics (déchets des voies publiques, des lieux publics, résidus d'incinération et carcasses de véhicules). Peu importe leur provenance, les déchets urbains, pris globalement, sont composés dans une très forte

TABLEAU 1  
 DECHETS SOLIDES PRODUITS (1970)  
 en milliers de tonnes (9.1 X 10<sup>2</sup> kg.)

	Québec	Canada	Etats-Unis
Déchets de source urbaine	6,722	11,000	250,000
Déchets de source industrielle	3,407	11,000	110,000
Déchets de source agricole	30,153	150,000	1,500,000
Déchets de source minière	122,611	55,000	550,000
Total	162,893	667,000	3,510,000

proportion de papier et produits connexes. Toutefois, une fois traités par incinération, ces résidus se débarrassent de presque toute matière combustible. Le verre occupe alors le premier rang des résidus non brûlés susceptibles d'être récupérés (11) (voir Tab. 2).

### 1.2.2 Sciures de bois

Au Québec, l'industrie du bois occupe une place de premier rang. Son importance se répercute sur les quantités de déchets produites; les résidus en provenance de l'industrie du bois, du meuble et du papier constituent 42% de l'ensemble des déchets industriels, une quantité qui surpasse de loin la production des autres secteurs (2). Les usines de sciages produisent à elles seules la majeure partie des copeaux de petite taille.

Une étude préparée par le ministère québécois des terres et forêts fournit des renseignements plus détaillés quant aux quantités de résidus de matières ligneuses produites aux usines de transformation primaire: principalement les usines de pâtes et papier et de sciage (12) (voir Tab.3). Statistiques Canada nous renseigne sur les livraisons de copeaux de bois, toutes industries (13) (voir Tab.4). Deux chiffres retiennent plus particulièrement l'attention:

- les quantités totales de sciures et planures produites par les usines de sciage (Québec) 1,514,000 tonnes métriques
- les quantités de copeaux de bois livrées, toutes industries (Québec) 3,543,535 tonnes métriques

TABLEAU 2 DECHETS RESIDUELS APRES INCINERATION QUEBEC - 1970	
Verre	50%
Boîtes de conserve en métal	16%
Cendres	14%
Scories diverses	6%
Papier non brûlé	4%
Métaux non ferreux	4%
Fer massif	3%
Fil de fer	1%
Pierres, briques	1%
Céramiques	1%

<u>TABLEAU 3</u> QUEBEC			
ESTIMATION DES QUANTITES DE RESIDUS DE MATIERES LIGNEUSES PRODUITES AUX USINES DE TRANSFORMATION PREMIERE . (MARS 79). (EN TONNES METRI- QUES ANHYDRES).			
Usines de pâtes et papiers:			
	Ecorces		
Région de Montréal	1,000		
Total Québec	618,000		
Usines de sciages et autres:			
	Ecorces	Sciures	Planures
Région de Montréal	13,000	9,000	8,000
Total Québec	1,005,000	800,000	714,000
TOTAL DES SCIURES ET DES PLANCHES: 1,514,000			

<u>TABLEAU 4</u>		
STATISTIQUE CANADA STATISTIQUES FORESTIERES DU CANADA NO 25-202 Livraisons de copeaux de bois, toutes industries (Québec)		
1975	Tonnes métriques anhydres 2,279,856	\$ 73,184,000
1976	Tonnes métriques anhydres 2,765,770	\$ 98,203,000
1977	Tonnes métriques anhydres 3,543,535	\$ 127,259,000

Bien qu'il soit difficile de relier ces deux nombres, deux remarques s'imposent. En premier lieu, les déchets des usines de sciage ne représentent qu'une portion des sciures, copeaux et planures de toute provenance produits lors des processus de transformation primaire et secondaire. En second lieu, les copeaux de bois à en juger par l'importance de leur livraison, se sont trouvés certains débouchés.

Ces marchés, quels sont-ils? Les gros copeaux (1.5 à 4 cm) sont en grande majorité récupérés pour les usines de pâtes et papier, qui les payent en moyenne 50 à 55 dollars la tonne (1980) (14). D'autres usages existent (15): utilisations reliées aux propriétés physiques; utilisations en tant que combustibles; utilisations pour la fabrication de coke industriel en sidérurgie; utilisations en tant que fibres ou en tant que particules dans des panneaux de bois agglomérés; utilisations reliées aux propriétés chimiques.

Enfin dans le domaine de la construction, elles peuvent entrer dans le processus de fabrication de briques et tuiles d'argile poreuses, servir comme agrégats légers pour bétons, constituer un isolant thermique ou être employé comme particules de renforcement (15,16).

### 1.2.3 Déchets de verre

Au Canada, en 1971, chaque individu à lui seul, utilisa plus de 108 contenants de verre. En tenant compte de la population d'alors, le Québec en consomma 646 millions, soit plus de 157,000 tonnes mét.

Une portion de ces contenants était retournable (bouteilles de bière et boissons gazeuses) de telle sorte que ce tonnage, après avoir été révisé à la baisse, se chiffre en réalité aux environs de 101,000 tonnes mét. (2).

Ce sont principalement aux centres urbains, en raison de l'importance de leurs populations, qu'incombe la responsabilité de la collecte et du traitement de la majeure partie de ces déchets. La ville de Montréal en amasse de 30 à 35,000 tonnes mét. annuellement. 90% de ce verre est acheminé vers l'incinérateur de Carrière tandis que la fraction restante est enfouie (17).

Aux Etats-Unis, les usines de fabrication de contenants de verre comptent pour plus de 70% du tonnage de verre produit mais ne récupèrent toutefois que 20% des rebuts de verre vendus (18). Au Québec, la situation est encore moins reluisante. Seul 5 à 10% des matières premières destinées à la fabrication proviennent de rebuts de verre. La Consumer Glass ne récupère, en plus de ses propres déchets de production, que 10 à 15,000 tonnes mét. de résidus de verre commercial (8% de sa production totale) (19). La Dominion Glass, elle, n'ajouta en 1979, que 8,000 tonnes mét. aux 47,000 de déchets internes pour produire ses 199,000 tonnes mét. de contenants de verre (4% de la production totale) (20).

En 1980, à Montréal, la tonne de rebuts de verre, lavée, non triée par couleur et livrée, se vendait de 30 à 38 dollars la tonne (21). Toutefois, au lieu d'être tributaire du commerce de la récupération du verre qui est fragmenté et peu organisé, les

fabricants préfèrent plutôt se fier à leur propre production interne de déchets car elle constitue une source sûre, homogène, contrôlable et relativement exempte d'impuretés (poussières de roches, résidus d'aluminium, etc.).

Une fois récupérés et traités sur une plus grande échelle, c'est-à-dire dans des usines municipales ou régionales de traitement des déchets solides et à l'aide de techniques modernes de tri (flottation par la mousse, séparation en milieu humide basée sur des différences de densité, etc.) les déchets de verre constitueront un matériau économiquement compétitif. Les études menées par le Bureau des Mines (18) le prouvent et soulignent de plus que le verre magnétique, d'un prix inférieur à la moitié de celui du "cullet" traditionnel et inapte pour la fabrication de contenants pourrait fort bien s'accaparer de nouveaux marchés dans l'industrie des matériaux de construction.

Comme le mentionne le sous-comité d'étude sur le recyclage des déchets au Québec (2): "Un plus grand pourcentage des contenants en verre produits dans le Québec, et dans tout le Canada pourra être recyclé dans les années à venir, et utilisé pour fabriquer un grand nombre de produits secondaires tels...des briques et des blocs de construction...."

### **1.3 MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES: SYNTHESE DES RECHERCHES ANTERIEURES**

En 1973, aux Etats-Unis, 21 des 27.5 millions de tonnes de mâchefer produites furent réutilisées comme agrégats; en 1975, 10% des sous-produits de l'extraction du charbon furent récupérés dans l'industrie de la construction (3). Ces taux de récupération ne constituent malheureusement que des cas d'exception parmi les multiples possibilités de recyclage des déchets solides. L'annexe A.1 nous donnent une vue d'ensemble des résultats des recherches dans ce domaine et dresse une liste des déchets pouvant être utilisés comme matières premières. Suivent séquentiellement, pour chaque résidu énuméré, une brève description des processus de transformation ainsi que des matériaux de construction qui en résultent. Finalement, aux annexes A.2 et A.3 on trouvera ue typologie des divers procédés de fabrication utilisés.

## CHAPITRE 2

### BRIQUES DE CONSTRUCTION LEGERES ET ISOLANTES

#### 2.1 BRIQUES DE CONSTRUCTION: DEFINITION

Les briques de construction et de parement utilisées dans le bâtiment doivent répondre à des exigences particulières. Elles doivent résister, dans certains cas, à des charges structurales importantes (murs de maçonnerie porteurs), et à des contraintes climatiques sévères (action combinée de la pénétration de l'eau et des cycles de gel-dégel). Les normes CSA A82.1 et A82.7 définissent les différentes catégories de briques de construction et de parement et établissent pour chaque propriété physique et mécanique pertinente les seuils minimaux requis (voir Tab. 5). On distingue deux grands types de maçonneries d'argile: le type 1: couvrant les briques de parement aptes à être exposées aux intempéries et le type 2: couvrant les briques ne devant être utilisées que protégées, à l'intérieur des parois ou comme recouvrement intérieur.

C'est en référence à ces normes que seront évalués les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude.

TABLEAU 5: SPECIFICATIONS DE LA NORME CSA A82.1.1. et A82.7

	Résistance en compression minimum		Taux maximum d'absorption dans l'eau bouillante (%)		Coefficient de saturation maximum	
	Moyenne de 5 briques	Individuelle	Moyenne de 5 briques	Individuelle	Moyenne de 5 briques	Individuelle
<u>Type I:</u> briques exposées aux intempéries Grade MW: Résistance modérée aux intempéries	2,500	2,200	22.00	25.0	.88	.90
Grade SW: Résistance élevée aux intempéries	3,000	2,500	17.0	20.0	.78	.80
<u>TYPE II:</u> Briques non exposées aux intempéries	1,500	1,250	pas de limite	pas de limite	pas de limite	pas de limite

## 2.2 PROCEDES DE FABRICATION

Les procédés de fabrication des briques d'argile de construction et de parement légères et isolantes peuvent être divisés suivant les 5 méthodes-types suivantes:

- a. Addition au mélange d'argile de matières volatiles ou solubles qui sont par la suite éliminées par évaporation ou sublimation.
- b. Formation de bulles de gaz par réactions chimiques dans une matière semi-fluide.
- c. Formation d'une structure cellulaire par brassage en présence d'un agent moussant. Bien qu'elle retient l'attention de plusieurs chercheurs, cette méthode s'avère coûteuse et nécessite une modification du processus habituel de production de briques d'argile et l'utilisation de nouveaux équipements. Albenque (22), par exemple, obtint une mousse en mélangeant, dans un agitateur, de l'argile, de la chamotte, des fibres, de l'eau et un détergeant (facteur d'allègement du fait de l'agitation mécanique). Ostrowiak (23) ajouta une solution aqueuse de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et de  $\text{Na}_2\text{SiO}_2$  à de l'argile, 24 heures avant que cette pâte soit mélangée avec 50% (en volume) d'une mousse gélatineuse (un composé entraîneur d'air). Le mélange poreux au départ, fut moulé, séché et cuit.
- d. Addition de matières combustibles qui sont par la suite éliminées par combustion. Cette méthode est sans conteste la plus simple. Elle ne requiert que des changements mineurs aux techniques de

production, et par conséquent, elle est celle qui est la plus économique. Matrai (24), par exemple, mit au point une brique de construction légère en incorporant à la pâte d'argile des billes de polystyrène de 0.5 à 2mm de diamètre. Les billes se consomment au cours de la cuisson et créent des vides d'air à l'intérieur des briques. Le produit fini, connu sous l'appellation commerciale de "Poroton" est léger, isolant, relativement durable et peut facilement être coupé et vissé. Carloncelli (25) mélangea des granules de résines expansées à de l'argile. La pâte est moulée par vibration et cuite. Au cours de la cuisson la résine se décompose et laisse des pores d'air. De nombreuses autres substances combustibles peuvent être ajoutées à une pâte d'argile pour créer des vides d'air après la combustion (de la pulpe de papier (26), des matières organiques diverses (patates, pommes, paille) et des pneus usagés broyés (27)). De plus, dans certains cas, ces matériaux peuvent se substituer, en partie, aux combustibles conventionnels alimentant les fours (27).

e. Utilisation simultanée de diverse méthodes.

### 2.3 Emploi de sciures de bois

L'incorporation de sciures de bois dans une pâte d'argile pour la production d'éléments de maçonnerie présente sept avantages principaux (on trouvera à l'annexe B.1 une liste exhaustive des avantages et inconvénients):

- a. diminution du poids des briques cuites.
- b. amélioration de l'ouvrabilité de pâtes d'argile trop plastiques ou à grains très fins.
- c. séchage plus rapide (en raison de la porosité accrue).
- d. diminution de la charge de cuisson des fours (moins de matières argileuses par volume).
- e. utilisation des sciures comme combustibles au cours de la cuisson.
- f. diminution de la conductibilité thermique.

Les travaux de recherche dont il sera fait mention ci-dessous, font état des résultats d'expériences effectuées sur des briques d'argile-sciures.

#### **Murray et Liversidge (28):**

L'originalité des travaux de Murray et Liversidge tient à la forme des particules de sciures qu'ils employèrent. En principe, l'utilisation d'additifs combustibles de formes sphériques favorisent

une meilleure distribution des efforts dans le matériau cuit. Ils tentèrent par conséquent, de trouver des copeaux ressemblant le plus possible à des billes et constatèrent que les scies à rubans (scies de débitage dont l'usage est de plus en plus répandu en Australie) produisaient justement un type de sciures aux formes cubiques, contrairement aux particules allongées et minces résultant de l'utilisation des scies circulaires conventionnelles. Les résultats des expériences qu'ils effectuèrent démontre que l'incorporation d'une quantité croissante de sciures de forme cubique augmente le module de rupture et améliore aussi la résistance en compression qui atteint une valeur de 24 MPa pour une proportion de sciures de 14% par poids. En ce qui a regard aux particules de sciures allongées, une proportion supérieure à 4% a pour effet, au contraire, de décroître la résistance en compression.

**Isenhour (29):**

Isenhour ajouta respectivement 5, 10 et 15% par volume de sciures à de l'argile sèche avant le broyage. Les sciures employées ne furent que grossièrement tamisées. Les résultats obtenus mettent en évidence le fait que l'addition de sciures dans une pâte d'argile réduit le poids des briques cuites, améliore l'ouvrabilité de la pâte d'argile et accroît la porosité. Les taux d'absorption sont donc plus élevés, mais par contre, le coefficient de saturation, lui, diminue de façon sensible, ce qui contribuerait à améliorer la durabilité éventuelle du produit. Ces avantages vont de pair cependant avec certains problèmes qui se sont posés au moment de la production. Ils sont mentionnés

dans la liste comparée des bénéfices et inconvénients énumérés à l'annexe B.1.

**Fortin (30):**

Un producteur québécois, Richard Fortin, de QA Briques, fabrique depuis 2 à 3 ans déjà une brique argile-sciures en ajoutant 15% (par volume) de sciures à ses mélanges d'argile. Les avantages observés sont les suivants: chaque brique est plus légère d'environ 0,35 kg, le temps de séchage est accéléré en raison de la structure poreuse des briques, et les coûts de transport sont moindres en raison de la légèreté des briques. D'autres bénéfices s'ajoutent à ceux-ci. L'addition de sciures au mélange améliore son ouvrabilité en éliminant la formation de couches successives de lamelles lorsque la pâte est extrudée. Finalement, un des avantages majeurs réside dans le fait que les sciures tendent à déserrer les grains d'argile au cours du malaxage et à réduire ainsi les contacts inter-granulaires dans les briques cuites. La granulation de l'argile utilisée par cette compagnie est particulièrement fine. A l'origine, elle fabriquait (à l'aide d'une atmosphère réduite en oxygène) une brique avec une résistance en compression très élevée, 124 MPa environ, et un taux d'absorption de 1%. Elle doit faire face à des problèmes d'effritement en dépit de ce faible taux d'absorption. L'addition de sciures solutionna ce problème.

**Guery (31):**

Guery s'est attaqué à un problème particulier: l'impossibilité

d'incorporer des sciures à une argile dans une proportion supérieure 40% du poids de la terre sèche sans modifier de façon sensible la plasticité du mélange et sa cohésion. Cette hétérogénéité du mélange nuit alors au pressage à sec ou à l'extrusion. Il démontre qu'une solution à ce problème est de modifier la granulométrie en n'utilisant que des particules d'une dimension inférieure à 20 microns. En deçà de ce seuil, la proportion limite de 40% peut être dépassée. Plus la taille des grains est petite, en fait, plus il est possible d'augmenter la proportion de sciures. En utilisant des particules très fines, la porosité est alors très régulière et uniforme et Les densités sont faibles. Le matériau peut être cloué ou scié.

**Puckett (32):**

Puckett s'est servi de sciures sèches pour absorber et réduire la teneur en eau de l'argile qu'utilise sa compagnie, et faciliter ainsi le processus de production. Les sciures sont ajoutées à l'argile dès le départ et le mélange passe alors au travers un désintégrateur et un broyeur avant d'être malaxé. La liste des avantages et inconvénients observés est présentée à l'annexe B.1

## 2.4 EMPLOI DE DECHETS DE VERRE BROYES

Incorporés aux matières premières dans les processus de fabrication de briques d'argile, les déchets de verre broyés présentent les avantages suivants:

- a. réduction des températures et/ou des temps de cuisson.
- b. abaissement des taux d'absorption d'eau dans les briques cuites.
- c. augmentation du module de rupture et de la résistance en compression.

Les travaux dont il sera fait mention ci-dessous mettent en évidence chacune de ces propriétés. On trouvera à l'annexe B.2 une liste exhaustive des avantages et inconvénients.

### Tyrrell et Goode (33):

Tyrrell et Goode employèrent des rebuts de verre d'incinérateurs. Ils mélangèrent le verre finement broyé à de l'argile et extrudèrent ce mélange en pâte dure.

La substitution de 50% (en poids) d'argile rouge par du verre engendre une réduction substantielle de la température de cuisson de l'ordre de 500°C. Cette diminution de température varie en fonction des quantités de verre ajoutées (voir Fig. 3). Elle entraîne des taux de cuisson accélérés, et de tels mélanges peuvent donc être cuits en des temps plus courts. Une augmentation possible de la production de 30% peut ainsi être anticipée. Des mélanges aux

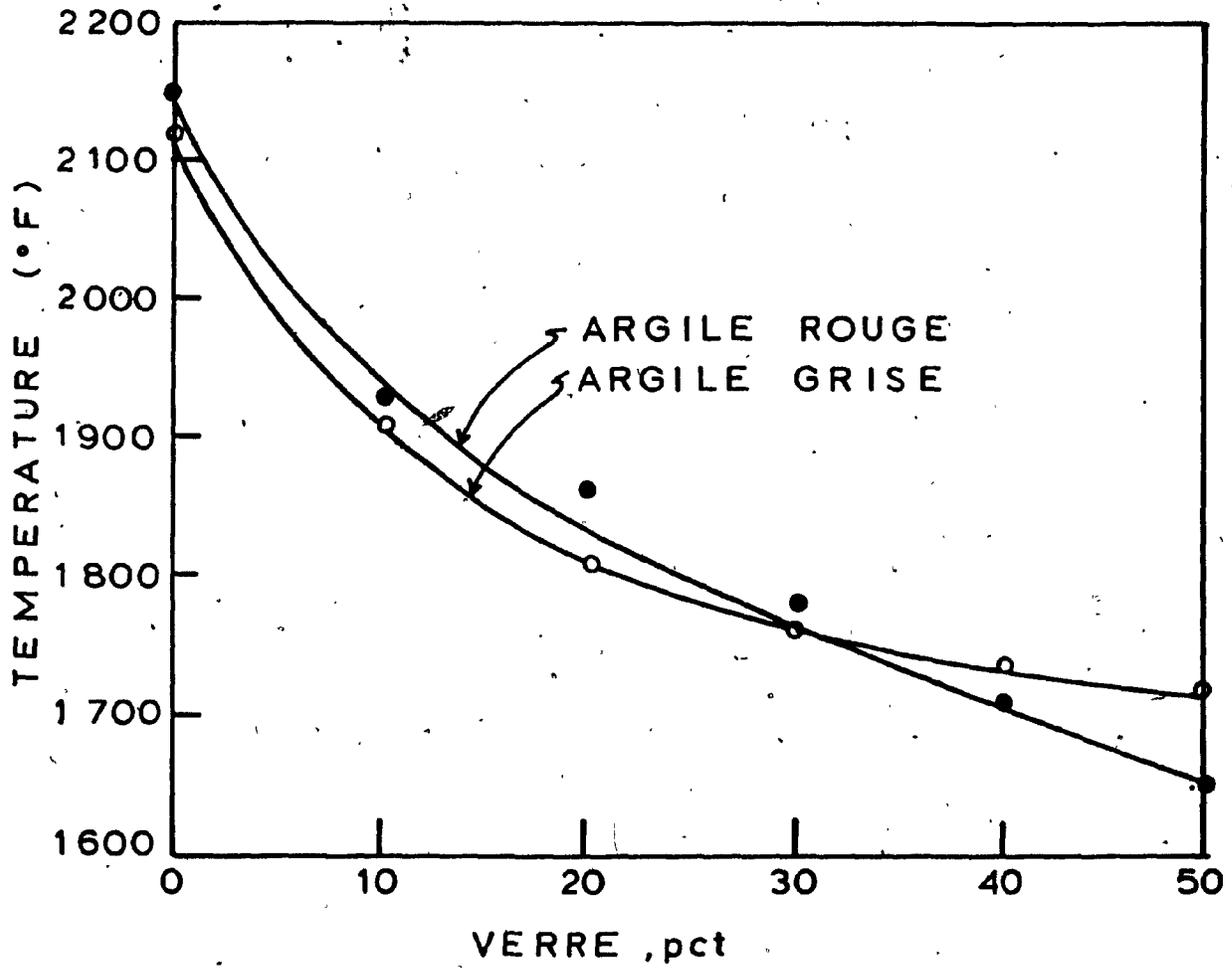


FIG. 3 : TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROPORTION DU VERRE

proportions identiques, mais en utilisant cette fois de l'argile jaune génèrent une chute de  $400^{\circ}\text{C}$  de la température maximale de cuisson et un accroissement de production de 23%. De plus l'ajout de verre broyé a aussi un effet marqué sur les taux d'absorption. Ceux-ci décroissent ou fuir et à mesure que la grosseur des grains de verre broyés diminue.

**Tyrrell et Feld (34):**

Tyrrell et Feld mélangèrent 70% de verre (en poids) à 30% d'argile rouge. Ils y ajoutèrent 0.5% de carbonate de barium (pour prévenir les problèmes d'efflorescence sur la surface des briques cuites) et 1% de lignosulfate, un agent liant qui augmente la résistance des briques avant la cuisson. De l'eau est additionné aux ingrédients, et le tout est pressé à sec. La température de cuisson est de  $950^{\circ}$ . Après la cuisson, les résultats sont les suivants. Le taux d'absorption dans l'eau froide est de 7.4%, celui dans l'eau bouillante de 9.8%, le coefficient de saturation de 0.76, la résistance en compression de 56.2 MPa et la densité apparente de 1.89 gr/cc.

**Shutt, Campbell et Abrahams (35):**

Campbell et Abrahams employèrent des déchets de verre comme agent liant avec une faible quantité d'argile et des briques usagées broyées comme agrégats. Les résultats démontrent qu'au fur et à mesure que les quantités de déchets de verre broyés augmentent, les températures de cuisson, les taux d'absorption et le coefficient de saturation

diminuent alors que le module de rupture et la résistance en compression accusent une hausse.

**Fernhoff et Glienke (36):**

Fernhoff et Glienke se servirent de verre broyé pour renforcer une structure cellulaire composée d'argile et de billes de polystyrène expansé. Ils ajoutèrent 23% (par poids) d'une mélange constitué d'une partie de verre broyé pour une partie de billes de polystyrène à 73% (par poids) d'argile. La cuisson s'effectue à 980°C. Ils fabriquèrent ainsi une brique légère d'une densité de 0.93 gr/cc et d'une résistance en compression de 16.3 MPa. Le même mélange, sans verre ajouté, voit sa résistance diminuer à 14.1 MPa.

## 2.5 OBJECTIFS

La section 2.3 résume pour l'essentiel les études qui ont été menées sur les briques d'argile-sciures. Toutefois de nombreuses lacunes sont à déplorer. Certains problèmes, par exemple, demeurent non résolus tel que les gonflements des briques argile-sciures lors de la cuisson. D'autre part certains avantages mentionnés ne sont pas fondés sur des résultats expérimentaux comme la diminution possible de la conductibilité thermique engendrée par la présence de pores dans les briques cuites. Finalement de nombreux paramètres de préparation et de cuisson n'ont pas été étudiés ou n'ont pas fait l'objet d'analyse suffisamment détaillées: influence du taux de cuisson, de la température maximale de cuisson, de la grosseur des grains d'argile et de sciures et de la pression exercée sur les mélanges lors du moulage sur les propriétés physiques et mécaniques des briques cuites. Les facteurs qui n'ont pas été étudiés ou qui n'ont pas fait l'objet d'une analyse suffisante seront étudié de façon détaillée et spécifique dans le cadre de cette étude.

En ce qui concerne l'addition de déchets de verre broyé dans des mélanges d'argile, leur ajout, tel que démontré à la section 2.4, augmente les propriétés mécaniques et réduit les taux d'absorption et le coefficient de saturation. Cependant aucune recherche n'a encore été réalisée pour analyser les avantages de l'ajout de verre à des mélanges d'argile-sciures. La section 4.3 de la présente étude comblera cette lacune et étudiera expérimentalement une brique composite constituée d'argile, de verre et de sciures.

Les objectifs de la présente étude sont donc les suivants:

1. Produire une brique de construction à la fois légère, isolante, résistante et durable à partir d'argile et de sciures de bois, tenter d'optimiser les propriétés physiques, mécaniques et thermiques en étudiant systématiquement plusieurs paramètres de préparation et de cuisson, et suppléer ainsi aux manques de résultats expérimentaux constatés dans les recherches réalisées sur les mélanges d'argile-sciures.

2. Analyser les effets sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de l'addition de déchets de verre broyés aux mélanges argile-sciures, et étudier systématiquement les principaux paramètres de préparation et de cuisson.

## CHAPITRE 3

## EXPERIENCE

3.1 MATIERES PREMIERES3.1.1 Argile

Les argiles sont constituées de silicates d'alumine hydratés, de silice, de calcaire, d'oxydes de fer et de quartz. Cette composition peut être modifiée si nécessaire, soit par l'addition de fondants pour abaisser les points de fusion (ex.: mica) ou pour donner un fini vitrifié au produit, ou au contraire par l'ajout d'agents augmentant les points de fusion dans le cas des produits réfractaires (37). Les points de fusion des argiles employées dans l'industrie de la maçonnerie sont inférieurs à 1410°C.

L'argile utilisée lors des expériences provient de Laprairie (Québec). Sa composition chimique, telle que déterminée par les analyses commandées par la compagnie Domtar, est la suivante (38):

$SiO_2$	57.9%
$Al_2O_3$	15.5%
$Fe_2O_3$	6.3%
$P_2O_5$	0.4%
MgO	3.6%
CaO	2.8%
Soufre	0.8%
$SO_3$	2.0%
$TiO_2$	0.39%

Na <sub>2</sub> O	1.6%
K <sub>2</sub> O	4.3%
Carbone	0.55%
Pertes par ignition	7.4%

Son analyse granulométrique s'établit comme suit:

Dimensions (mm)	Tamis (no)	Passant (%)
2360	8	100.0
1180	16	95.6
600	30	60.5
300	50	39.1
150	100	25.7
75	200	16.0
75	pan	0

Une description des réactions chimiques se produisant à l'intérieur des briques du début de la cuisson à la température maximale peuvent être consultées à l'annexe C (38).

### 3.1.2 Sciures de bois

Quelles que soient les essences d'arbres considérées, la composition chimique du bois est approximativement la même: 50% de carbone, 6% d'hydrogène et 44% d'oxygène (39). Sa valeur calorifique, par kilogramme, est elle aussi constante pour toutes les espèces, soit environ 8370 KJ. Quant aux températures de combustion, elle s'établissent entre 280 et 500°C, la majeure partie des réactions

exothermiques se terminant à des températures voisines de 500°C (40).

Au cours des expériences des sciures de bois d'érable de forme allongée furent utilisées (voir photographie no 7) et leur analyse granulométrique est la suivante:

Dimensions (µm)	Tamis (no)	Passant (%)
	60	98.5
	80	65.0
150	100	28.0
75	pan	0

### 3.1.3 Déchets de verre

Le verre peut être défini comme une substance inorganique qui, à partir de sa phase liquide a été refroidie et a ainsi atteint un degré de viscosité tel qu'elle peut être considérée comme rigide. C'est pour cette raison qu'il est reconnu comme étant un solide amorphe. Alors qu'un cristal possède un réseau uniforme de modules se succédant à intervalle régulier dans toutes les directions, le verre, lui, n'est pourvu que d'un réseau déformé, interrompu en plusieurs points par des atomes de sodium et de calcium (41).

Le verre utilisé au cours des expériences est un verre de récupération provenant de bouteilles lavées, incolore et broyé, vraisemblablement du type soude-chaux-silice couramment utilisé dans l'industrie des contenants. Sa composition n'a pas été spécifiquement

analysée mais devrait s'apparenter à la formule décrite à l'annexe D (42). Seules les particules de verre inférieures à 150  $\mu\text{m}$  furent employées lors de la préparation des mélanges.

### 3.2 PROCEDES DE FABRICATION

#### 3.2.1 Description du procédé de fabrication

Pour chaque mélange d'un échantillon, les ingrédients secs sont pesés et brassés ensemble dans un récipient. L'eau est par la suite ajoutée dans une proportion équivalente à environ 8% du poids des ingrédients secs. Le tout est mélangé mécaniquement dans un malaxeur électrique pendant 10 minutes. Le mélange, ayant la consistance d'une poudre humide, est versé dans un moule métallique et compressé à l'aide d'une presse hydraulique. Les briques sont alors démoulées en dévissant complètement les parois du moule, et séchées à une température de 50°C pendant 17 heures. Les échantillons sont alors transportés dans des fours électriques et cuits.

L'emploi de la méthode de moulage par pressage ne nécessite qu'une quantité réduite d'eau. Plusieurs essais successifs ont été effectués pour établir la dose optimale d'eau dans les mélanges. Ceux-ci devaient avoir la consistance d'une poudre humide et ne laisser aucune trace d'eau excédentaire à la base du moule métallique après le pressage. Une quantité d'eau variant entre 4 et 10% du poids des mélanges secs, suivant leur composition, s'est avérée une proportion qui répondait à ces exigences.

Les premiers essais de séchage démontrèrent que soumettre soudainement les briques fraîchement démoulées à un gradient de température élevé (de 25°C à 100°C) induisait de nombreuses fissures à la surface des briques d'argile-sciures et diminuait de

façon significative leur résistance en compression et leur module de rupture après la cuisson. Une façon de résoudre ce problème est de réduire le taux d'évaporation de l'eau au début du séchage, en soumettant les briques à une température relativement basse ( $40^{\circ}\text{C}$ ) dans une atmosphère quasi-saturée, et par la suite en augmentant graduellement la température (jusqu'à  $110^{\circ}\text{C}$ ) tout en réduisant le degré d'humidité (28). Ce procédé minimise le craquelage et le temps requis pour le séchage. Ne disposant pas de l'équipement requis, cette technique a été écartée au profit d'un temps de séchage prolongé, 17 heures, à une température constante de  $50^{\circ}\text{C}$ , avec une bonne circulation d'air. Le taux d'évaporation d'eau d'une brique d'argile-sicures est illustré à l'annexe E (teneur en eau: 7% du poids des ingrédients secs; quantité de sicures ajoutée: 4.5% par poids).

Les dimensions standards d'une brique de construction de type "modulaire" sont les suivantes: 10 par 20 par 7 cm d'épaisseur. Afin de réduire au minimum les quantités de matériaux bruts utilisées et de maximiser le nombre d'échantillons par cuisson, étant donné la capacité restreinte des fours, les dimensions utilisées furent réduites de moitié. Voici les proportions intérieures du moule métallique: 5 par 10 cm par une hauteur qui varie suivant la pression exercée sur la partie supérieure et amovible du moule.

### 3.2.2 Équipements

Plusieurs équipements furent utilisés lors des différentes étapes de la préparation des échantillons pour la pesée des ingrédients; le

malaxage, la mise en forme, le pressage, le séchage, la cuisson et les mesures de volume. Ces équipements sont décrits ci-dessous:

- Pesée des ingrédients et des briques avant et après la cuisson: balance électrique "Sartorius 1103" mesurant le poids au dixième de gramme près.
- Malaxage: malaxeur électrique "Blakeslee" à vitesse de rotation variable.
- Mise en forme: moule métallique en acier constitué d'une plate-forme, de quatre parois dévissables permettant le démoulage, ainsi que d'un couvercle amovible, lui aussi métallique, fixé à une pièce de bois franc rectangulaire. Une plaque de plexiglass, de mêmes dimensions que la plate-forme est insérée entre celle-ci et le reste du moule, afin de faciliter la manutention des échantillons une fois pressés.
- Pressage: presse hydraulique de laboratoire "Carver" pouvant exercer une pression allant de 0 à 11 tonnes métriques avec une précision à la dizaine de kilogrammes près.
- Séchage: les briques furent séchées dans un séchoir "Fisher Isotemp" modèle 350.
- Cuisson: deux fours électriques furent utilisés: le "Sybron Thermolyne Furnatrol II" et le "Callenkamp". Ils furent calibrés à l'aide d'un voltmètre de marque "Hewlett-Packard" (lecture au centième de millivolt près) relié aux thermocouples, constitués

d'un alliage "chromel-alumel" dans le cas du Sybron et de "platinum-platinum 13% rhodium" pour le Callenkamp. Leur taux d'élévation de température fut mesuré.

- Mesure de volume: les échantillons furent tous mesurés après le démoulage, après le séchage (sauf pour certaines compositions contenant une forte proportion de déchets de verre broyés) et après la cuisson une fois les briques refroidies. Chaque dimension de chaque échantillon (longueur, largeur, hauteur) fut calculée en quatre points, au centième de pouce près, à l'aide d'un calibre de précision "Mitutoyo" modèle no. 192-112. Les moyennes furent établies et le volume de chaque échantillon calculé.

### 3.3 PLAN D'EXPERIMENTATION

L'expérience se subdivise en trois parties suivant le nombre de composantes à partir desquelles les échantillons furent fabriqués:

- 1° partie: 1 composante: argile
- 2° partie: 2 composantes: argile et sciures de bois
- 3° partie: 3 composantes: argile, sciures de bois et déchets de verre broyés.

La première partie porté sur l'analyse des propriétés physiques et mécaniques de briques constituées uniquement d'argile. Elle a pour objectif de se familiariser avec le processus de fabrication, d'étudier le comportement de l'argile lors de la cuisson, et finalement de constituer à partir des essais effectués, un ensemble de données qui serviront de références pour évaluer les changements de propriétés provoqués par l'ajout de sciures de bois et/ou de verre de récupération. Deux échantillons par composition furent fabriqués.

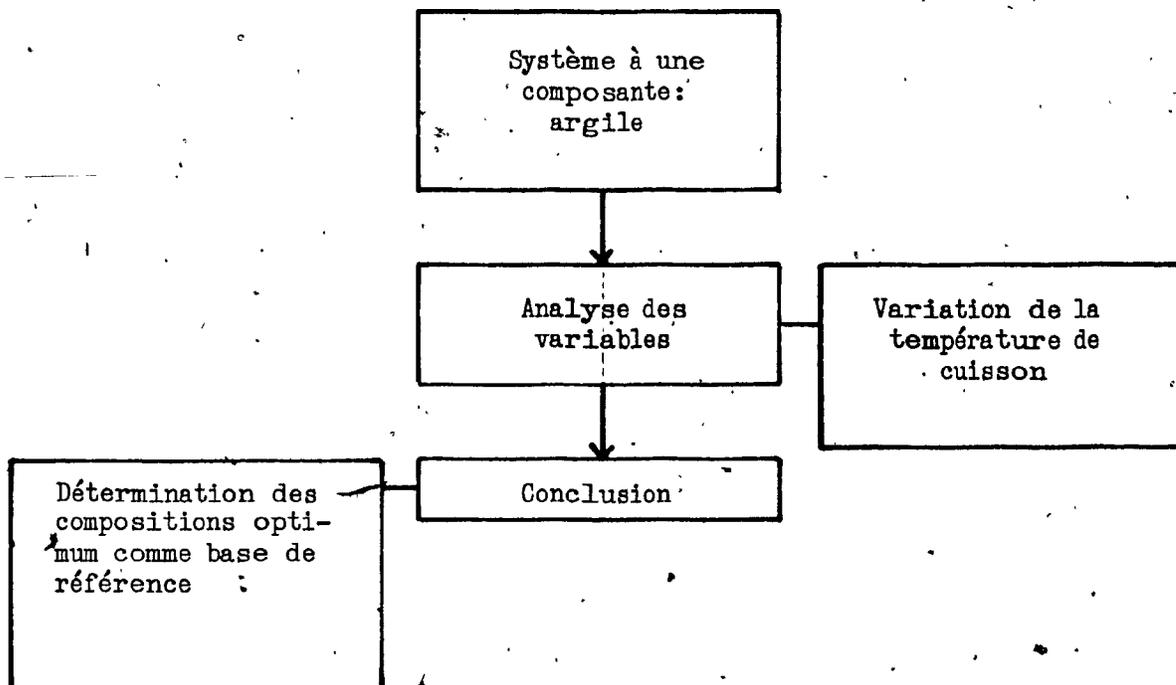
La seconde partie analyse les modifications subies par les briques d'argile lorsque des sciures de bois sont ajoutées aux mélanges. Le taux de combustion des sciures de bois à l'intérieur des échantillons sera analysé ainsi que le taux de cuisson requis pour les éliminer complètement. D'autres paramètres ont aussi été étudiés; ils sont énumérés en détail au Tableau 6. Chacun d'entre eux a fait l'objet d'une analyse spécifique et les résultats des essais ont été systématiquement compilés sous forme de graphes. Finalement, en tenant compte des effets de la variation de l'ensemble de ces paramètres, les proportions requises d'argile et de sciures, leurs

granulométries, le procédé de fabrication ainsi que la méthode optimale de cuisson furent déterminés afin de produire une brique d'argile poreuse de faible densité dont les propriétés répondent aux exigences spécifiées par les normes CSA A82.2 et A82.7, pour les briques de parement. Trois échantillons par composition furent fabriqués.

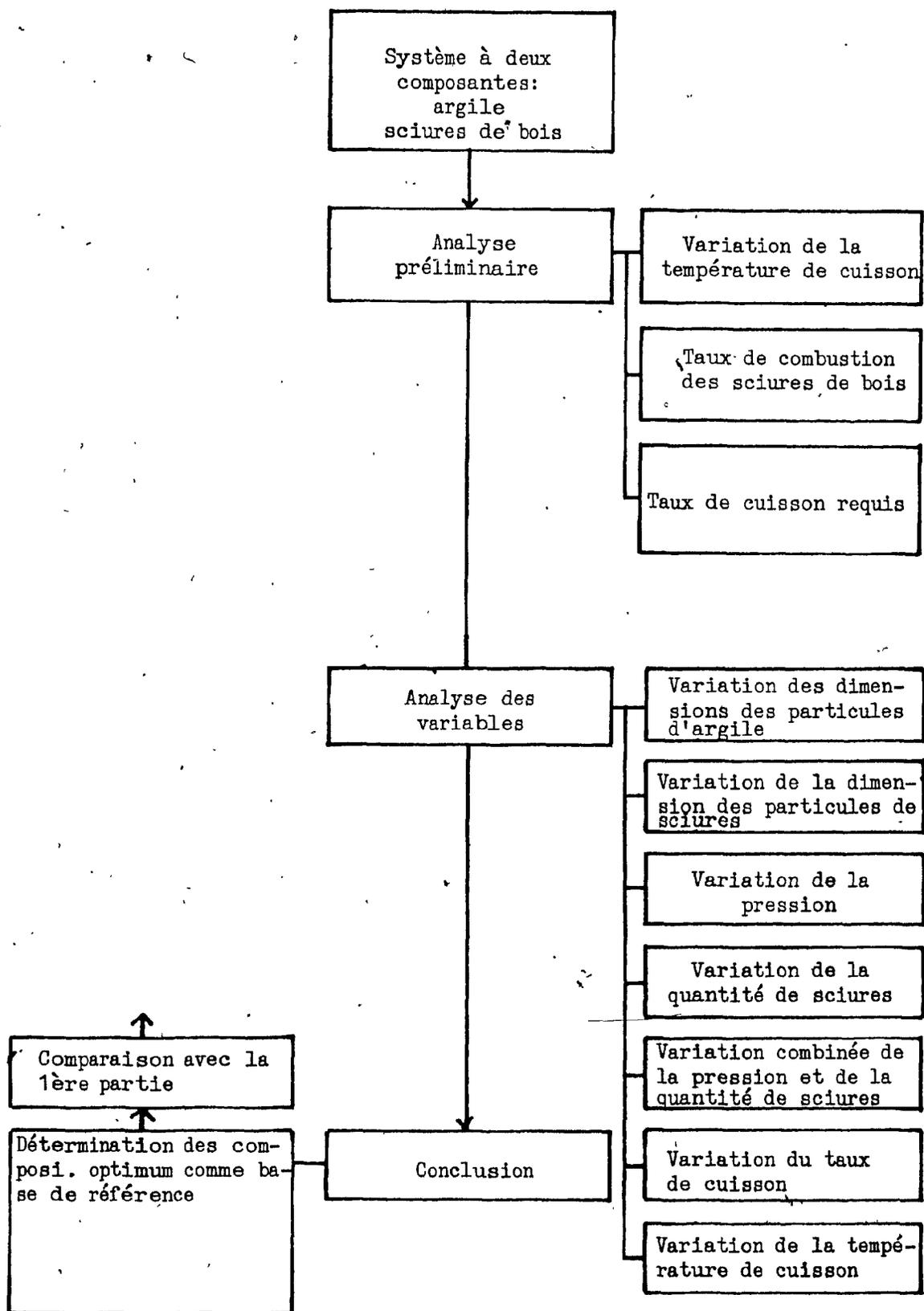
La troisième partie se rapporte à l'utilisation de déchets de verre broyés comme substitut à l'argile. Les propriétés physiques des matériaux bruts, la composition ainsi que le procédé de fabrication optimal des mélanges à deux composantes (argile et sciures) furent retenus comme paramètres de référence, à partir desquels trois variables furent étudiées: la proportion de verre par rapport à la quantité d'argile, la température maximale de cuisson et la proportion de sciures. Deux échantillons furent fabriqués par mélange.

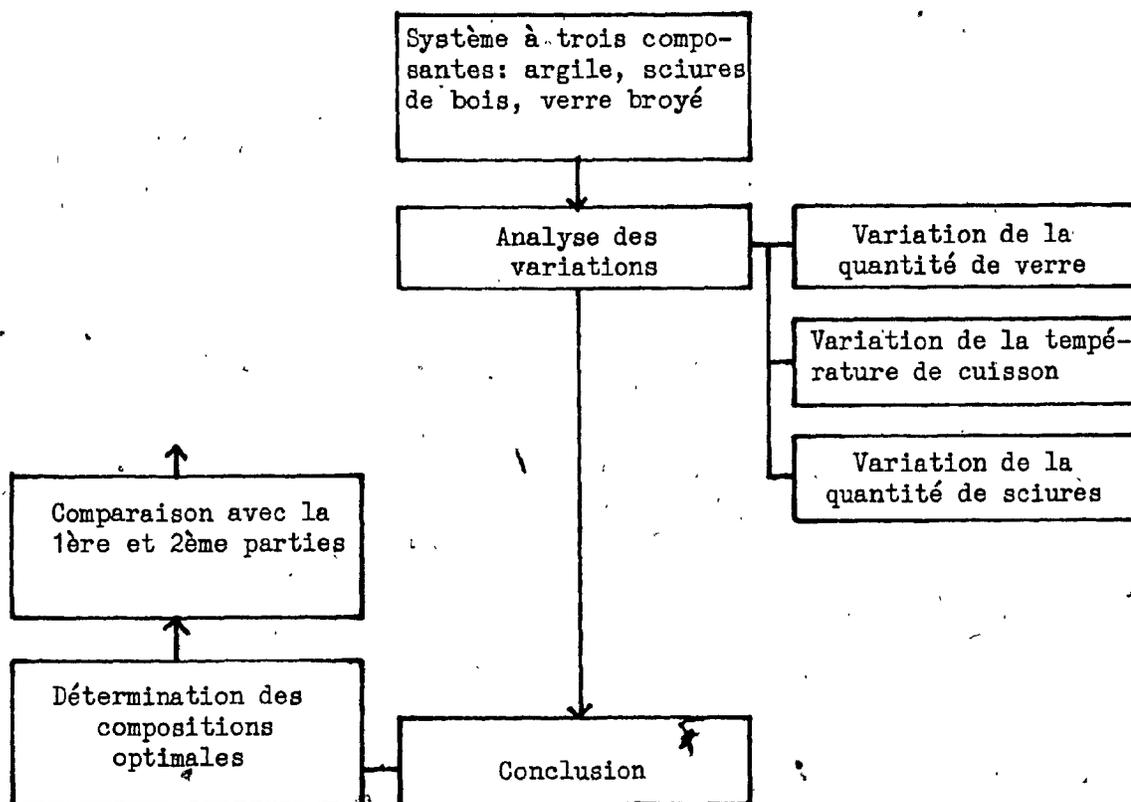
TABLEAU 6  
PLAN D'EXPERIMENTATION

1° PARTIE



## 2° PARTIE



3<sup>o</sup> PARTIE

### 3.4 ESSAIS

Les essais furent effectués avec le plus de conformité possible avec les normes CSA A82.2 et A82.7. Les essais d'absorption d'eau, du coefficient de saturation, de la résistance au gel, de la résistance en compression, du module de rupture et de la conductibilité thermique sont décrits ci-dessous.

#### **Absorption d'eau (à température ambiante):**

L'absorption d'eau est un indice de la porosité et de la perméabilité. Elle permet aussi de mesurer le coefficient de saturation.

Les briques sont d'abord séchées dans une étuve ventilée à une température de 110°C, pendant 24 heures. Elles sont ensuite refroidies, pesées à 0.1 gr près et immergées dans un contenant d'eau à température ambiante. Après une immersion de 24 heures, les briques sont retirées, essuyées à l'aide d'un linge humide et pesées.

Le pourcentage d'absorption d'eau est calculé de la façon suivante:

$$\text{Absorption (\%)} = \frac{100 (w_2 - w_1)}{w_1}$$

où  $w_2$  = poids de la brique saturée d'eau  
(à température ambiante)

$w_1$  = poids de la brique sèche.

**Absorption d'eau (eau bouillante):**

La méthode est similaire à celle décrite ci-dessus. Elle ne diffère que par la température de l'eau (eau bouillante) et le temps d'immersion qui est réduit à 5 heures. Le temps nécessaire pour amener l'eau à ébullition ne doit pas excéder 1 heure. Le refroidissement, lui, s'effectue par déperdition naturelle de la chaleur. Les briques doivent être essuyées, pesées entre 16 et 18 heures après le début de la période de refroidissement.

**Coefficient de saturation:**

On mesure le coefficient de saturation afin d'évaluer le volume poreux qui servira éventuellement à niveler les pressions dues à l'expansion par le gel.

Le coefficient de saturation est le rapport entre la quantité d'eau absorbée par la méthode d'immersion pendant 24 heures, dans l'eau froide et l'immersion pendant 5 heures dans l'eau bouillante.

$$\text{Coefficient de saturation} = \frac{w_2 - w_1}{w_3 - w_1}$$

où  $w_3$  = poids de la brique saturée  
d'eau bouillante.

**Résistance au gel:**

Les briques ont préalablement été séchées, pesées et immergées pendant 4 heures dans les contenants de la machine à gel-dégel "Soiltest", modèle CT-110. Une portion de l'eau a ensuite été enlevée, de telle sorte que dans chaque contenant, les briques

reposent dans environ 13 mm. d'eau. Les cycles de gel-dégel ( $-12^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$ ) débutent alors, et après la complétion du 50ième cycle les briques sont de nouveau séchées et pesées, les pertes étant exprimées en pourcentage du poids du spécimen avant l'essai de gel.

#### **Résistance en compression:**

La résistance en compression est la résistance moyenne à l'écrasement à vitesse contrôlée. Les échantillons sont des demi-briques, leur longueur étant approximativement égale à la moitié de la longueur normale, sciées et aplanies de telle sorte que les surfaces en contact avec les éléments de la machine sont parallèles. Dans tous les essais effectués à l'aide de l'"Instron Universal Testing Machine", la vitesse de chargement fut de 1.0 mm/min., et un graphique de la résistance en compression fut automatiquement tracé dans chaque cas.

#### **Module de rupture**

Le module de rupture détermine le degré de résistance à la flexion de la brique. La charge est appliquée au milieu d'un échantillon reposant à plat sur deux appuis, la portée étant de 2.5 cm moindre que la longueur totale. La charge est appliquée dans le sens de l'épaisseur de la brique avec une vitesse de chargement égale à 1.0 mm/min.

Le module de rupture est exprimé en KPa, selon la formule qui

$$E = \frac{3WL_2}{2BD}$$

où W = poids maximum supporté, en KN

L = distance entre les points d'appui, en mm.

B = largeur moyenne de l'échantillon, en mm.

D = épaisseur moyenne de l'échantillon, en mm.

#### Conductibilité thermique

La conductibilité thermique fut déterminée, selon la méthode décrite par la norme ASTM C-77, à l'aide d'un instrument de mesure spécialement conçu à cet effet, le "Dynatech guarded hot-plate". Deux échantillons par composition, de forme circulaire (diamètre: 15 cm) et d'une épaisseur de 2 à 3 cm, furent testés.

## CHAPITRE 4

## RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 SYSTEME A UNE COMPOSANTE: ARGILE

Cette première partie, "Système à une composante", porte sur l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des briques cuites constituées uniquement d'argile. Elle a pour triple objectif de se familiariser avec le processus de fabrication (quelle est la quantité d'eau requise lors du malaxage de l'argile, quelle est la pression qui doit être exercée sur les mélanges d'argile et d'eau lors du pressage, etc.), d'évaluer les modifications des propriétés physiques et mécaniques des briques d'argile lors de la cuisson, d'établir ainsi la température optimale de cuisson et finalement de constituer à partir des résultats des essais effectués des valeurs de référence afin de comparer les propriétés physiques et mécaniques des briques cuites d'argile-sciures et d'argile-verre-sciures avec celles des briques fabriquées à partir d'argile uniquement.

**EXPERIENCE**

Deux échantillons ont été fabriqués et cuits dans chaque cas à une température maximale différente allant de 300°C jusqu'à 1100°C. Vingt-deux échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 13 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile sèche d'une granulométrie donnée (voir annexe F pour un compte-rendu

de l'analyse granulométrique) et ce mélange après 15 minutes de malaxage fut versé dans un moule métallique et comprimé sous une pression de 3.4 MPa. A la suite d'un séchage de 17 heures à 50°C, les briques furent cuites pendant une heure à différentes températures.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Propriétés physiques

Un des changements, immédiatement décelable visuellement, fut la modification de la couleur sous l'action de la température. Les échantillons passèrent d'un gris terne après le séchage, à des tonalités de jaune, d'orangé et finalement à des teintes de brun-rouge à la suite d'une cuisson d'une heure à une température de 1100°C. Cette modification de la couleur des briques d'argile au cours de leur cuisson sont des phénomènes bien connus de l'industrie de la maçonnerie. Les changements de coloration sont habituellement occasionnés par la présence, dans l'argile à l'état brut, d'oxydes ferriques ( $Fe_2O_3$ ) qui changent graduellement de couleur sous l'action de la température (43).

La modification d'une autre propriété physique a pu être décelée: la variation du poids des briques cuites en fonction de la température de cuisson. Pour chaque échantillon, après une cuisson d'une heure aux différentes températures les pertes de poids ont été calculées en se référant au poids initial des briques immédiatement avant la

cuisson (voir Fig. 4, courbe de la variation des pertes de poids en fonction de la température de cuisson). Une cuisson d'une heure à des températures de 300, 400 ou 500°C n'affecte pas de façon significative les pertes de poids. Toutefois une brève analyse de la figure 4 nous montre qu'à partir de 600°C, les pertes de poids augmentent de façon quasi-linéaire pour atteindre environ 7% après une cuisson d'une heure à 1100°C. L'argile utilisée au cours de cette étude contient, à l'état naturel, une certaine quantité de matières organiques et de carbonates (38). Les pertes de poids sont donc vraisemblablement causées, d'une part, par la décomposition de ces substances durant la première phase de la cuisson et, d'autre part, par l'évaporation de l'eau résiduelle qui a servi à la préparation et au moulage des briques.

Des zones noires, clairement délimitées, furent décelées à l'endos et au centre des échantillons cuits à 1050 et 1100°C. Ces zones ont une apparence vitreuse et une surface polie et brillante. Elles sont accompagnées sans exceptions d'une déformation des échantillons, telle qu'en témoigne la photographie no 1 montrant une coupe transversale d'une brique cuite à 1050°C. Cette expansion débute, comme telle, à partir de 800°C. Elle progresse ensuite très rapidement pour finalement atteindre environ 50% suite à une cuisson d'une heure à 1100°C. La courbe de la figure 5 (courbe de la variation de volume en fonction de la température de cuisson), illustre cette progression, et celle de la figure 6 (courbe de la variation de la densité apparente en fonction de la température de cuisson), rend compte du même phénomène en mettant en évidence une

chute marquée de la densité apparente à la suite de cuissons, à des températures supérieures à  $800^{\circ}\text{C}$ . Ce phénomène, dénommé "coeurs noirs" et caractérisé par sa couleur, l'expansion qu'il produit et son apparence vitreuse, est généralement bien connu de l'industrie de la maçonnerie. D'autres études (44) démontrent que la coloration noire et l'aspect vitreux de la zone affectée sont probablement attribuables à la présence de carbone non oxydé et de composés de fer maintenus à l'état ferreux ( $\text{FeO}$  par exemple) à cause d'un taux de cuisson trop rapide et/ou d'une circulation d'air insuffisante dans le four au cours de la cuisson. Ces composés de fer à l'état ferreux fondent rapidement et tout comme le carbone sont de couleur noire. La distorsion, elle, est due au fait que les oxydes de fer maintenus à l'état ferreux forment, en fondant, une enveloppe plus ou moins imperméable qui empêche les gaz formés au cours des phases ultérieures de la cuisson de s'échapper du centre des échantillons entraînant par conséquent des gonflements et des fissures en surface. De plus les analyses effectuées par la compagnie Domtar (38) établissent qu'à des températures égales ou supérieures à  $900^{\circ}\text{C}$ , l'argile accélère son taux de consolidation; c'est alors que des liens céramiques se forment et il devient encore plus difficile pour les gaz formés d'être libérés.

Les quantités d'eau absorbée dans l'eau froide et bouillante augmentent de façon linéaire en fonction de la température de cuisson, telle qu'en atteste la courbe de la figure 7 (courbe de la variation des taux d'absorption en fonction de la température de cuisson). Cette augmentation est vraisemblablement causée par la formation de

fissures en surface et l'accroissement de la porosité. L'examen de la photographie no 2 rend compte du craquelage des échantillons et de leur expansion à la suite d'une cuisson d'une heure à 1050°C.

Il est intéressant toutefois de constater, en consultant la figure 8 (courbe de la variation du coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson) que le coefficient de saturation diminue en fonction de la température de cuisson. A cet effet, il importe de noter qu'à partir de 900°C, les taux d'absorption ne progressent que faiblement en regard de la diminution de la densité apparente. C'est donc dire que la proportion de pores scellés augmente au fur et à mesure que la température de cuisson s'élève, dû au fait que l'argile qui a fondu se solidifie après la cuisson durant la période de refroidissement et tend à isoler les vides d'air formés par les réactions libératrices de gaz dans des parois de matières solides imperméables ou tout au moins plus difficilement accessibles par l'eau froide. Cette hypothèse expliquerait la baisse du coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson, le coefficient de saturation étant, par définition, un rapport entre la quantité d'eau absorbée à température ambiante par rapport au taux d'absorption dans l'eau bouillante.

#### **Propriétés mécaniques**

La courbe de la figure 9 (courbe de la variation de la résistance en compression en fonction de la température de cuisson) illustre bien la modification de la résistance en compression selon la température.

On peut distinguer 2 zones distinctes: une zone de croissance de la résistance jusqu'à une température de  $850^{\circ}\text{C}$ ; et une zone de décroissance à partir de  $850^{\circ}\text{C}$ . L'augmentation de la résistance est probablement due au fait que durant la cuisson les oxydes ferreux agissent comme fondants et que l'argile ramollie se solidifie durant la période de refroidissement, lie les particules d'argile entre elles et entraîne une augmentation marquée de la résistance mécanique des échantillons cuits à des températures ( $800, 850, 900^{\circ}\text{C}$ ) qui sont inférieures aux températures de cuisson habituelles qui oscillent entre  $900$  et  $1020^{\circ}\text{C}$  (38).

La chute de la résistance à partir de  $850^{\circ}\text{C}$  est vraisemblablement attribuable à la formation de coeurs noirs qui entraînent une augmentation de la porosité, de gonflements et un craquelage en surface. Ces craques rompent la continuité des liens solides établis, et diminuent la résistance en compression des échantillons au fur et à mesure que la température de cuisson augmente et que le gauchissement (voir photo no. 2) des briques s'amplifie de même que la grosseur des pores formés au sein des coeurs noirs. La variation du module de rupture en fonction de la température de cuisson peut être expliquée suivant la même logique.

### **Conclusion**

L'augmentation de la température de cuisson modifie les propriétés physiques et mécaniques des échantillons. Toutefois la formation de coeurs noirs à des températures supérieures à  $800^{\circ}\text{C}$

amplifie les changements de propriétés physiques, comme c'est le cas pour l'expansion et les taux d'absorption d'eau, ou au contraire altère sensiblement les propriétés mécaniques. Ce phénomène indésirable est vraisemblablement attribuable à la présence dans l'argile, au cours de la cuisson, de matières organiques non-oxydées et d'oxydes qui sont maintenus à l'état ferreux (tel le FeO) à cause d'une circulation insuffisante d'oxygène à l'intérieur du four ou d'un taux de cuisson trop rapide. Ces oxydes agissent comme fondant à des températures inférieures aux températures de cuisson habituelles, empêchent les gaz de s'échapper et créent des gonflements et un craquelage en surface. Ce phénomène qui commence à faire son apparition aux environs de 800°C est caractéristique de certains types d'argile seulement. A la section 4.2.2 le taux et les conditions de cuisson requis pour prévenir la formation de coeurs noirs seront étudiés. Ce n'est que lorsque ce phénomène aura été contrôlé que la température optimale de cuisson pourra être déterminée.

Variations de volume en fonction de la température de cuisson.

FIGURE 5

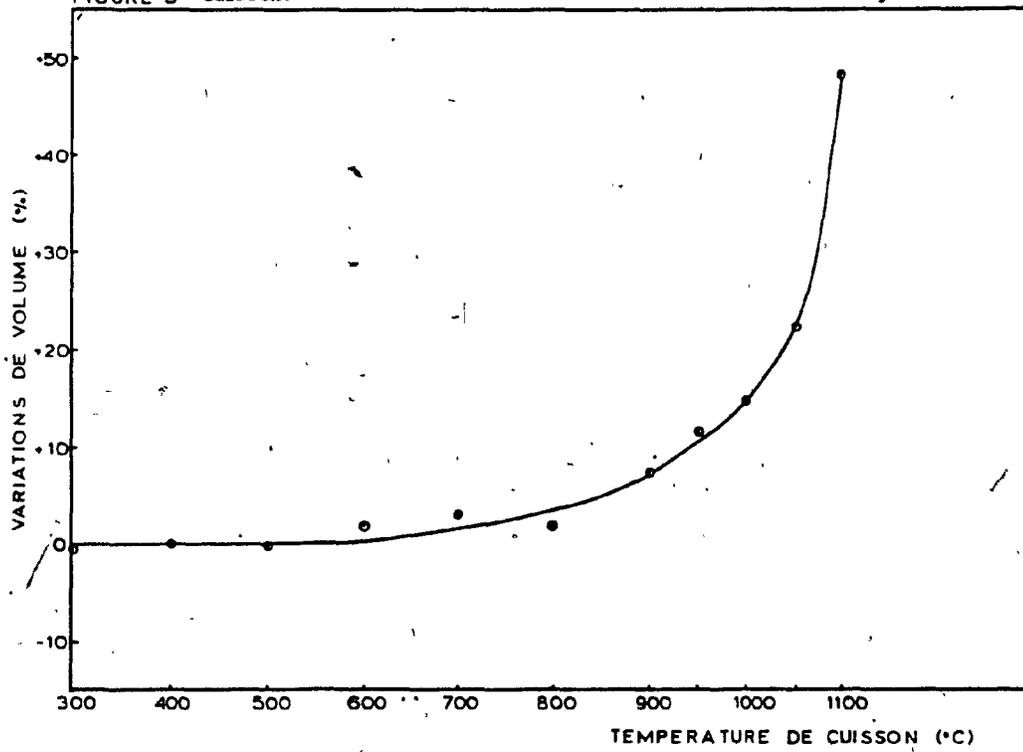
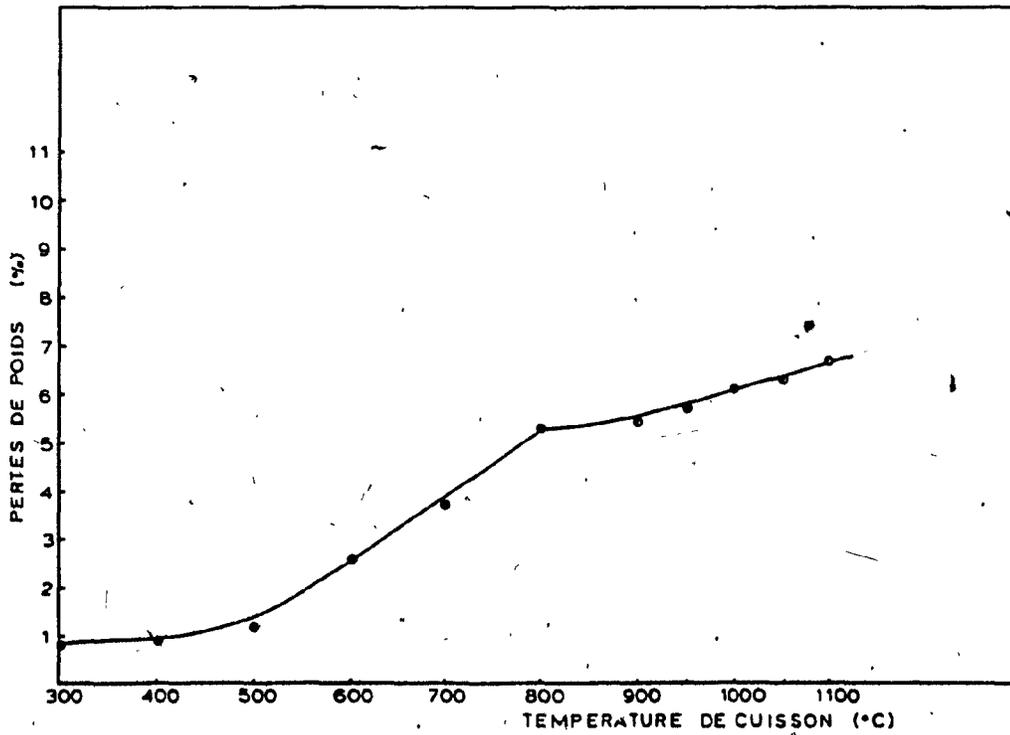
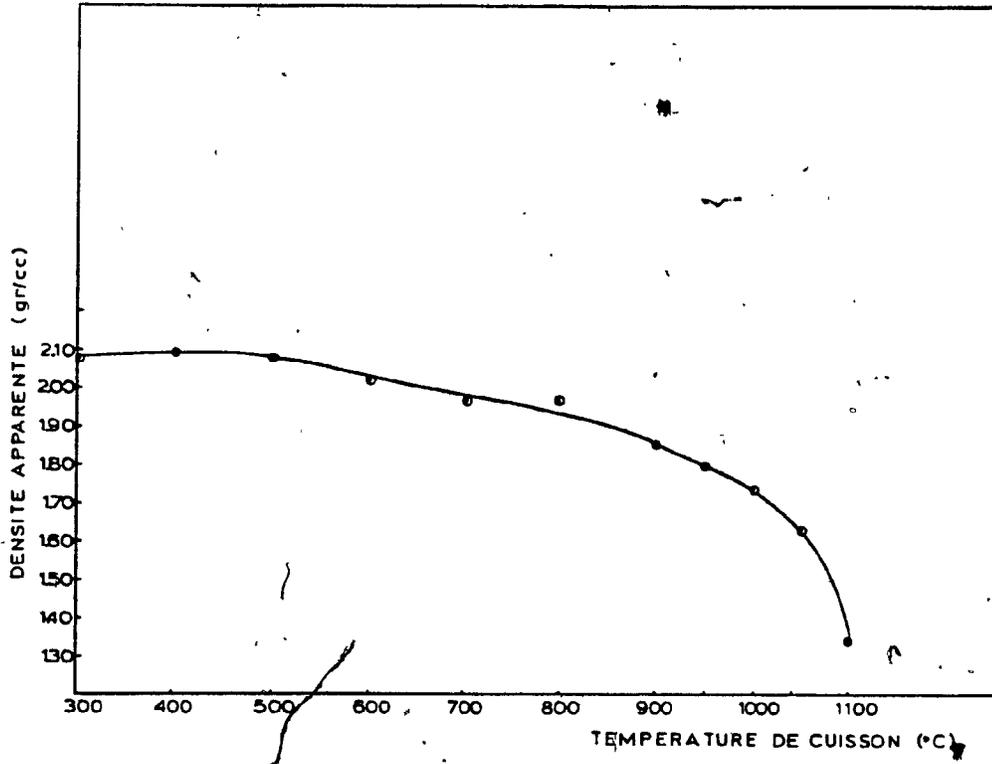


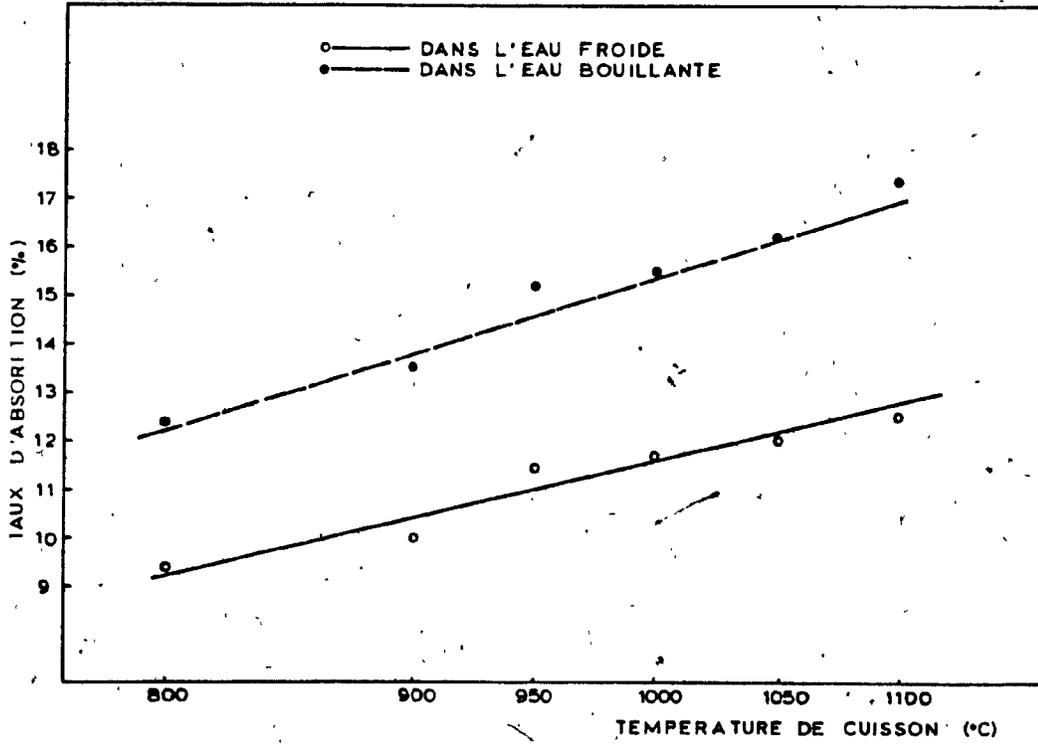
FIGURE 4 Pertes de poids en fonction de la température de cuisson.



Densité apparente en fonction de la température de cuisson.  
FIGURE 6



Taux d'absorption en fonction de la température de cuisson.  
FIGURE 7



Coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson.

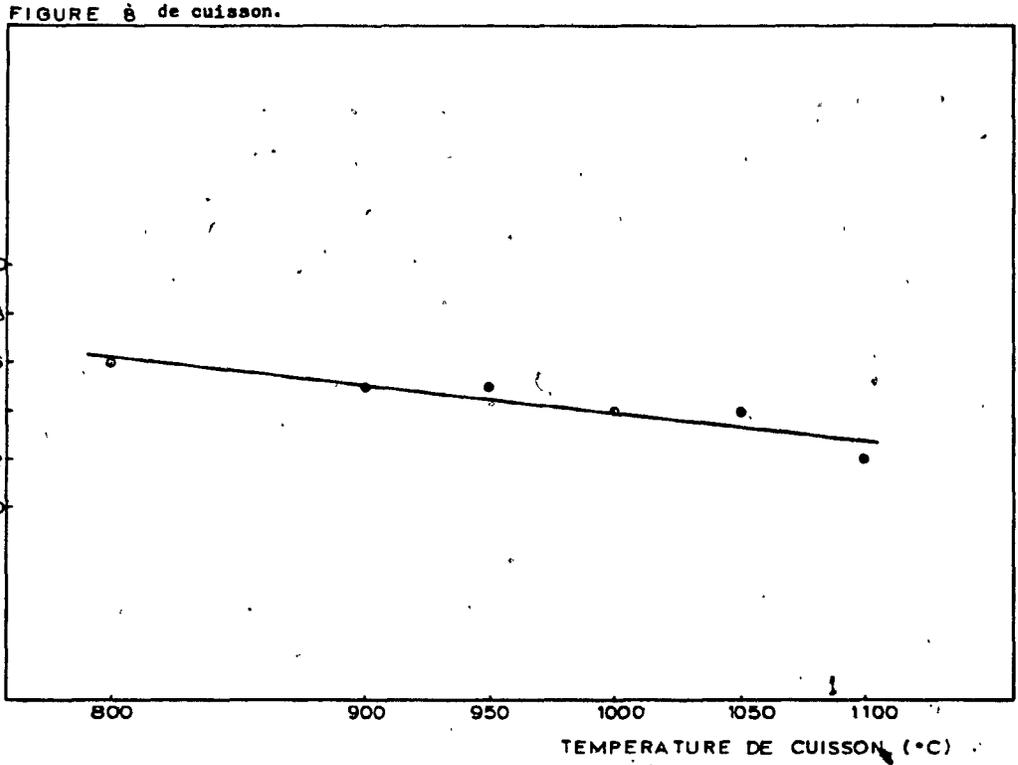


FIGURE 9 Résistance en compression en fonction de la température de cuisson.

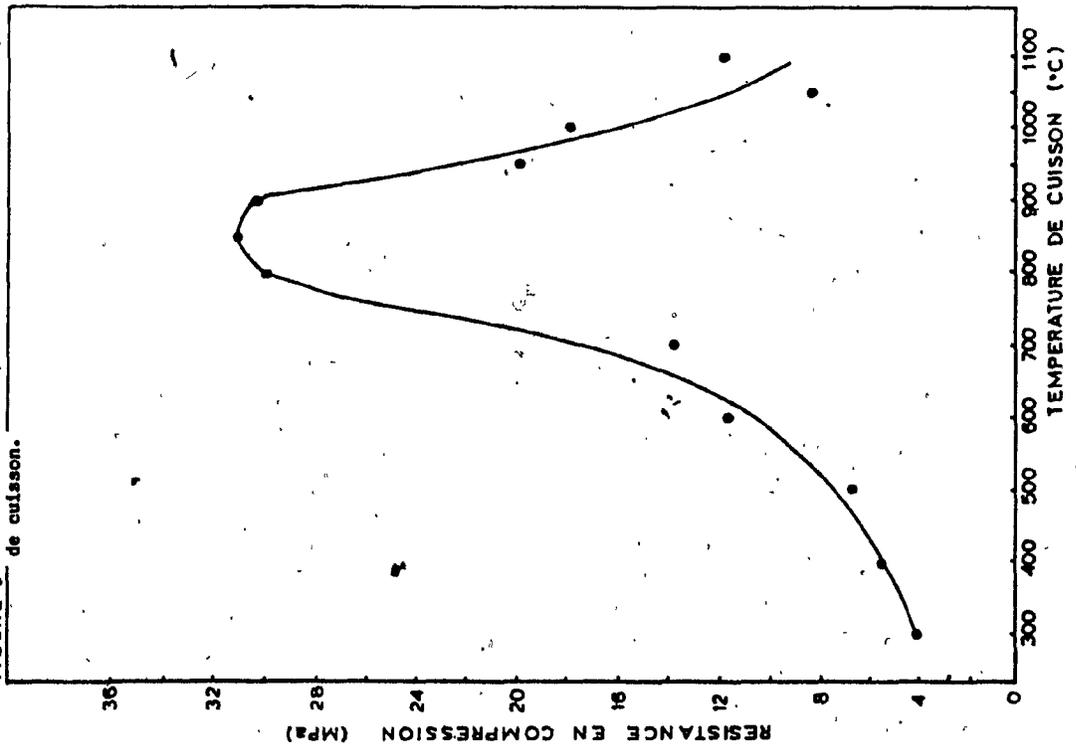
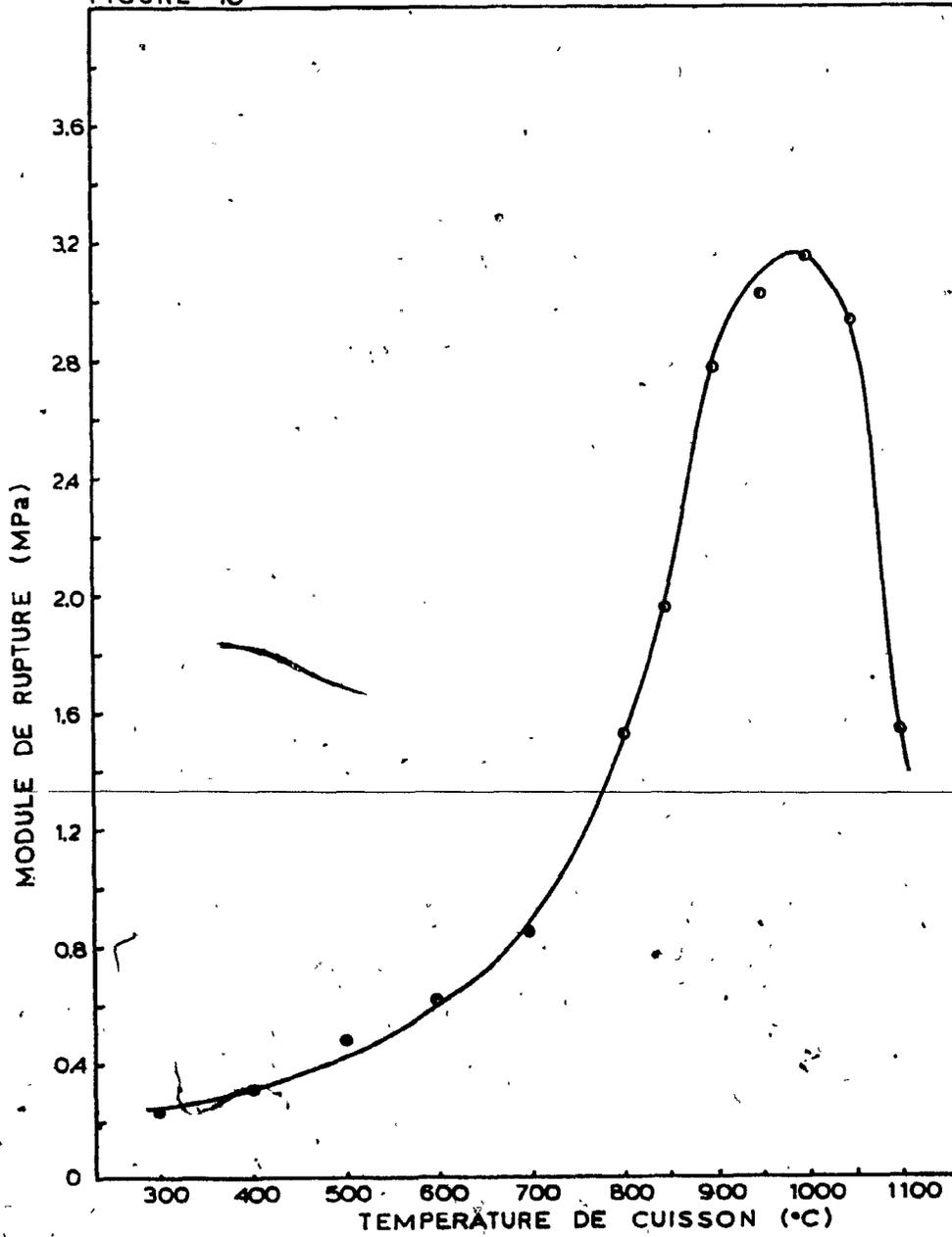


FIGURE 10 Module de rupture en fonction de la température de cuisson



## 4.2 SYSTEME A DEUX COMPOSANTES: ARGILE ET SCIURES

### 4.2.1 Variation de la température de cuisson avant l'élimination des sciures

Cette deuxième partie, "Système à deux composantes", porte sur l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des briques cuites fabriquées à partir d'argile et de sciures. En premier lieu les effets sur les propriétés physiques et mécaniques de briques cuites d'argile provoqués par l'addition de sciures aux mélanges avant la cuisson sont mesurés et comparés aux résultats obtenus dans la première section, et ce pour différentes températures de cuisson. Les objectifs de cette expérience sont d'une part de comparer les propriétés de briques cuites d'argile-sciures avec celles constituées uniquement d'argile pour des mélanges préparés et cuits dans des conditions en tout point identiques et d'autre part d'évaluer les effets de l'addition de sciures sur la formation de coeurs noirs. En second lieu, afin de prévenir la formation de coeurs noirs dans les échantillons cuits le taux ainsi que les conditions de cuisson requises pour éliminer les sciures et toutes traces de carbone résiduelles sont déterminés. Par la suite la température et le temps de cuisson optimaux sont établis. Finalement, pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des échantillons cuits d'argile-sciures, différents paramètres sont étudiés tel que la grosseur des particules d'argile et de sciures, la quantité de sciures et la pression appliquée sur les mélanges au moment du moulage.

Deux échantillons ont été fabriqués et cuits dans chaque cas à une température maximale différente allant de 300° à 1100°C.

Vingt-deux échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 23 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile et à 13.5 gr (4.5% par poids) de sciures de bois (voir annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures), et ces mélanges furent malaxés, moulés, séchés et cuits suivant le même processus que pour les mélanges constitués uniquement d'argile.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Propriétés physiques

Une des premières constatation qui peut être faite est la désagrégation facile des échantillons après la cuisson. Une simple manipulation des échantillons suffit pour que leurs surfaces s'effritent. Cette fragilité est nettement supérieure à celle observée pour les briques constituées uniquement d'argile. C'est pour cette raison, d'ailleurs, que les taux d'absorption dans l'eau froide ou bouillante n'ont pu être déterminés, les échantillons se décomposant lorsqu'immergés dans l'eau.

L'ajout de 4.5% par poids de sciures augmente de façon significative le volume des échantillons avant la cuisson par rapport à des mélanges de composition similaires mais exempts de sciures. Cette augmentation est de 30% en moyenne.

Les variations de volume en fonction de la température de cuisson sont à toute fin pratique identiques, qu'il s'agisse des briques avec ou sans sciures, tel qu'illustrée par la figure 12 (courbes des

variations de volume en fonction de la température de cuisson).

L'allure des courbes des pertes de poids en fonction de la température de cuisson de la figure 11 est la même pour les briques d'argile-sciures comme pour les briques d'argile. L'écart qui les sépare est de 4% par poids environ, soit la quantité approximative de sciures de bois ajoutée aux mélanges d'argile. A la suite d'une cuisson d'une heure à 300°C, les sciures se sont partiellement consommées; la différence est alors d'un peu plus de 2%. Cette différence se stabilise autour de 4% par poids après une cuisson à 600°C ou plus.

Sous l'action de la température les sciures se consomment et créent des pores à l'intérieur des briques. Toutefois, cette combustion est incomplète tel qu'en témoigne l'examen des coupes transversales des échantillons cuits à des températures inférieures à 800°C. En effet, une teinte noire foncée prédomine, en particulier à la suite de cuisson à des températures de 300 et 400°C. A 500, 600 et 700°C, le noir s'estompe à la surface des échantillons et laisse place graduellement à un jaune-brun. Cette couleur noire est vraisemblablement due à la présence de composés de carbone.

A des températures de cuisson égales ou supérieures à 800°C, une observation des échantillons coupés transversalement révèle la présence de coeurs noirs de dimensions importantes comme en témoigne la photographie no 2 illustrant une brique coupée en son centre à la suite d'une cuisson à 1100°C pendant une heure.

Si la température de cuisson influence de façon quasi-identique les propriétés physiques des briques avec et sans sciures, il n'en va pas de même pour les propriétés mécaniques. A toute fin pratique la résistance en compression ne varie pas en fonction de la température de cuisson et demeure à un niveau très bas de 1 MPa environ telle qu'en témoigne la courbe de la figure 13 (courbes de la variation de la résistance en compression en fonction de la température de cuisson). Le module de rupture, quant à lui, n'a pu être mesuré étant donné la fragilité des échantillons. Cette absence presque totale de résistance est vraisemblablement due au fait que les particules de sciures, se logeant entre les grains d'argile, réduisent la surface de contact entre ces grains et compromettent la quantité de liens céramiques pouvant s'établir au cours de la cuisson. Il s'en suit que les échantillons, quelque soit la température de cuisson, se désagrègent facilement. De plus, à des températures supérieures à 800°C, les coeurs noirs engendrent des déformations et un craquelage plus importants dans le cas des briques d'argile-sciures que dans le cas des briques constituées d'argile uniquement. La comparaison entre les photographies no 1 (brique d'argile) et 2 (briques d'argile-sciures) montre bien cette différence.

#### CONCLUSION

L'ajout de sciures aux mélanges d'argile ne modifie pas les variations de volume. Quant à la courbe des pertes de poids en fonction de la température de cuisson, son allure est la même dans le cas des briques d'argile-sciures que dans le cas des briques d'argile

et l'écart entre les deux courbes s'explique par la volatilisation des sciures.

Les taux d'absorption, par contre, n'ont pas été mesurés à cause de la fragilité des échantillons cuits. La résistance moyenne, quelque soit la température, n'est que d'environ 1 MPa et est probablement due au fait que l'ajout de sciures empêchent la formation de liens céramiques en réduisant la surface de contact entre les grains d'argile, et amplifie la formation de coeurs noirs et les gonflements qu'ils entraînent. Donc, encore plus que dans le cas des échantillons d'argile et tel que conclu à la section 4.1, il importe de diminuer le taux de cuisson des échantillons d'argile-sciures ou d'augmenter la circulation d'air à l'intérieur des fours pour éliminer le plutôt possible les sciures et pour oxyder les composés de fer.

---

FIGURE 11 Pertes de poids en fonction de la température de cuisson.

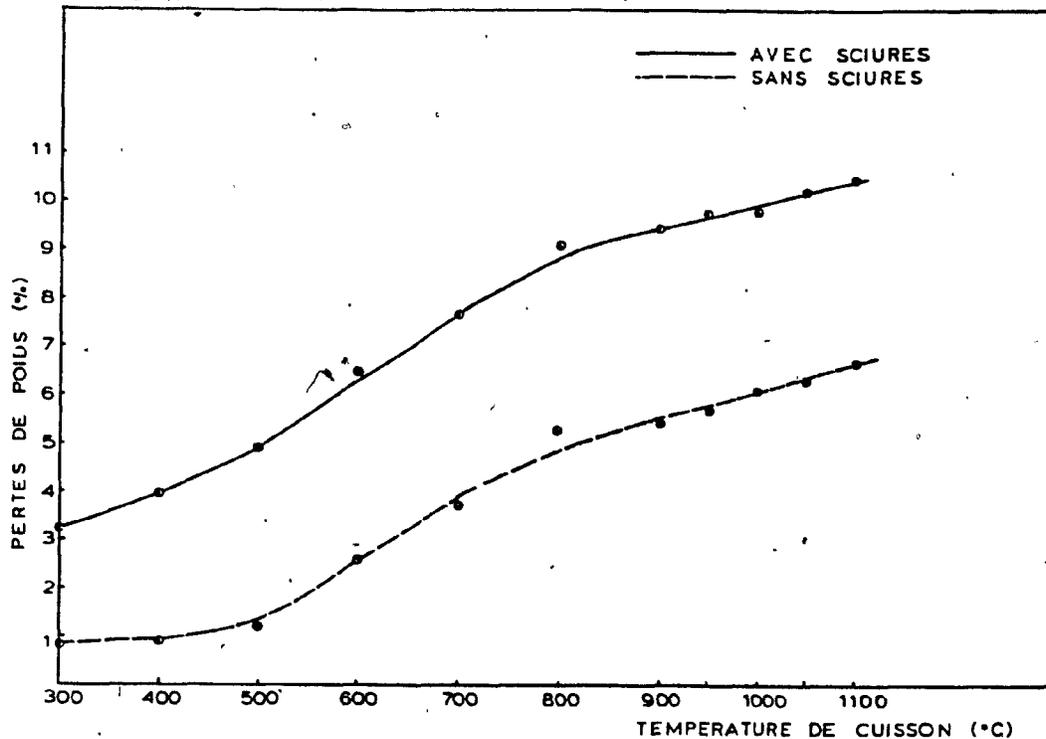
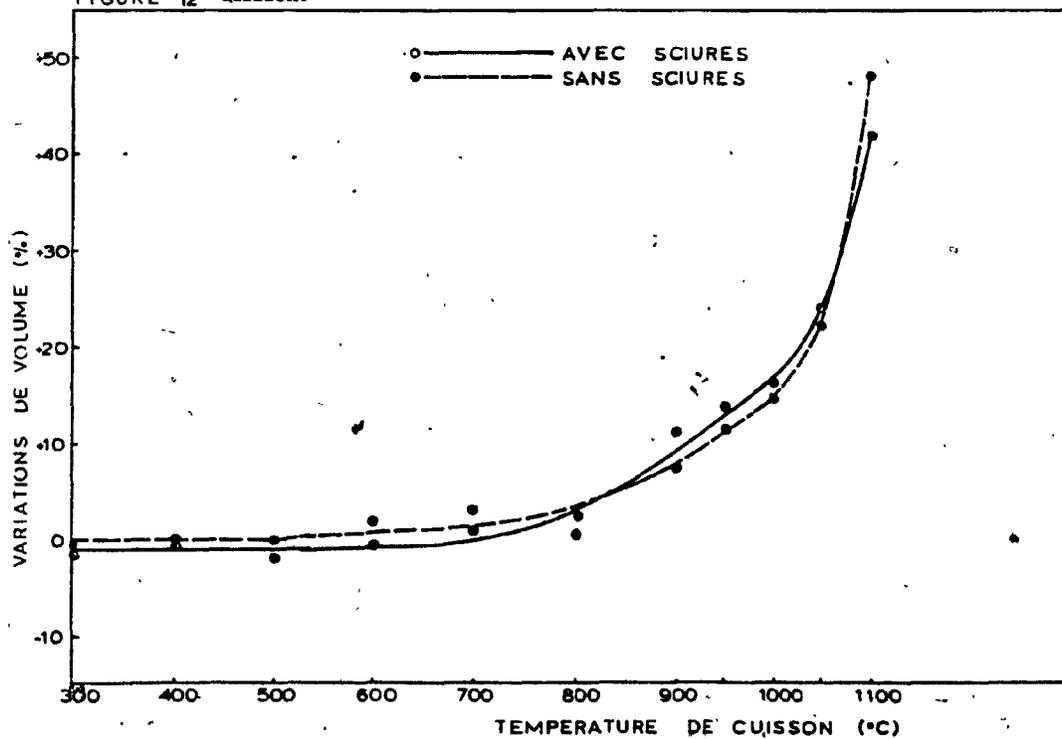
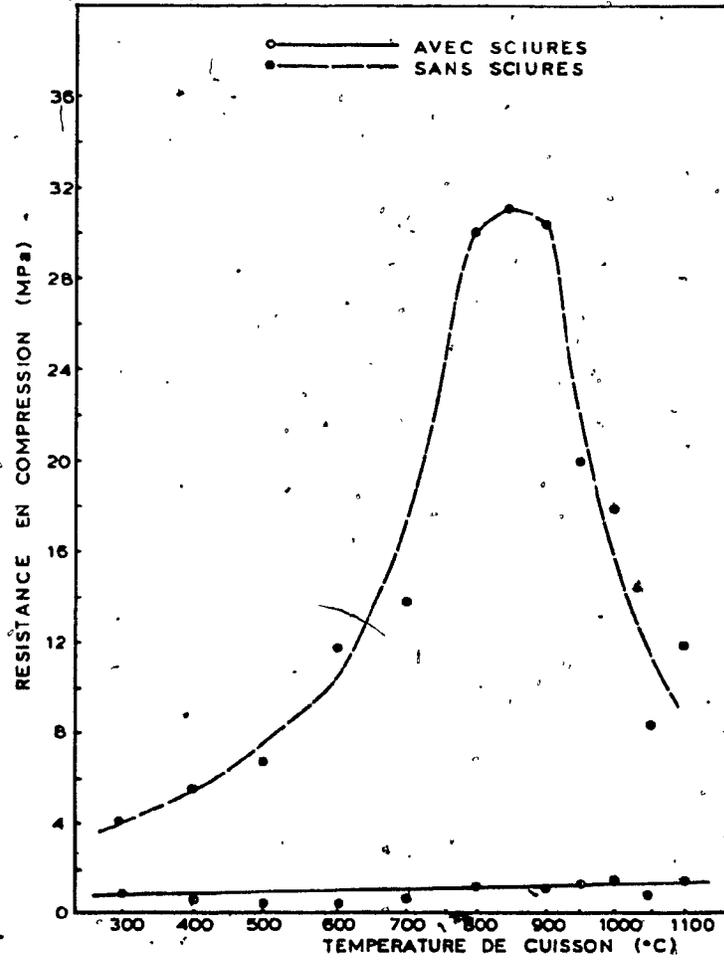


FIGURE 12 Variations de volume en fonction de la température de cuisson.



Résistance en compression en fonction de la température de cuisson.

FIGURE 13



**PHOTOGRAPHIE NO 1**  
**FORMATION DE COEURS NOIRS**



**(7X)**

**PHOTOGRAPHIE NO 2**



**ARGILE-SCIURES (13.5 pt, pds)**

**ARGILE SEULEMENT**

#### 4.2.2. Variation du taux de cuisson pour obtenir une combustion complète des sciures

##### EXPERIENCE

L'objectif de cette section est, d'une part, de déterminer la quantité de sciures incinérée à différentes températures, et d'autre part, de déterminer la température et le temps de cuisson requis pour consumer complètement les particules de sciures lorsqu'elles sont présentes à l'intérieur des briques d'argile-sciures, avant d'élever la température à son niveau maximal.

Durant la première phase de l'expérience, afin de déterminer les quantités résiduelles et la température de combustion des sciures de bois non incorporées à des mélanges d'argile, 5 gr de sciures furent incinérées, pendant une heure, à des températures différentes variant de 300 à 1100°C. Le poids des quantités restantes fut mesuré dans chaque cas.

Par la suite, deux échantillons ont été fabriqués et cuits à des températures intermédiaires de 500, 600 et 800°C, pendant 1, 2, 3, et 5 heures avant d'élever la température à son niveau maximale de 1000°C. La disparition progressive de la coloration noire à l'intérieur des échantillons fut notée, de même que les pertes de poids en fonction du temps de cuisson et de la température. Douze échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 23 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile et 13.5 gr (4.5% par poids) de sciures de bois (voir annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures) et

ces mélanges furent malaxés, moulés et séchés suivant le même processus que pour les mélanges constitués uniquement d'argile. Comme base de comparaison, douze autres échantillons furent préparés de façon identique mais sans ajouter de sciures aux mélanges.

## RESULTATS ET DISCUSSION

En ce qui concerne l'incinération des sciures de bois prises isolément, une cuisson d'une heure à  $300^{\circ}\text{C}$  est suffisante pour que 95% du poids initial de sciures soit consommé. La courbe de la figure 14 (variation du poids restant des sciures en fonction de la température de cuisson) montre de plus qu'à partir d'une cuisson d'une heure à  $400^{\circ}\text{C}$  la combustion des sciures est quasi-totale. Un examen visuel indique toutefois que des traces résiduelles de poids inférieur à 0.1 gr subsistent à la suite de cuissons à des températures plus élevées. Le poids de ces résidus diminue très lentement en fonction de la température pour ne représenter qu'une quantité et un volume négligeable à la suite d'une combustion à  $1100^{\circ}\text{C}$ . La combustion des sciures dépend donc de la température de cuisson mais varie aussi suivant la quantité d'oxygène présente dans le four (45). A cet effet, un orifice aménagé dans la porte du four et qui sert habituellement à l'inspection visuelle des échantillons au cours de la cuisson a été laissé ouvert afin de permettre à une quantité suffisante d'oxygène de circuler à l'intérieur.

Lorsqu'incorporées à l'intérieur d'une masse d'argile, les

sciures de bois ne brûlent pas aussi rapidement. Deux méthodes ont été employées pour évaluer ce taux de combustion. La première consiste à mesurer les variations de poids avant et après la cuisson, lorsque des plateaux de température de 500, 600 et 800°C sont maintenus pendant 1, 2, 3 et 5 heures. Pour la deuxième méthode, il s'agit d'examiner la coloration du centre de chaque échantillon d'argile-sciures après la cuisson. Le carbone étant, par nature, de couleur noire, sa disparition totale en fonction du temps de cuisson aux différentes températures sera caractérisée par une élimination progressive de toute tache foncée.

Les courbes de la figure 15 rendent compte de la variation du poids des briques en fonction du temps de cuisson à différentes températures. Plus la température est élevée, plus les pertes de poids sont importantes; ce phénomène a été constaté à la section 4.1. De plus, les sciures s'éliminent rapidement: il suffit d'une cuisson de deux heures à des températures de 500 et 600°C pour que les pertes de poids se stabilisent et pour qu'un écart d'environ 4% par poids soit atteint entre les courbes des échantillons d'argile-sciures et celles des briques fabriquées à partir d'argile uniquement, soit approximativement la quantité de sciures ajoutée aux mélanges d'argile.

Toutefois ces mesures de variations de poids ne constituent qu'une approximation de la quantité de sciures qui s'est consommée à l'intérieur de la masse des échantillons d'argile. Des résidus de carbone demeurent, tel qu'en témoigne la présence de teintes noires

aux centres des échantillons des photographies no 3 et 4. La présence de ces résidus ne peut être décelée par des mesures de poids, mais par l'observation de la disparition de la coloration noire à l'intérieur des échantillons. Une inspection visuelle des photographies no 3 et 4 permet de constater que pour un temps de cuisson d'une heure une augmentation de la température de 500 à 700°C (voir photo no 3) réduit progressivement la coloration noire au centre des échantillons jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement. Un effet similaire est obtenu en augmentant le temps de cuisson et en conservant la température constante (voir photo no 4). L'inspection de la coloration interne des échantillons démontre que le temps de cuisson doit être prolongé jusqu'à 5 heures à 500°C ou jusqu'à 3 heures à 600°C pour effacer toute trace de carbone. L'incinération des sciures lorsqu'elles sont incorporées à l'intérieur des échantillons est soumise à une contrainte supplémentaire: l'oxygène présent dans le four au moment de la cuisson doit parvenir à pénétrer à l'intérieur de la masse d'argile. Par conséquent, le système poreux des échantillons doit être perméable pour permettre une bonne pénétration de l'oxygène. Les particules de sciures, en brûlant, créent des pores et des interstices qui à leur tour facilitent la combustion des sciures qui se trouvent plus au centre de la masse en permettant à l'oxygène de les atteindre plus facilement. L'élimination progressive des sciures s'effectue de l'extérieur des échantillons vers l'intérieur.

Le temps et la température de cuisson influencent la combustion des sciures. Plus la température est élevée, plus les sciures se

consument rapidement. Toutefois, à des températures voisines de 800°C, les grains d'argile commencent à se consolider et l'oxygène arrive alors plus difficilement à pénétrer à l'intérieur des échantillons. De plus, cette consolidation des particules d'argile entre elles empêche le bioxyde de carbone déjà formé de s'échapper de l'intérieur des échantillons et crée une pression interne qui engendre un gonflement sensible des échantillons. Les échantillons qui ont été cuits 1 heure à 1000°C, après qu'une plate-forme de 5 heures à 800°C ait été maintenue, subissent une augmentation de volume de 12.3%, comparativement à 4% environ pour les échantillons dont les paliers de température ont été de 500, 600 et 700°C avant que la température soit élevée à 1000°C.

#### CONCLUSION

Il importe donc d'éliminer les sciures en maintenant des paliers de température entre 500 et 800°C et d'assurer une libre pénétration d'oxygène avant d'élever la température à son niveau maximal en laissant ouvert l'orifice aménagée dans la porte du four. Pour chaque cuisson, compte tenu de la dimension des échantillons et de leur nombre, ainsi que de la porosité du système un plateau de 500 à 600°C maintenu pendant 5 heures assure une élimination complète des sciures et de ses traces résiduelles de carbone et empêche la formation de coeurs noirs.

FIGURE 14 Poids restant des sciures en fonction de la température de cuisson.

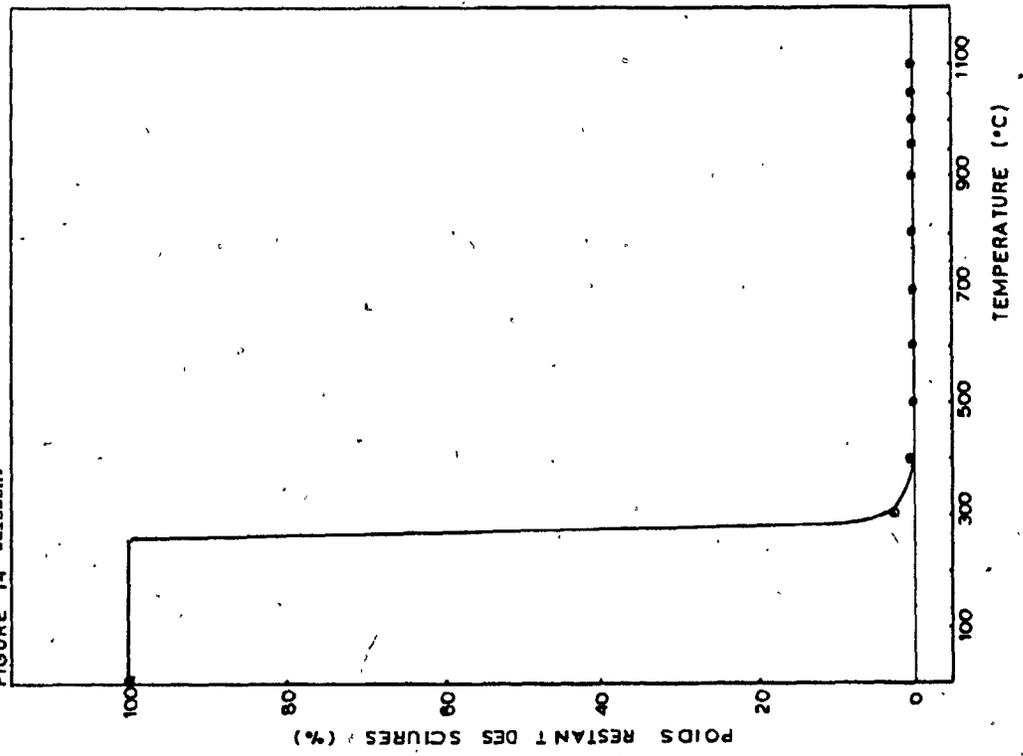
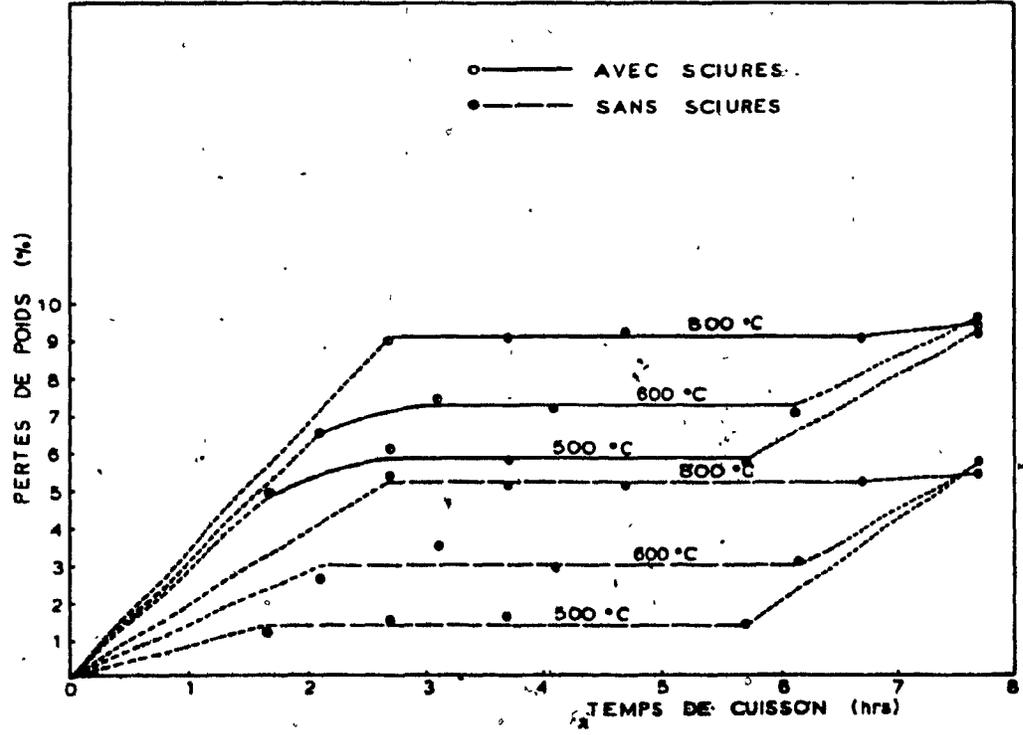
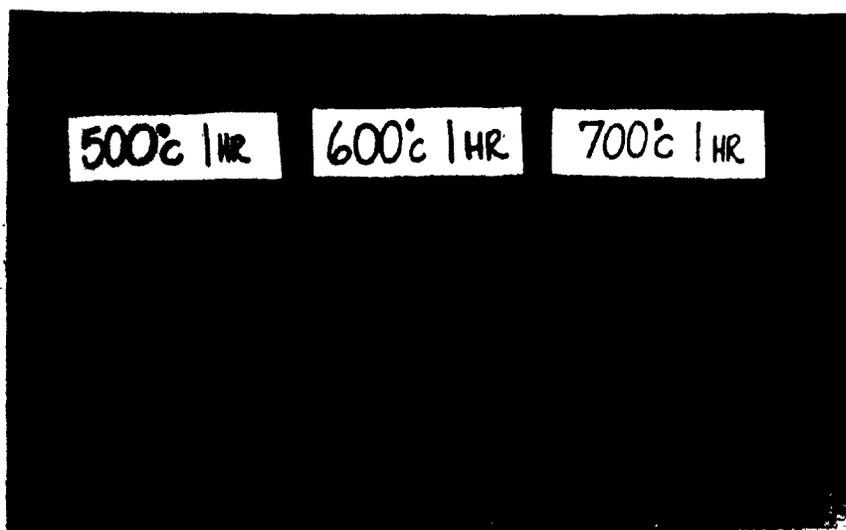


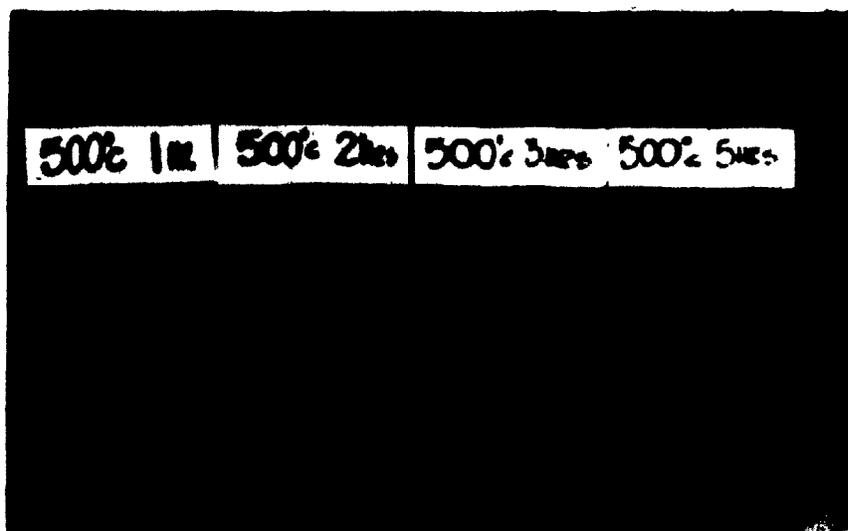
FIGURE 15 Pertes de poids en fonction du temps de cuisson.



**PHOTOGRAPHIE NO 3**  
**ELIMINATION DU CARBONE EN FONCTION**  
**DE LA TEMPERATURE**



**PHOTOGRAPHIE NO 4**  
**ELIMINATION EN FONCTION DU TEMPS**



#### 4.2.3 Variation de la température et du temps de cuisson après l'élimination des sciures

Les coeurs noirs ont été éliminés en maintenant un plateau de température de 500 à 600°C pendant 5 heures, en favorisant l'accès d'oxygène à l'intérieur du four, et en permettant ainsi une combustion complète des sciures de bois et des oxydes ferreux. L'expérience qui suit a pour objectif de déterminer le temps optimal et la température maximale de cuisson des échantillons ne présentant aucune trace de coeurs noirs.

#### **EXPERIENCE**

Les résultats des analyses thermographiques de l'argile effectuées par la compagnie Domtar (38) indique que les températures de cuisson optimales se situent autour de 1020°C. Deux températures ont donc été testés au cour de cette expérience: 1000 et 1050°C.

Deux échantillons ont été fabriqués et cuits dans chaque cas à une température maximale de 1000 et 1050°C, après avoir été maintenus 5 heures à 500°C. Quatre temps de cuisson furent utilisés: 1, 5, 15 et 30 heures. Seize échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 23 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile et 13.5 gr (4.5% par poids) de sciures de bois (voir annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures) et ces mélanges furent malaxés, moulés et séchés suivant le même processus que les mélanges constitués uniquement d'argile.

## RESULTATS & DISCUSSION

### Propriétés physiques

A une température de  $1000^{\circ}\text{C}$ , la variation du temps de cuisson n'affecte en aucun cas le pourcentage d'expansion qui demeure constant et égale à 4%. Il en est de même pour le taux d'absorption dans l'eau froide qui lui se maintient autour de 24%, tel qu'en témoignent les courbes des figures 16 et 17 (Variation de volume et variation des taux d'absorption dans l'eau froide en fonction du temps de cuisson). Toutefois, à une température de  $1050^{\circ}\text{C}$ , les pourcentages d'expansion des échantillons accusent une hausse graduelle en fonction du temps de cuisson: le taux d'augmentation du volume des échantillons passe de 4% environ à la suite d'une heure de cuisson, à plus de 20% quand le temps de cuisson est de 30 heures; alors que les taux d'absorption dans l'eau froide sont constants quelque soit le temps de cuisson, comme ce fut le cas, à une température de  $1000^{\circ}\text{C}$ , bien que leur niveau soit légèrement supérieur et égale à 25%. Dans les deux cas, qu'il s'agissent de cuisson à  $1000$  ou  $1050^{\circ}\text{C}$ , les échantillons cuits, en dépit de leur expansion (à la suite de cuissons prolongées à  $1050^{\circ}\text{C}$ ), ne montrent aucun signes apparents de formation de coeurs noirs en leur centre. L'expansion marquée des échantillons à la suite d'une cuisson prolongée à  $1050^{\circ}\text{C}$  est probablement due au fait que cette température se rapproche de la température de fusion du type d'argile utilisée lors de cette expérience. Cette hypothèse se confirme par l'examen du centre et de la surface des échantillons cuits à  $1050^{\circ}\text{C}$  pendant 15 et 30 heures qui met en évidence leur apparence vitreuse causée par la présence, au

moment de la cuisson, de substances qui se sont ramollies. L'expansion des échantillons résulteraient alors d'une sommation d'efforts de directions opposées: d'une part la pression qu'exercent les gaz pour s'échapper et d'autre part les forces de liaisons des particules d'argile entre elles qui, à cause d'une cuisson à une température proche de celle de fusion, se sont amoindries. Lors des cuissons à  $1000^{\circ}\text{C}$  aucun ramollissement de l'argile ne s'est formée à en juger par l'examen visuelle des échantillons et le volume de gaz libéré a pu s'échapper au travers le système poreux sans provoquer d'expansions. En ce qui concerne les taux d'absorption dans l'eau froide, le fait que les taux demeurent approximativement les mêmes qu'il s'agisse d'échantillons cuits à  $1000$  ou  $1050^{\circ}\text{C}$ , ou ayant subi des expansions de 4 à 20%, est vraisemblablement causé par le ramollissement de l'argile à  $1050^{\circ}\text{C}$  (15 et 30 heures) qui a créé des pores scellés.

### Propriétés mécaniques

Quelques soient la température utilisée ou les temps de cuisson, les échantillons, une fois refroidis, sont friables et peu résistants. Les risques de bris furent tels que les essais pour déterminer le module de rupture n'ont pu être effectués. Leurs résistances en compression, comme le montrent les courbes de la figure 18 (Variation de la résistance en compression en fonction du temps de cuisson), sont égales ou inférieures à 3 MPa seulement. A une température de  $1000^{\circ}\text{C}$ , le temps de cuisson n'affecte pas la résistance, alors qu'à une température de  $1050^{\circ}\text{C}$ , le fait

d'augmenter le temps de cuisson de 1 à 30 heures fait passer la résistance de 1 à 3 MPa. Un examen de la structure poreuse permet d'émettre l'hypothèse suivante pour expliquer cette faible résistance: les grains d'argile sont relativement gros et fortement distancés les uns par rapport aux autres vu leur granulométrie et la présence d'interstices importants créés par la combustion des sciures. Les surfaces de contacts entre les particules d'argile sont donc réduites et des liens céramiques n'ont pu se former en quantité suffisante pour assurer une résistance élevée, et ce en dépit du temps de cuisson prolongé. Cette hypothèse est d'ailleurs renforcée par le fait qu'après le séchage, déjà, les échantillons à cause de la présence de sciures dans les mélanges, devaient être manipulés avec précaution pour ne pas se désintégrer lors de leur transfert du séchoir au four. Cette fragilité est un indice supplémentaire d'une compaction insuffisante des grains d'argile entre eux.

#### CONCLUSION

Donc, une cuisson de 15 heures ou plus à 1050°C, une température qui semble vraisemblablement être proche de la température de fusion de l'argile, (génère des expansions indésirables du volume des échantillons et contribue avec la présence de particules de sciures qui réduisent la surface de contact entre les grains d'argile, à diminuer considérablement la résistance en compression des échantillons comparativement aux briques constituées uniquement d'argile. Il ne suffit donc pas d'éliminer complètement les sciures en maintenant un pallier de 5 heures à 500°C mais encore faut-il que

d'autres paramètres soient modifiés pour augmenter la compaction des mélanges et de là, la surface de contact entre les grains d'argile et le nombre de liens céramiques formés au cours de la cuisson.

FIGURE 16 Variations de volume en fonction du temps de cuisson.

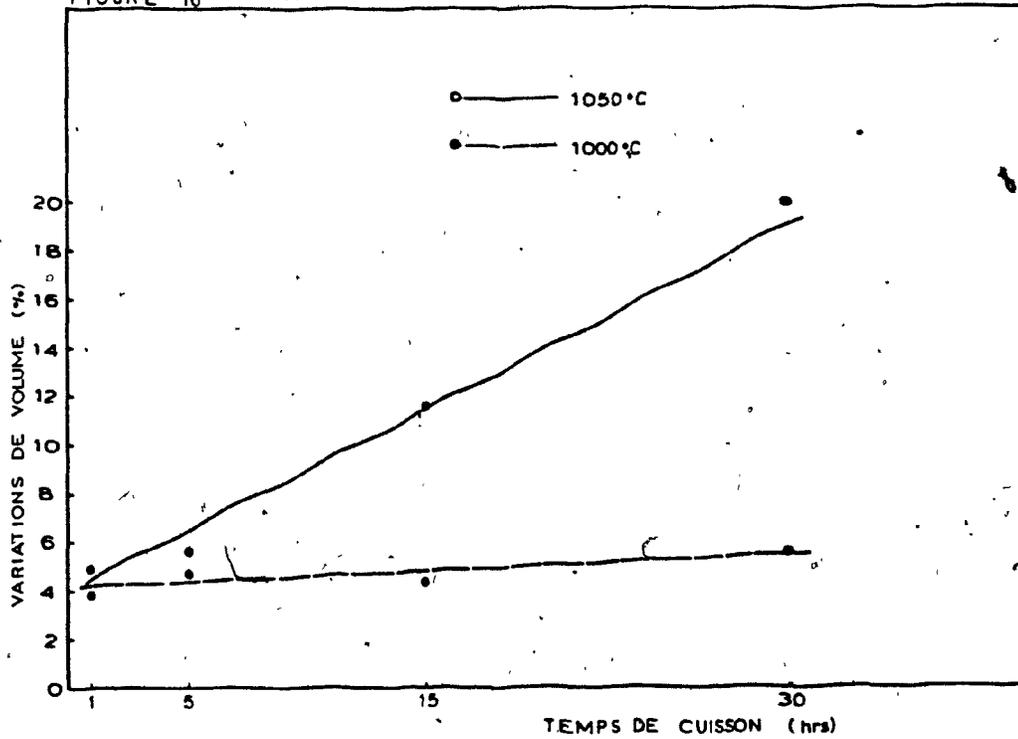


FIGURE 17 Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction du temps de cuisson.

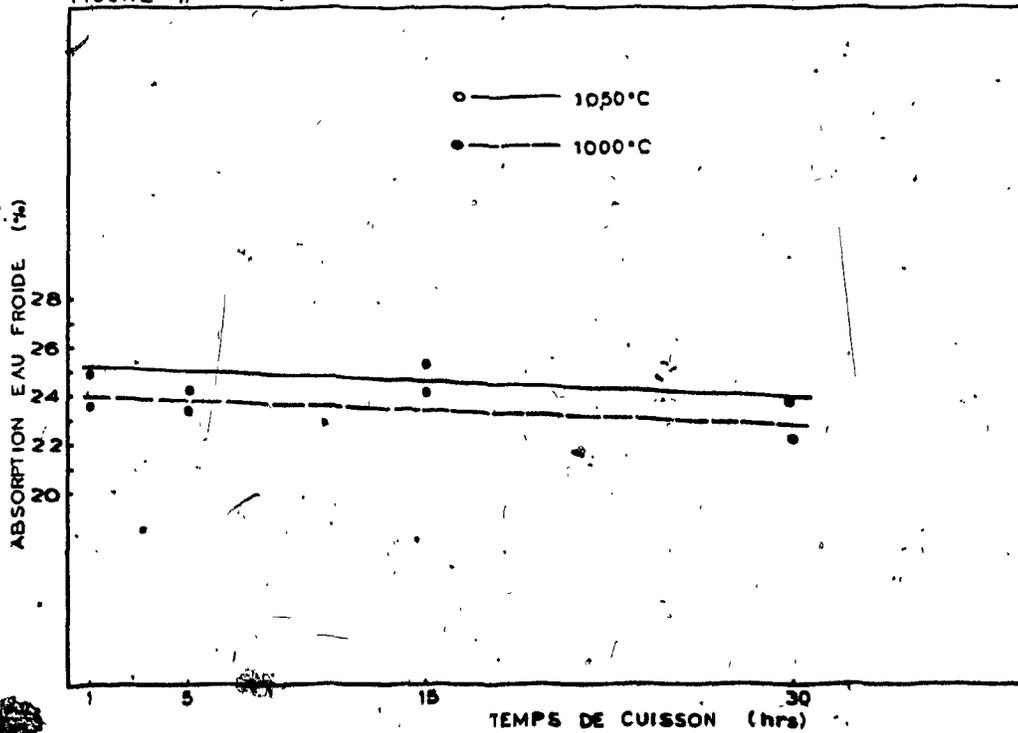
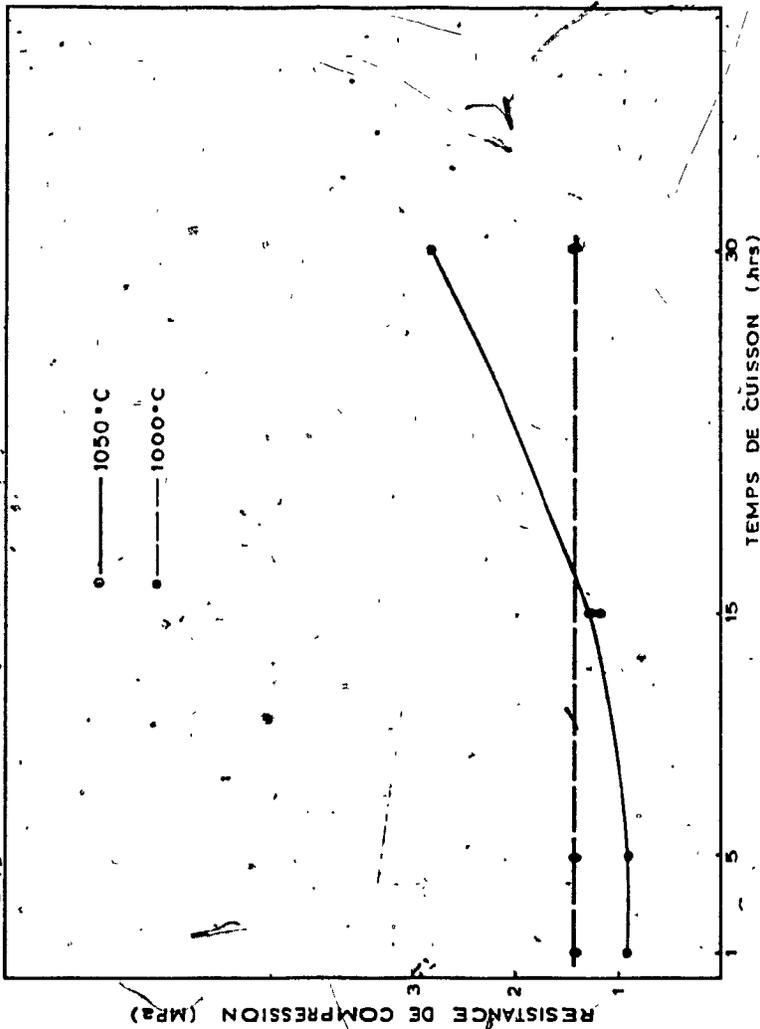


FIGURE 18 Résistance en compression en fonction du temps de cuisson.



#### 4.2.4 Variation de la grosseur des particules d'argile

Il a été démontré à la section 4.2.2 que le maintien d'un plateau de 5 heures à une température de 500°C était nécessaire pour éliminer complètement les sciures et toutes traces de carbone. Par la suite, tel que démontré à la section 4.2.3, une cuisson à des températures maximales de 1000 ou 1050°C s'avéra insuffisante, quelque soit le temps de séjour des échantillons dans le four, pour leur donner des résistances mécaniques supérieures à 3 MPa. L'hypothèse qui sera étudiée dans cette section est que ces faibles résistances, en compression sont attribuables en fait à l'utilisation de gros grains d'argile dans les mélanges.

#### EXPERIENCE

Deux échantillons ont donc été fabriqués et cuits dans chaque cas à une température maximale de 1050°C pendant 5 heures, après avoir été maintenus 5 heures à 500°C. Dix échantillons furent ainsi préparées à partir de la composition suivante: 23 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile et 13.5 gr de sciures (4.5% par poids). Pour l'argile, 5 différentes granulométries furent utilisées: d'une part, 1 mélange non tamisé, celui qui a été utilisé dans les expériences précédentes et d'autre part quatre autres mélanges, tamisés à partir du premier (voir l'annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des 5 mélanges d'argile ainsi que celui des sciures de bois). Les mélanges furent malaxés, moulés et séchés suivant le même processus que les mélanges constitués uniquement d'argile.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Propriétés physiques

Un examen visuel (agrandissement: 7 fois) des grains d'argile avant la cuisson (voir photo. no 5) révèle des différences marquées entre le mélange non tamisé et celui constitué de particules de dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$  et supérieures à 150  $\mu\text{m}$ , et ce autant dans la grosseur des grains que dans leur uniformité. De la même façon, une comparaison des sections transversales des échantillons cuits et préparés à partir de mélanges de granulométries différentes met en évidence des dissemblances significatives. Tel qu'illustré par la photographie no 6, les échantillons constitués de mélanges dont les particules sont de dimensions inférieures à 150  $\mu\text{m}$ , présentent une surface moins poreuse, plus homogène et lisse que les briques fabriquées à partir de grains d'argile non tamisés ou de dimension supérieures.

La contraction des échantillons après la cuisson augmente linéairement et de façon significative en fonction de la finesse des grains d'argile (voir la figure no 20: Variations du volume en fonction de la dimension des grains d'argile). Pour le mélange non tamisé et ceux dont les grains sont supérieures à 300  $\mu\text{m}$  les échantillons augmentent de volume après la cuisson par rapport au volume initial tandis que les briques constituées de grains aux dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$  ont tendance à se contracter. Cette variation sensible de l'expansion ne peut être attribuable à une température maximale de cuisson qui se rapprocherait de la température de fusion de l'argile, puisque tous les échantillons ont été cuits à

une température maximale de cuisson identique de 1050°C, alors que certains d'entre eux subissent un rétrécissement de volume de 15% et que d'autres augmentent leur volume de près de 30% après la cuisson. Ces variations de volume doivent donc être expliquées d'une autre façon. De faibles quantités de gaz se dégagent aux températures maximale de cuisson. En s'échappant, ces gaz exercent une pression interne à l'intérieur des échantillons qui peut être suffisamment forte pour créer des gonflements si les grains d'argile à cause de leurs dimensions et des faibles surfaces de contacts entre eux n'ont pas développé de liens céramiques suffisamment forts pour résister à cette pression. A l'opposé, les grains d'argile plus petits que 300  $\mu\text{m}$  constituent des échantillons plus compacts, à l'intérieur desquels les surfaces de contact entre les particules sont plus grandes. Ainsi, pendant la cuisson, les particules d'argile se consolident plus facilement, les liens céramiques formés résistent à la pression interne des gaz, et engendrent une densification des échantillons au lieu d'une expansion.

La densité apparente, étant par définition égale au poids des échantillons divisé par leur volume, augmente en fonction de la finesse des particules d'argile car plus les grains d'argile sont petits, plus les surfaces de contact entre eux augmentent, plus ils ont tendance à se compacter facilement et les vides d'air formés entre les grains sont donc moins nombreux. (Voir la figure no 19: Variations de la densité apparente en fonction de la dimension des particules d'argile.)

Les taux d'absorption d'eau, dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante ont tendance dans un premier temps à augmenter lorsque les grains d'argile du mélange initial sont tamisés pour ne retenir que les particules supérieures à 300  $\mu\text{m}$  ou à 600  $\mu\text{m}$ , tel qu'illustré par les deux courbes de la figure 21 (Variations des taux d'absorption d'eau en fonction des dimensions des particules d'argile). Les taux, qui sont alors respectivement de 32 et de 25% dans l'eau bouillante et froide, chutent linéairement jusqu'à 10 et 5% pour les échantillons cuits fabriqués à partir de particules inférieures à 150  $\mu\text{m}$ . Le coefficient de saturation subit les mêmes variations passant d'un maximum de 0.90 à 0.50 (voir figure no 22: Variations du coefficient de saturation en fonction des dimensions des particules d'argile).

Les échantillons constitués d'argile non-tamisée ont des taux d'absorption élevés de 24 et 29% dus à un volume poreux important causé par un pourcentage d'expansion du volume des échantillons après la cuisson de près de 30% et par la présence non seulement de vides d'air créés par la combustion des sciures mais aussi de gros grains d'argile qui ont tendance à former des pores plus gros entre eux. Lorsque l'argile est tamisée et que les particules inférieures à 300  $\mu\text{m}$  sont éliminées des mélanges comme c'est le cas pour les échantillons constitués de grains supérieurs à 600  $\mu\text{m}$  ou inférieurs à 600  $\mu\text{m}$  mais supérieurs à 300  $\mu\text{m}$ , les taux d'absorption dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante augmentent, les particules de petites dimensions libérant alors un volume d'air additionnel qui pourra être occupé par l'eau. Toutefois, en ce qui concerne les briques fabriqués à partir de grains inférieurs à 300  $\mu\text{m}$ , la compacité accrue des mélanges lors

du moulage, leur rétrécissement après la cuisson, et la meilleure consolidation des particules entre elles (voir photo no 6) font abaisser les taux d'absorption en créant soit moins de pores ou des pores scellés. Le coefficient de saturation diminue en fonction de la finesse des grains d'argile. Les échantillons immergés dans une eau à température ambiante sont donc de plus en plus difficile à saturer par rapport au volume de pores pouvant être remplis par de l'eau bouillante étant donné la présence dans les systèmes poreux de canaux moins nombreux et plus étroits comme en témoigne la photographie no 6.

#### Propriétés mécaniques

La résistance en compression et le module de rupture varient de façon peu sensible lorsque l'argile est tamisée et que seules les particules de dimensions supérieures à  $600 \mu\text{m}$ , ou encore celles qui sont inférieures à  $600 \mu\text{m}$  et supérieures à  $300 \mu\text{m}$  sont retenues. Toutefois, pour les grains plus petits que  $300 \mu\text{m}$ , l'augmentation des propriétés mécaniques est marquée et atteint  $34 \text{ MPa}$  pour la résistance en compression et  $12 \text{ MPa}$  environ pour le module de rupture (voir Fig. no 23 Variations des propriétés mécaniques en fonction de la dimension des particules d'argile).

Ce gain de résistance peut être expliqué par deux facteurs. D'une part, les grains d'argile inférieures à  $300 \mu\text{m}$  ont des surfaces de contact accrues et de ce fait se consolident plus facilement pendant

la cuisson et peuvent d'autre part enrober les particules de sciures (600  $\mu\text{m}$  > dimensions > 300  $\mu\text{m}$ ) tout en demeurant en contact les uns avec les autres.

#### CONCLUSION

Donc des échantillons d'argile-sciures préparés et cuits dans les mêmes conditions peuvent avoir, suivant la grosseur des grains d'argile de faibles densités apparentes, de fort taux d'absorption et des résistances en compression n'excédant pas 2 MPa, ou au contraire, lorsque les grains d'argile sont de dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$ , constituer des matériaux denses, résistants et peu absorbants. Ces différences peuvent être expliquées par le fait que les grains d'argile inférieures à 300  $\mu\text{m}$  favorisent une meilleure compaction des mélanges lors de leur préparation, enrobent adéquatement les particules de sciures supérieures à 300  $\mu\text{m}$  tout en demeurant en contact les uns avec les autres, et forment de nombreux liens céramiques lors de la cuisson à cause de leurs surfaces de contact plus grandes que pour les grains d'argile de dimensions supérieures à 300  $\mu\text{m}$ .

FIGURE 20 Variations de volume en fonction de la dimension des particules d'argile.

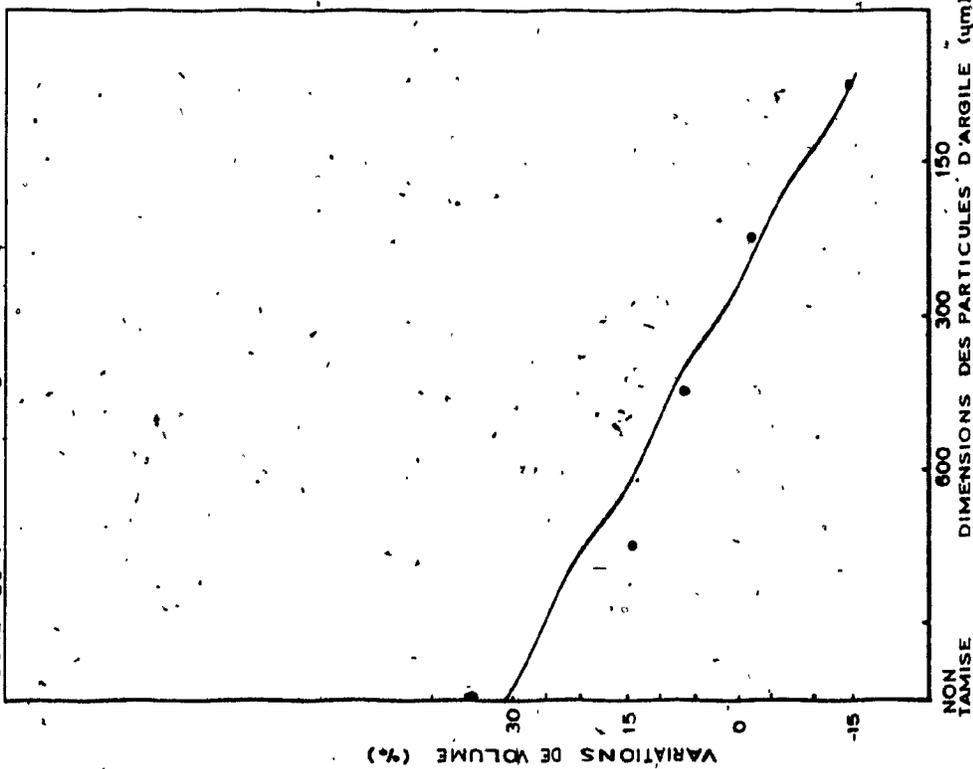


FIGURE 19 Densité apparente en fonction de la dimension des particules d'argile.

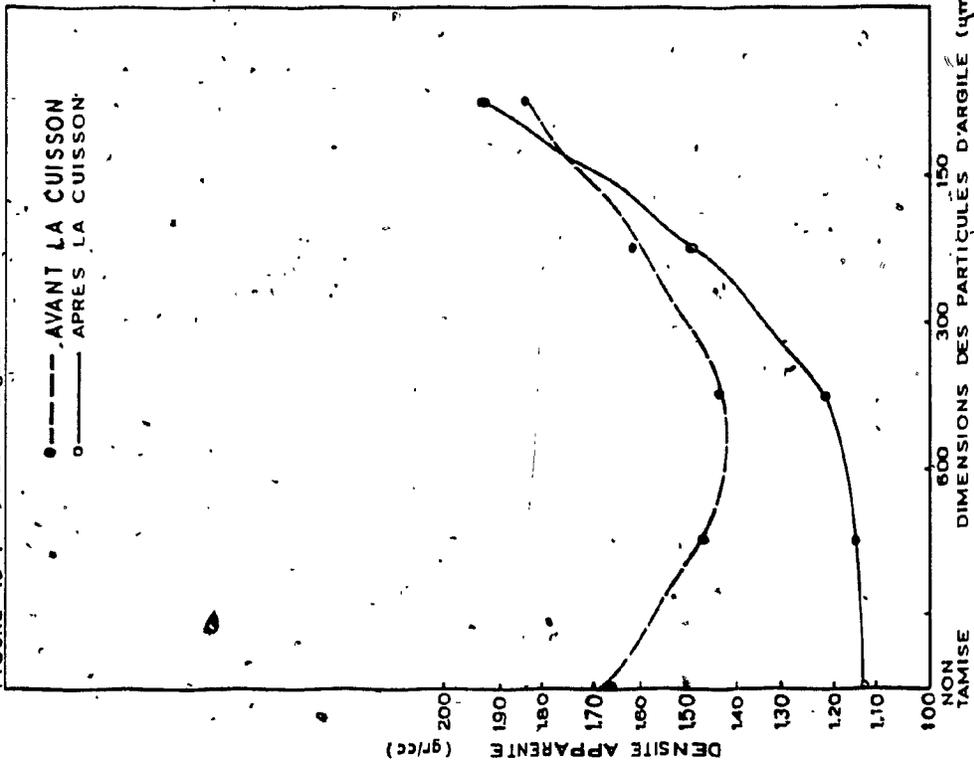


FIGURE 22 Coefficient de saturation en fonction de la dimension des particules d'argile.

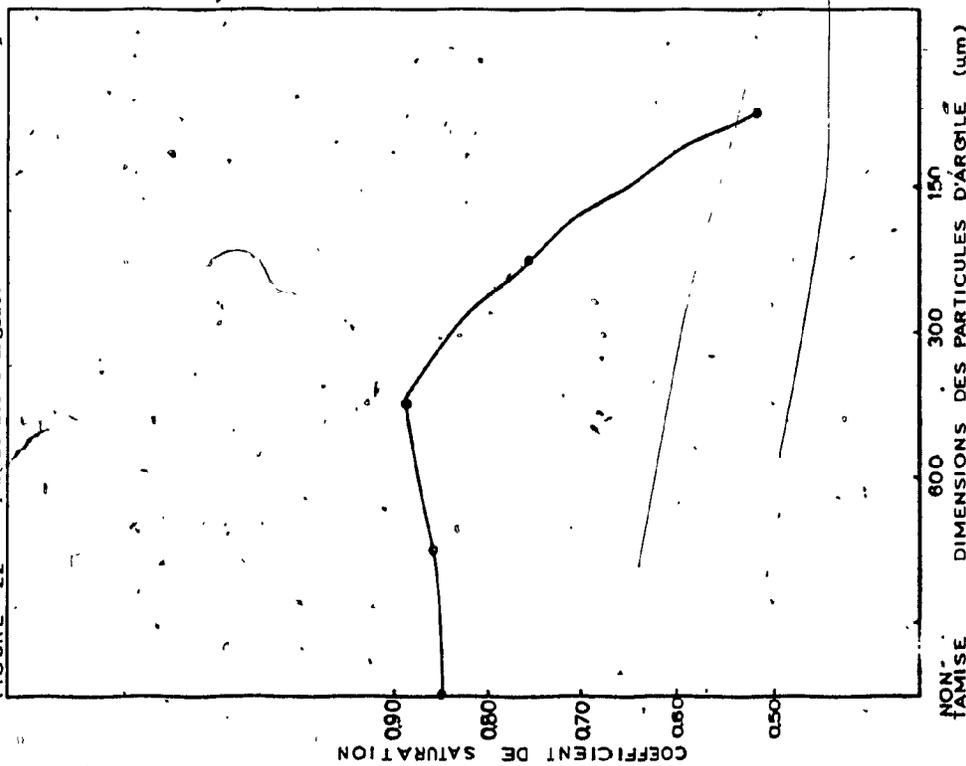
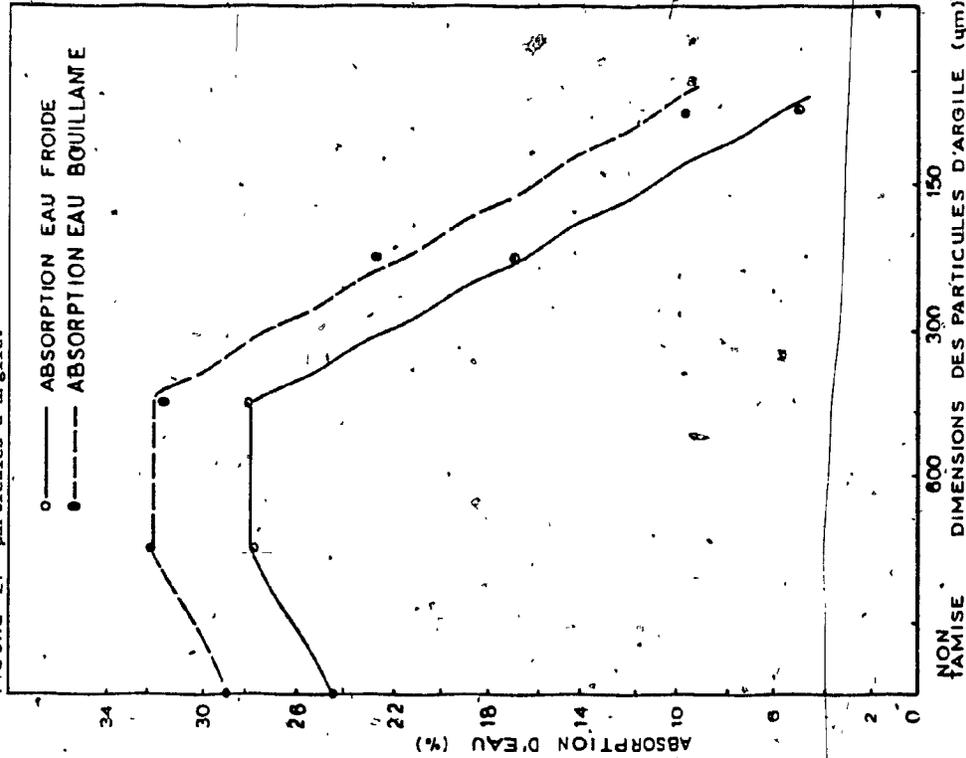
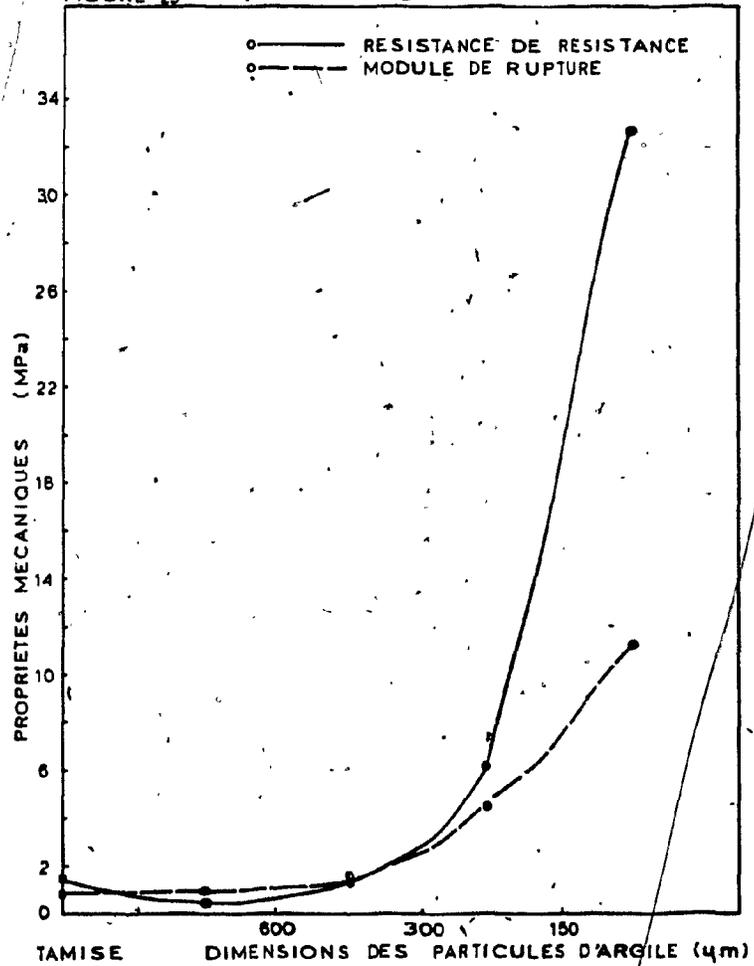


FIGURE 21 Taux d'absorption en fonction de la dimension des particules d'argile.

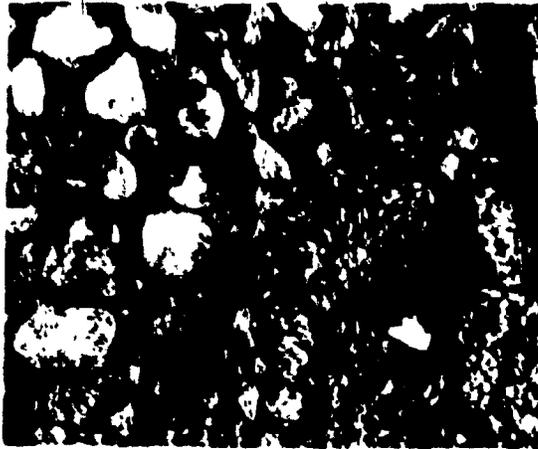


Propriétés mécaniques en fonction de la dimension des particules d'argile.

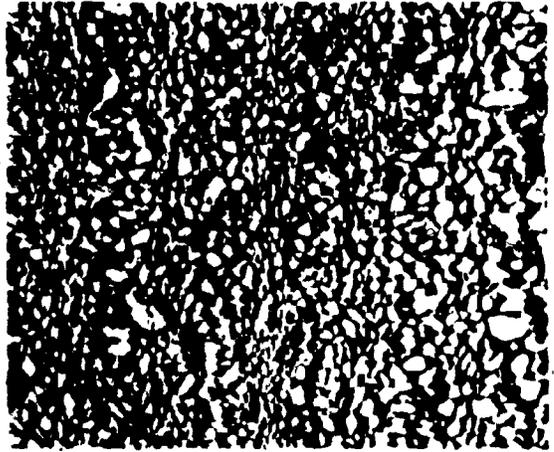


**PHOTOGRAPHIE NO 5**  
**GROSSEUR DES PARTICULES D'ARGILE**  
**(7X)**

**NON TAMISEE**



**150µm < D < 300µm**

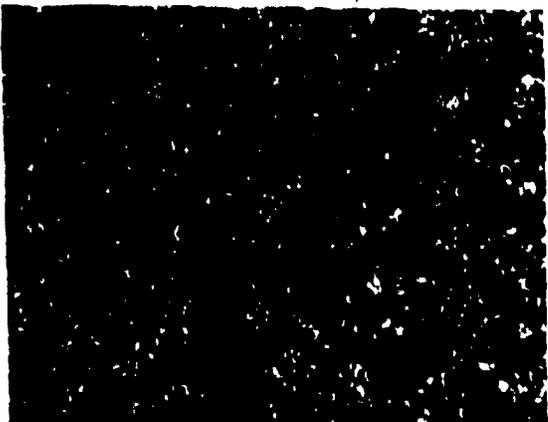
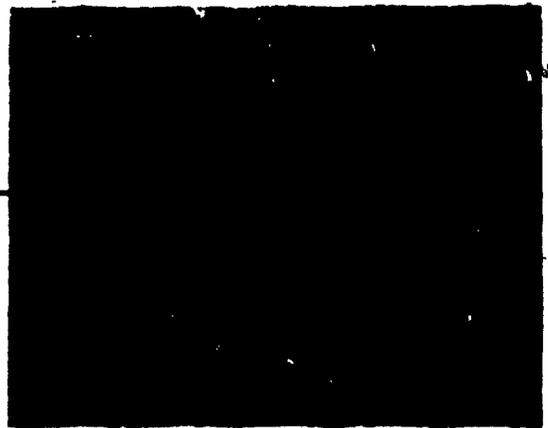


**PHOTOGRAPHIE NO 6**  
**ECHANTILLONS CUITS**

**D < 150**

**150 < D < 300**

**NON TAMISEE**



#### 4.2.5 Variation de la grosseur des particules de sciures

Suite aux résultats obtenus dans la section précédente, seuls des grains d'argile de dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$  seront utilisés dans l'expérience qui suit. Toutefois, la grosseur des particules de sciures sera modifiée afin de déterminer l'effet de la dimension des grains de sciures sur les propriétés physiques et mécaniques des échantillons.

#### **EXPERIENCE**

Deux échantillons ont été fabriqués et cuits dans chaque cas à une température maximale de 1050°C pendant 5 heures, après avoir été maintenus 5 heures à 500°C. Huit échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 23 gr d'eau fut ajoutée à 300 gr d'argile et 17.5 gr de sciures (6.0% par poids). Les grains d'argile furent tamisés et seules les particules inférieures à 300  $\mu\text{m}$  furent utilisées. En ce qui concerne les sciures, 4 mélanges de granulométries différentes furent employés (voir l'annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique). Les mélanges furent malaxés, moulés et séchés suivant le même processus que les mélanges constitués uniquement d'argile.

#### **RESULTATS ET DISCUSSION**

Un examen visuel des coupes transversales des échantillons produits à partir de mélanges d'argile contenant des particules de

sciures de dimensions différentes tel qu'illustré à la photo no 8, révèlent deux caractéristiques importantes. D'une part les masses d'argile entourant les pores semblent être homogènes et bien consolidées. D'autre par les pores ne sont pas de mêmes dimensions et correspondent à la différence qui existe entre les grosseurs des particules de sciures elles-mêmes, différence qui est illustrée par la photographie no 7. En ce qui concerne les propriétés physiques, on peut noter à la figure 24 (Courbe des variations de la densité apparente en fonction de la dimension des particules de sciures) que la densité apparente augmente linéairement en fonction de la finesse des particules de sciures. Tous les échantillons, sans exception, diminuent de volume d'environ 6% après avoir été cuits, sauf lorsque le mélange non-tamisé de particules de très petites dimensions est utilisé; le rétrécissement, après la cuisson est d'alors 10% par volume (voir Fig.25: Courbe des variations de volume en fonction des dimensions des particules de sciures). Cette augmentation de la densité apparente ou les rétrécissements constatés peuvent être expliqués de la façon suivante: plus ces particules de sciures sont fines, mieux elles remplissent les vides entre les grains d'argile, plus les échantillons après le moulage et la cuisson ont un volume réduit pour un poids à peu près identique.

Les taux d'absorption dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante diminuent en fonction de la finesse des particules de sciures alors que le coefficient de saturation demeure constant (voir les figures 26 et 27: Courbes des variations des taux d'absorption et du coefficient de saturation en fonction de la finesse des particules

de sciures). En effet, les pores créés par la combustion des plus petites particules de sciures, étant donné leur dimensions, ont plus de chances d'être scellés par la formation de liens céramiques entre les grains d'argile qui les entourent que les particules plus grosses. Ces dernières, au contraire, diminuent les surfaces de contact entre les grains d'argile en les distançant les uns des autres, empêchent les grains de se consolider et augmentent la possibilité de formation d'ouvertures ou de passages au travers lesquels l'eau peut s'infiltrer.

La grosseur des sciures influence aussi les propriétés mécaniques. Celles-ci progressent légèrement de quelques 2 MPa dans le cas de la résistance en compression et de 3 MPa pour le module de rupture (voir la Figure 28: Courbes des variations des propriétés mécaniques en fonction de la dimension des particules de sciures.) Pour un volume donné, plus les vides d'air sont gros, moins fréquentes sont les parois de matière solide argileuse les entourant après la cuisson. Pour le même volume, des sciures de plus petites dimensions multiplient le nombre de pores laissés vides après la combustion des sciures, tendant ainsi à augmenter le nombre de parois entre les pores et donc la superficie porteuse de l'argile cuite pour un volume donné. La résistance en compression et le module de rupture tendent ainsi à croître au fur et à mesure que les dimensions des particules de sciures diminuent.

**CONCLUSION**

Ainsi de la même façon que pour les grains d'argile, les particules de sciures les plus fines donnent les échantillons d'argile qui ont les plus bas taux d'absorption et les propriétés mécaniques les plus élevées. Le mélange non-tamisé constitué de particules de sciures de petites dimensions (mélange H-70) sera utilisé dans les expériences subséquentes.

FIGURE 25 Variations de volume en fonction de la dimension des particules de sciures.

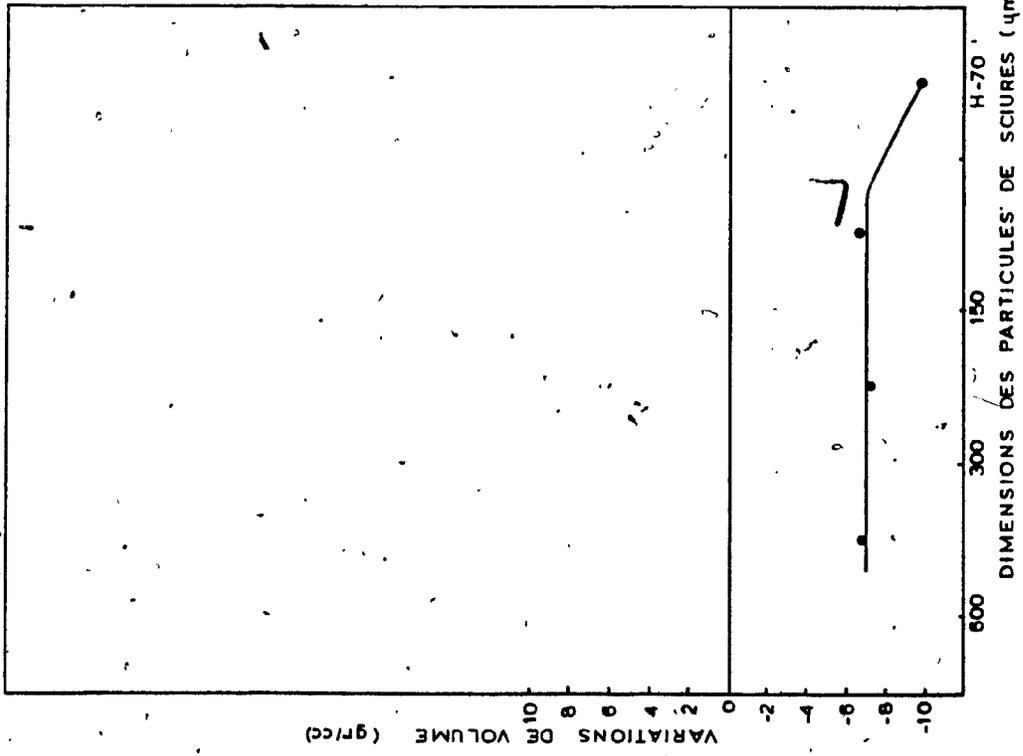


FIGURE 24 Densité apparente en fonction de la dimension des particules de sciures.

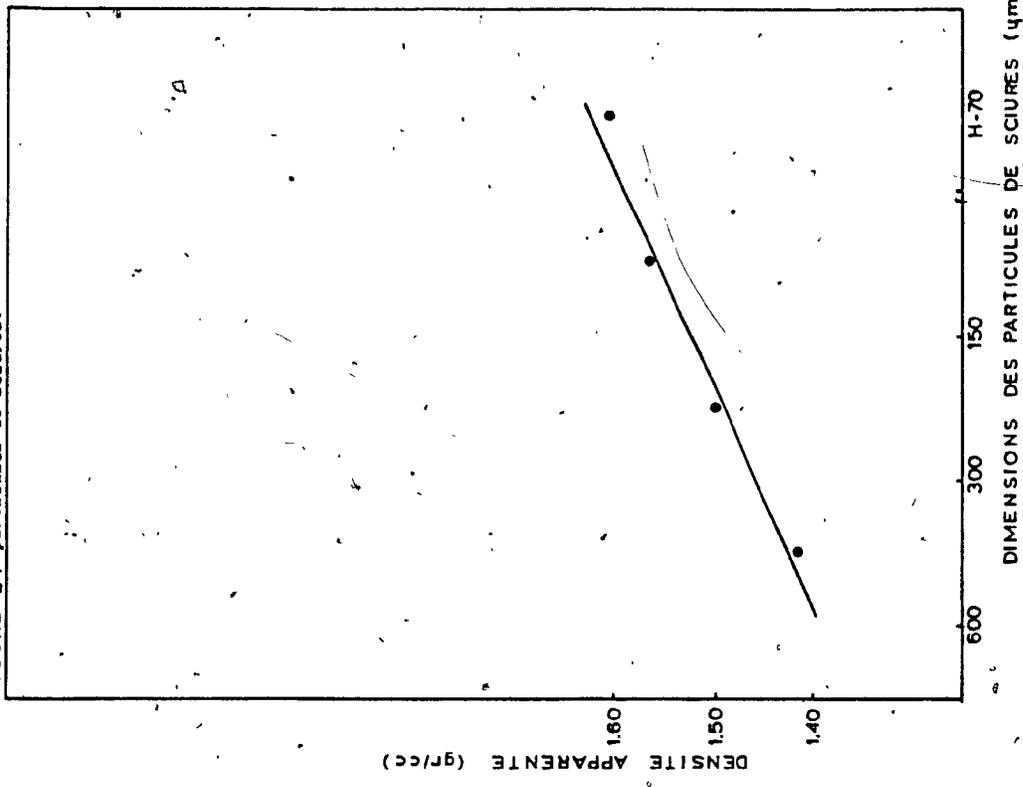


FIGURE 26 Taux d'absorption en fonction de la dimension des particules de sciures.

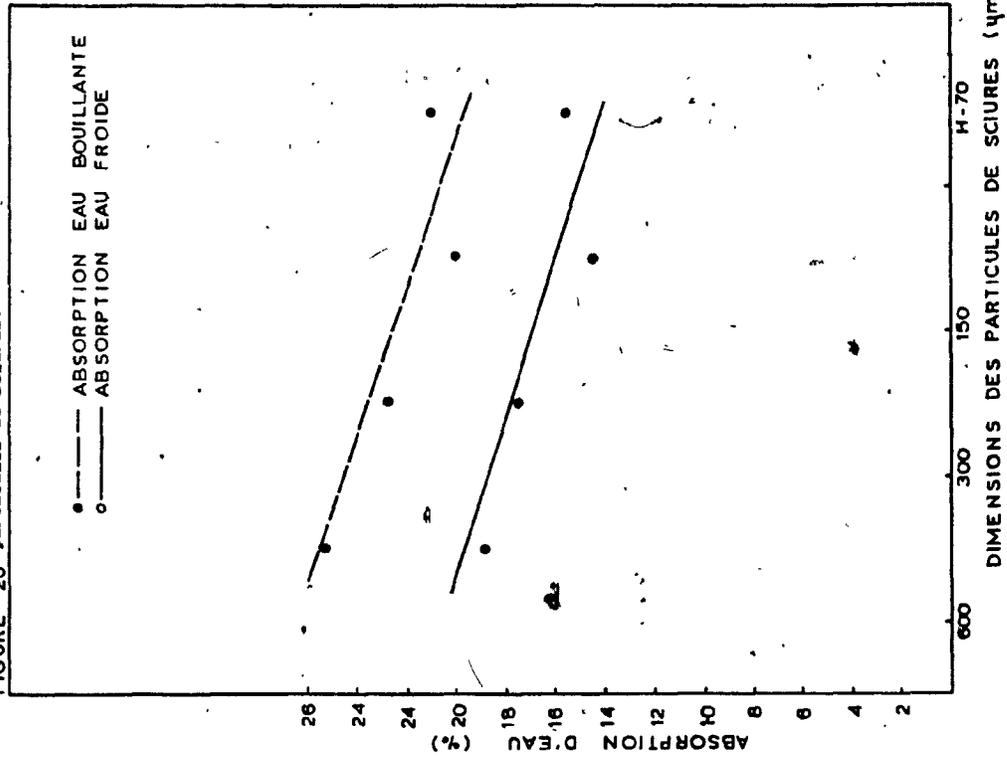


FIGURE 27 Coefficient de saturation en fonction de la dimension des particules de sciures.

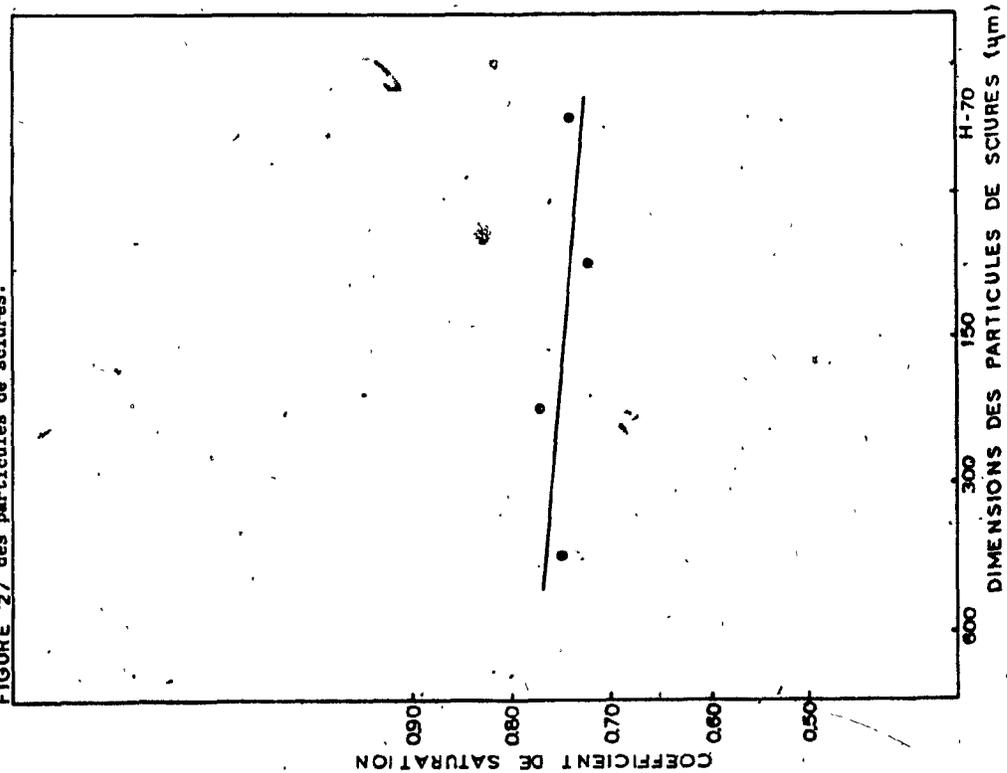
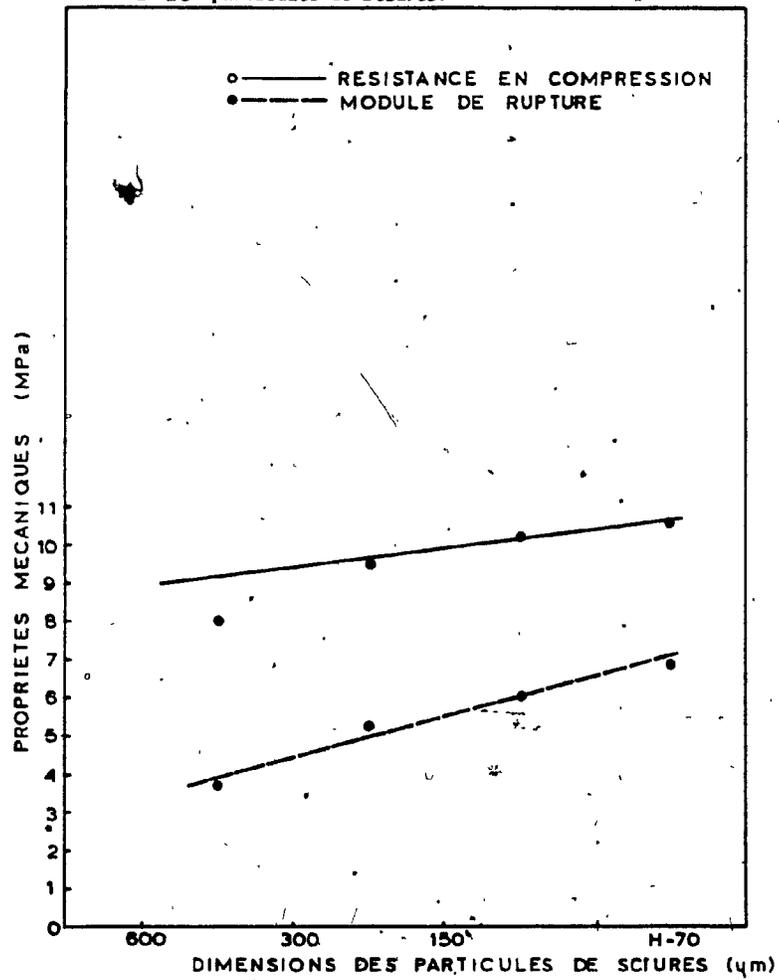
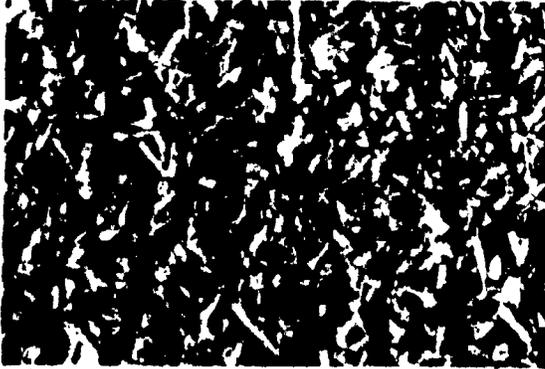


FIGURE 28 Propriétés mécaniques en fonction de la dimension des particules de sciures.



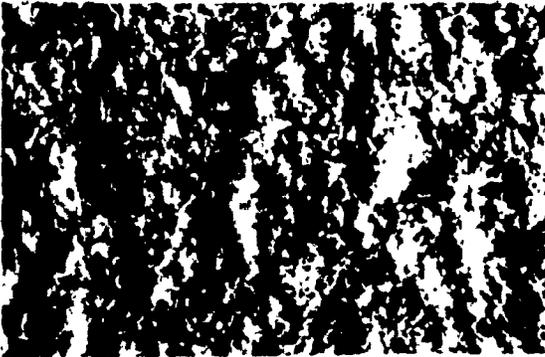
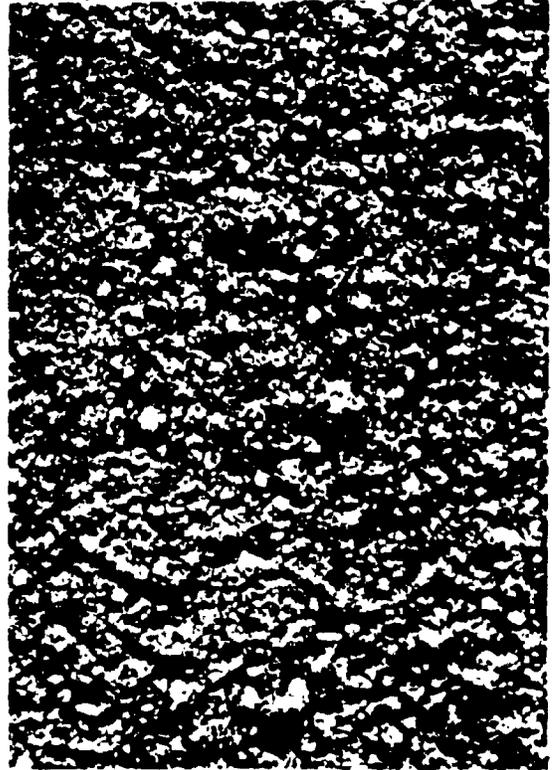
**PHOTOGRAPHIE NO 7**  
**GROSSEUR DES PARTICULES DE SCIURES**  
**(7X)**

150 $\mu$ m < D < 300 $\mu$ m



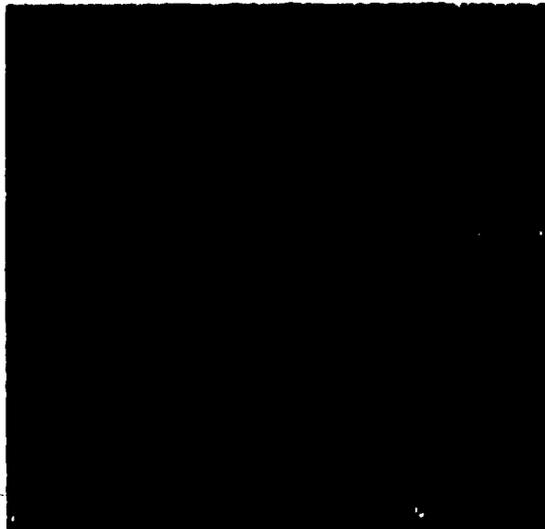
H-70

ARGILE < 300 $\mu$ m



**PHOTOGRAPHIE NO 8**  
**ECHANTILLONS CUITS**  
**(7X)**

150 < D < 300



H-70



#### 4.2.6 Variation de la pression lors du moulage

Tel que démontré à la section 4.2.4 et 4.2.5, la grosseur des particules d'argile et de sciures joue un rôle important en rapport avec la compacité des mélanges et par conséquent avec les propriétés physiques et mécaniques des échantillons cuits. En ce qui concerne l'argile, les grains les plus petits enrobent adéquatement les particules de sciures, et réduisent les espaces d'air entre eux. En ce qui a regard aux particules de sciures, plus elles sont petites, mieux elles se logent entre les grains d'argile, et moins elles créent de vides d'air entre elles-mêmes et les grains d'argile qui les entourent. Il est probable que la pression lors du moulage soit un autre paramètre qui tendent à augmenter la compacité. Cette hypothèse sera vérifié au cours de l'expérience décrite ci-dessous.

#### **EXPERIENCE**

Deux échantillons ont été fabriqués et cuits dans chaque cas à une température maximale de 1050°C pendant 5 heures, après avoir été maintenus 5 heures à 500°C. Huit échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 23 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile et 20 gr de sciures (7% par poids) (voir l'annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures.) Les mélanges furent malaxés, moulés et séchés suivant le même processus que les mélanges constitués uniquement d'argile, sauf que les pressions exercées sur les mélanges lors du moulage varièrent de 0.9 à 8.6 MPa.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Propriétés physiques

L'augmentation de la pression diminue le volume des échantillons après le moulage et la cuisson. Ces variations sont illustrées à la photographie no.9. De plus, comme en témoigne la photographie no.10, la microstructure des échantillons cuits se trouve à être modifiée. La coupe transversale d'un échantillon cuit qui a été moulé sous une pression de 0.9 MPa montre des grains d'argile espacés et une structure poreuse qui semble être relativement ouverte. A l'opposé, la microstructure d'un échantillon moulé sous une pression de 6.9 MPa révèle la présence de pores plus petits et de grains d'argile mieux consolidés. L'augmentation progressive de la densité apparente en fonction de la pression exercée sur les mélanges lors du moulage peut aussi être constatée par l'examen de la courbe de la figure no 29 (courbe de la variation de la densité apparente en fonction de la pression de moulage). La densité apparente passe de 1.45 gr/cc à 0.9 MPa à 1.75 gr/cc environ à la suite d'une compaction sous une pression de 8.6 MPa, la hausse la plus marquée se produisant entre 0.9 et 3.5 MPa. L'augmentation de la pression lors du moulage tasse les particules d'argile et de sciures les unes contre les autres, augmente les surfaces de contact entre les grains d'argile, et fait en sorte que les vides d'air entre les particules du mélange soient réduits à leur minimum. Comme conséquence de ce tassement progressif des particules entre elles, le volume des échantillons après le moulage diminue et la densité apparente des échantillons cuits

progressent en fonction de la pression. Le tassement progressif des grains d'argile entre eux engendre une meilleure consolidation de l'argile pendant la cuisson. Une analyse des coupes transversales des échantillons cuits démontre que les interstices entre les grains d'argile qui ne sont pas créés par la combustion des sciures diminuent au fur et à mesure que la pression lors du moulage augmente. A la suite d'une compaction sous une pression de 6.9 MPa. et après la cuisson, il semble que la structure poreuse qui s'est formé soit surtout le résultat de la combustion des sciures. Les variations des taux d'absorption, dans l'eau à température ambiante, comme dans l'eau bouillante; diminuent en fonction de la pression de moulage tel qu'illustré par la figure no 30 (Variation des taux d'absorption en fonction de la pression de moulage). Les taux d'absorption initialement de 19.5 et 25% chutent rapidement entre 0.9 et 3.5 MPa pour se stabiliser à environ 12 et 17% à 6.0 et 8.6 MPa. Le coefficient de saturation obéit à la même tendance, et décroît en fonction de la pression, passant de 0.78 à 0.69 environ (voir Fig. no 31: Courbe de la variation du coefficient de saturation en fonction de la pression de moulage.) La pression optimale de moulage semble être de 6.9 MPa. L'argile se referme alors sur les pores, en scelle une partie, et les rend donc plus difficile d'accès à la pénétration de l'eau. Cependant, compresser trop fortement les mélanges (8.6 MPa), tend à générer des craques suffisamment importantes dans les échantillons cuits pour que le le taux d'absorption d'eau à température ambiante et le coefficient de saturation soient plus élevés. Le craquelage des échantillons cuits peut probablement être

expliqué par le fait que les sciures, étant par nature compressibles, tendent à reprendre leur forme initiale, durant la période de séchage après avoir été comprimés de façon excessive.

Quant aux propriétés mécaniques, l'influence de la pression lors du moulage est telle que les mélanges pressés à 6.0 MPa ont une résistance en compression après la cuisson de 22 MPa, soit plus double de la résistance des échantillons moulés sous une pression de 0.9 MPa (voir Fig. no 32: Courbes de la variation des propriétés mécaniques en fonction de la pression de moulage). Toutefois au-delà d'une compaction de 6.0 MPa, la résistance en compression augmente moins rapidement et semble même tendre vers une valeur limite ne dépassant que de peu 22 MPa. La fissuration des échantillons qui a été observée pendant le séchage et après la cuisson explique les différences significatives de la valeur des propriétés mécaniques entre les échantillons moulés à 6.0 ou 8.6 MPa.

### **Conclusion**

Les résultats démontrent qu'il n'est pas utile d'excéder une pression de moulage de 6.0 MPa pour améliorer les propriétés des briques cuites d'argile-sciures. A l'opposé, 3.5 MPa peut être considéré comme étant une valeur minimale qui assure aux grains d'argile un tassement suffisant, et constitue un point à partir duquel la densité croît de façon linéaire.

FIGURE 29 Densité apparente en fonction de la pression de moulage.

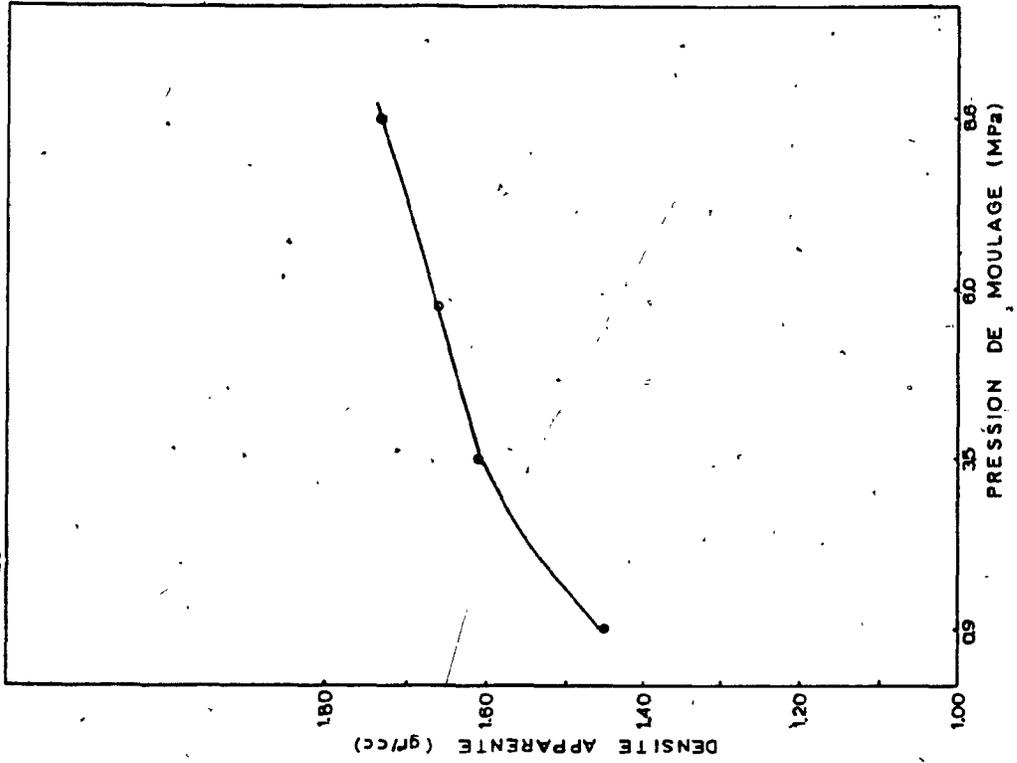


FIGURE 30 Taux d'absorption en fonction de la pression de moulage.

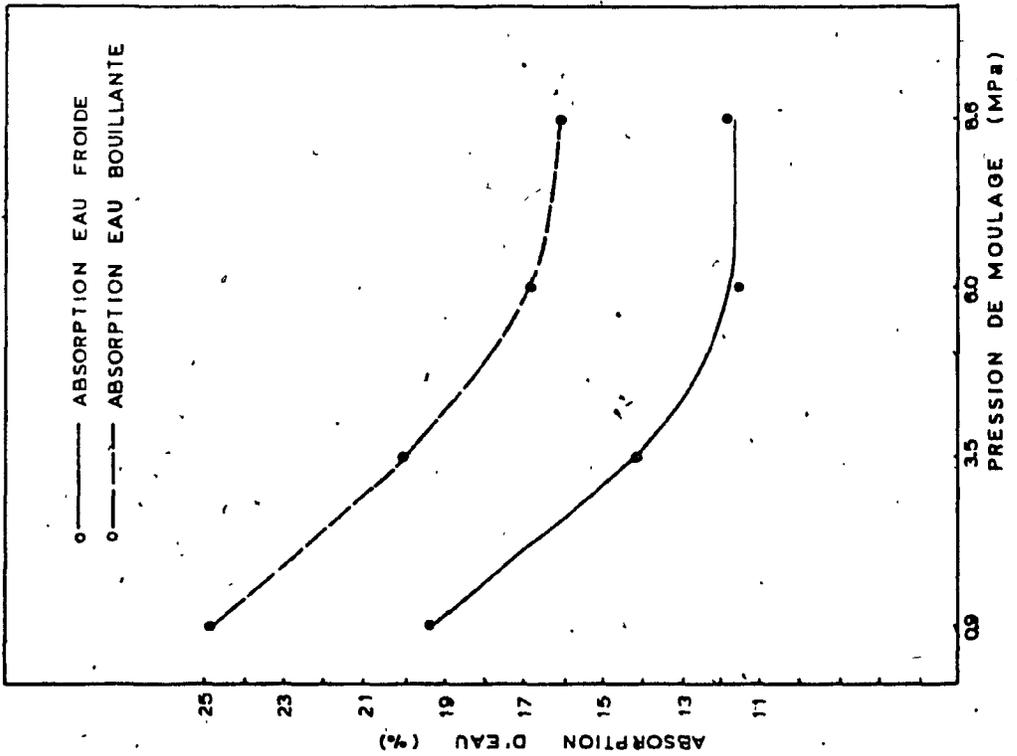


FIGURE 31 Coefficient de saturation en fonction de la pression de moulage.

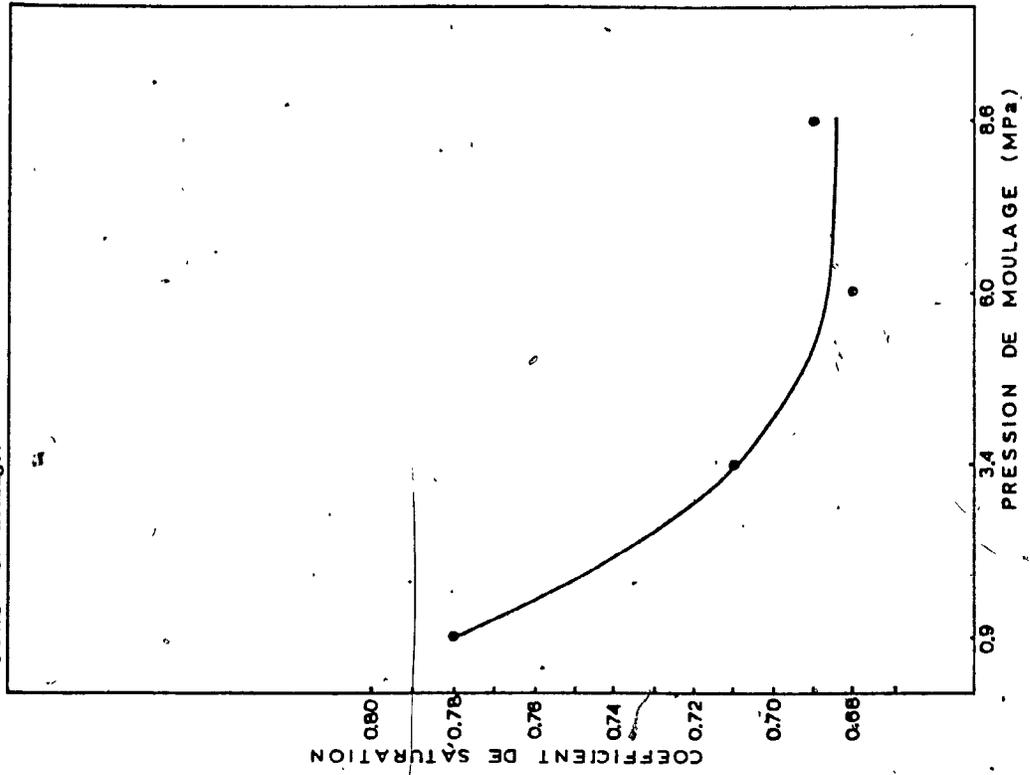
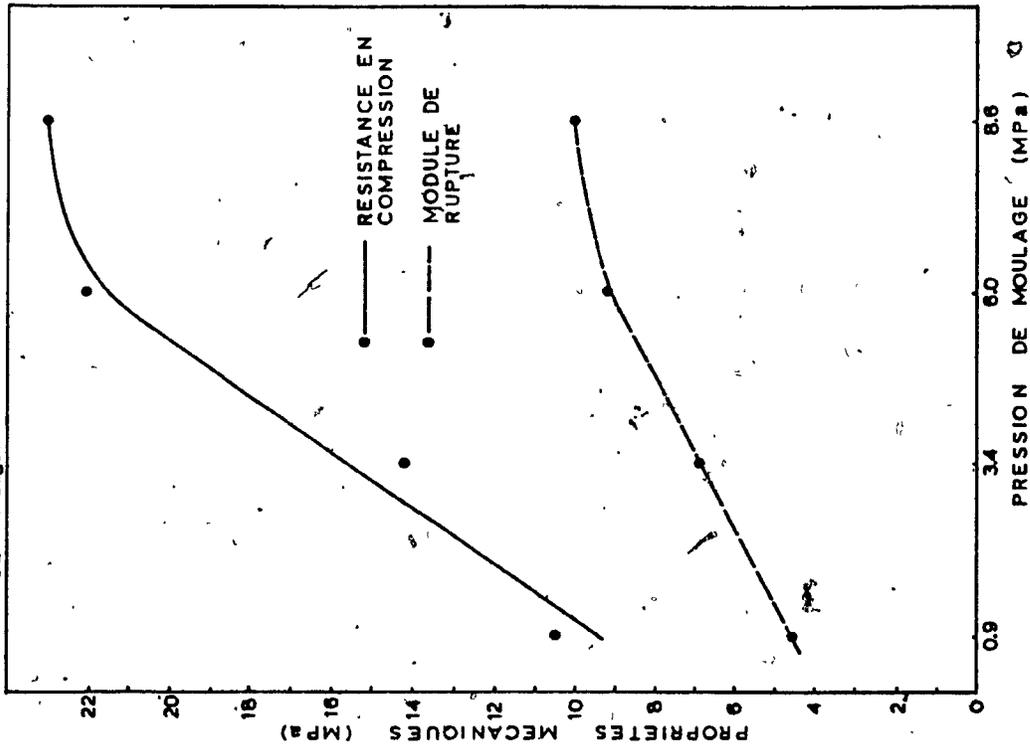
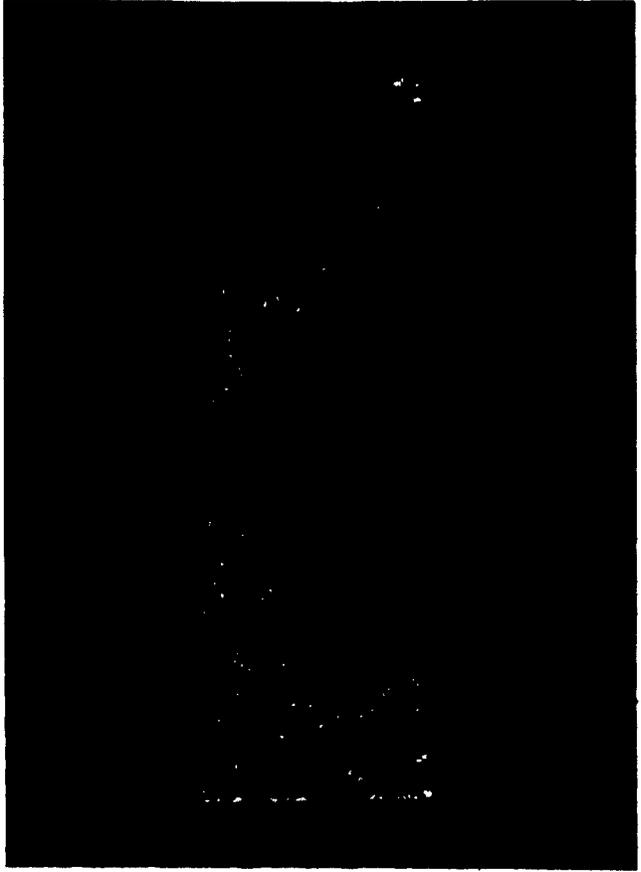


FIGURE 32 Propriétés mécaniques en fonction de la pression de moulage.



**PHOTOGRAPHIE NO 9  
VARIATION DE LA PRESSION**

- 0.9 MPa**
- 2.6 MPa**
- 6.9 MPa**
- 10.3 MPa**



**PHOTOGRAPHIE NO 10  
(7X)**

**0.9 MPa**



**6.9 MPa**



#### 4.2.7 Variation de la quantité de sciures

L'objectif de la section 4.2 est de produire un matériau céramique léger, aux propriétés physiques et mécaniques optimisées, à partir d'argile et de sciures de bois. Par conséquent la variation des quantités de sciures dans les mélanges argile-sciures est un des paramètres les plus importants à étudier. Toutefois, tel que démontré dans les sections 4.2.1 à 4.2.6 inclusivement, les modifications d'autres paramètres tel que la température et le temps de cuisson, la grosseur des particules d'argile et de sciures, et la pression exercée sur les mélanges lors du moulage s'avèrent nécessaires pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des échantillons cuits. L'expérience qui suit a pour objectifs d'étudier les modifications des propriétés physiques et mécaniques qu'entraînent l'addition d'une quantité variable de sciures, en utilisant les meilleurs résultats obtenus dans les sections 4.2.1 à 4.2.6.

#### **EXPERIENCE**

Deux échantillons ont été fabriqués et cuits à une température maximale de 1050°C pendant 5 heures, après avoir maintenu un palier de 5 heures à 500°C et en employant pour chaque deux échantillons une quantité de sciures différente. Huit échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 23 à 30 gr d'eau, suivant la quantité de sciures ajoutée, fut additionné à 300 gr

d'argile et à 4 différentes quantités de sciures (variant de 10 à 40 gr, ou de 3 à 13% par poids) (voir l'annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures.) Les mélanges furent malaxés, moulés et séchés suivant le même processus que les mélanges constitués uniquement d'argile.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Propriétés physiques

Comme le met en évidence l'examen de la photographie no 11, l'addition d'une quantité croissante de sciures modifie de façon très significative la microstructure poreuse des échantillons. Sur la photographie de chaque échantillon, les zones noires constituent une indication de la présence de pores. Ceux-ci sont petits, de dimensions relativement uniformes et bien distribués, lorsque 10 gr de sciures ont été ajoutés aux mélanges lors de leur préparation. Des canaux aux dimensions importantes (largeur et longueur) et interreliant les pores entre eux font leur apparition dans les échantillons cuits / fabriqués avec 20 gr de sciures. Lorsque 30 gr de sciures sont additionnés à l'argile, les canaux se multiplient mais surtout les pores augmentent de dimensions de façon marquée. Leurs grosseurs sont peu uniformes: certains d'entre eux sont très gros et ne se trouvent qu'en certains endroits de la masse, d'autre au contraire sont petits. De plus le nombre de connexions entre les pores augmentent de façon significative. La densité apparente diminue de façon inversement proportionnelle à la quantité de sciures, passant de 2.00

gr/cc, pour les échantillons sans sciures à 1.30 gr/cc pour ceux constitués de 13% de sciures (par poids) (voir Fig. no 33: Courbe de la variation de la densité apparente en fonction de la quantité de sciures). Les taux d'absorption dans l'eau à température ambiante comme dans l'eau bouillante augmentent de façon linéaire sauf pour de faibles additions de sciures alors que la croissance des taux est faible ou lorsque la quantité de sciures atteint 13% et que les pourcentages d'absorption grimpent alors plus rapidement. C'est ainsi que les taux d'absorption dans l'eau à température ambiante et dans l'eau bouillante passe respectivement de 8 et 10% à 28 et 33% (voir Fig. no 34: Courbes des taux d'absorption en fonction de la quantité de sciures). Le coefficient de saturation suit la même tendance, il ne se modifie pas lorsque 3% de sciures sont ajoutés, mais par la suite grimpe rapidement pour atteindre 0.85 avec 13% par poids de sciures (voir Fig. no 35).

L'addition d'une faible quantité de sciures, ou 10 gr (3% par poids) créent de petits pores uniformément distribués. Les particules de sciures semblent bien se répartir dans les mélanges et conserve à l'argile cuite sa structure homogène. La densité apparente diminue sensiblement, mais les taux d'absorption d'eau et le coefficient de saturation n'augmentent que faiblement ce qui tend à démontrer que la consolidation des particules d'argile est suffisante pour que l'argile se referme partiellement sur les pores créés par la combustion des sciures et réduise ainsi la pénétration de l'eau à l'intérieur des échantillons. L'ajout de sciures en plus grande quantité, soit 20 gr ou 7% (par poids), provoque la création de gros pores localisés en

certains endroits ou encore la formation de canaux ou de pores allongés. Malgré un malaxage mécanique de 15 minutes interrompu par plusieurs brassages manuels, il semble qu'une certaine quantité de sciures se soit concentrée et agglomérée en quelques endroits et aient généré, après leur combustion, des pores de grosses dimensions à l'intérieur des échantillons cuits. Ces pores et canaux constituent des passages supplémentaires qui facilitent la pénétration de l'eau ce qui explique les augmentations plus importantes des taux d'absorption et en particulier du coefficient de saturation. L'addition d'une quantité de sciures équivalent à 10% par poids des mélanges d'argile perpétue ces tendances. Par contre, accroître le pourcentage de sciures jusqu'à 13% par poids créent de très gros pores. Dans ce cas, la plupart des pores sont interreliés et les taux d'absorption, étant donné la grande porosité des échantillons cuits, accusent une augmentation plus élevée que lorsque l'addition de sciures n'est que de 3, 7 et 10%.

### Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des échantillons cuits, résistance en compression et module de rupture, chutent très rapidement en fonction de la quantité de sciures ajoutée aux mélanges. Ceux qui ne sont constitués que d'argile ont une résistance en compression, après la cuisson, de 48 MPa, alors que les mélanges d'argile et de 13% (par poids) de sciures n'offrent pratiquement plus de résistance, c'est-à-dire 3 MPa (voir Fig. no 36: Courbes de la variation des propriétés mécaniques en fonction de la quantité de sciures). La

photographie no 11 illustre le fait que plus la quantité de sciures augmente, plus les grains d'argile sont distancés les uns des autres, et plus la consolidation de ces grains est difficile au moment de la cuisson. Ce phénomène est particulièrement marqué lorsque l'ajout de sciures est de 13% par poids; les coupes transversales des échantillons cuits offrent alors l'apparence d'une masse de particules non-cimentées qui s'effrite d'ailleurs facilement.

### Conclusion

L'addition d'une quantité croissante de sciures tend donc à modifier sensiblement les propriétés physiques et mécaniques des échantillons cuits. La présence de sciures réduit le nombre de connections entre les grains d'argile et produit un matériau plus léger, plus absorbant et moins résistant. Plus la quantité de sciures est élevée, plus le nombre de liaisons est réduit entre les grains d'argile, plus les pores sont ouverts et ont un coefficient de saturation élevé.

FIGURE 33 Densité apparente en fonction de la quantité de sciures.

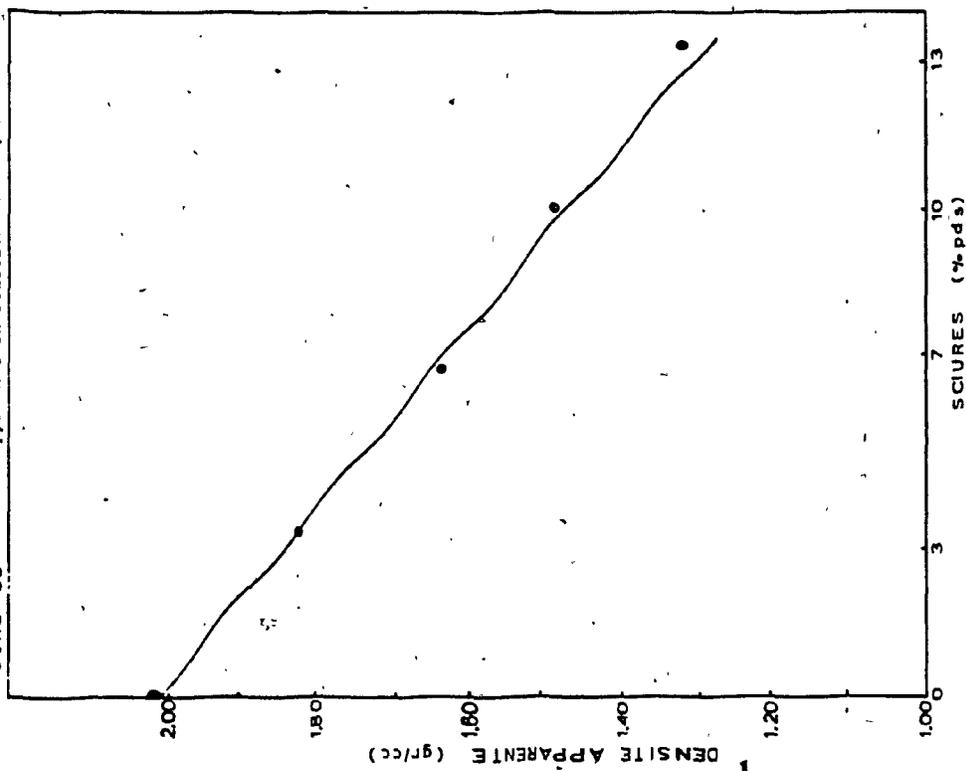


FIGURE 34 Taux d'absorption en fonction de la quantité de sciures.

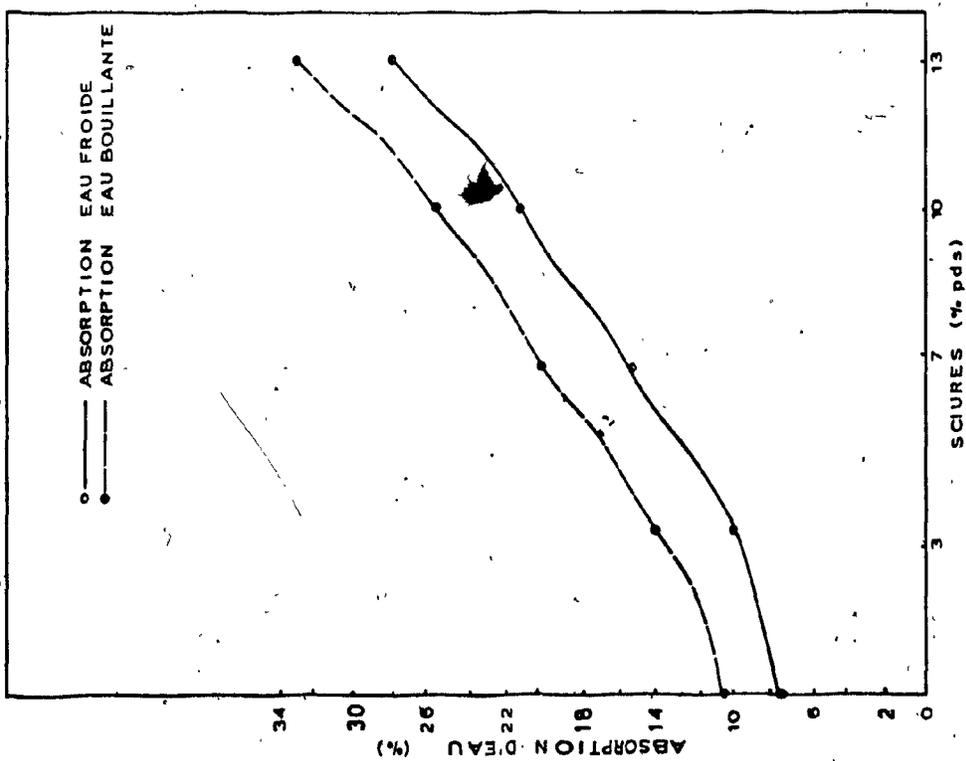


FIGURE 35 Coefficient de saturation en fonction de la quantité de sciures (% de sciures).

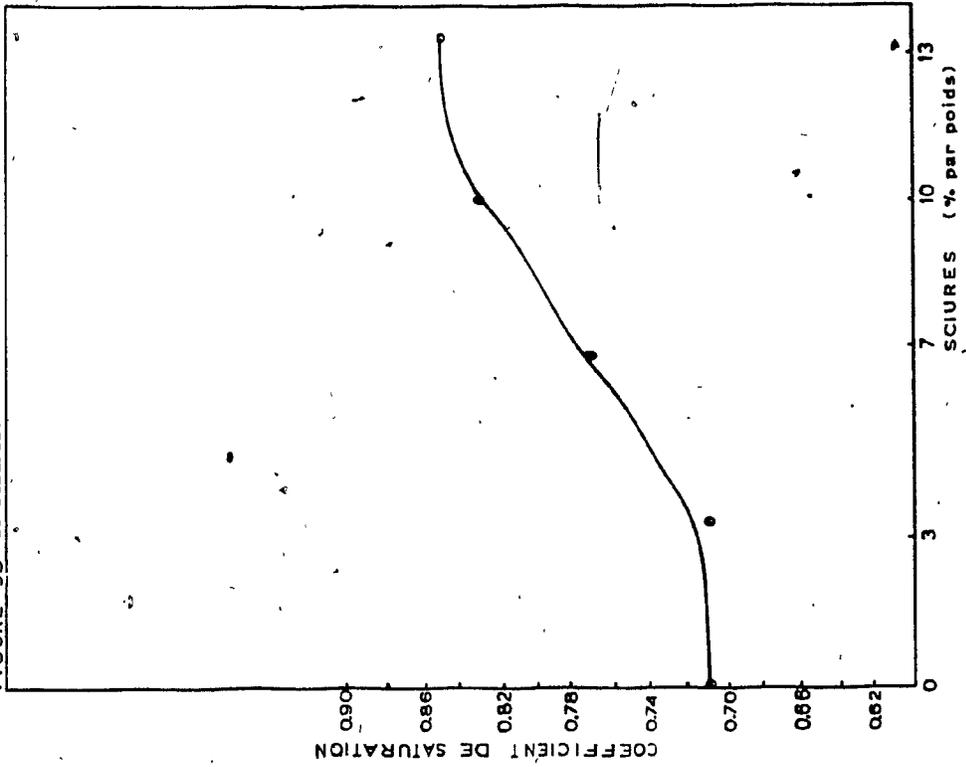
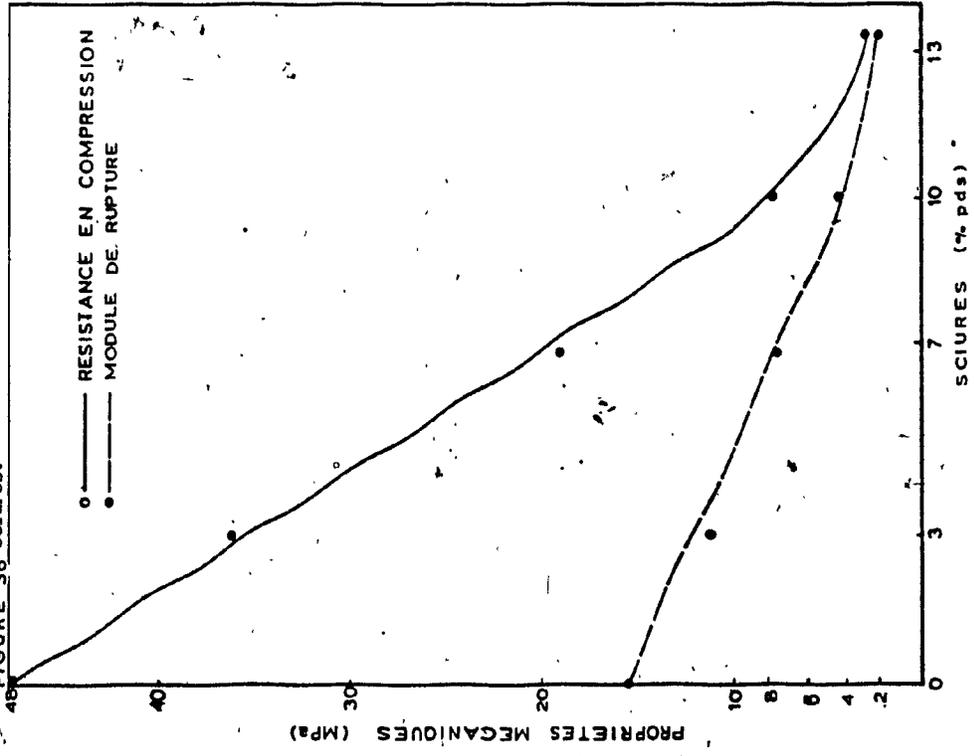
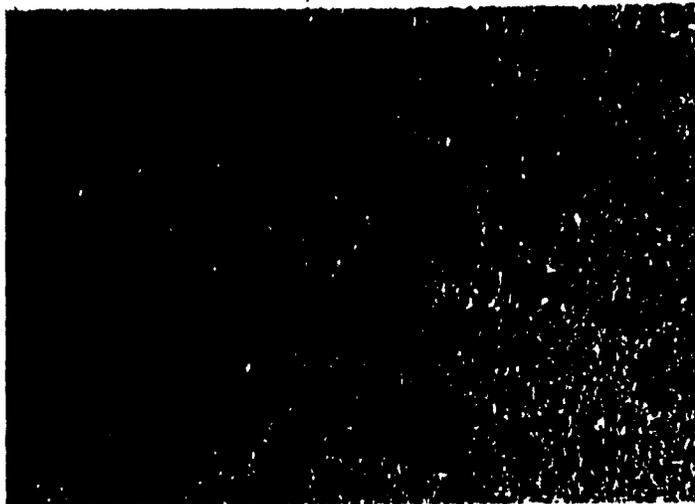


FIGURE 36 Propriétés mécaniques en fonction de la quantité de sciures.



**PHOTOGRAPHIE NO II**  
**VARIATION DE LA QUANTITE DE SCIURES**  
**(7X)**

**10 GR**



**20 GR**



**30 GR**



#### 4.2.8 Optimisation de la température et du temps de cuisson, de la quantité de sciures et de la pression lors du moulage.

L'addition de sciures à de l'argile séchée et broyée non tamisée de granulométrie semblable aux mélanges utilisés couramment dans l'industrie de la maçonnerie produit tel que démontré à la section 4.2.1, des échantillons cuits ayant des propriétés mécaniques quasi-nulles. Plusieurs paramètres de fabrication durent être modifiés afin d'améliorer ces propriétés. L'emploi de particules fines d'argile et de sciures, d'une pression lors du moulage de 3.5 MPa, d'une quantité de sciures égale ou inférieure à 10% (par poids) de même qu'un pallier intermédiaire de 500°C pendant 5 heures et d'une température maximale de 1050°C produisirent les échantillons cuits ayant les plus faibles taux d'absorption et coefficients de saturation ainsi que les propriétés mécaniques les plus élevées. Or un des principaux objectifs de cette étude est de fabriquer un matériau céramique léger possédant toutefois de bonnes propriétés mécaniques. Afin de réaliser cet objectif, trois questions demeurent en suspens. En premier lieu, est-ce possible d'améliorer par une élévation de la température maximale de cuisson les propriétés physiques et mécaniques des échantillons cuits lorsque les paramètres de fabrication ont été optimisés et que les problèmes de gonflements mentionnés aux sections 4.1, 4.2.1, 4.2.3 ont été résolus? Deuxièmement, est-ce possible d'améliorer ces propriétés par une augmentation du temps de cuisson? Finalement, étant donné que deux facteurs, la pression et la quantité de sciures, déterminent la densité apparente des échantillons cuits, quel est la meilleure combinaison pression-quantité de sciures pour

produire le matériau céramique le plus léger possible tout en conservant les propriétés physiques et mécaniques requises pour être utilisée comme brique de revêtement extérieur? Afin de répondre à ces questions deux expériences seront tentées. D'une part le temps et la température maximale de cuisson seront variés de façon à déterminer leur niveaux optimaux. D'autre part, plusieurs échantillons moulés sous des pressions différentes et préparés à partir de quantités de sciures variables seront cuits et testés. Leur propriétés seront comparées aux valeurs minimales requises par le code national du bâtiment pour les briques de construction à usage extérieur.

### Variation du temps et de la température maximale de cuisson

#### EXPERIENCE

D'une part, deux échantillons ont été fabriqués et cuits à 500°C pendant 5 heures et la température fut ensuite élevée à des niveaux différents pour chaque 2 échantillons (1050, 1062, 1069, 1075 et 1087°C). Dix échantillons furent ainsi préparés à partir de la composition suivante: 25 gr d'eau fut ajouté à 300 gr d'argile et à 20 gr de sciures (7% par poids) (voir l'annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures.) Les mélanges furent malaxés, moulés sous une pression de 3.5 MPa et séchés suivant le même processus que pour les mélanges constitués uniquement d'argile.

D'autre part, deux échantillons ont été fabriqués et cuits à une température maximale de 1050°C après avoir été maintenus 5 heures à 500°C et ce fut cette fois-ci le temps de cuisson qui fut modifié pour chaque 2 échantillons (5 hrs, 10, 20, 30 et 40 heures). Dix échantillons furent ainsi préparés à partir d'une compositions identique à l'expérience précédente.

#### RESULTATS ET DISCUSSION

##### Variation de la température de cuisson

A elle seule une augmentation de la température maximale, entre 1050 et 1090°C environ,, a un effet très marqué sur le gonflement des échantillons et leur affaissement. Cette variation de la température maximale affecte aussi la microstructure. Les pores,

généralement ronds, petits et uniformément répartis à la suite d'une cuisson à 1062°C environ, font graduellement place à des pores de plus grosses dimensions et de formes irrégulières lorsque la température maximale de cuisson est de 1075°C. A 1087°C approximativement, les pores atteignent des proportions imposantes. Tel qu'illustré par la photographie no 12, cette modification de la microstructure se produit surtout dans le centre inférieur des échantillons et s'accompagne d'un affaissement graduel au fur et à mesure que la température augmente. Lors de cette expérience un plateau de 5 heures à 500°C a été maintenu. Les sciures de bois ont donc presque toutes été consommées et les dernières traces de carbone qui se volatilisent à haute température ne génèrent probablement qu'une quantité minime de CO<sub>2</sub>. A 1050°C, le CO<sub>2</sub> ainsi que les gaz résultant des réactions de dissociation ne peuvent exercer une pression interne suffisante pour déconsolider les grains d'argile entre eux. Par contre lorsque la température s'élève, et se rapproche du point de fusion de l'argile, la masse des échantillons commence à ramollir. Dans ces conditions, la pression produite par le dégagement de gaz crée des gonflements.

La densité apparente diminue en fonction de la température (voir Fig. no 37: Courbe de la variation de la densité apparente en fonction de la température de cuisson). Toutefois les diminutions engendrées par une élévation de température de 1050 à 1062°C, sont sensiblement moindres que la baisse de densité provoquée par le passage de 1075 à 1087°C. En réalité l'expansion des échantillons par rapport à leurs volumes initiaux, comme le montre la courbe de la

figure 39 (Courbe des variations de volume en fonction de la température de cuisson), ne débute que pour une température de cuisson supérieure à  $1062^{\circ}\text{C}$ , alors qu'après une cuisson à  $1087^{\circ}\text{C}$ , l'expansion est de 70% environ. Les taux d'absorption dans l'eau à température ambiante comme dans l'eau bouillante décroissent linéairement, tout comme le coefficient de saturation (voir Fig. nos 41 et 43: Courbes des variations des taux d'absorption et du coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson). Les taux passent de 14 et de 19% à 3 et 8% respectivement, tandis que le coefficient de saturation passe de 0.74 à 0.38. Ces diminutions peuvent être expliquées par le fait qu'au fur et à mesure que la température augmente, le ramolissement des échantillons d'argile prend de l'ampleur et graduellement les parois des pores se referment sur elles-mêmes et empêchent la pénétration de l'eau.

La résistance en compression, quant à elle, atteint une valeur maximale d'environ 40 MPa à la suite d'une cuisson à  $1062^{\circ}\text{C}$  et diminue par la suite (voir Fig. no 45). A partir de cette température les échantillons commencent à gonfler de façon significative. La résistance en compression augmente jusqu'à cette température et par la suite à cause des gonflements elle chute alors graduellement. L'argile qui s'est ramollie au cours de la cuisson, lorsqu'elle se refroidit et se solidifie, a pour caractéristique de lier très fortement les particules d'argile entre elles, conférant aux échantillons, à la température de la pièce une grande résistance. Même à la suite d'une cuisson à  $1087^{\circ}\text{C}$ , la résistance en compression est très élevée, 20 MPa, compte tenu de la faible densité

de 0.9 gr/cc.

### Variation du temps de cuisson

Dans l'ensemble la prolongation du temps de cuisson, de 5 heures à 40 heures à une température de 1050°C produit des effets similaires à ceux provoqués par une augmentation de la température, et qui peuvent être expliqués de la même manière. Toutefois, l'échelle de grandeur est différente, la variation du temps de cuisson favorisant dans une moindre mesure le ramollissement des échantillons. La diminution de la densité apparente est beaucoup plus faible comme le révèle l'examen comparé des figures nos 37 et 38 (Courbes des variations des densités apparentes en fonction de la température et du temps de cuisson). En effet, un temps de séjour de 40 heures à 1050°C est nécessaire pour que la densité décroît de 12%, alors qu'élever la température jusqu'à 1090°C environ et pour une durée de 5 heures engendre une chute de près de 50%. Il n'y a d'expansion des échantillons après la cuisson, quelque soit le temps de séjour dans le four (voir Fig. no 40). Par contre le taux de variations volumiques se modifie, passant de -12% pour des cuissons de 10 et 20 heures à 0% après 40 heures. Les taux d'absorption d'eau baissent en fonction du temps de cuisson pour se stabiliser à 6% et 11% après 30 et 40 heures. Il en est de même pour le coefficient de saturation qui s'immobilise à 0.60 après 30 et 40 heures (voir Fig. nos 42 et 44: Courbes des variations des taux d'absorption et du coefficient de saturation en fonction du temps de cuisson). Finalement, tel que démontré à la figure 46 (Courbe de la variation des propriétés

mécaniques en fonction du temps de cuisson), la prolongation du temps de séjour à 1050°C fait presque doubler la résistance mécanique après une cuisson de 20, 30 ou 40 heures.

### Conclusion

En variant la température maximale de cuisson, les meilleurs résultats ont été obtenus à 1062°C. La résistance en compression fut alors de 40 MPa environ, avec un coefficient de saturation de 0.64, des taux d'absorption dans l'eau bouillante et dans l'eau froide de respectivement 15 et 10%, et cela pour des densités moyennes de 1.50 gr/cc. Le contrôle de la température maximale de cuisson est extrêmement délicat. Seule une variation de 40°C entraîne une chute de densité de 1.65 à 0.9 gr/cc, soit une diminution de l'ordre de 45%. Cette diminution marquée de la densité, à partir de 1062°C, engendre des distorsions indésirables des échantillons cuits. La variation du temps de cuisson, par contre, n'occasionne pas de gonflements semblables et il est donc préférable de prolonger le temps de cuisson plutôt que de hausser la température maximale, même si pour se faire la quantité d'énergie requise pour la cuisson est plus grande. Des échantillons de 1.50 gr/cc ont pu être produits en prolongeant la température de cuisson à 1050°C de 5 à 40 heures. Cette densité est similaire à celle qui a été obtenue en haussant la température de cuisson de 1050 à 1062°C; la résistance en compression fut alors de 34 MPa, le coefficient de saturation de 0.60 et les taux d'absorption dans l'eau bouillante et dans l'eau à température ambiante de 5 et 10% environ.

FIGURE 37 Densité apparente en fonction de la température de cuisson.

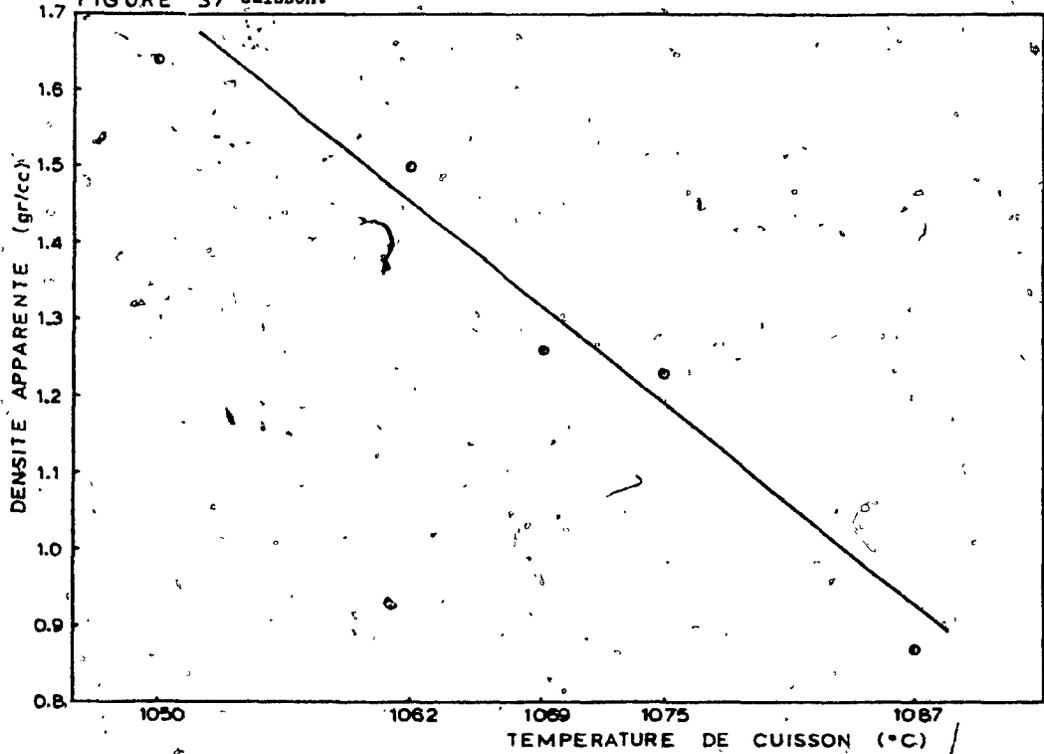


FIGURE 38 Densité apparente en fonction du temps de cuisson.

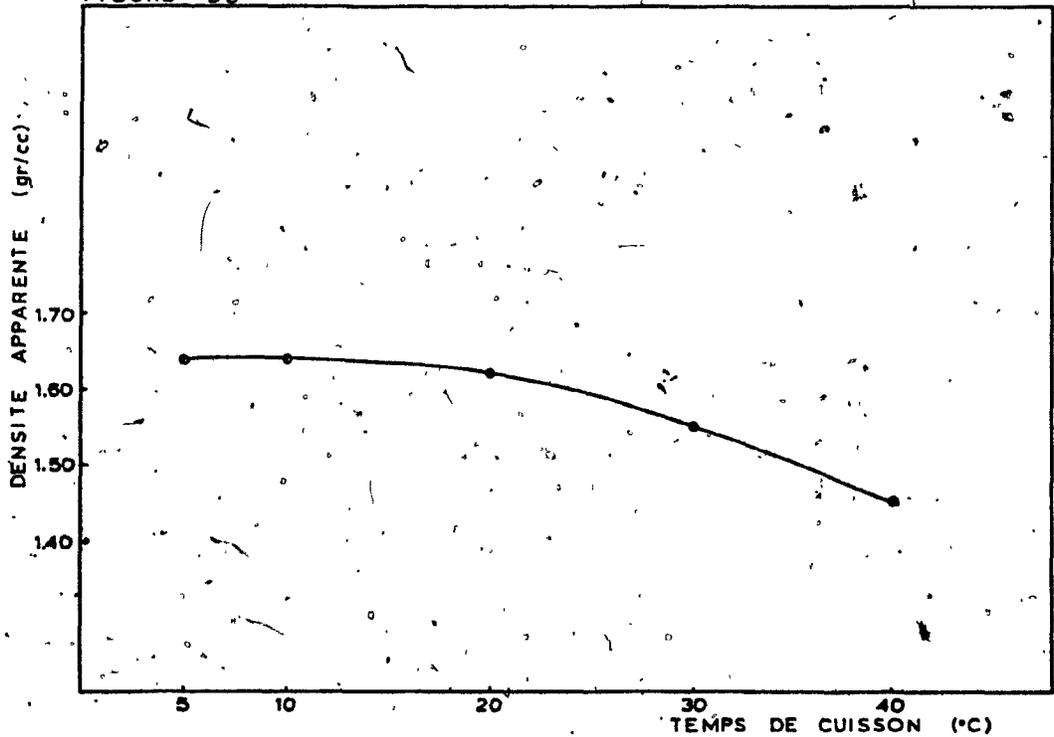


FIGURE 39 Variations de volume en fonction de la température de cuisson.

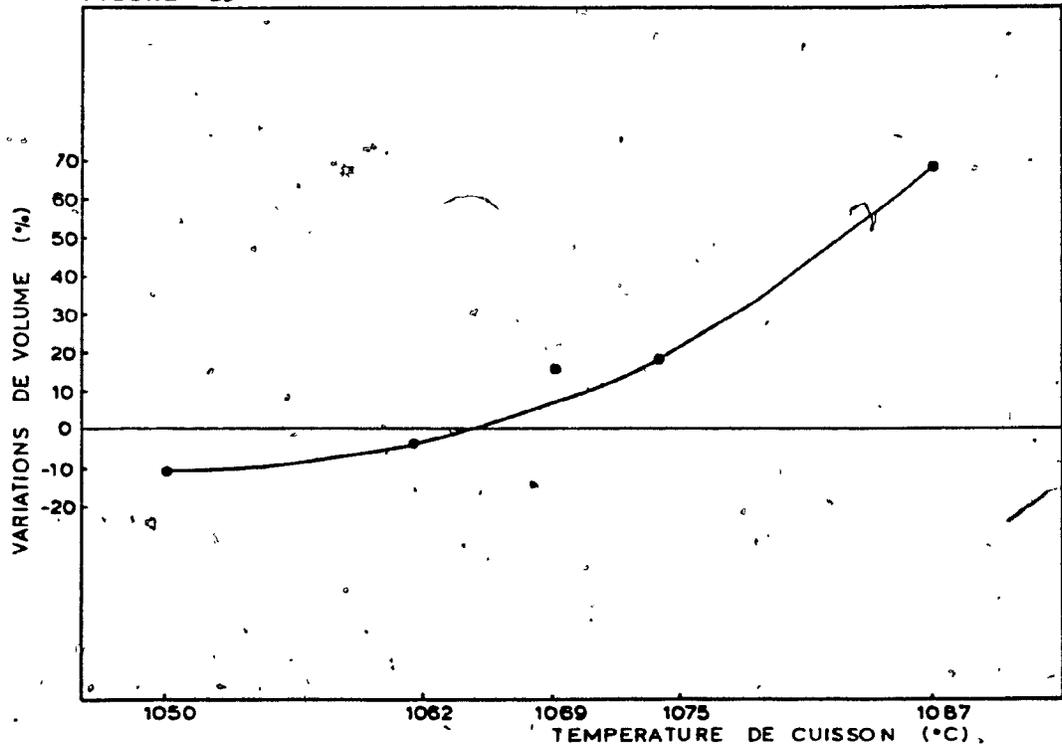


FIGURE 40 Variations de volume en fonction du temps de cuisson.

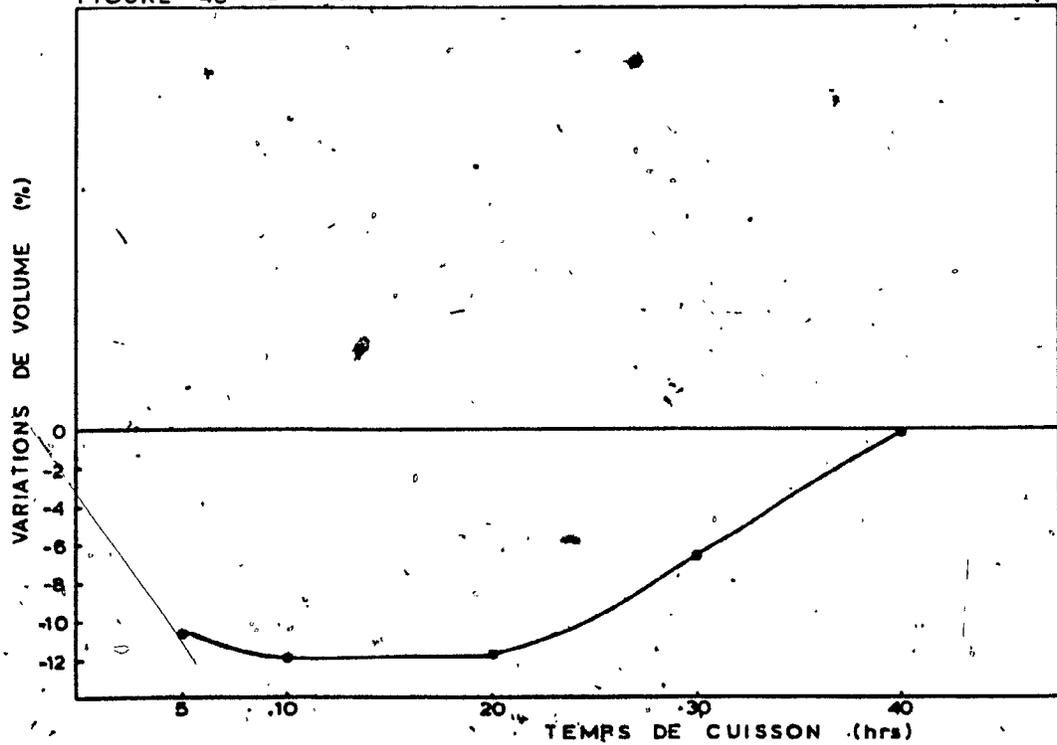


FIGURE 41 Taux d'absorption en fonction de la température de cuisson.

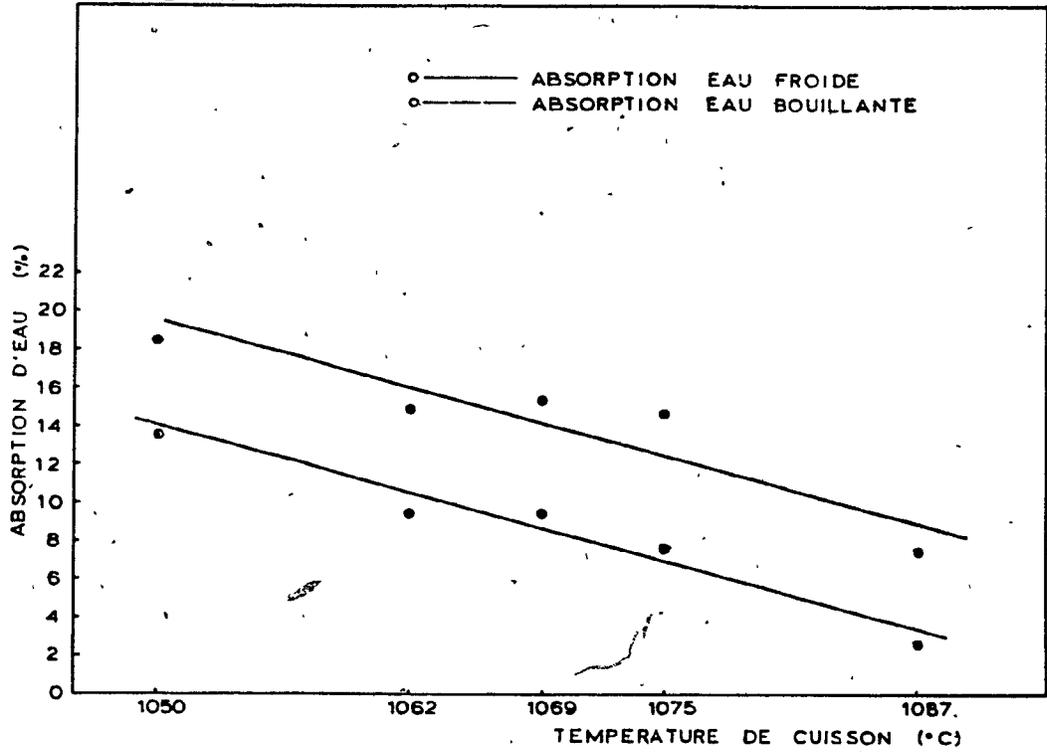


FIGURE 42 Taux d'absorption en fonction du temps de cuisson.

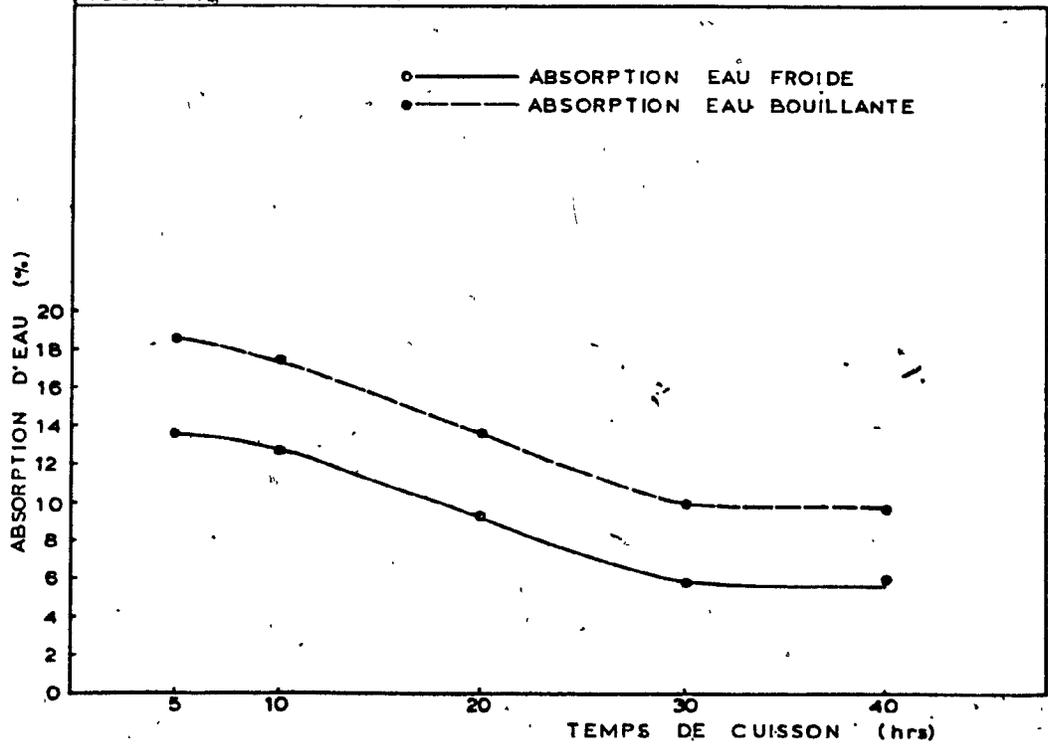


FIGURE 43 Coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson.

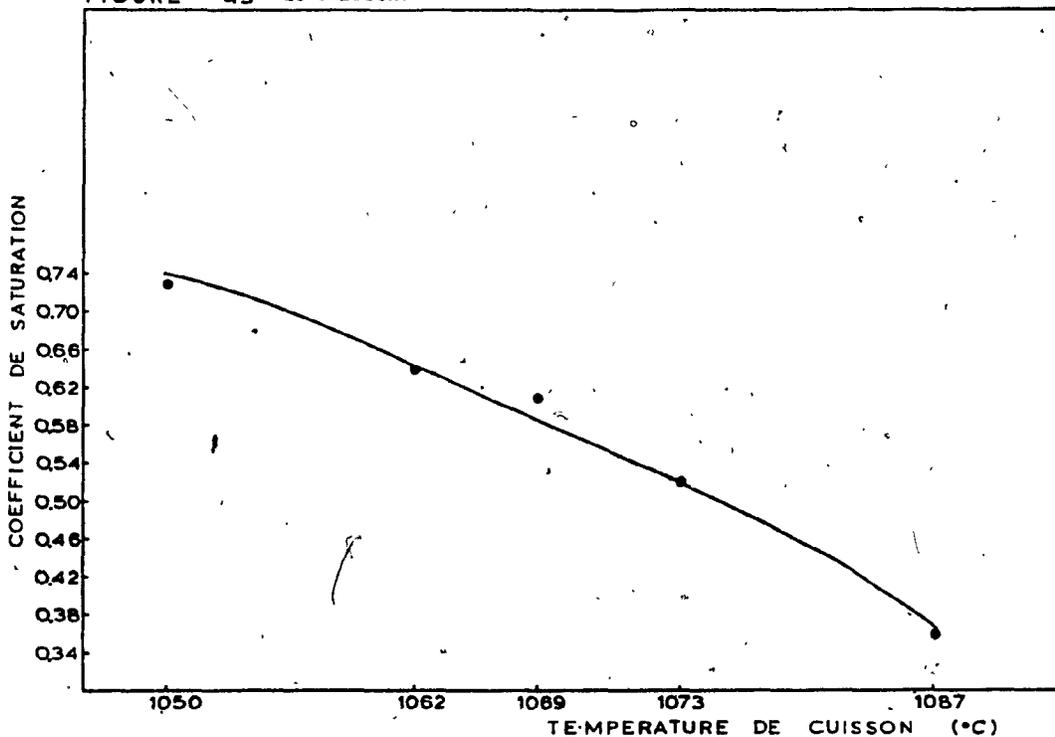


FIGURE 44 Coefficient de saturation en fonction du temps de cuisson.

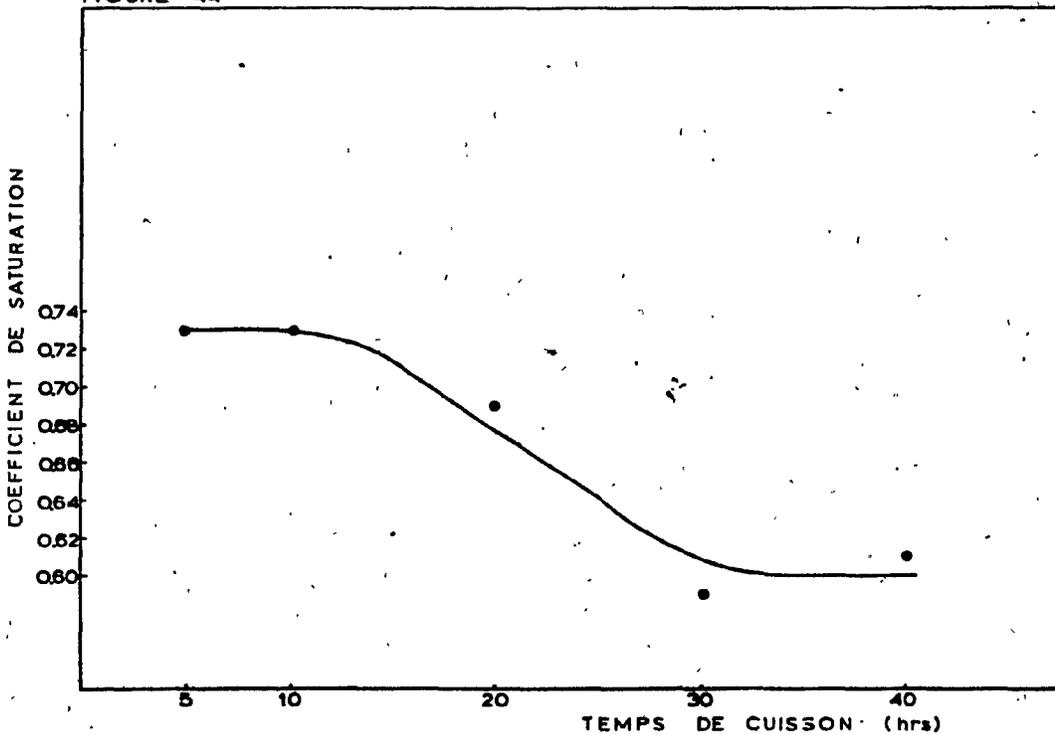


FIGURE 45 Propriétés mécaniques en fonction de la température de cuisson.

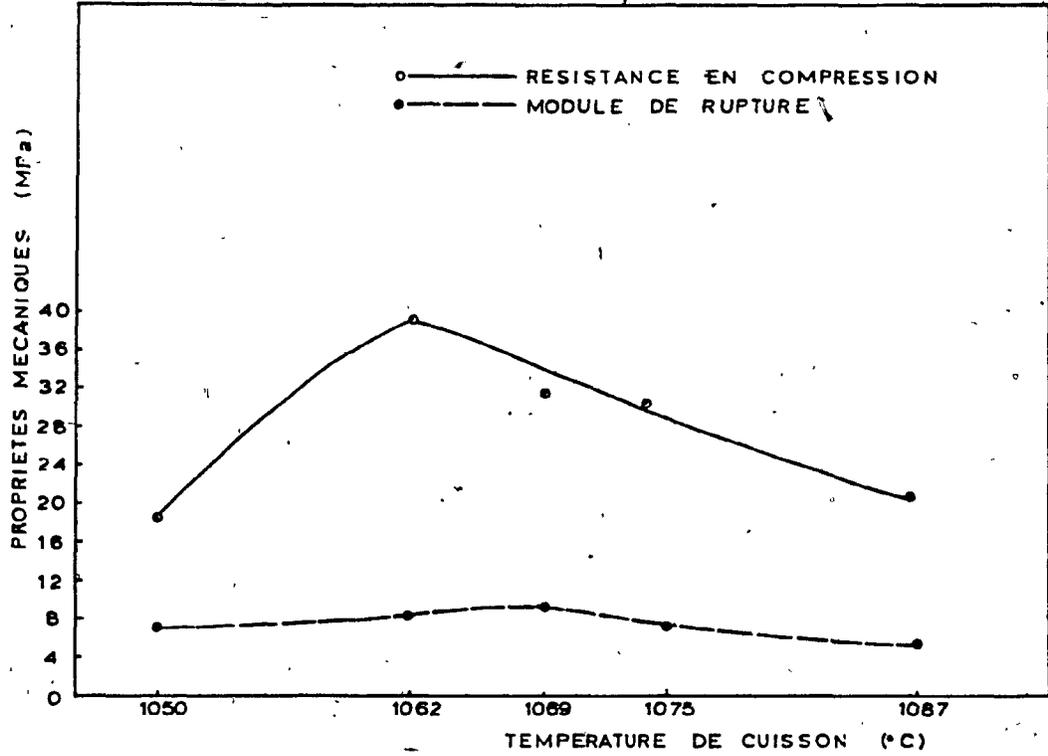
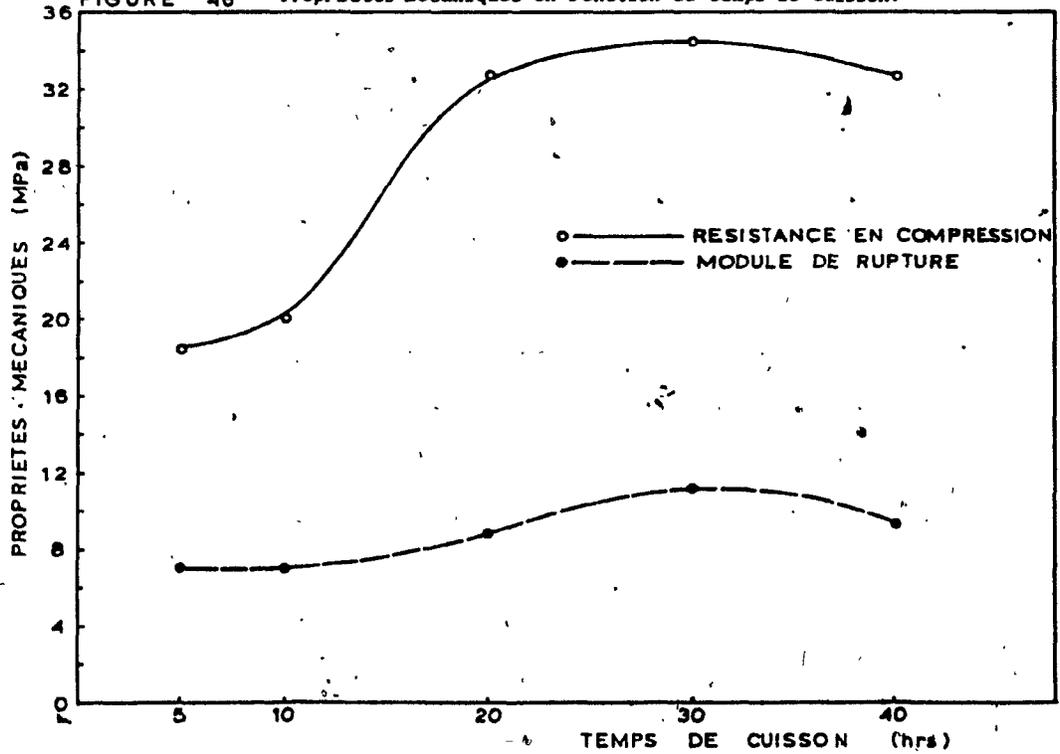


FIGURE 46 Propriétés mécaniques en fonction du temps de cuisson.



**PHOTOGRAPHIE NO 12**  
**VARIATION DE LA TEMPERATURE MAXI-**  
**MALE DE CUISSON**

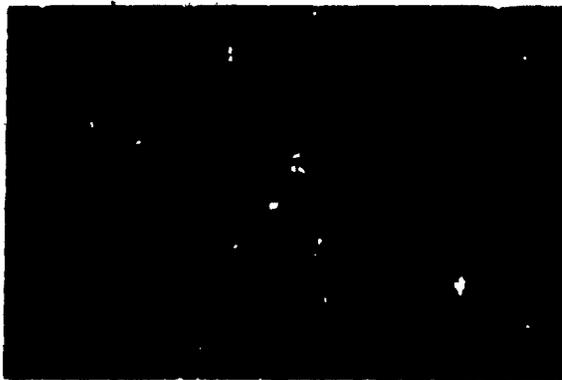


**1082 °C**

**1075 °C**

**1087 °C**

**(7X)**



## Variation combinée de la pression et de la quantité de sciures

### EXPERIENCE

Vingt-trois échantillons ont été fabriqués à partir de mélanges constitués de quantités variables de sciures et moulés sous des pressions différentes. L'ensemble des combinaisons pression-quantités de sciures est illustré à l'annexe G. Ces échantillons furent préparés à partir de la composition suivante: des quantités variables d'eau et de sciures furent ajoutées à 300gr d'argile (voir l'annexe F pour un compte-rendu de l'analyse granulométrique des particules d'argile et de sciures.) Les mélanges furent malaxés et séchés suivant le même processus que pour les mélanges constitués uniquement d'argile.

### RESULTATS ET DISCUSSION

Il est important de noter, en premier lieu que les échantillons fabriqués et cuits au cours de cette expérience l'ont été à partir de paramètres optimisés, à partir donc des meilleurs résultats obtenus dans les sections précédentes en regard du taux de cuisson, de la température maximale de cuisson, des grosseurs des particules de sciures et d'argile.

Une première constatation s'impose: la variation de la pression exercée sur les mélanges lors du moulage, produit après la cuisson une grande diversité de densités apparentes. Au fur et à mesure que la pression augmente, la densité des échantillons cuits augmente

elle-aussi. Cette progression est particulièrement prononcée jusqu'à une pression de 3.4 MPa, et l'augmentation par la suite est plus lente. L'augmentation de la quantité de sciures dans les mélanges produit l'effet inverse: la densité diminue au fur et à mesure que la quantité de sciures ajoutées s'accroît. On peut constater ces tendances en observant la série de courbes de la figure 47 (Courbes des variations de la densité apparente en fonction de la pression de moulage pour différentes quantités de sciures ajoutées). Vingt-trois densités apparentes ont ainsi été produites s'échelonnant de 1.30 gr/cc à 1.80 gr/cc. Les échantillons de 1.30 gr/cc ont pu être fabriqués en ajoutant 30 à 40 gr de sciures à 300 gr d'argile et à de l'eau en exerçant une pression de 1.7 ou de 3.4 MPa, tandis que ceux d'une densité apparente de 1.80 gr/cc ont été préparés à partir de 10 gr de sciures, 300 gr d'argile, de l'eau, les mélanges étant compactés sous une pression de 2.6 MPa. Contrairement aux sections précédentes, les propriétés physiques et mécaniques ont été établies en fonction de la densité apparente.

Il ressort clairement des résultats obtenus que les taux d'absorption, le coefficient de saturation, la résistance en compression et le module de rupture varient de façon très consistante par rapport à la densité apparente des échantillons cuits. Les propriétés physiques (taux d'absorption et coefficient de saturation diminuent de façon linéaire par rapport à la densité apparente. Tel qu'illustrée par la figure no 48 (Courbes des variations des taux d'absorption en fonction de la densité apparente), les taux d'absorption à température ambiante et dans l'eau bouillante varient

de 23 et 34% respectivement pour une densité de 1.30 gr/cc, à 10 et 14% pour une densité de 1.80 gr/cc. La figure 49 (Courbe de la variation du coefficient desaturation en fonction de la densité apparente) montre que le coefficient de saturation, lui, diminue de 0.90 à 0.70 lorsque la densité apparente passe de 1.30 gr/cc à 1.80 gr/cc. En ce qui concerne la résistance en compression (voir la figure no 50: Courbe de la variation de la résistance en compression en fonction de la densité apparente), on remarque l'existence de 2 zones, tel qu'illustré à la figure no 50. En premier lieu, d'une densité apparente de 1.30 à 1.50 gr/cc, les variations de la résistance augmentent lentement. A partir de 1.70 gr/cc, l'augmentation est linéaire et beaucoup plus marquée.

Les effets de la variation de la pression et de la quantité de sciures ajoutée aux mélanges d'argile sont étudiés et expliqués aux sections 4.2.6 et 4.2.7: la pression exercée sur les échantillons lors du moulage favorise le tassement des particules d'argile les unes sur les autres, minimisent les interstices entre les grains et facilite ainsi la formation de liens céramiques assurant une bonne résistance aux échantillons cuits; l'augmentation de la quantité de sciures ajoutée aux mélanges d'argile augmente le nombre de pores après la cuisson, diminue les surfaces de contacts entre les grains d'argile et réduit ainsi le nombre de liens céramiques pouvant se former au cours de la cuisson.

### Conclusion

Dans cette expérience les échantillons ont été préparé et cuits à partir de paramètres optimisés: en effet les particules d'argile furent de dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$ , les mélanges de particules de sciures les plus fines furent utilisés (mélange H-70), un pallier de 5 heures à 500°C fut maintenu, et par la suite la température fut élevée rapidement jusqu'à un niveau maximum de 1050°C où elle fut maintenu pendant 5 heures. Une grande variété de densités apparentes différentes fut obtenue en faisant varier la pression lors du moulage et la quantité de sciures ajoutée aux mélanges d'argile, et étant donné l'optimisation des paramètres de préparation et de cuisson, les résultats des propriétés physiques et mécaniques peuvent être considérées comme étant optimaux pour les échantillons d'argile et de sciures.

On peut donc conclure qu'en diminuant la pression exercée sur les mélanges lors du moulage ou en augmentant la quantité de sciures ajoutée aux mélanges d'argile, ou par une action combinée de ces deux facteurs, on diminue la densité apparente des échantillons cuits suivant les courbes tracées à la figure 47, et que cette diminution entraîne une augmentation linéaire des taux d'absorption et du coefficient de saturation et une chute de la résistance en compression. Il ne peut y avoir de diminution de la densité apparente qu'au détriment d'une augmentation des taux d'absorption et du coefficient de saturation et d'une chute de la résistance en compression.

FIGURE 47 Densité apparente en fonction de la pression de moulage.

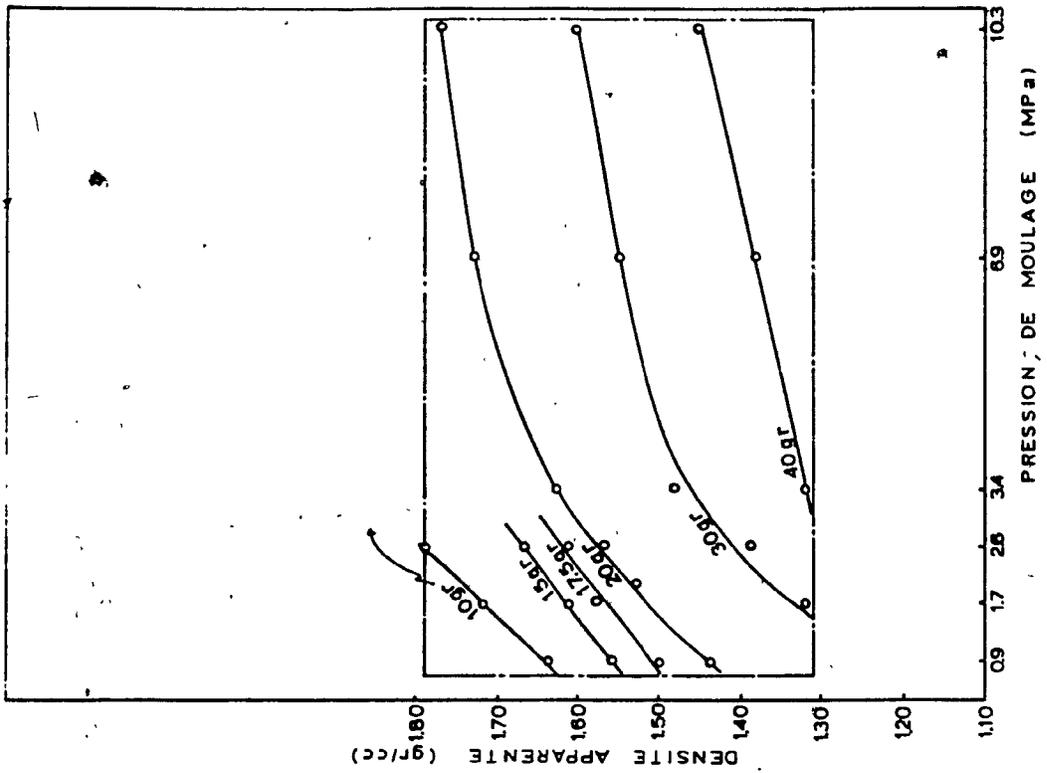
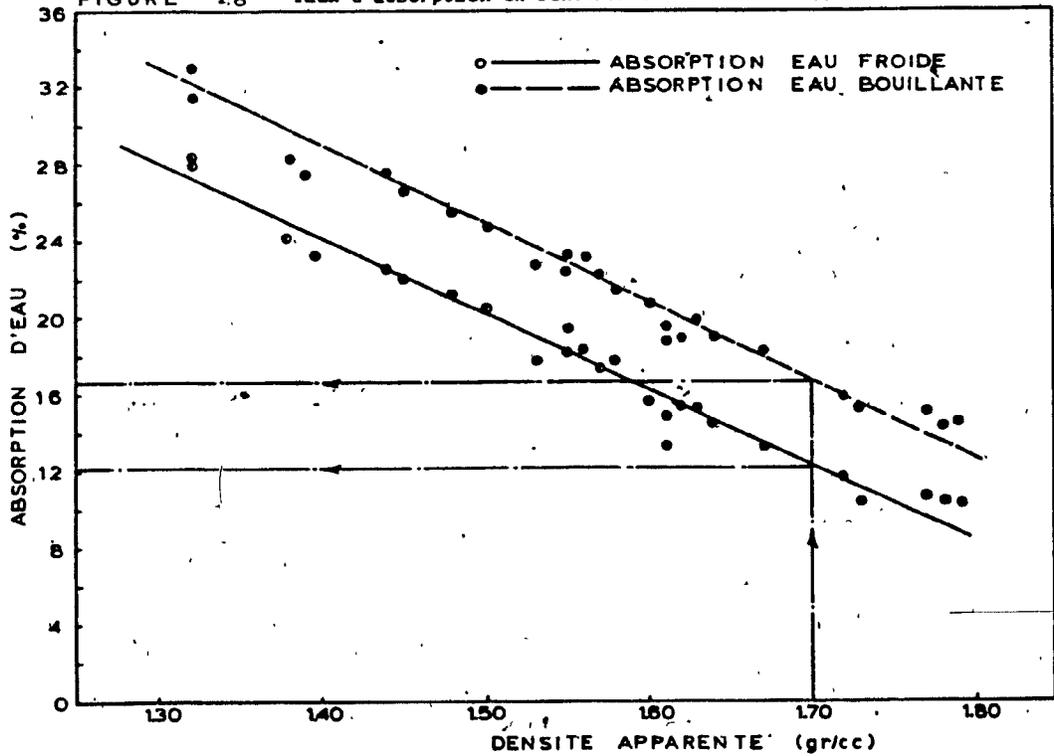
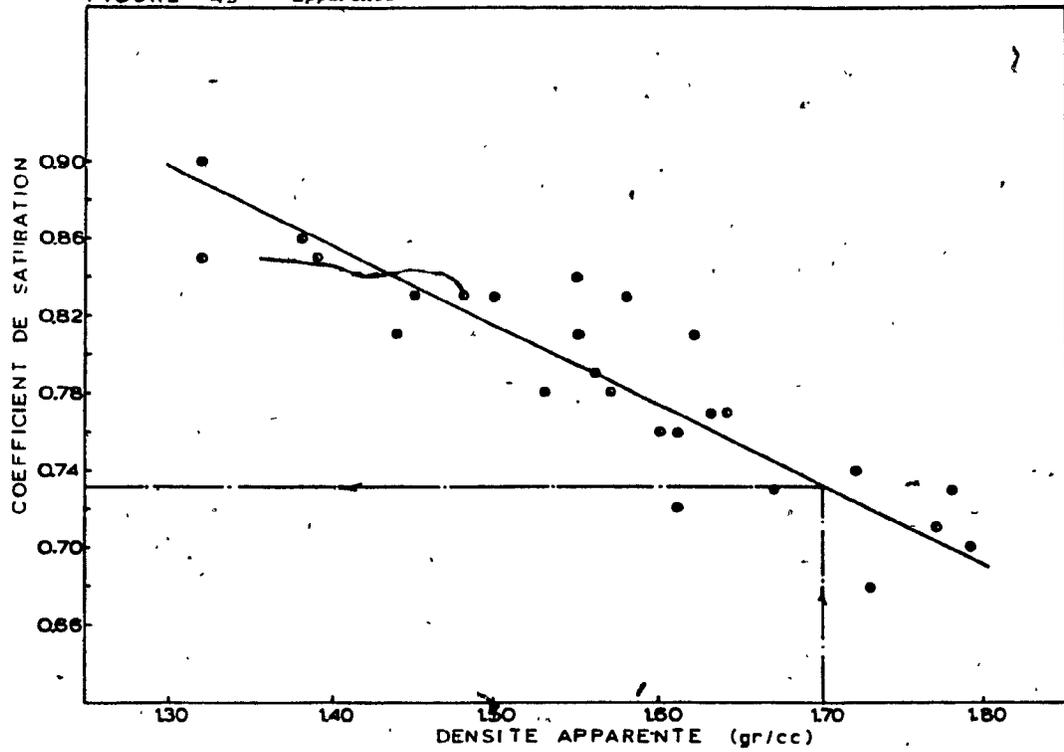


FIGURE 48 Taux d'absorption en fonction de la densité apparente.



Coefficient de saturation en fonction de la densité apparente.

FIGURE 49



Résistance en compression en fonction de la densité apparente.

FIGURE 50

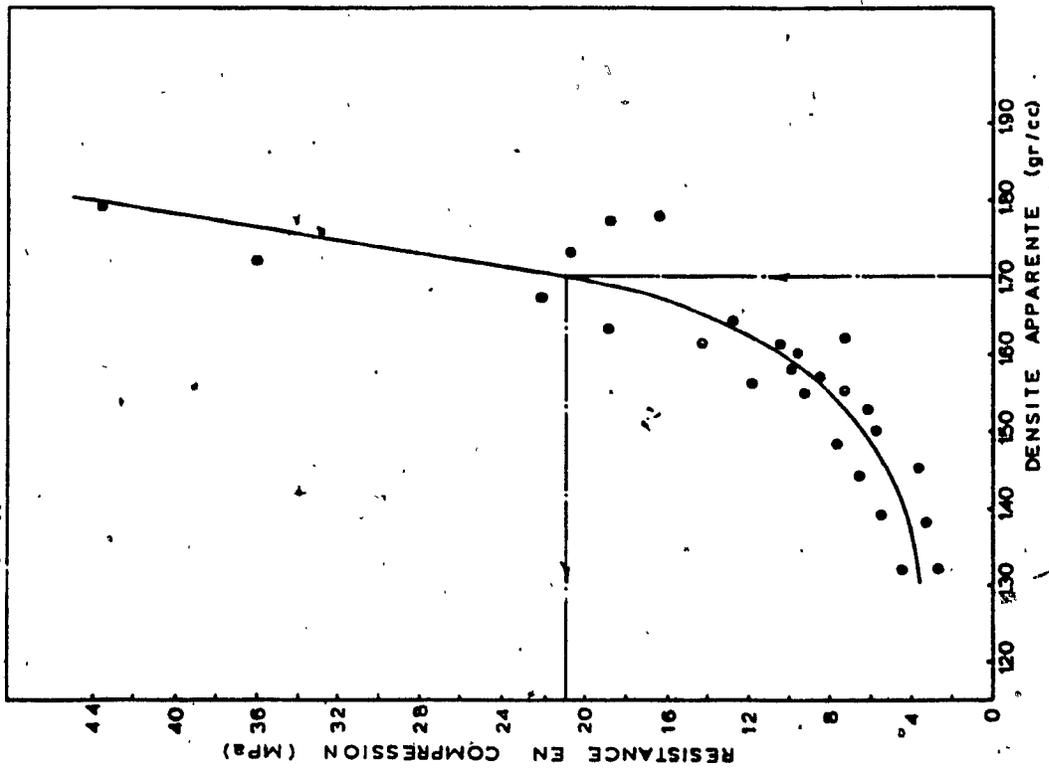
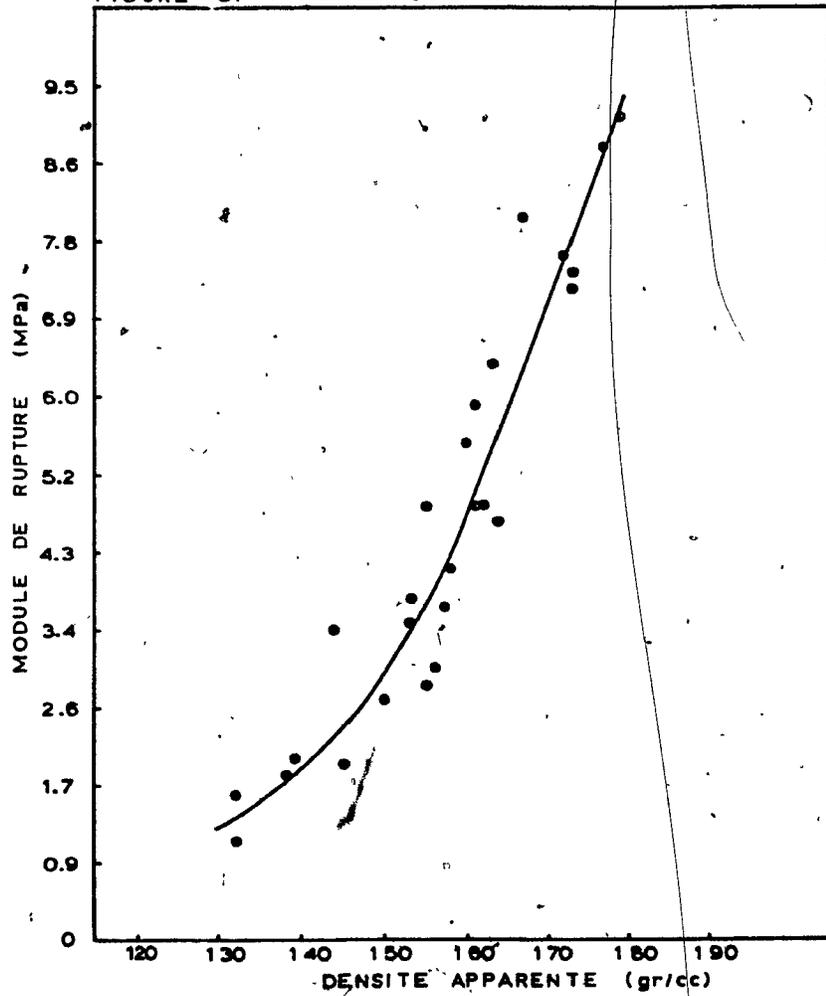


FIGURE 51 Module de rupture en fonction de la densité apparente.



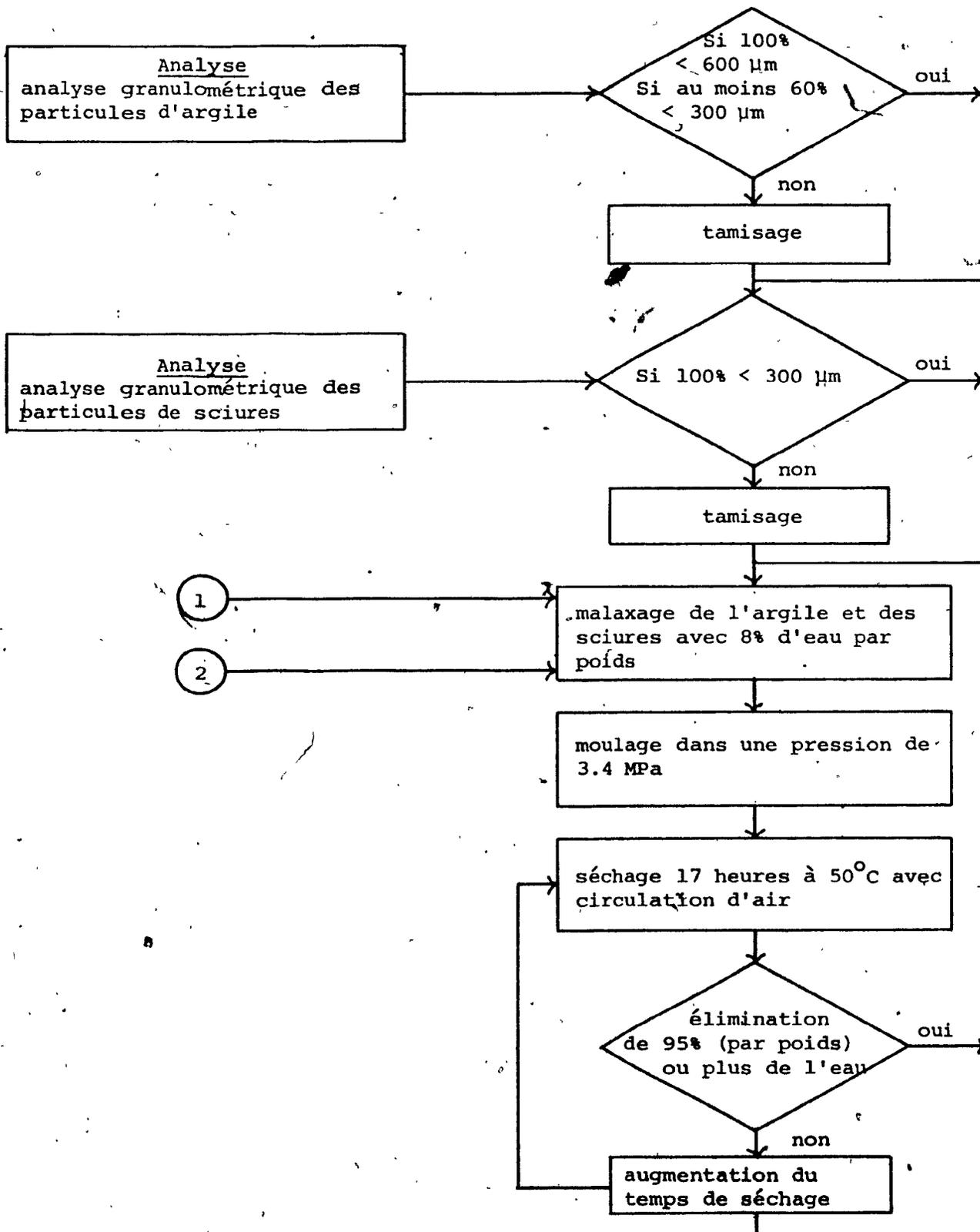
#### 4.2.9 Conclusion

L'objectif principale de cette première partie (4.2) est de produire une brique d'argile plus légère que celles qui sont actuellement sur le marché, en ajoutant des sciures de bois aux mélanges d'argile. Il a été démontré dans les sections 4.2.1 à 4.2.8 inclusivement que l'ajout de sciures modifie de façon marquée les propriétés physiques et mécaniques des échantillons cuits et que pour optimiser ces propriétés il faut modifier de façon sensible les procédés de fabrication et de cuisson habituels des briques d'argile. Plusieurs paramètres ont été étudiés ainsi que leur effet sur les modifications des propriétés physiques et mécaniques: le taux et la température maximale de cuisson, la grosseur des particules d'argile et de sciures, la quantité des sciures ajoutées aux mélanges et finalement la pression exercée sur les mélanges lors du moulage. Il ressort de l'analyse des résultats des expériences effectuées les points suivants: un pallier de 5 heures à 500°C est nécessaire de façon à éliminer complètement les sciures de bois lors de la cuisson qui autrement peuvent entraîner des gonflements indésirables de la masse des échantillons à haute température; par la suite, la température doit être élevée rapidement de 500 à 1050°C de façon à favoriser une consolidation rapide des grains d'argile entre eux et à empêcher les gaz résiduels d'exercer une pression interne qui diminuerait la résistance des échantillons cuits. Une température maximale de 1050°C fut considérée comme optimale, cette température étant voisine du point de fusion de l'argile, elle ne peut être dépassée sans générer un ramolissement et donc une distorsion des

échantillons lors de la cuisson. Les grains d'argile doivent être de dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$  de façon à favoriser leur consolidation et de telle sorte qu'il enrobe les particules de sciures en minimisant les interstices. La majorité des particules de bois doit être elle aussi de dimensions inférieures à 300  $\mu\text{m}$ , subdivisant ainsi le volume poreux en de petites bulles d'air réparties de façon homogène et assurant ainsi aux échantillons cuits une meilleure résistance à la pénétration de l'eau et de meilleures propriétés mécaniques. La pression exercée sur les mélanges lors du moulage doit être d'environ 3.5 MPa pour permettre un tassement suffisant des grains d'argile entre eux et favoriser ainsi la formation de liens céramiques. Les résultats de ces expériences constituent l'ensemble des modifications qui doivent être apportés au processus habituel de fabrication de maçonnerie d'argile pour obtenir un abaissement de la densité apparente des produits cuits, tout en minimisant l'accroissement des taux d'absorption, du coefficient de saturation et en limitant le plus possible la diminution des propriétés mécaniques (résistance en compression et module de rupture). Le tableau 7 résume les lignes directrices pour la fabrication de briques d'argile-sciures. En utilisant ces paramètres optimisés, on peut diminuer la densité apparente des briques d'argile-sciures jusqu'à une limite compatible avec les normes CSA A82.2 et A82.7. Ces normes stipulent que pour les briques d'argile utilisées comme parement extérieur d'un bâtiment doivent avoir une résistance en compression d'au moins 20.7 MPa, des taux d'absorption dans l'eau froide n'excédant pas 13.3% et dans l'eau bouillante 17%, et finalement un

coefficient de saturation pas plus élevé que 0.78. Les courbes des figures 47, 48, et 49 démontrent qu'en respectant ces conditions, la densité apparente des briques d'argile actuellement sur le marché qui est d'environ 2.05 gr/cc peut être abaissés jusqu'à 1.70 gr/cc, soit une diminution de 17% environ, en ajoutant environ 5% de sciures de bois par poids. Au Tableau 8, on peut comparer les propriétés physiques et mécaniques de briques constituées d'argile uniquement, de briques d'argile-sciures et les valeurs minimales ou maximales spécifiées par les normes CSA A82.2 et A82.7. Les briques d'argile-sciures, bien que 17% plus légères que les briques constituées d'argile uniquement, ont une résistance en compression de 21.0 MPa qui est supérieure à la valeur minimale de 20.7 MPa prescrite par la norme CSA A82.2 et A82.7, des taux d'absorption dans l'eau froide et l'eau bouillante de 12.2 et de 16.8% inférieure aux 13.3 et 17% de la norme, et un coefficient de saturation de 0.73 comparé au 0.78 maximale de la norme.

LIGNES DIRECTRICES POUR LA FABRICATION, PAR PRESSAGE  
 DE BRIQUES D'ARGILE EN UTILISANT DES SCIURES  
 DE BOIS D'ERABLE ANHYDRE  
 ET UNE ARGILE GRISE SECHEE ET BROYEE



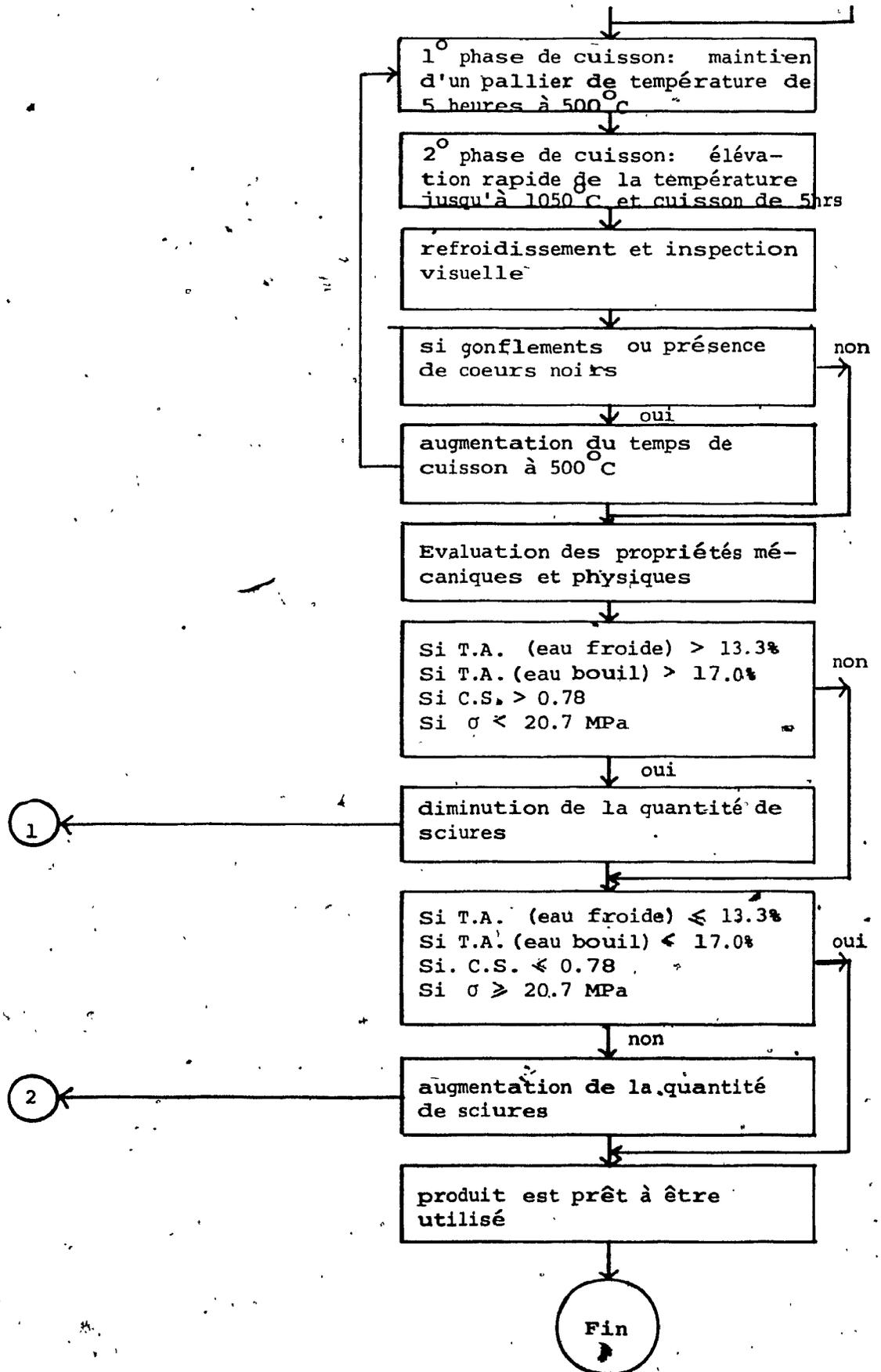


TABLEAU 8

PROPRIETES COMPAREES:  
SYSTEMES A 2 COMPOSANTES

	Systeme à une com- posante: argile uniquement	Systeme à deux composantes: valeurs optimales	ASTM C-216
Densité apparente	2.05 gr./cc	1.70 gr./cc	
Résistance en compression	48.0 MPa	21.0 MPa	20.7 MPa
Taux d'absorption (24 heures)	7.3%	12.2%	13.3%
Taux d'absorption (5 heures dans l'eau bouillante)	10.2%	16.8%	17.0%
Coefficient de saturation	0.72	0.73	0.78

#### 4.3 SYSTEME A TROIS COMPOSANTES: ARGILE, DECHETS DE VERRE BROYES ET SCIURES DE BOIS

L'objectif principale de la présente étude est de produire des briques plus légères et isolantes en abaissant la densité apparente. L'ajout de sciures de bois à des mélanges d'argile ne fait qu'abaisser la densité apparente de 2.05 gr/cc pour des briques constituées d'argile uniquement à 1.70 gr/cc. Cette diminution qui n'est que de 17% environ, constitue néanmoins la réduction maximale obtenue après que les paramètres de fabrication et de cuisson furent optimisés.

Ce résultat a été obtenu pour un temps de cuisson de 5 heures à 1050°C. Il serait possible, tel que démontré à la section 4.2.3, d'améliorer de façon sensible les propriétés physiques et mécaniques des briques en prolongeant le temps de cuisson jusqu'à 20 heures et d'ainsi obtenir pour des propriétés semblables une densité apparente plus faible. Toutefois la substitution de l'argile par des déchets de verre broyés permettrait pour une densité donnée d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques sans avoir à augmenter le temps de cuisson. Des travaux récents (33, 34, 35) démontrent en effet que l'addition de verre de récupération broyé à des mélanges d'argile, non seulement augmente les propriétés mécaniques et diminue les taux d'absorption et le coefficient de saturation mais étant donné le point de fusion moins élevé du verre, diminue aussi la température maximale de cuisson des mélanges de verre et d'argile et réduit le temps de cuisson. Deux autres avantages doivent être portés au compte des déchets de verre en tant que 3<sup>e</sup> composante: sa densité réelle est plus faible que celle de l'argile et contribue ainsi à abaisser la

densité apparente des échantillons cuits; le verre constitue aussi, au même titre, que les sciures de bois un produit de récupération.

Dans les trois sections qui suivent (4.3.1, 4.3.2 et 4.3.3) trois facteurs seront étudiés afin de déterminer les paramètres de fabrication et de cuisson optimaux du système à 3 composantes: la proportion de verre substituée à l'argile, la température maximale de cuisson, et la quantité de sciures ajoutées au mélange.

#### 4.3.1 Variation de la proportion de verre substituée à l'argile

##### EXPERIENCE

Pour chaque composition, 2 échantillons ont été fabriqués à partir de mélanges constitués à partir de 300 gr de matières sèches (argile et déchets de verre broyés auxquelles ont été ajoutées 20 gr de sciures de bois (6.7% par poids; voir annexe F pour l'analyse granulométrique des particules de sciures et d'argile). La proportion de déchets de verre broyés est exprimée en pourcentage du poids de matières sèches et varie de 10 à 70%. 25 gr d'eau fut ajouté aux mélanges qui furent moulés à une pression de 3.4 MPa. Les mélanges furent malaxés et séchés suivant le même processus que pour les mélanges constitués d'argile et de sciures. Un pallier de 5 heures à 500°C fut maintenu lors de la cuisson et la température par la suite fut élevée jusqu'à 900°C au lieu de 1050°C, et conservée à ce niveau pendant 5 heures.

##### RESULTATS ET DISCUSSION

Lorsque la proportion de déchets de verre broyés augmente par rapport à celle de l'argile, le volume des échantillons cuits pour un poids donné augmente lui aussi jusqu'à provoquer un gonflement et une fissuration de la surface externe des briques lorsque la proportion de verre atteint 60 et 70%, tel qu'en témoigne l'examen de la photographie no 14. La couleur elle aussi se modifie et passe graduellement du brun foncé au rose. Ces augmentations de volume ou ces diminutions de la densité apparente, tel qu'illustré par la figure

52 (Courbes de la variation de la densité apparente en fonction de la proportion de verre), sont relativement faibles et constantes jusqu'à une proportion de verre égale à 50%. Par contre à 60 et à 70% des gonflements marqués font leur apparition. Les grains de verre se resserrent au cours de la cuisson, se ramolissent et imperméabilisent alors partiellement la surface empêchant ainsi les gaz produits par la combustion résiduelle des sciures de bois de s'échapper. Il se crée à la surface des échantillons une zone de matière plus dense et de faible épaisseur. A l'intérieur de cette zone, les grains sont plus serrés et les pores plus petits. La photographie no 13 illustre bien la présence de cette zone et met bien en évidence la différence de grosseur entre ces pores et ceux, beaucoup plus gros localisés à l'intérieur des échantillons cuits. Etant donné que la surface des échantillons est en contact immédiat avec la température du four, le ramolissement des grains de verre et l'effet de scellement se produit d'abord en surface. Cet effet ne peut cependant se produire que si la quantité de verre est suffisante, 60 et 70% , pour créer une enveloppe imperméable.

Les taux d'absorption dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante suivent une tendance inverse. Dans le cas des taux d'absorption dans l'eau froide, la substitution de 10% d'argile par du verre broyé ne semble pas avoir eu d'effet. Lorsque la proportion passe à 30, 40, 50, ou 60% les taux d'absorption grimpent alors de 12 à 30% environ et doublent ensuite lorsque la teneur en verre passe à 70% (voir Fig. no 53: Courbe de la variation des taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la proportion de verre). La

variation des taux d'absorption dans l'eau bouillante suit le même cheminement, passant de 17% pour les mélanges argile-sciures à 35% lorsque la proportion de verre est de 30, 40, 50 ou 60% pour finalement atteindre 90% lorsque 70% de l'argile est remplacée par du verre broyé (voir Fig. no 54: Courbe de la variation des taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la proportion de verre). Le coefficient de saturation, lui, a tout d'abord tendance à augmenter de façon marquée lorsque 10% de l'argile est substituée par du verre passant alors de 0.74 à 0.90 et diminue par la suite graduellement jusqu'à 0.58 pour une proportion de verre de 60%. Ensuite le coefficient augmente de nouveau jusqu'à 0.70 quand la proportion de verre atteint 70% (voir Fig. no 55: Courbe de la variation du coefficient de saturation en fonction de la proportion de verre). L'accroissement des taux d'absorption s'explique par le fait qu'au fur et à mesure que la proportion de verre augmente, la densité apparente diminue de façon appréciable et qu'ainsi le volume pour un même poids donné augmente de même que la porosité. Le nombre de pores et de canaux pouvant être saturés d'eau augmentent en conséquence. Par contre, pour une proportion de déchets de verre broyés égale à 60%, en dépit d'une densité apparente sensiblement plus faible et de la création, donc, d'un nombre plus important de pores disponible, le taux d'absorption dans l'eau à température ambiante n'augmente pas et celui dans l'eau bouillante ne fait que croître faiblement à cause de l'existence d'une couche imperméable en surface et la création de pores scellés à l'intérieur des briques. Toutefois pour une quantité de verre égale à 70%, les taux d'absorption augmentent de façon très

marquée, dû à la fissuration des échantillons en surface (voir photo no 14) et étant donné la création de gros pores et de réseaux de connections entre ces pores. Ce n'est que pour une proportion de verre égale à 50% que le coefficient de saturation atteint une valeur inférieure. La quantité de verre est alors suffisante pour former une matrice qui se substitue à l'argile pour assurer la solidité du matériau cuit, enrober ainsi les particules d'argile et les lier entre elles. Cette quantité de verre est suffisante pour imperméabiliser partiellement les pores et réduire ainsi le taux de pénétration de l'eau froide. Ce phénomène se confirme lorsque la proportion de verre est égale à 60%. Néanmoins à 70%, la surface des échantillons lors de la cuisson éclate en certains points et la création de gros pores à l'intérieur des briques cuites fait augmenter le coefficient de saturation.

La substitution de l'argile par des déchets de verre broyés entraînent aussi des modifications marquées des propriétés mécaniques. On peut distinguer 3 zones, tel qu'en témoigne l'examen de la figure no 56 (Courbes de la variation des propriétés mécaniques en fonction de la proportion de verre); en premier lieu la suppression presque totale de la résistance en compression et du module de rupture lorsque 10, 30, ou 40% des particules d'argile sont substituées par des grains de verre; ensuite lorsque la proportion de verre est égale à 50 ou 60%, la résistance en compression des échantillons excède celle des mélanges constitués uniquement d'argile et de sciures en dépit du fait que leur densité apparente soit sensiblement plus faible (1.52, 1.32, et 1.06 gr/cc) que celle des échantillons

d'argile-sciures; finalement pour une quantité de verre égale à 70%, les propriétés mécaniques rechutent de nouveau et la résistance en compression et le module de rupture ne sont plus alors égale qu'à 4 et 2 MPa respectivement. Ce n'est qu'avec une proportion de verre égale ou supérieure à 40% que les échantillons cuits acquièrent une certaine solidité. Lorsque la proportion de déchets de verre broyés atteint 50%, la quantité de verre est suffisante pour se substituer à l'argile comme élément consolidant des échantillons. La résistance des échantillons augmente alors de nouveau et dépasse même de quelque peu la résistance des briques cuites d'argile-sciures. Pour les mélanges constitués de 70% de verre, la fissuration des échantillons en surface et la présence de gros pores à l'intérieur des briques cuites fait chuter de nouveau la résistance.

### Conclusion

Il semble donc qu'une partie d'argile pour une partie de verre soit une proportion optimale pour une cuisson de 5 heures à 900°C. Les mélanges ainsi constitués produisent des briques cuites possédant une résistance en compression légèrement supérieure aux briques d'argile sciures, un coefficient de saturation de 0.70 et ne présentent pas de gonflements indésirables comme c'est le cas pour des proportion de verre égales à 60 ou à 70%.

FIGURE **Densité apparente en fonction de la proportion de déchets de verre.**

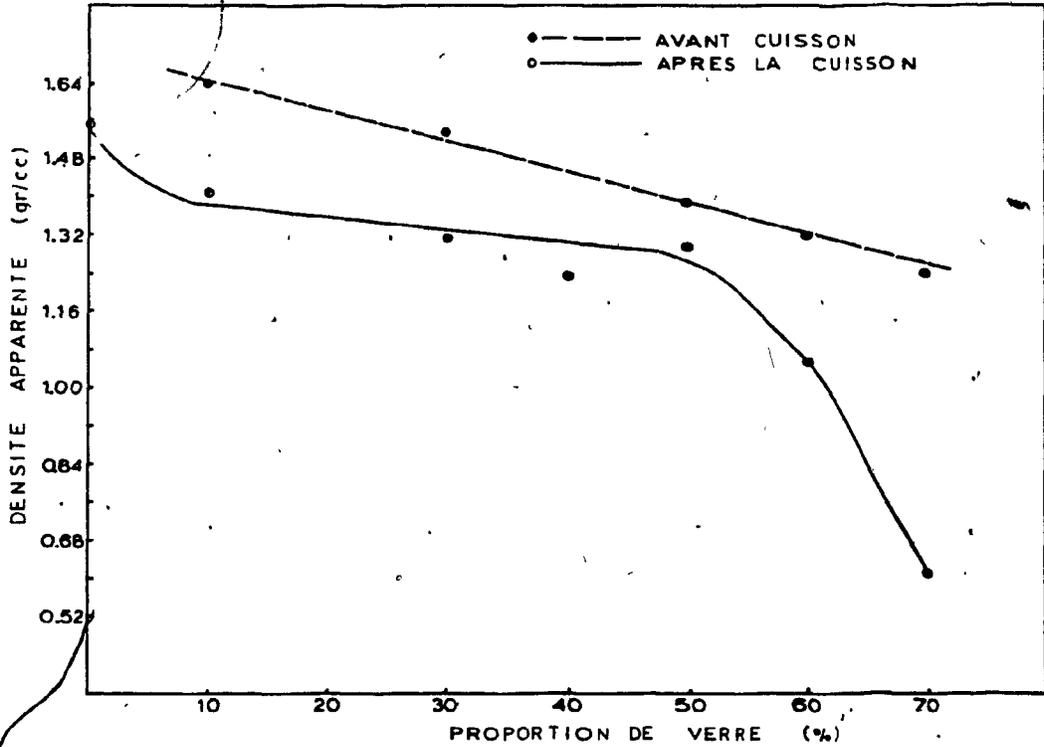
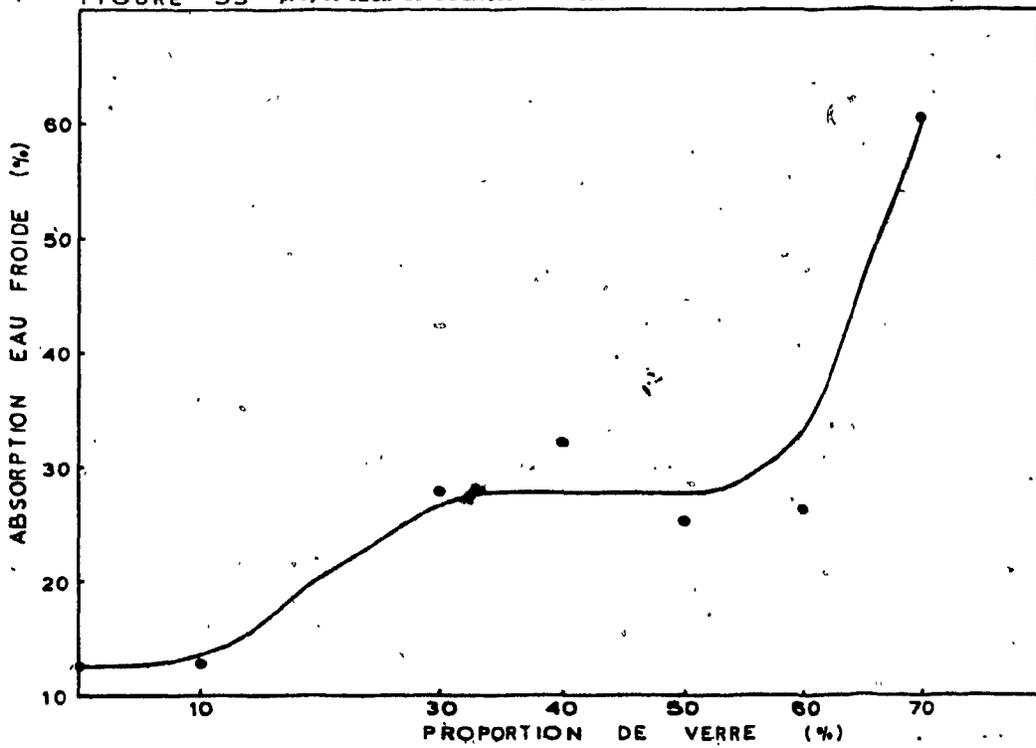
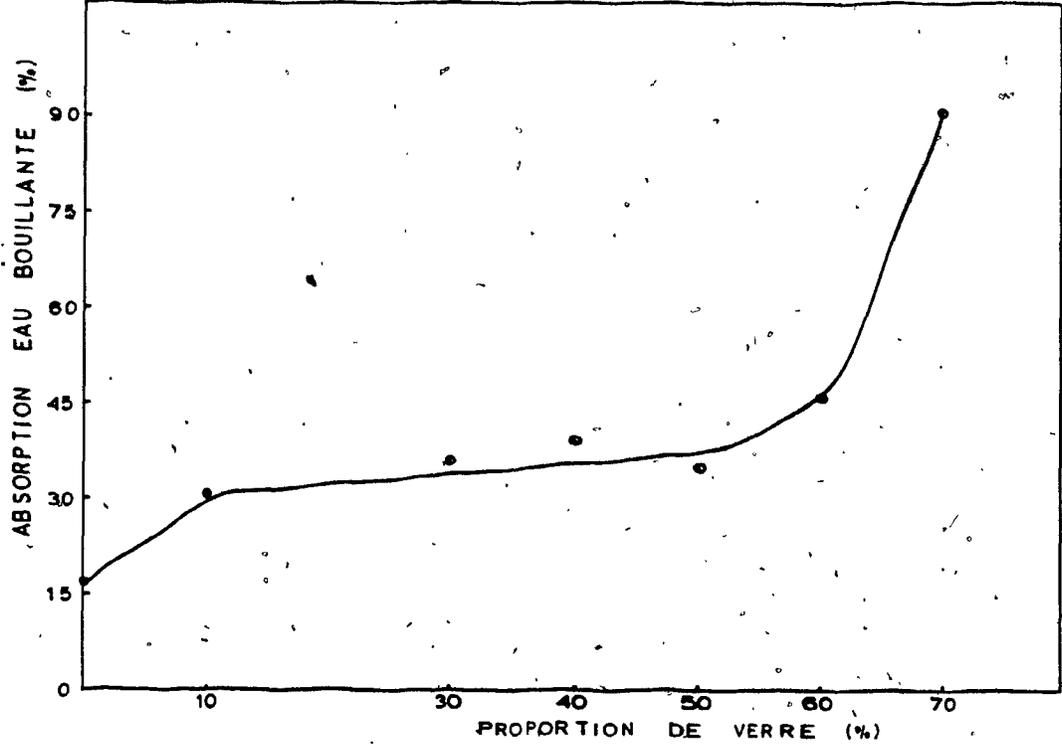


FIGURE 53 **Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la proportion de déchets de verre.**



Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la proportion de déchets de verre.

FIGURE 54



Coefficient de saturation en fonction de la proportion de déchets de verre.

FIGURE 55

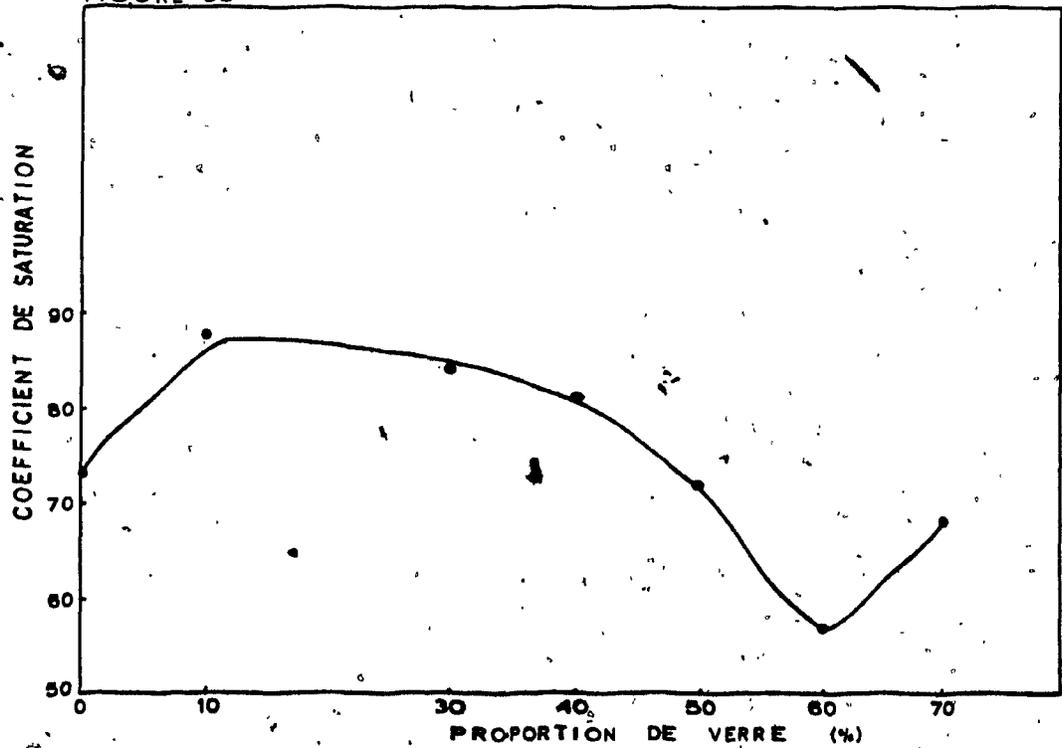
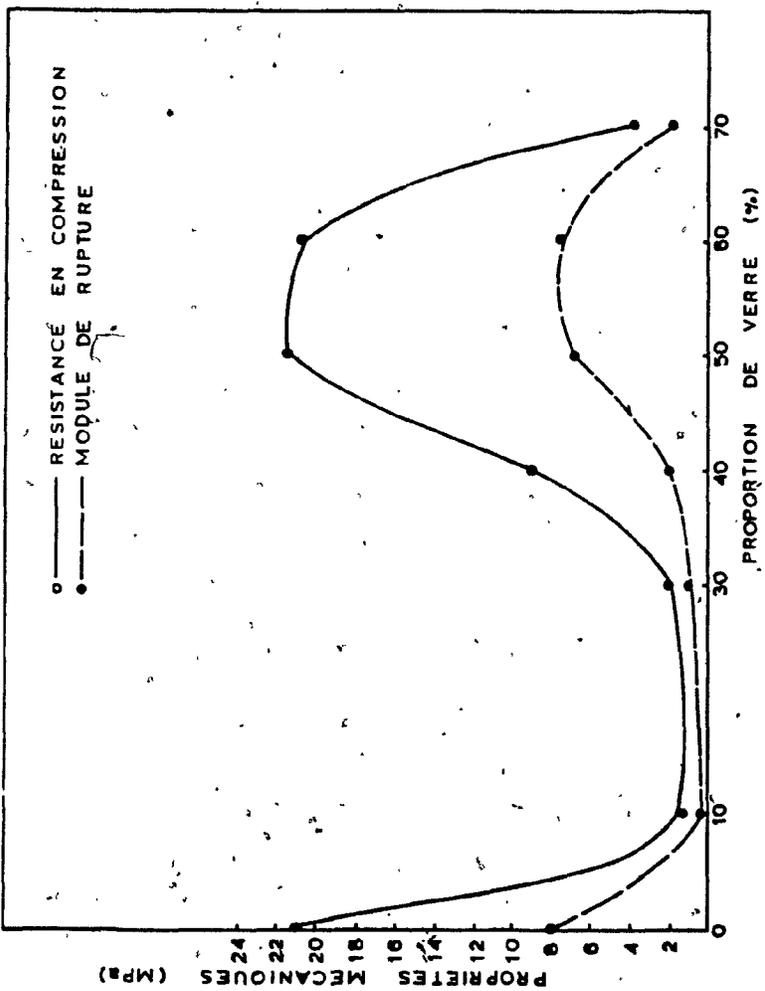
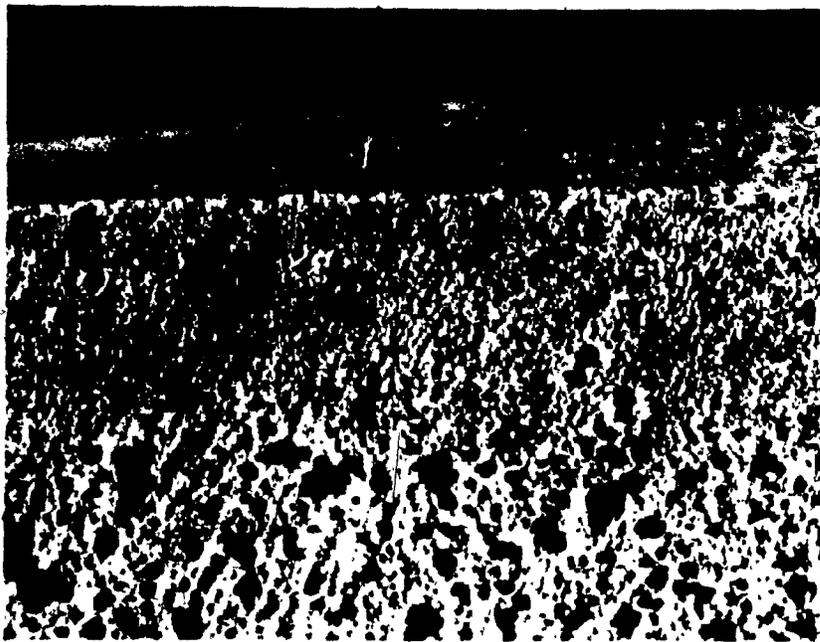


FIGURE 56 Propriétés mécaniques en fonction de la proportion de déchets de verre.



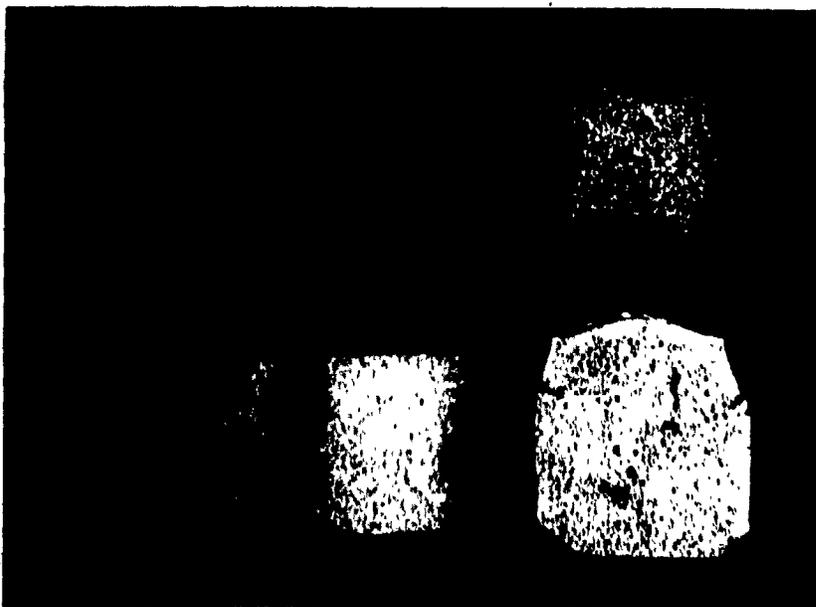
**PHOTOGRAPHIE NO 13**  
**EFFET DE SURFACE**



**PHOTOGRAPHIE NO 14**  
**VARIATION DE LA PROPORTION DE DE-**  
**CHETS DE VERRE - CUISSON A 900°C**

POURCENTAGES = 10, 30, 40

50, 60, 70



### 4.3.2 Variation de la température de cuisson

#### EXPERIENCE

Pour chaque composition, 2 échantillons furent fabriqués à partir de mélanges constitués de 150 gr d'argile et de 150 gr de déchets de verre broyé auxquels furent ajoutées 20 gr de sciures de bois (6.7% par poids; voir annexe F pour l'analyse granulométrique de particules d'argile de verre et de sciures). 25 gr d'eau fut ajouté aux matières sèches et les mélanges furent moulés sous une pression de 3.4 MPa, malaxés et séchés suivant le même processus que pour ceux constitués d'argile et de sciures. Un pallier de 5 heures à 500°C fut maintenu et par la suite les échantillons furent cuits à une température, de 900, 950, 1000 et 1050°C pendant 5 heures.

#### RESULTATS ET DISCUSSION

Les figures nos 57 à 62 inclusivement illustrent les effets de la variation de la température (abscisses) et les variations de la proportion de verre qui se substitue à l'argile (les quatre différentes courbes que l'on retrouve dans chacune des figures) sur les propriétés physiques et mécaniques.

Comme le démontre la figure no 57 (Courbes de la variation de la densité apparente en fonction de la température de cuisson pour différentes proportions de déchets de verre), la variation de la température maximale de cuisson de 900 à 1000°C n'a que peu d'effet sur la densité apparente des échantillons. De 1000 à

1050°C toutefois, la densité accuse une augmentation marquée quelque soient les proportions de verre considérées. Les densités apparentes passent de 1.41 gr/cc à 900°C lorsque la quantité de verre est égale à 10%, jusqu'à 1.70 gr/cc à 1050°C lorsque la quantité de verre est égale à 50%. Cette hausse de la densité est bien illustré par la photographie no-15 qui montre les variations de volumes des échantillons cuits fabriqués à partir de 50% de verre et cuits à des température de cuisson de 900 à 1050°C. On constate aisément la diminution sensible de volume subit par l'échantillon cuit à 1050°C. Pour une proportion de verre égale à 10%, quelque soit la température maximale de cuisson considérée, la densité apparente ne varie pas de façon significative. Cette absence de rétrécissement à haute température est un indice d'une consolidation inadéquate des particules d'argile entre elles. Les grains de verre semblent s'être interposés entre les grains d'argile pour empêcher la formation de liens céramiques, tout en n'étant pas suffisamment nombreux pour enrober les particules d'argile, les lier, et former une matrice structurale après la cuisson. Lorsque le verre est présent dans une proportion égale à 30, 40 et 50%, il n'y a pas de contraction significative des échantillons à 900, 950 ou 1000°C. Toutefois, à 1050°C, le verre présent dans les mélanges se ramolit et remplit les pores créés par la combustion des sciures.

La variation de la température maximale de cuisson a pour effet de diminuer les taux d'absorption dans l'eau froide. De 900 à 950°C, les taux sont constants, mais commencent à baisser de façon significative à 1000°C dans le cas d'échantillons fabriqués à

partir de 40 et 50% de déchets de verre broyés et à partir de 1050°C pour ceux fabriqués à partir de 10 et 30% de déchets de verre. Ainsi pour les échantillons fabriqués à partir de 50% de verre, la diminution lorsque la température de cuisson passe de 900 à 1050°C est de 23%; de 24% dans le cas des échantillons constitués de 40% de verre et de 10 et 3% pour ceux fabriqués à partir de 30 et 10% de verre respectivement. De la même façon l'augmentation de la proportion de verre dans les mélanges a tendance à diminuer les taux d'absorption dans l'eau bouillante, en particulier à des températures de cuisson élevées.

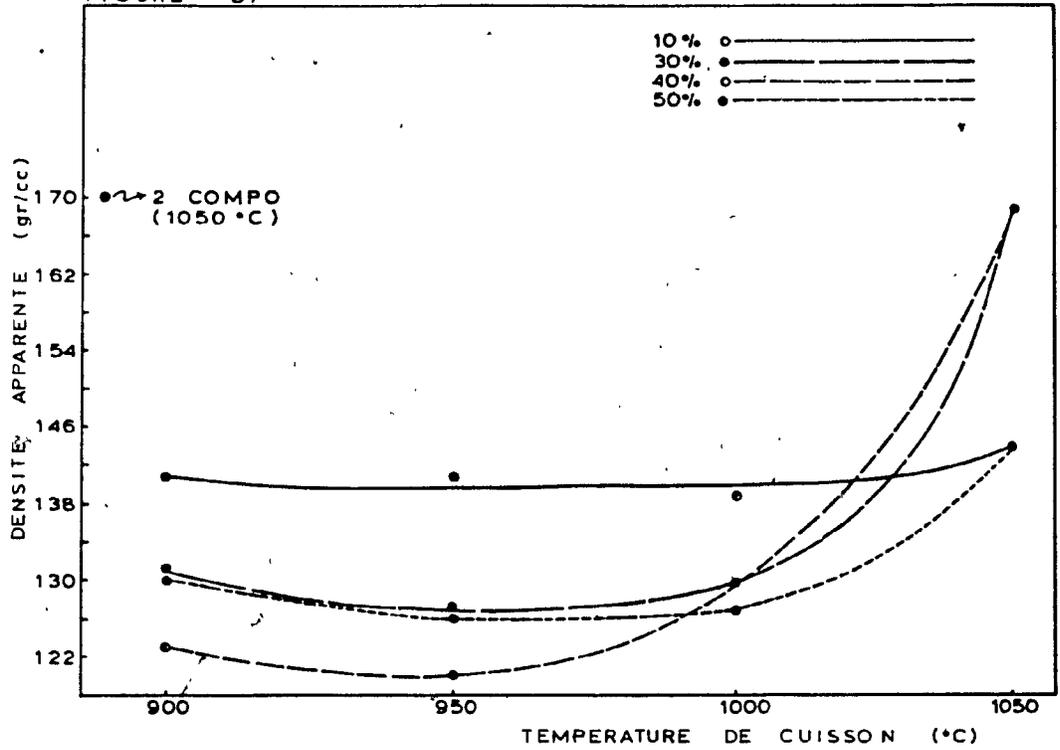
Le coefficient de saturation diminue en fonction de la température et de la proportion de déchets de verre. De 900 à 1050°C pour les mélanges cuits constitués de 10% de verre, la diminution du coefficient est de 0.09; elle est de 0.05, 0.21 et de 0.32 en ce qui concerne les mélanges composés respectivement de 30, 40 et 50% de verre. A des températures de 1000 et 1050°C, les taux d'absorption diminuent car le verre s'est alors considérablement ramolli et comble en partie les vides d'air se trouvant à l'intérieur des échantillons pour sceller partiellement la structure poreuse restante. Plus la proportion de verre est grande, plus elle a des chances de constituer une matrice enrobant intimement les interstices entre les grains d'argile et les pores pour constituer autour de ceux-ci, dans les échantillons cuits, des parois imperméables. Le nombre de pores ouverts décroît ou devient plus difficilement accessibles par l'eau à température ambiante, ce qui explique la diminution du coefficient de saturation.

La résistance en compression augmente de façon significative au fur et à mesure que la température maximale de cuisson croît. Une exception toutefois doit être notée dans le cas des échantillons constitués de 50% de verre: de 900 à 950°C, la résistance en compression accuse une hausse marquée passant de 21 MPa à plus de 30 MPa et par la suite elle diminue lorsque la température maximale de cuisson est de 1000°C et 1050°C. Une autre constatation peut être faite: la résistance croît en fonction de la proportion de verre dans les mélanges et les raisons qui expliquent ce phénomène ont été mentionnées à la section précédente. Lorsque le verre est présent dans les mélanges dans une proportion de 50%, sa quantité est suffisante pour enrober et lier l'ensemble des grains d'argile et former une matrice structurale après une cuisson à une température maximale de 900°C. La résistance des échantillons cuits à cette température est alors approximativement égale à celle des briques d'argile-sciures cuites à une température de 1050°C pendant 5 heures. La résistance augmente ensuite de façon sensible lorsque la température maximale de cuisson est de 950°C, mais diminue par la suite après une cuisson à 1000 et 1050°C. En effet l'examen visuel des surfaces des échantillons cuits à 1050°C fait ressortir la présence de nombreuses fissures (voir photo no 16) comme si les particules de verre en remplissant les pores avaient engendré des rétrécissements localisés du matériau et non pas des pertes de volume homogènes de l'ensemble de la masse des échantillons. Ces rétrécissements ponctuels ont ouvert la structure et réduits les propriétés mécaniques après une cuisson à haute température.

**Conclusion**

La proportion optimale de verre dans les mélanges est de 50%. Pour cette proportion de déchets de verre, les mélanges cuits à une température maximale de 900°C ont une résistance en compression supérieure à 20 MPa et coefficient de saturation d'environ 0.72 tout comme pour les briques d'argile-sciures, bien qu'ayant une densité apparente sensiblement inférieure: 1.30 gr/cc au lieu de 1.70 gr/cc pour le système à 2 composantes. Les taux d'absorption dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante des briques d'argile-verre-sciures sont toutefois plus élevés que pour les briques constituées uniquement d'argile et de sciures, 75 et 36% au lieu de 12 et 17%. Si on augmente la température de cuisson de 900 à 950°C, les propriétés physiques restent inchangées, mais la résistance en compression croît de façon marquée pour atteindre 31 MPa.

FIGURE 57 Densité apparente en fonction de la température de cuisson.



Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la température de cuisson.

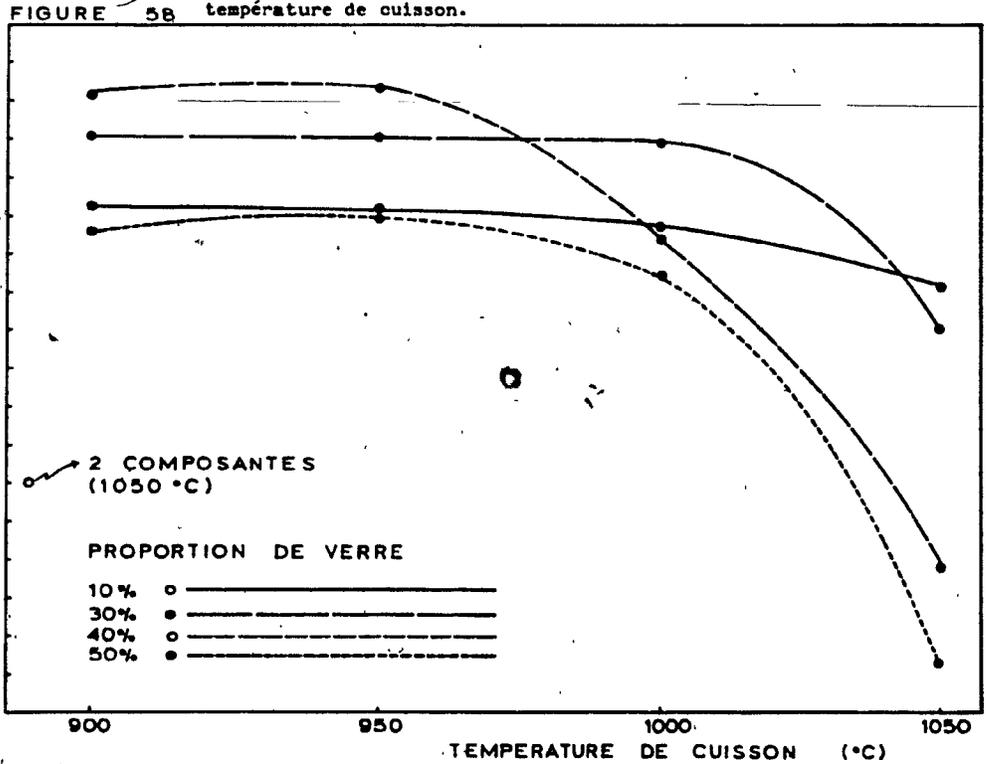


FIGURE 59 Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la température de cuisson.

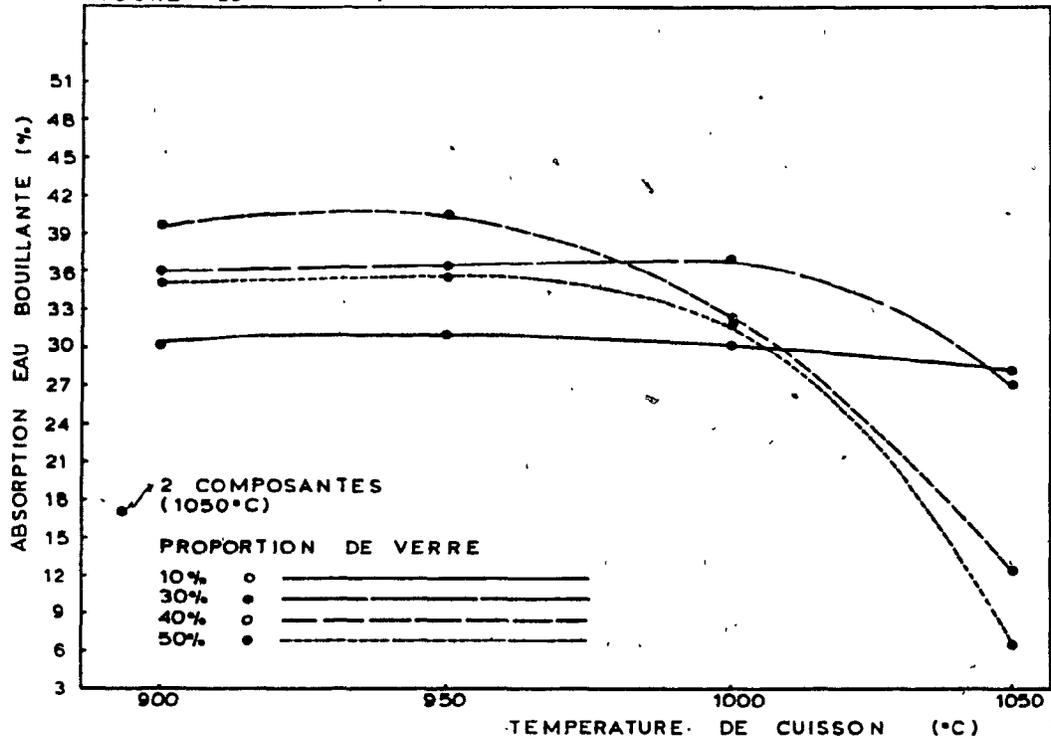
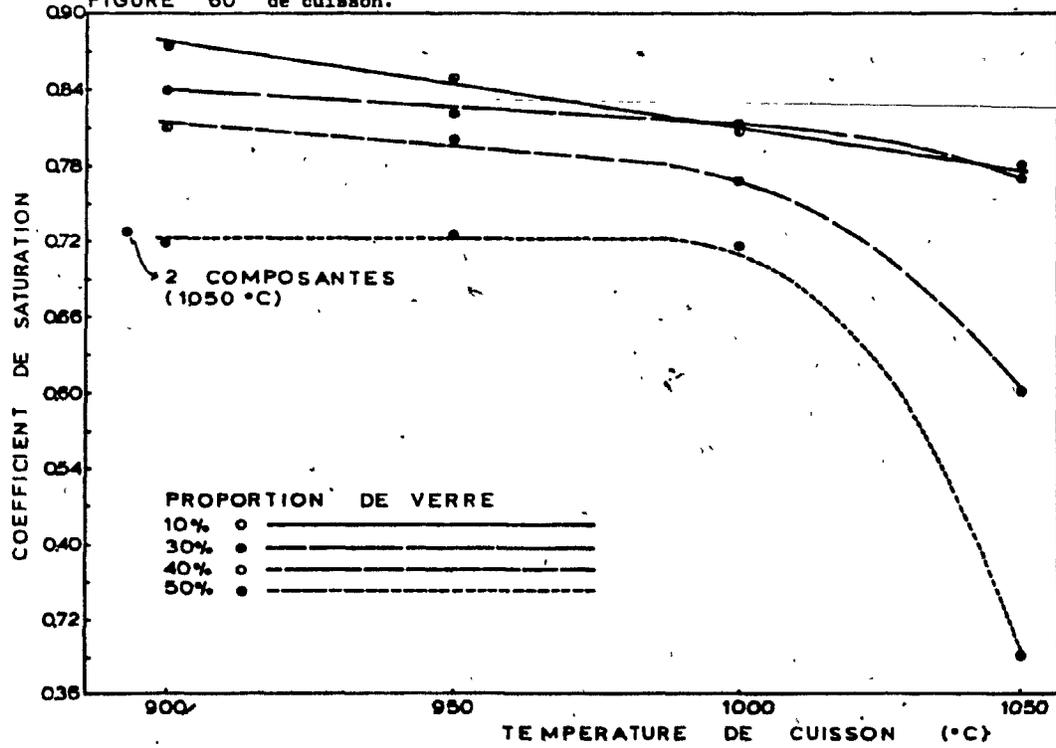
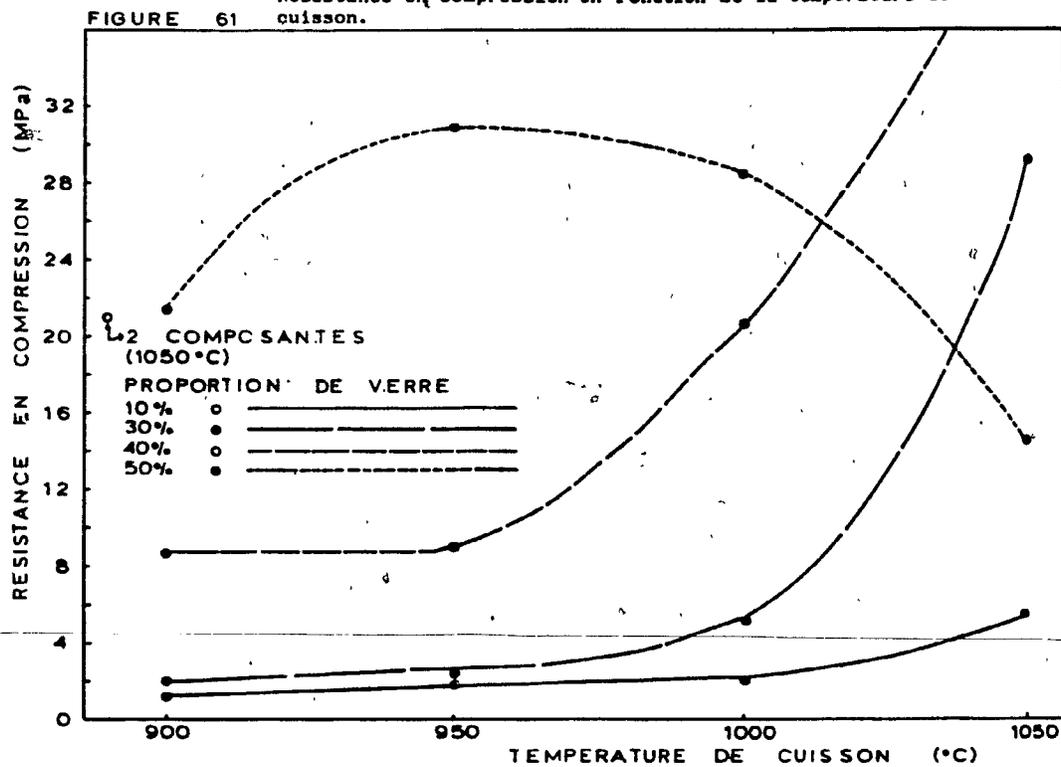


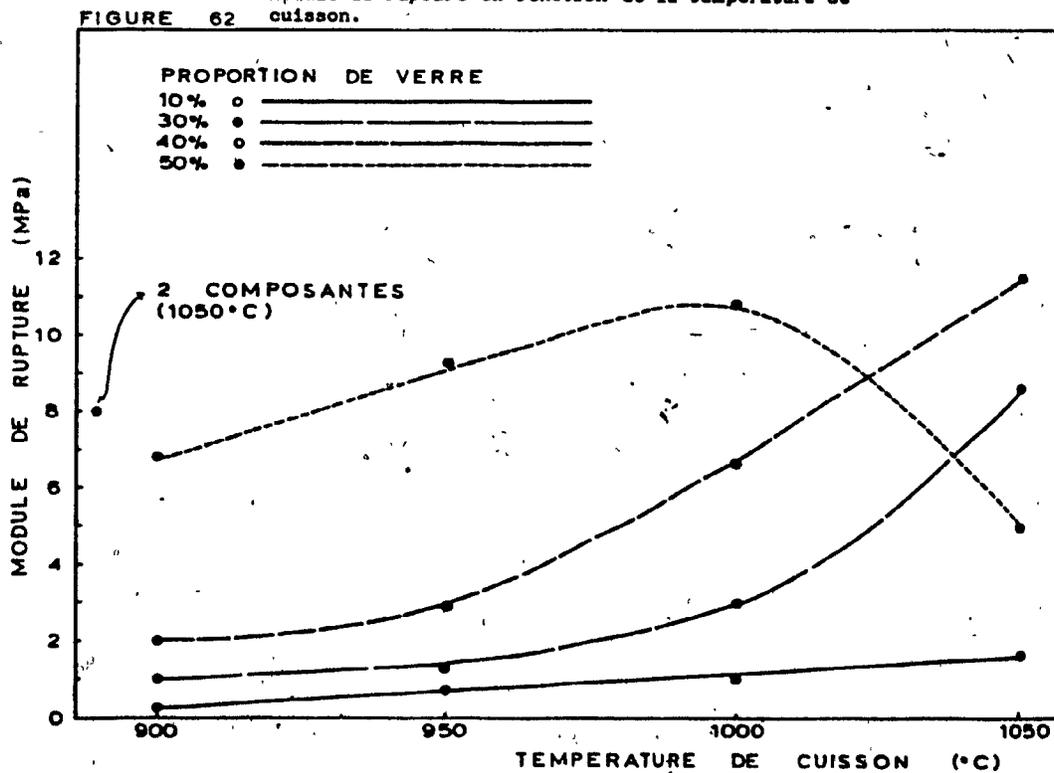
FIGURE 60 Coefficient de saturation en fonction de la température de cuisson.



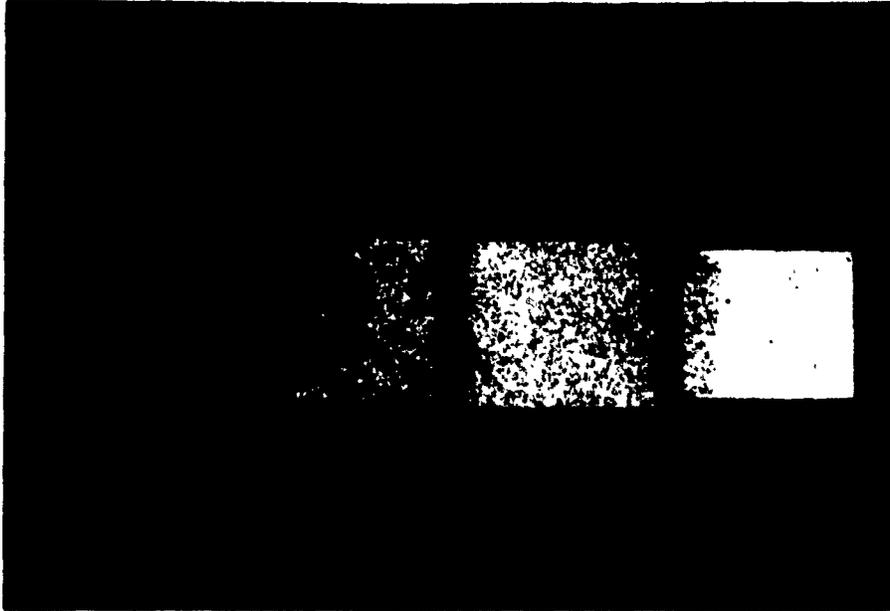
Résistance en compression en fonction de la température de cuisson.



Module de rupture en fonction de la température de cuisson.



**PHOTOGRAPHIE NO 15  
VARIATIONS DE VOLUME**



**PHOTOGRAPHIE NO 16  
FISSURATION DE LA SURFACE  
(7X)**



### 4.3.3 Variation de la quantité de sciures

#### Expérience

Pour chaque composition, 2 échantillons furent fabriqués à partir de mélanges constitués de 150 gr d'argile, de 150 gr de déchets de verre broyés auxquels ont été ajoutés des poids variables de sciures de bois: de 1 à 7% par poids (voir annexe F pour l'analyse granulométrique des particules d'argile, de déchets de verre et de sciures). 25 gr d'eau furent ajoutés aux matières sèches et les mélanges furent moulés sous une pression de 3.4 MPa. Les échantillons furent cuits pendant 5 heures à 500°C et par la suite 5 heures à 900°C.

#### RESULTATS ET DISCUSSION

Comme dans le cas du système à 2 composantes (argile-sciures), l'augmentation de la quantité de sciures entraîne une diminution linéaire de la densité apparente des échantillons cuits (voir Fig. no 63: Courbes des variations de la densité apparente en fonction de la quantité de sciures pour les systèmes à 2 et à 3 composantes). Qu'il s'agisse du système à 2 ou à 3 composantes la pente est presque la même. Mais dans tous les cas, quelque soit le pourcentage de sciures considéré, les valeurs du système à 3 composantes (verre-argile-sciures) sont inférieures. La densité apparente des échantillons composés de verre et d'argile sans aucune sciures ajoutées est de 1.86 gr/cc et cette valeur diminue jusqu'à environ 1.40 gr/cc lorsque la quantité de sciures ajoutées est de 7% par poids. La densité apparente des briques cuites d'argile-verre-sciures

est plus faible étant donné que la densité réelle du verre est inférieure à celle de l'argile et que le volume des échantillons argile-verre-sciures après le moulage est plus grand que celui des briques d'argile-sciures, dû à un tassement différent des particules de verre, d'argile et de sciures entre elles.

Les taux d'absorption dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante augmentent de façon linéaire lorsque la quantité de sciures passe de 0 à 7% par poids suivant le même taux que le système à 2 composantes (voir Fig. no 64: Courbe de la variation des taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la quantité de sciures). Les valeurs sont toutefois plus élevées dans le cas des échantillons verre-argile-sciures, et aux taux d'absorption dans l'eau bouillante, les valeurs sont plus du double que celles obtenues avec les briques argile-sciures (voir Fig. no 65: Courbe de la variation des taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la quantité de sciures). En ce qui a regard au coefficient de saturation, les systèmes à 2 et à 3 composantes ne se comportent pas de la même façon (voir Fig. no 66: Courbe de la variation du coefficient de saturation en fonction de la quantité de sciures). Alors que dans le cas des briques d'argile-sciures, le coefficient de saturation a tendance à augmenter au fur et à mesure que la quantité de sciures augmente, le coefficient de saturation du système à 3 composantes (argile-verre-sciures) a tendance, lui, à diminuer passant de 0.78 pour les mélanges verre-argile sans sciures ajoutées à 0.72 lorsqu'environ 7% (par poids) de particules de sciures sont ajoutées aux mélanges. Les taux d'absorption plus élevés des échantillons

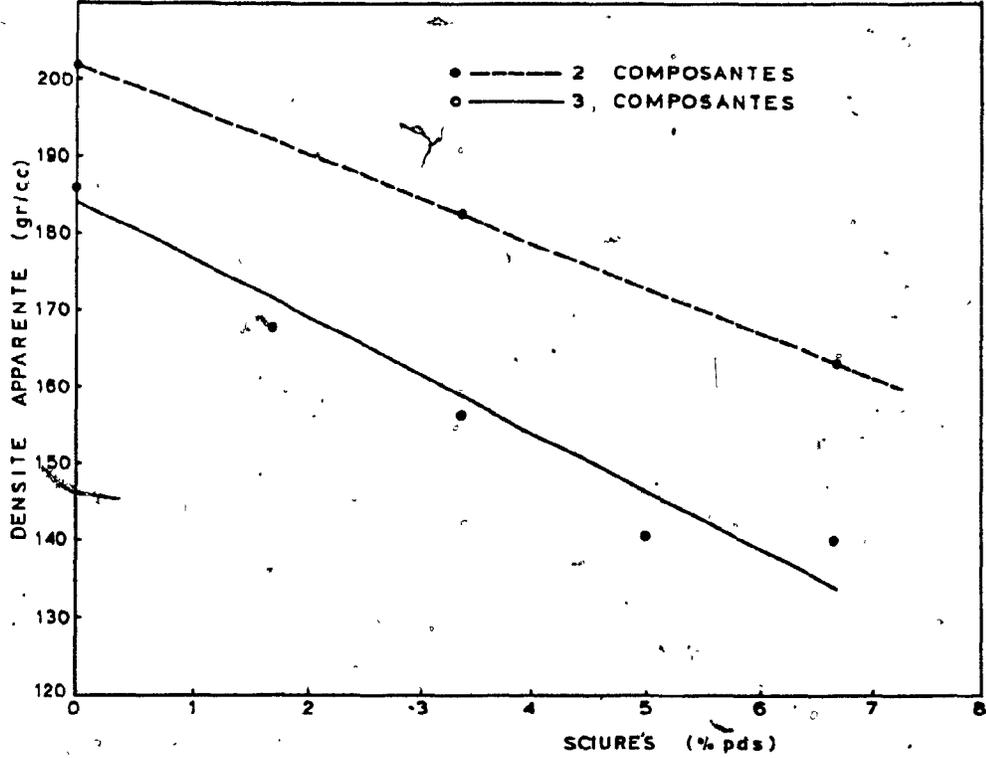
argile-verre-sciures comparés au système à 2 composantes sont causés par une porosité qui est plus importante dans le cas des mélanges de verre. En ce qui a regard à la baisse du coefficient de saturation en fonction de la quantité de sciures ajoutée, elle se justifie par le fait que les passages ou les canaux dans les échantillons cuits d'argile-verre-sciures sont plus étroits et que l'absorption par action capillaire dans le cas du verre est inférieure à celle de l'argile.

Les résistances en compression, pour les systèmes à 2 ou à 3 composantes, sont approximativement les mêmes quelque soit la quantité de sciures ajoutées (voir Fig. no 67: Courbes de la variation de la résistance en compression en fonction de la quantité de sciures). La résistance en compression passe de 50 MPa environ à 21 MPa lorsque la proportion de sciures augmente de 0 à 7% par poids environ. Les résistances sont identiques en dépit du fait que les densités apparentes, tels qu'illustré à la figure no 63, sont différentes. Bien que la porosité soit accrue dans le cas des échantillons d'argile-verre-sciures, les grains de verre semblent avoir été suffisamment petits et abondants dans les mélanges, au moment de la cuisson pour enrober adéquatement les grains d'argile et de sciures et de former des liens solides après la période de refroidissement, après que le verre ramoli se soit resolidifié.

#### Conclusion

une température maximale de cuisson de 900°C maintenue

FIGURE 63 Densité apparente en fonction de la quantité de sciures.



Taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la quantité de sciures.

FIGURE 64

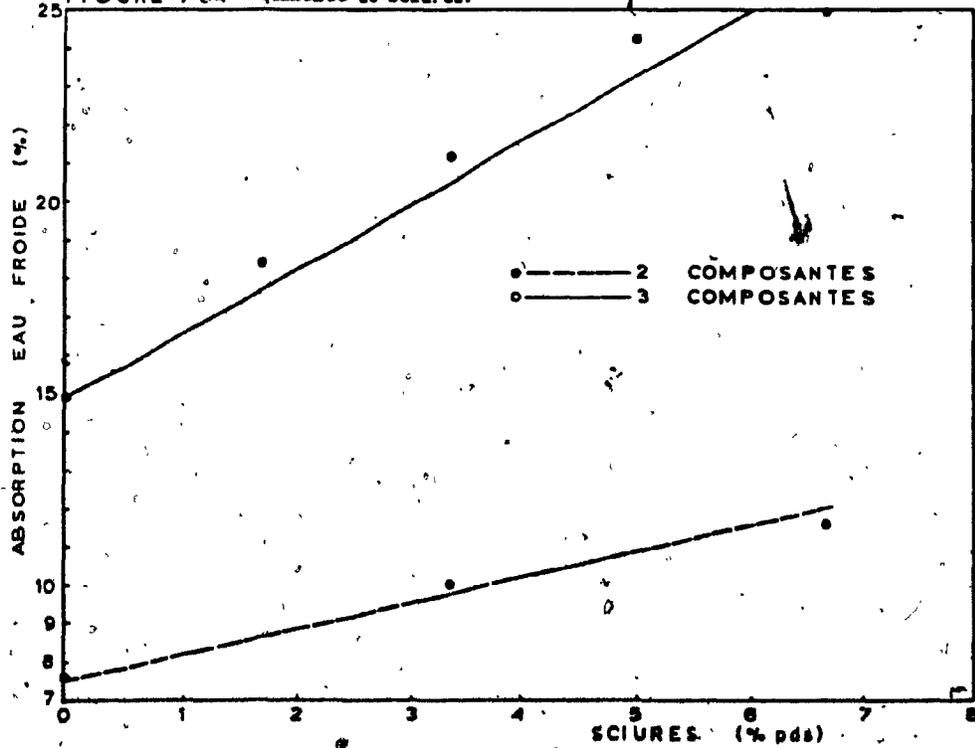


FIGURE 65 Taux d'absorption dans l'eau bouillante en fonction de la quantité de sciures.

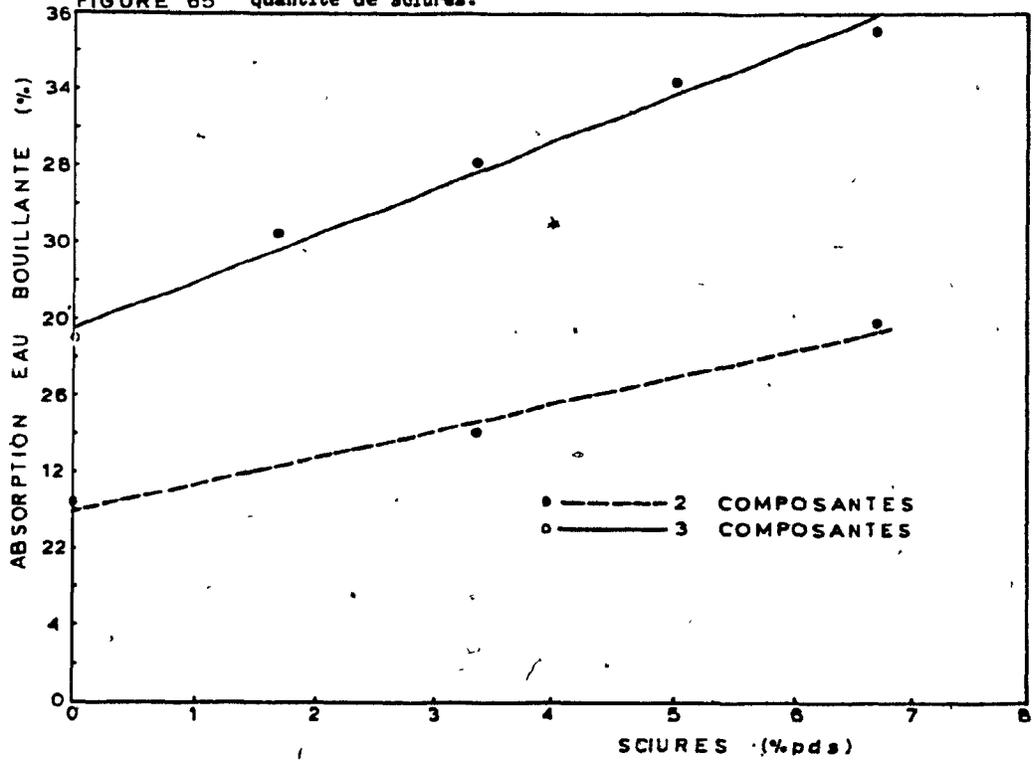


FIGURE 66 Coefficient de saturation en fonction de la quantité de sciures.

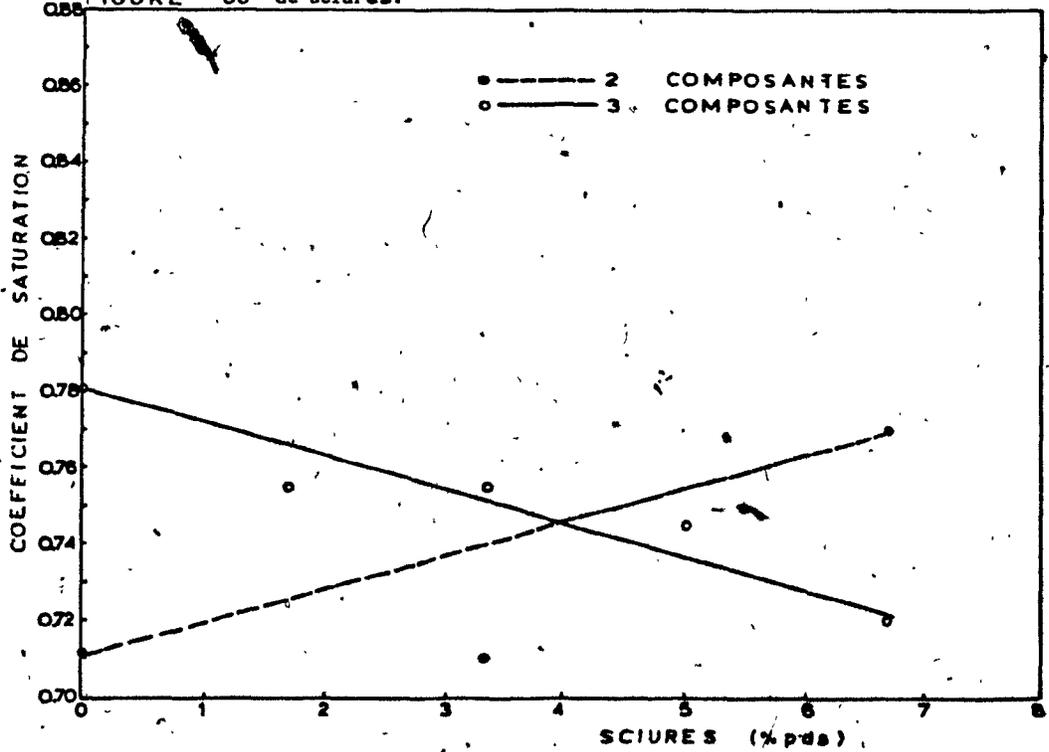
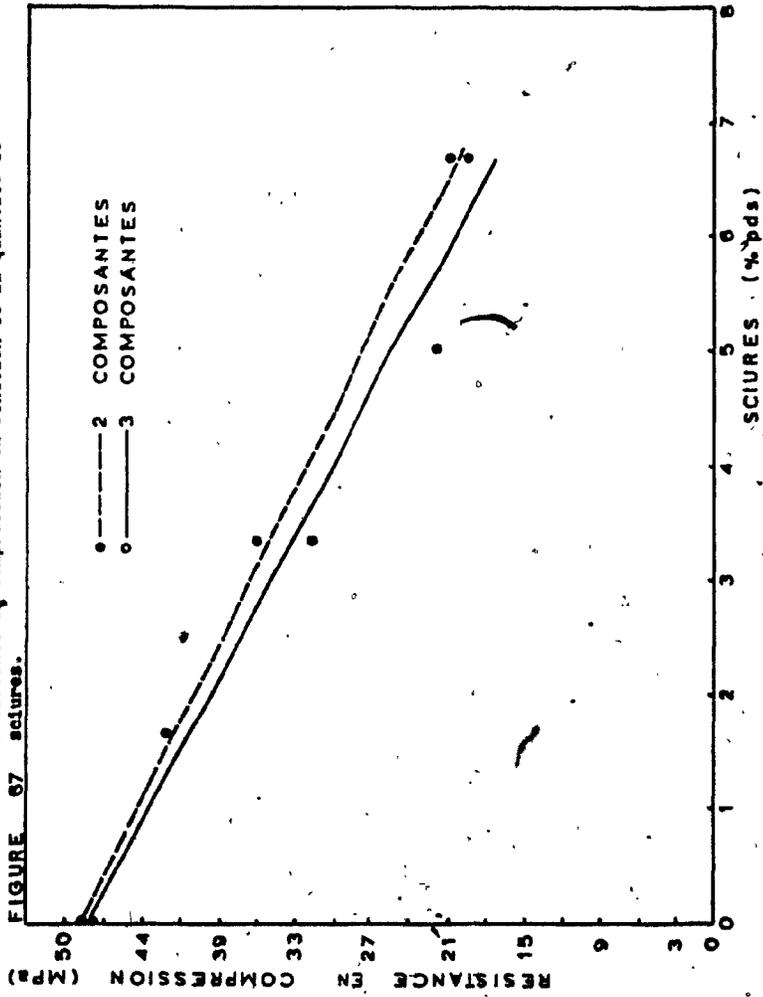


FIGURE 67 Résistance eq compression en fonction de la quantité de sciures.



pendant 5 heures, le système à 3 composantes argile-verre-sciures, quelque soit la quantité des sciures ajoutées produit des échantillons cuits aux résistances en compression identiques aux briques cuites d'argile-sciures mais avec des densités apparentes sensiblement plus faibles et des taux d'absorption dans l'eau froide comme dans l'eau bouillante plus élevés, et un coefficient de saturation qui diminue au fur et à mesure que la quantité de sciures augmente.

#### 4.3.4 Conclusion

L'addition de déchets de verre broyés, une 3<sup>e</sup> composante au système argile-sciures, modifie les propriétés physiques et mécaniques des échantillons.

En premier lieu, l'ajout d'une quantité croissante de verre en substitution de l'argile (de 10 à 70% par poids de l'argile) abaisse la densité apparente des échantillons cuits, et les taux d'absorption et le coefficient de saturation diminuent. Pour des échantillons cuits de mêmes densités apparentes et pour une proportion de verre de 50%, les propriétés mécaniques des briques argile-verre-sciures sont nettement supérieures à celles du système argile-sciures et ce après une cuisson de 5 heures à une température maximale de 900°C au lieu de 1050°C.

En second lieu, l'augmentation de la température de cuisson affecte aussi de façon sensible la densité, les taux d'absorption et le coefficient de saturation. Une élévation de température de 900 à

950°C augmente de façon marquée la résistance en compression et le module de rupture des échantillons constitués de 50% de verre tout en maintenant au même niveau les propriétés physiques. Lorsque les températures de cuisson sont de 1000 et 1050°C, la densité augmente, tandis que les taux d'absorption, le coefficient de saturation et les propriétés mécaniques diminuent.

Finalement, en troisième lieu, l'addition d'une quantité croissante de sciures diminue la densité apparente des échantillons cuits, réduit leur résistance en compression et les rend plus absorbants, de la même façon d'ailleurs que pour le système argile-sciures, sauf en ce qui concerne le coefficient de saturation qui, lui, diminue.

Pour le système à 3 composantes argile-verre-sciures, les meilleurs résultats furent obtenus à partir de la composition suivante: 1 partie en poids de déchets de verre broyés pour une partie d'argile auxquelles s'ajoute 7% de sciures par poids. Ces échantillons, après une cuisson de 5 heures, ont une résistance en compression de 21 MPa lorsque la température est de 900°C et de 31 MPa lorsque la température de cuisson est de 950°C. Les normes CSA A82.2 et A82.7 spécifient que la résistance en compression minimale doit être de 20.7 MPa. Il a donc été possible de réduire la densité apparente par rapport au système argile-sciures tout en conservant la résistance en compression minimale requise. Afin d'obtenir des valeurs plus significatives, 6 échantillons au lieu de 2 ont été fabriqués et les résultats ont été colligés au tableaux nos 31

et 32. En comparant les résultats obtenus avec les minimums requis par les normes A82.2 et A82.7, on note que les résistances en compression et les coefficients de saturation excèdent les valeurs prescrites pour les briques de revêtement extérieur. Bien que les taux d'absorption soient substantiellement supérieurs aux valeurs maximales spécifiées, 70 cycles de gel-dégel (nombre de cycles minimal spécifié: 50) ont été complétés sans qu'il y ait détérioration significative de la structure des échantillons où une baisse appréciable de leur résistance en compression.

Les propriétés physiques et mécaniques des systèmes à une, deux et 3 composantes fabriquées dans chacun des cas à partir des compositions optimales ont servi à tracer les courbes des figures nos 68 à 71 en fonction de la densité apparente. La variation des densités apparentes est due à une variation des quantités de sciures ajoutées, à une modification de la pression exercée sur les mélanges au moment du moulage ou, dans le cas du système à 1 composante, à des cuissons différentes. En examinant ces figures, l'avantage de l'addition d'une troisième composante, les déchets de verre broyés, ressort clairement. Tel qu'illustrée par la figure no 68 (Courbes de la variation des taux d'absorption dans l'eau froide en fonction de la densité apparente), les taux d'absorption dans l'eau froide des échantillons d'argile-verre-sciures, sont inférieurs aux briques d'argile-sciures quelque soit la densité apparente considérée. Par contre, les taux d'absorption dans l'eau bouillante sont approximativement les mêmes. Des différences très marquées existent toutefois en ce qui concerne le coefficient de saturation. Dans tous

les cas les briques d'argile-verre-sciures ont un coefficient de saturation inférieure et l'écart s'accroît au fur et à mesure que la densité apparente diminue. Enfin la résistance en compression est considérablement plus élevée pour le système à 3 composantes.

La substitution de 50% de l'argile dans les mélanges argile-sciures par des déchets de verre broyés entraîne une augmentation très marquée de la résistance en compression ainsi qu'une baisse du taux d'absorption dans l'eau froide et du coefficient de saturation, tout en réduisant la température maximale de cuisson requise qui passe alors de 1050°C, dans le cas des briques d'argile-sciures à 900°C seulement pour le système à 3 composantes. Ainsi un échantillon de 1.30 gr/cc aura dans le cas d'un système à 2 composantes un taux d'absorption dans l'eau froide de 29%, dans l'eau bouillante de 34%, un coefficient de saturation de 0.90 et une résistance en compression de 4 MPa seulement. Un échantillon cuit d'argile-verre-sciures de même densité aura un taux d'absorption dans l'eau froide de 24%, dans l'eau bouillante de 32%, un coefficient de saturation de 0.75, et une résistance en compression de 30 MPa.

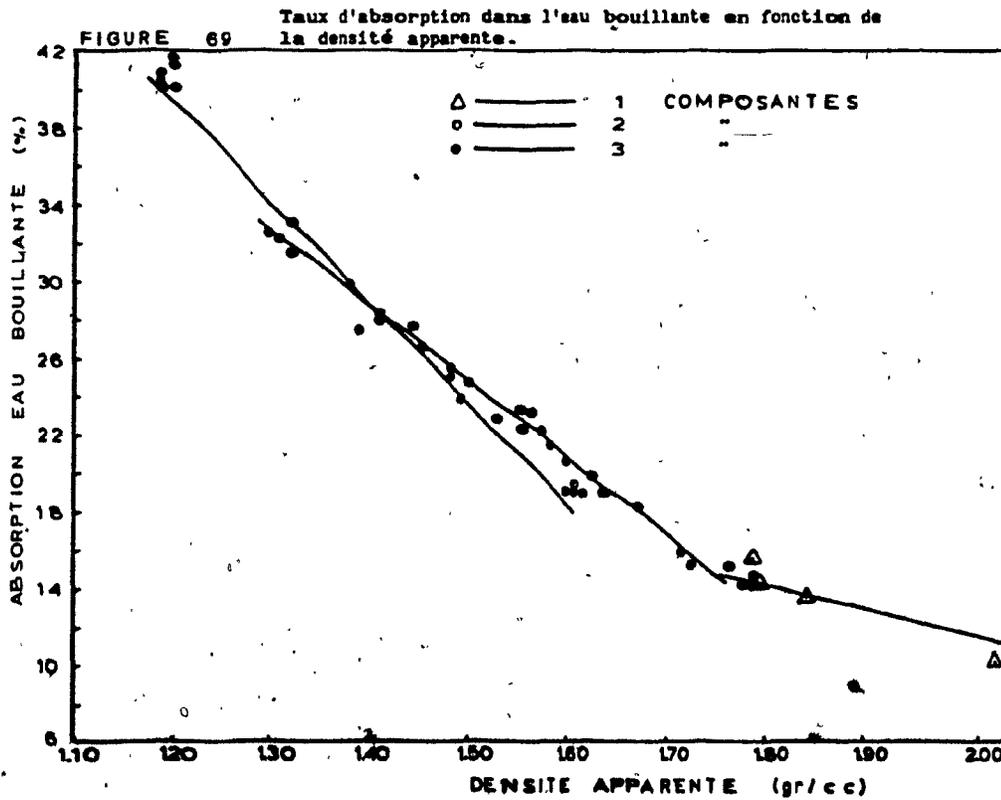
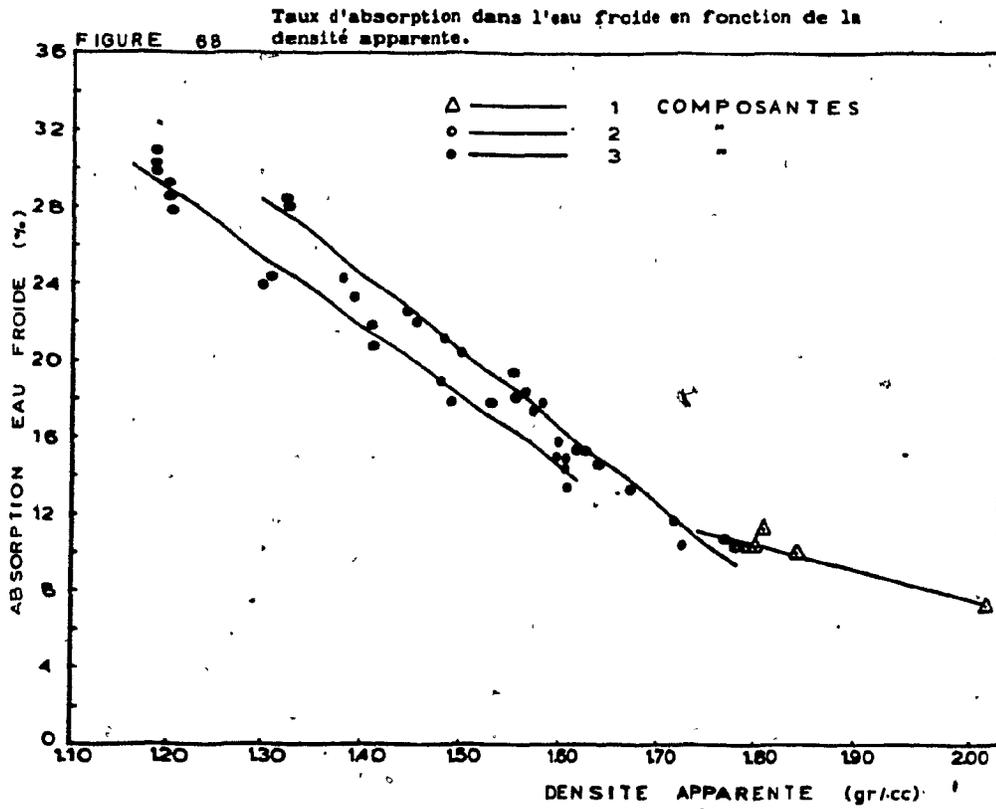


FIGURE 70 Coefficient de saturation en fonction de la densité apparente.

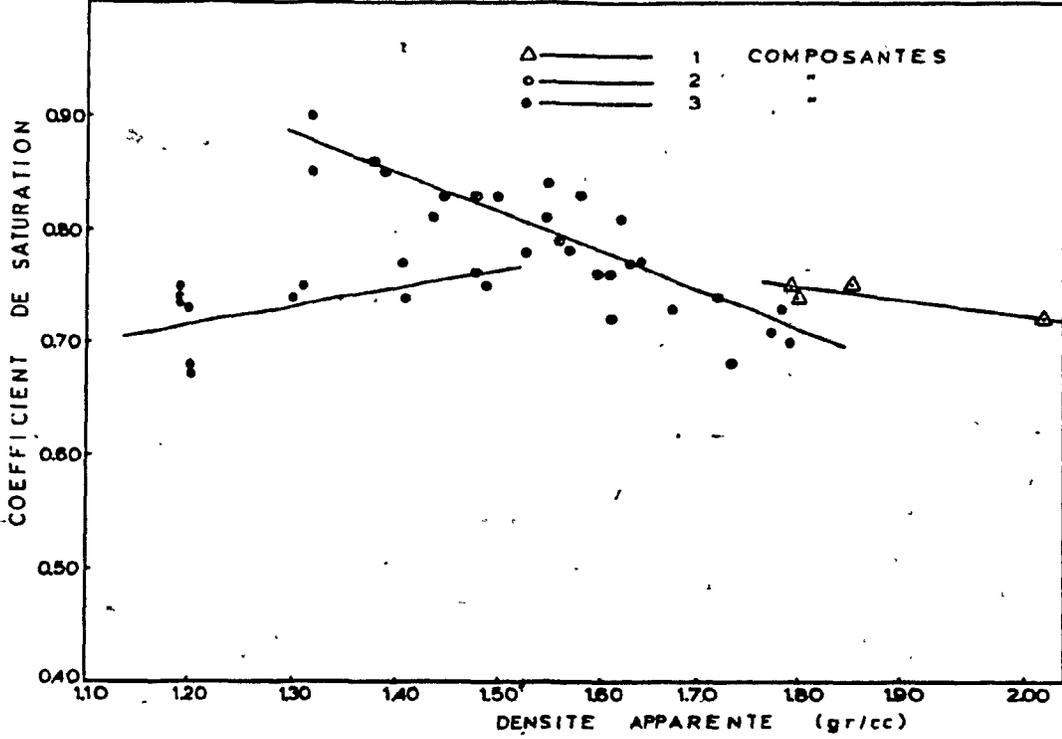
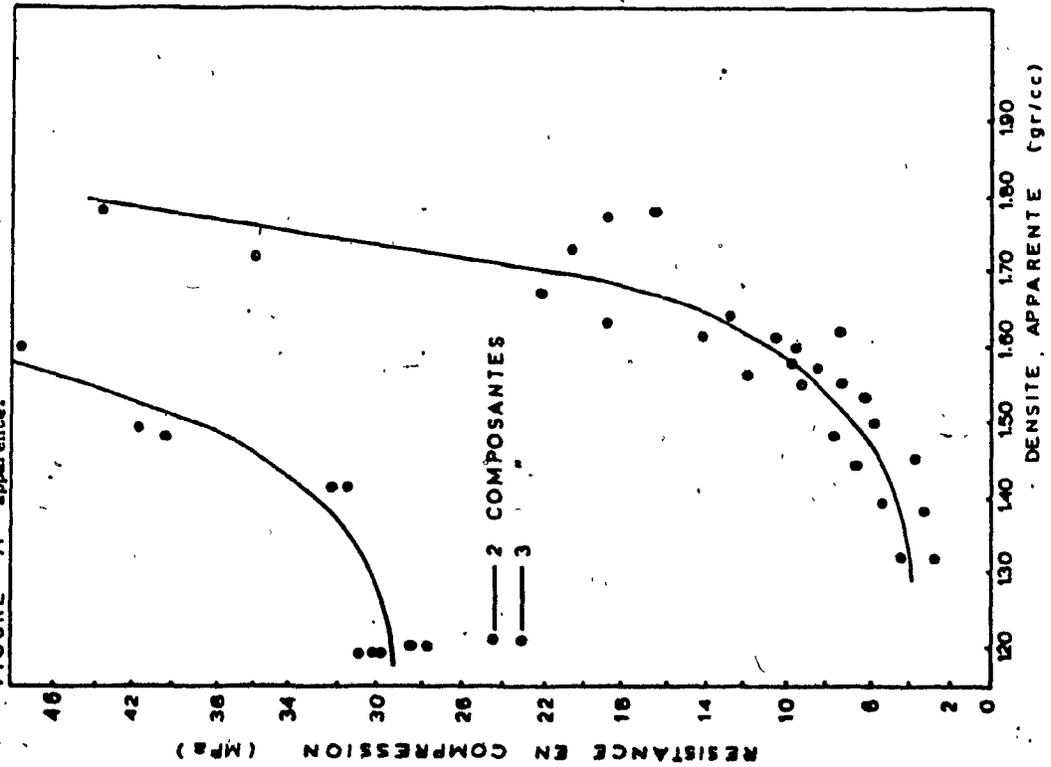


FIGURE 71 Résistance en compression en fonction de la densité apparente.



#### 4.4 CONDUCTIBILITE THERMIQUE DES SYSTEMES A 1, 2 et 3 COMPOSANTES

##### EXPERIENCE

Seize échantillons circulaires d'un diamètre égale à 15 cm ont été fabriqués et testés à l'aide d'un instrument de mesure spécialement conçu pour évaluer la conductibilité thermique suivant la méthode décrite par la norme ASTM C-77: le "Dynatech Guarded Hot-Plate". Ces échantillons ont été préparés, séchés et cuits suivant les paramètres optimaux propres aux systèmes à 1, 2 et 3 composantes. Les échantillons sortis du four ont été refroidis, soumis aux conditions ambiantes de température et d'humidité. Deux entailles ont été pratiquées sur chacune de leur face de façon à y insérer des thermocouples. Par la suite, ils ont été insérés dans le "Dynatech guarded hot-plate" afin de mesurer la conductibilité thermique de chaque paire d'échantillons.

##### RESULTATS ET DISCUSSION

A partir des résultats obtenus, 2 séries de courbes ont été tracées. En ce qui a regard à la première série, la conductibilité thermique ( $W/m^{\circ}C$ ) a été établie en fonction de la quantité de sciures ajoutées (en % par poids) et ce pour les systèmes à 2 et à 3 composantes. Deux graphiques ont été tracés: l'un établissant la conductibilité thermique à une température de  $25^{\circ}C$  et l'autre à  $100^{\circ}C$  (voir Figs. nos 72 et 73). En ce qui concerne la 2<sup>e</sup> série, la conductibilité thermique fut établie en fonction de la densité apparente des échantillons cuits des systèmes à 2 et à 3

composantes, à une température de 25°C (voir Fig. no 74).

Il ressort de l'analyse des graphiques de la première série (Figs. nos 72 et 73) que la conductibilité thermique des échantillons cuits, qu'il s'agisse du système à 2 ou à 3 composantes diminue en fonction de l'accroissement de la teneur en sciures ajoutées dans les mélanges lors de la préparation des échantillons. Sans sciures ajoutées (0% par poids) les conductibilités des systèmes à 2 et à 3 composantes varient de façon très marquée: 0.53 W/m°C pour les échantillons d'argile-sciures et 0.29 W/m°C pour les échantillons de verre-argile-sciures. Toutefois, pour des teneurs en sciures de 4, 8 et 12% (par poids), cet écart disparaît presque complètement et les valeurs obtenues sont presque les mêmes. Additionner 4% par poids de sciures aux mélanges d'argile fait chuter le facteur "k" de 0.53 à 0.29 alors qu'il ne diminue que de 0.29 à 0.27 W/m°C dans le cas des mélanges verre-argile-sciures. Quand la quantité des sciures passe de 4 à 12%, la conductibilité du système à 2 composantes diminue de 0.29 à 0.22 et pour celui à 3 composantes de 0.27 à 0.21 W/m°C. Ces mêmes remarques prévalent pour le graphique no 73 alors que la conductibilité est établie en fonction de la teneur en sciures, mais à une température de 100°C au lieu de 25°C; on remarque alors les mêmes variations sauf une légère augmentation générale du facteur "k".

L'examen de la figure no 74 (Courbes de la variation de la conductibilité thermique en fonction de la densité apparente) met en évidence le fait que la conductibilité augmente en fonction de la

densité apparente des échantillons cuits. On peut constater que pour une densité apparente inférieure à 1.65 gr/cc la conductibilité du système à 2 composantes est inférieure aux valeurs obtenues pour les échantillons de verre-argile-sciures que la température soit de 25 ou 100°C.

L'augmentation de la résistance thermique en fonction de la quantité de sciures ajoutée aux mélanges s'explique par le fait que les conductibilités varient en fonction de la quantité d'air emprisonnée dans la masse du matériau entre les particules solides constituantes. L'air étant un piètre conducteur de chaleur, sa présence en volume croissant tend à augmenter la résistance au passage de la chaleur. Or le fait d'ajouter des sciures de bois aux mélanges, ces sciures se consumant durant la cuisson et libérant des vides d'air, accroît le volume poreux des échantillons après la cuisson et contribue donc à diminuer la conductibilité thermique. La variation de la conductibilité thermique en fonction de la densité apparente des échantillons cuits s'explique de la même façon. Toutefois, on peut constater à l'examen de la figure no 74 que les échantillons du système à 3 composantes argile-verre-sciures avaient pour des densités inférieures à 1.65 gr/cc, une conductibilité thermique supérieure à celles des échantillons d'argile-sciures. Cet écart peut être expliqué de deux façons. Dans un matériau solide, à température ambiante, la quasi-totalité des transferts de chaleur s'effectue par conduction au travers la matière solide. Les différences entre les conductibilités thermiques de l'argile et du verre (argile: 0.72 W/m°C, verre: 1.74 W/m°C) expliquent le fait que pour une même

densité les échantillons verre-argile ont une conductibilité thermique plus grande. On peut noter enfin que la température moyenne a une influence sur la conductibilité thermique et qu'il est habituel de constater que pour les matériaux céramiques la valeur  $k$  augmente en fonction de la température. Ainsi les résultats obtenus à  $100^{\circ}\text{C}$  sont supérieurs à ceux enregistrés à  $25^{\circ}\text{C}$ .

### Conclusion

Les échantillons d'argile sans sciures ont une conductibilité d'environ  $0.53 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  pour une densité apparente de  $1.89 \text{ gr/cc}$ , une valeur qui est moindre que de la conductibilité thermique moyenne des briques de construction qui est de  $0.73 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ . L'écart qui sépare ces deux valeurs est probablement attribuable au fait que les briques de construction sont en général plus dense ( $2.05 \text{ gr/cc}$ ) que les échantillons d'argile testés ( $1.89 \text{ gr/cc}$ ); ils ont de ce fait une conductibilité plus grande, celle-ci ayant tendance à augmenter en fonction de la densité apparente. L'ajout d'une quantité de sciures de 4% par poids d'argile aux mélanges fait chuter la conductibilité de près de la moitié. L'addition d'une quantité croissante de sciures (8 et 12%) n'entraîne qu'une faible diminution supplémentaire de la conductibilité. Quant au système à 3 composants, sa composition optimale (déchets de verre broyés: 50%; argile: 50% et quantité de sciures: 8.3% du mélange argile-verre) a une conductibilité de  $0.26 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ : une valeur qui est égale à environ le tiers des briques de construction qui sont actuellement sur le marché. Le système à 3 composants, à cause de ses faibles valeurs de conductibilité

thermique, constitue un matériau qui pourrait être utilisé comme matériau isolant.

FIG. 72 sciures (25°C).  
 Conductibilité thermique en fonction de la quantité de

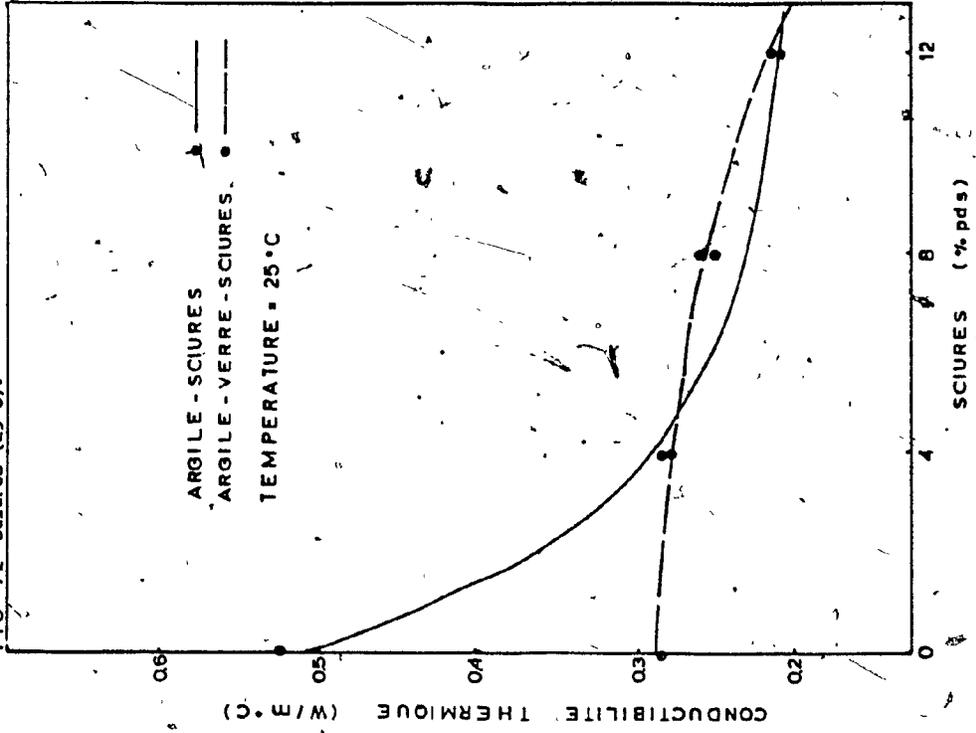
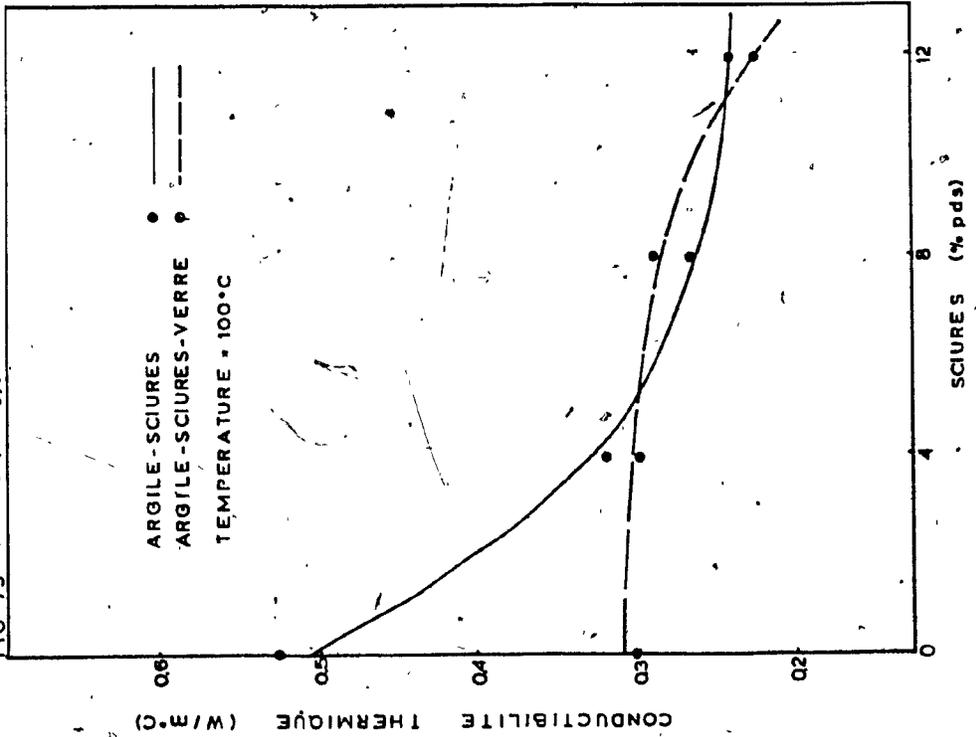
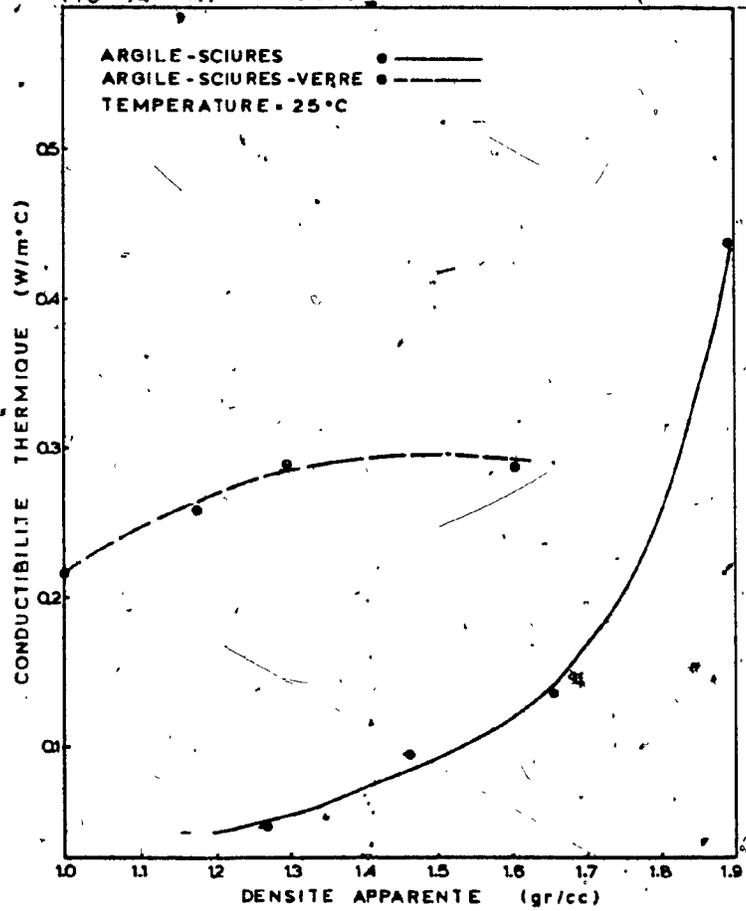


FIG. 73 sciures (100°C).  
 Conductibilité thermique en fonction de la quantité de



Conductibilité thermique en fonction de la densité  
apparente (25°C).



**CHAPITRE 5****CONCLUSION**

Deux séries d'expériences ont été réalisées pour mettre au point une brique de construction légère, isolante et durable. Dans la première série deux composants furent utilisés: argile et sciures de bois, alors que dans la deuxième; des déchets de verre broyés furent ajoutés aux composants de la première série. Des techniques de fabrication simples furent employées, similaires à celles qui sont de pratique courante dans l'industrie de la construction: addition d'eau aux composants solides, malaxage, pressage, séchage et cuisson. Plusieurs paramètres furent progressivement modifiés afin d'optimiser les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques cuites, tel la granulométrie des particules d'argile et de sciures, la quantité de sciures, la proportion de déchets de verre broyés, la pression de moulage, le taux et la température maximale de cuisson.

Pour le système à 2 composants, les meilleurs résultats furent obtenus à partir de la composition suivante: 300 gr de particules d'argile de dimensions inférieures à 300  $\mu$ m sont ajoutés à 20 gr de sciures à grains fins et à 20 gr d'eau. Le mélange est malaxé pendant 10 minutes, mis en forme sous une pression de moulage de 3.4 MPa, séché 17 heures à 50°C, et cuit 5 heures à 500°C et 5 heures à une température maximale de 1050°C. Les briques cuites à partir de ce mélange ont une densité apparente de 1.70 gr/cc, une résistance en compression de 21.0 MPa, des taux d'absorption dans l'eau froide et

dans l'eau bouillante de 12.2 et de 16.8%, un coefficient de saturation de 0.73 et une conductibilité thermique de 0.26 W/m<sup>0</sup>C.

Les résultats obtenus satisfont aux exigences de la norme ASTM C-216 (pour les briques de construction à usage extérieur). 20 gr de particules fines de sciures (6.7% par poids d'argile) additionné à l'argile permet donc une réduction de la densité apparente de 2.05 gr/cc pour les briques cuites constituées d'argile seulement à 1.70 gr/cc pour les briques cuites d'argile-sciures, soit une diminution de 1.7% et de la conductibilité thermique de 0.53 à 0.26 W/m<sup>0</sup>C, soit une chute de 51%. Un ajout plus important de sciures augmenterait les taux d'absorption et diminuerait la résistance en compression des briques cuites et la norme ASTM C-216 ne serait plus respectée.

Pour le système à 3 composantes, les meilleurs résultats furent obtenus à partir de la composition suivante: 150 gr de déchets de verre broyé et 150 gr d'argile aux particules de dimensions inférieures à 300 .m sont ajoutés à 25 gr de sciures à grains fins et à 20 gr d'eau. Le mélange est malaxé, mis en forme, séché et cuit dans les mêmes conditions que le système à 2 composantes sauf que la température maximale de cuisson est de 900<sup>0</sup>C au lieu de 1050<sup>0</sup>C. Les briques cuites à partir de ce mélange ont une densité apparente de 1.19 gr/cc, une résistance en compression de 21 MPa, des taux d'absorption dans l'eau froide et dans l'eau bouillante de 29.4 et 40.7%, un coefficient de saturation de 0.72 et une conductibilité thermique de 0.76 W/m<sup>0</sup>C. La substitution de 50% de l'argile par des déchets de verre broyé permet une diminution plus importante de la densité apparente que dans le cas du système argile-sciures. Cette

réduction est de l'ordre de 42% pour le système à 3 composantes comparativement à 17% pour les briques d'argile-sciures. Bien que la résistance en compression et le coefficient de saturation ne subissent aucune variation sensible suite à la substitution de l'argile par du verre broyé, la diminution sensible de la densité apparente s'accompagne d'une augmentation importante des taux d'absorption dans l'eau froide et dans l'eau bouillante.

Les propriétés physiques, mécaniques et thermiques optimales des systèmes à 1, 2 et 3 composantes ainsi que les techniques de préparation et de cuisson des mélanges sont présentées au Tableau 9,

Le système à deux composantes présente de nombreux avantages: il constitue un matériau céramique léger diminuant d'autant les frais de transport et facilitant la manutention lors de la construction; sa conductibilité thermique est sensiblement moins élevée que les briques constituées d'argile uniquement; il ne requiert pas de techniques de production différentes de celles qui sont traditionnellement employées pour la fabrication de briques d'argile. Finalement, les sciures de bois qui sont ajoutées aux mélanges d'argile sont peu coûteuses et permettent d'utiliser moins d'argile par brique, réduisant ainsi la charge des fours pour un même volume de cuisson. Au chapitre des inconvénients, il importe de mentionner que la densité apparente ne peut être abaissée plus de 17%, sans augmenter les taux d'absorption et diminuer la résistance en compression au-delà des limites prescrites par la norme ASTM C-216 pour les briques de construction à usage extérieur. De plus, en dépit du fait que la conductibilité thermique

des briques argile-sciures est sensiblement plus faible que celle des briques d'argile conventionnelles, l'espace d'air qui sépare le parement de maçonnerie extérieur du reste du mur engendre des pertes de chaleur par convection et contrevient partiellement à l'effet bénéfique que pourrait avoir l'utilisation d'une brique extérieure isolante. Ainsi, le potentiel véritable du système à deux composantes réside dans son application comme élément de maçonnerie à usage intérieur. Des blocs, des panneaux ou des tuiles décoratives pourraient être fabriqués à partir de mélanges d'argile-sciures dont les particules seraient plus petites que celles utilisées au cours de cette expérience et dans lesquels la proportion de sciures serait sensiblement plus élevée. Les produits ainsi fabriqués seraient structuraux ou purement décoratifs; ils pourraient être collés à une paroi existante et leur taux d'absorption élevés ou leur faible résistance en compression ne constitueraient plus une limite à leur utilisation puisqu'ils seraient utilisés à l'intérieur.

Le système à 3 composantes présente les mêmes avantages que celui à 2 composantes, et quelques atouts supplémentaires. De la même façon que pour les briques d'argile-sciures, les briques d'argile-verre-sciures sont plus isolantes que les briques de construction usuelles; toutefois elles sont beaucoup plus légères que le système à deux composantes, leur température maximale de cuisson est de 150°C inférieure et sur le plan de la couleur, elles offrent une gamme de coloris originale. Au chapitre des inconvénients, le système à 3 composantes possède des taux d'absorption très élevés, présente des problèmes de disponibilité et

des coûts élevés pour les déchets de verre broyés, et s'avère être très fragile autant, avant qu'après le séchage. Ces problèmes de porosité élevée et de fragilité pourraient être solutionnés respectivement par des techniques de scellement en surface (vitrification), et par l'ajout d'un agent liant lors du malaxage. Cependant ces procédés viendraient augmenter les coûts de production. En fait, le potentiel véritable du système à 3 composants deviendra évident lorsque les déchets de verre seront récupérés des incinérateurs municipaux; ces déchets ne peuvent être utilisés pour la fabrication de contenants à cause de leurs impuretés et une des seules applications possibles serait la fabrication de briques de construction; les coûts des déchets de verre des incinérateurs seraient vraisemblablement moindres que le cullet recyclé à la source et le problème de l'approvisionnement serait résolu.

RESULTATS OPTIMAUX OBTENUS AVEC LES SYSTEMES A  
1, 2 ET 3 COMPOSANTES\*

SYSTEMES		Système à 1 composante	Système à 2 composantes	Système à 3 composantes
PREPARATION	composition	Argile: 300 gr Sciures: 0 Verre: 0	Argile: 300 gr Sciures: 20 gr Verre: 0	Argile: 150 gr Sciures: 25 gr Verre: 150 gr
	eau	20 gr	20 gr	20 gr
	temps de malaxage	10 minutes	10 minutes	10 minutes
	pression de moulage	3.4 MPa	3.4 MPa	3.4 MPa
	temp. de séchage	50°C	50°C	50°C
	temps de séchage	17 heures	17 heures	17 heures
	pallier de temp.	500°C/5 hrs	500°C/5 hrs	500°C/5 hrs
	temp. de cuisson	1050°C	1050°C	900°C
	temps de cuisson	5 heures	5 heures	5 heures
	PROPRIETES	densité apparente (gr/cc)	2.03	1.70
cond. therm. (w/m°C)		0.53	0.26	0.26
taux d'absorption (24 heures) (%)		7.3	12.2	29.4
taux d'absorption (5 heures) (%)		10.2	16.8	40.7
coefficient de saturation		.72	.73	.72
résistance en compression (MPa)		48	21	21
variation de la ré- sistance en compres- sion après 70 cycles de gel-dégel (%)		---	---	-7.6

**RECHERCHES FUTURES**

1. Etudier différentes techniques afin d'abaisser les taux d'absorption des briques d'argile-verre-sciures (incorporation d'un demi-pouce d'argile sur la face exposée aux intempéries; vitrification des surfaces avec des déchets de verre broyés).

2. Etudier les différentes façons de contrôler les distorsions et les gonflements (des briques d'argile-sciures à haute température; des briques d'argile-verre-sciures avec une forte proportion de verre) afin de produire un matériau plus léger et plus isolant ayant une bonne stabilité dimensionnelle.

3. Quantifier la chaleur dégagée par la combustion des sciures à l'intérieur des briques durant la cuisson afin d'établir les économies d'énergie réalisables.

4. Améliorer les méthodes de malaxage pour s'assurer de l'uniformité de la répartition des particules de sciures dans les mélanges, en présence d'eau.

5. Expérimenter différents agents liants additionnés aux mélanges lors de la préparation afin d'augmenter la résistance en compression après le séchage.

6. Etudier la possibilité de produire des briques de plus grandes dimensions.

7. Etudier les variations de couleurs possibles par l'incorporation dans les mélanges de déchets de verre de couleurs différentes.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Emery, John J. "Trends in Waste Utilization in Construction". Chicago, Illinois, Institute of Technology, proceedings of the 5th Mineral Waste Utilization Symposium, 13-14 avril 1976, p. 26.
2. Arpin, Jean V. "La gestion des déchets solides". Rapport préparé par le Comité d'aide créé par le ministre responsable de la qualité de l'environnement, Service de la Protection de l'Environnement, Gouvernement du Québec, décembre 1972.
3. Koerner, Robert M.; Schoenberger, Robert J. "Synthesis of Construction Materials from Waste Products". New Horizon in Construction Materials, International Symposium, Lehigh University, Bethlehem, November 1-3, 1976, p. 111.
4. Clifton, James R. et al. "Survey of Uses of Waste Materials in Construction in the United States". Washington, D.C., National Bureau of Standards, report NBSIR-77-1244, July 1977.
5. Keyser, Joseph Hode et Rigaud, Michel. "Les matériaux de construction". Texte préparé pour la revue IF (Industrialisation Forum), présenté lors du 4ième Colloque Augustin-Frigon, le 27 octobre 1977 à l'École Polytechnique de Montréal.
6. Anonyme. "Eight Bricks to the Gallon". Dans Héritage, Juin 1980, p. 19.
7. National Commission on Materials Policy. "Materials Needs and the Environment Today and Tomorrow". Final Report, Washington, D.C., United States Government Printer, 1973.
8. Arpin, Jean V. "La gestion des déchets". Rapport présenté à la Communauté Urbaine de Montréal, Montréal, septembre 1976.
9. Bortz, Seymour A.; Asce, M.; Schwartz, Murray A. "Recycling Wastes for Structural Applications". Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 99, April 1973, paper 9648, p. 249.
10. Hayes, Denis. "Repairs, Reuse, Recycling - First Steps Toward a Sustainable Society". Worldwatch Paper 23, Worldwatch Institute, September 1978.
11. Côté, André-G.; Lachance, Luc; Picard, André; Pigeon, Michel. "Utilisation de déchets pour la fabrication de bétons spéciaux et de matériaux de construction". Dans L'Ingénieur, septembre 1974, p. 10.

12. Lévesque, Yves. "Disponibilité théorique de résidus de matières ligneuses produites aux usines de transformation primaire". Document à usage interne, Québec, Ministère des Terres et Forêts, mars 1979.
13. Statistique Canada, no. 25-202: "Statistiques forestières du Canada".
14. Renseignements fournis par Clément Turcotte. Gouvernement du Québec, Direction des produits du bois de construction, Direction générale de l'industrie, Ministère de l'Industrie et du Commerce.
15. Harkin, John M. "Uses for Sawdust, Shavings and Waste Chips". Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Research note no. FPL-0208, November 1969.
16. Agence Européenne de Productivité de l'Organisation Européenne de Coopération Economique. "Utilisation industrielle des déchets du bois". Paris, 1956.
17. Informations recueillies du département de l'environnement de la Ville de Montréal.
18. Santur, Harold R. "Glass Recycling and Reuse". Madison, Wisconsin University, Institute for Environmental Studies, Mars 1974.
19. Informations recueillies auprès de la Compagnie Consumer Glass.
20. Informations recueillies auprès de la Compagnie Dominion Glass.
21. Informations recueillies auprès du Centre de recyclage Montréal Inc.
22. Albenque, M. "New Ceramic Material 'Foam Clay'". Dans Chemicals Abstracts, Vol. 57, 1973, no. 22925 p.
23. Ostrowiak, J. "Cellular bricks". Dans Chemical Abstracts,<sup>9</sup> Vol. 89, 1978, no. 47947 s.
24. Matrai, J. "Manufacturing Technology and Technical Parameters of 'Poroton' Bricks". Dans Chemical Abstracts, Vol. 87, 1977, no 188373 x.
25. Carloncelli, C. "Lightweight Bricks". Dans Chemical Abstracts, Vol. 87, 1977, no. 72430 j.
26. Liebig, P. "Lightweight Bricks". Dans Chemical Abstracts, Vol. 87, 1977, no. 72430 j.

27. Rogalinski, H. "Environmentally Favorable Disposal of Used Tires and Use of the Recovered Heat Energy in Firing Ceramic Products". Dans Chemical Abstracts, Vol. 88, 1978, no. 54241q.
28. Murray, M.J.; Liversidge, R.M. "The Use of Cubic Shaped Sawdusts in Heavy Clay Products". Dans Ceramurgia International, Vol. 4, no. 3, 1978.
29. Isenhour, Charles T. "Sawdust Addition to a Shale Body". Dans Ceramic Bulletin, Vol. 58, no. 12, 1979, p. 1197.
30. Fortin, Richard; QA Briques, East-Angus, Québec: entrevues et communications téléphoniques.
31. Guery, François. "Procédé de fabrication de matériaux légers et de faibles résistance en compression et matériaux ainsi obtenus". Brevet français no. 2,094,851, mars 1972.
32. Jeffers, P.E. "Progress at Columbus Brick Keeps Costs Under Control". Dans Brick & Clay Record, avril 1979, p. 58.
33. Tyrrell, M.E.; Goode, Alan H. "Waste Glass as a Flux for Brick Clays". Bureau of Mines, Report of Investigation no. 7701, January 1973.
34. Tyrrell, M.E.; Feld, I.L. "Fabrication and Cost Evaluation of Experimental Building Brick from Waste Glass". Bureau of Mines, Report of Investigation no. 7605, May 1972.
35. Shutt, T.C.; Campbell, H.; Abrahams, J.H. Jr. "New Building Materials Containing Waste Glass". Dans American Ceramic Society Bulletin, Vol. 51, no. 9, 1972, p.679.
36. Fernhof, Suen; Glienke, Peter. "Porous Lightweight Ceramic Product". Brevet allemand no. 2,641,631, mars 1978.
37. Keyser, J.-Hode. "Matériaux de construction II". Notes de cours, Montréal, Ecole d'architecture, Université de Montréal, janvier 1977.
38. Domtar Inc., 800 rue des Conseillers, Laprairie, Québec: "Analyse de l'argile de Laprairie", rapport interne, mars 1956.
39. McElhanney, T.A. "Les bois du Canada". Canada, Imprimeur de la Reine, 1940.
40. Shelton, J.W. and Shapiro, A. "The Woodburners Encyclopedia". Vermont Crossroads Press, avril 1977.
41. Norton, Frederick Hardwood. "Elements of Ceramics". Springer-Verlag, New York. 1974.

42. Goode, Alan H.; Tyrrell, M.E.; Feld, I.L. "Mineral Wool from High-Glass Fractions of Municipal Incinerator Residues". Chicago, Tuscaloosa Metallurgy Research Laboratory, Proceedings of the Third Mineral Waste Utilization Symposium, 1972.
43. Grimshaw, Rex W. "The Chemistry and Physics of Clay and Allied Ceramic Materials". John Wiley & Sons, New York. 1971.
44. Brownell, W.E. "Structural Clay Products". Springer-Verlag, New-York. 1976.
45. Clews, F.H. "Heavy Clay Technology". Academic Press, New York. 1969.

## ANNEXE A.1

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

1. DECHETS MINIERES		
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration de taconite (minerai de fer de la région du Lac Supérieur)</li> <li>Déchets résultants de la pelletisation de taconite</li> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai de fer</li> </ul>		<p>Agrégat pour béton, agrégat anti-dérapant, blocs de construction</p> <p>Agrégats divers, agrégats pour béton bitumineux</p> <p>Agrégats pour béton</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Boues rouges (résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai de cuivre)</li> </ul>	<p>Boues mélangées avec de la bentonite, de la dolomie et de la wallastonite; séchage; compression; nouveau séchage; cuisson</p>	<p>Briques</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai de cuivre</li> </ul>	<p>Pressage à sec</p>	<p>Briques</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction du minerai de cuivre</li> </ul>		<p>Matériau de remblayage, dans les mélanges bitumineux, filler minéral</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai de cuivre</li> </ul>	<p>Elimination des sulfures de fer; mélange des résidus miniers avec divers agents cristallisants; fusion; refroidissement; nouvelle phase de cuisson</p>	<p>Verre cristallisé</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Résidus boueux résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'aluminium</li> </ul>		<p>Mousse céramique, ciment, agrégat léger</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration des minéraux de plomb et de zinc</li> </ul>		<p>Filler minéral dans les mélanges bitumineux; briques réfractaires</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'or (sable fin constitué de quartz)</li> </ul>	<p>Addition de chaux; mise en forme; pressage; cure à la vapeur</p>	<p>Bloc</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'or</li> </ul>		<p>Brique de silicate de calcium et bloc</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'or</li> </ul>		<p>Brique, sable, agrégat, filler minéral</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Minéraux de silicate de magnésium (déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'amiante)</li> </ul>	<p>Elimination du Fe et du Ni des minéraux au cours de leur fusion dans des fours électriques; production subséquente de tuiles céramiques et de produits réfractaires</p>	<p>Tuile céramique, matériau réfractaire, ou matériau isolant utilisé en électronique</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'amiante</li> </ul>		<p>Produits réfractaires, amiante-ciment</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de la purification du minerai d'amiante</li> </ul>	<p>Mélange de déchets d'amiante avec un sable à haute teneur en quartz; fusion; fibrification</p>	<p>Laine minérale</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'amiante</li> </ul>	<p>Mélange d'argile et de déchets d'amiante; cuisson</p>	<p>Briques</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets résultants de l'extraction du minerai d'amiante</li> </ul>		<p>Tuile céramique, briques réfractaires, filler minéral dans les mélanges bitumineux</p>

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

1. DECHETS MINIERS			
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION	
• Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'uranium	2 traitements possibles: - traitement à sec: tamisage; séparation magnétique et électronique - traitement humide: tamisage; séparation magnétique et par flottation par la mousse; processus conventionnel de production de verre	Verre cristallisé	
• Schistes et grès provenant de l'extraction du charbon	Gonflement du schiste sous l'action rapide de la chaleur	Agrégats expansés pour bétons	
• Déchets résultants de l'extraction de minéraux de phosphate		Matériau de remblayage, digues pour boues phosphatées	
• Déchets résultants de l'extraction du gypse		Briques	
• Déchets résultants de l'extraction de feldspath		Fabrication de briques et de matériaux de construction légers	
• Barite (minerai de baryum; résultant de travaux d'extraction)		Matériau de recouvrement routier	
• Différents déchets miniers	Purification des déchets (élimination des sulfures de fer) mélange des rebuts et des matières premières usuelles; processus habituel de fabrication de verre	Verre	
• Déchets miniers divers	Mélange d'argile et de déchets miniers; processus habituel de cuisson de briques d'argile	Briques	
• Déchets miniers divers, lignosulfate de calcium (déchets des industries de pâtes et papiers)	Mélange de déchets miniers broyés, de lignosulfate de calcium (agent liant) et d'eau; pressage; cuisson	Brique, bloc	
• Déchets de carrières d'extraction minières		Agrégats	
• Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration des minéraux d'or, de cuivre de nickel de molybdène	Réaction avec l'hydroxyde de calcium pour former des pozzolanes	Additif ou substitut au ciment Portland	
• Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration des minéraux de cuivre, d'amiante et de zinc	Déchets miniers agissants comme agrégats avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et ciment Portland comme agents liants	Briques	7
• Spath-fluor (déchets résultants de l'extraction des minéraux de plomb, d'étain et de zinc)		Agrégats	
• Déchets résultants de l'extraction et de l'épuration du minerai d'amiante et du minerai de cuivre porphyrique	Addition de ciment au mélange et procédé de fabrication à la vapeur	Briques	

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

2. DECHETS INDUSTRIELS		
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boues résultantes de la fabrication de l'aluminium</li> <li>• Fibres d'acier résiduelles déchets de verre</li> <li>• Déchets de fonderies</li> <li>• Scories</li> <li>Scories</li> <li>Scories de haut fourneau granulées</li> <li>Scories de haut fourneau refroidies à l'air</li> <li>Scories de haut fourneau expansées</li> <li>Scories produites dans les fours "convertisseurs"</li> <li>Scories de fonderies de zinc</li> <li>Scories de phosphate</li> <li>• Cendres, résidus de la combustion du charbon</li> <li>• Cendres volantes (de lignite) scories de haut fourneau granulées</li> <li>• Cendres provenant de la combustion de charbon</li> <li>• Lignine (déchet des usines de pâtes et papiers) rebuts miniers</li> <li>• Acide sulfurique (déchet issu de plusieurs processus industriels)</li> <li>• Acide sulfurique</li> <li>• Soufre</li> <li>• Soufre</li> <li>• Soufre</li> </ul>	<p>Mélange de boues calcinées et d'argile; cuisson</p> <p>Les fibres d'acier sont ajoutées à du verre de récupération broyé</p> <p>Mélange de scories, de chaux hydratée, de cendres volantes et d'eau; mise en forme et pression; cure à l'auto-clave</p> <p>Les cendres volantes agissent comme agents liants et les scories comme agrégats</p> <p>Mélange des cendres avec une fine poudre d'argile sablonneuse ou soit une argile réfractaire; compression; séchage; cuisson</p> <p>La lignine agit comme agent liant</p> <p>Neutralisation à l'aide de chaux hydratée; les sels de sulfates de calcium sont alors séchés et calcinés (à basse température)</p> <p>Acide sulfurique calcinée (à haute température)</p> <p>Agrégats et soufre comme agent liant (sous l'action de la chaleur) en remplacement du ciment conventionnel</p> <p>Expansion sous l'action de la chaleur et d'un agent moussant</p> <p>Mélange de soufre, de did-cyclopentadéine, de fibres de verre et de talc</p>	<p>Briques réfractaires</p> <p>Agrégats et matrice de renforcement pour bétons</p> <p>Agrégat fin, pigment minéral</p> <p>Agrégats</p> <p>Briques</p> <p>Eléments composants dans la production de ciment</p> <p>Ballast de voies ferrées, laine minérale</p> <p>Elément composant dans la fabrication de ciment</p> <p>Agrégats, ballast de voies ferrées</p> <p>Agrégats fins</p> <p>Agrégats, tuiles céramiques</p> <p>1. Utilisation dans un ciment de type TP (ASTM) ou comme matériau brut dans le processus de fabrication de ciment</p> <p>2. Additif minéral dans des bétons ou des produits de bétons</p> <p>3. Production d'agrégats légers</p> <p>4. Stabilisateur de sol</p> <p>5. Filler minéral dans les mélanges bitumineux</p> <p>Blocs de bétons</p> <p>Briques</p> <p>Briques</p> <p>Composant pour la fabrication de plâtres, de revêtements muraux, de tuiles de plafond, etc...</p> <p>Composante pouvant entrer dans la fabrication de clinker de ciment Portland</p> <p>Béton de soufre</p> <p>Mousse de soufre isolante</p> <p>Enduit protecteur et imperméable pour maçonneries (résistant aux intempéries et à la corrosion); enduit pour toiture</p>

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

2. DECHETS INDUSTRIELS			
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION	
• Soufre	Imprégnation de bois mou et de bétons avec soufre liquide	Couche de protection résistante aux intempéries et à la corrosion.	
• Soufre	Emulsification (ou substitution directe) du soufre avec l'asphalte en vue de produire un agent liant dans des matériaux bitumineux (incorporation possible de sable)	Mélanges bitumineux	
• Déchets résultants de la production de phosphate: sable		Matériau de remblayage et digues de béton	
• Déchets résultants de la production de phosphate: boues phosphatées		Agrégats légers	
• Boues phosphatées (résultant de la transformation de la phosphate en fertilisant)	Extrusion	Brique (et tuiles) agrégats légers	
• Sulfates: (déchet des industries de phosphate, d'aluminium et de ciment): phosphogypsum		Panneaux de gypse; matériau de remplissage pour plancher et toiture; additifs pour béton	
• Gypse (résultant de la transformation du minerai de phosphate en fertilisant et en acide phosphorique)	Elimination d'impuretés: résidus de carbone éliminés par flottation par la mousse; sable fin éliminé par broyage et tamisage	Plâtre de Paris	
• Sulfates: fluorogypsum		Panneaux de gypse	
• Poussières de sable récupérées et poussières en provenance des fours à arc (fondries)	Pelletisation	Agrégats légers, isolation en vrac	
• Poussières résiduelles des fours à ciment		Elément composant de ciment mélangé, substitut à la chaux et à la pierre à chaux	
• Poussière (résultant de la fabrication de Si, de ferrosilicone et d'alliage Ca-Si)	Mélange de sable, de CaO, de poussières et d'eau; mise en forme; compression; cure à l'autoclave	Briques	
• Poussière de grog	Mélange d'argile, de poussière de grog, de perlite et de divers agents moussants; cuisson	Briques	
• Boues bitumineuses résiduelles	Boues bitumineuses ajoutées aux agrégats	Sol stabilisé	
• Vases provenant des travaux de dragage (toutes matières riches en $S_2O_3$ )	Déchets se substituant à l'argile conventionnelle	Briques	
• Déchets de dragage	Couches successives de 3 éléments: chaux hydratée entre 2 épaisseurs de carton et 1 couche de vase; expansion de la chaux; l'eau est extraite de la vase qui se durcit sous l'action de la chaleur générée	Formation de blocs ou de panneaux multicouches	
• Déchets de dragage		Matériau de remblayage	
• Cendres volantes	Addition de cendres volantes pendant la phase terminale de mouture du ciment	Ciments	
• Scories	Broyage des scories et addition au ciment Portland pendant la phase terminale de mouture	Ciments	

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

3. DECHETS URBAINS			
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION	
Déchets urbains	Précompression pour éliminer le contenu liquide; fortes compressions successives; insertion dans un treillis; application d'un mortier	Blocs	
Déchets urbains	Déchets urbains solides et inorganiques comme agrégats mélangés au ciment et à l'eau. La pâte est versée dans des moules. Application d'une pression	Briques	
Déchets solides divers (boîtes de conserves, pneus usagés, etc.)	Déchets sont utilisés comme noyaux creux, légers ou amortisseur entre deux membranes de ferrociment	Noyaux inertes dans des panneaux préfabriqués de béton ou de ferrociment	
Déchets urbains	Déchets urbains solides utilisés comme agrégats, sauf d'égoût comme agent hydratant pour le ciment. Le béton ainsi produit est séché et imprégné d'une solution de monomères. La polymérisation se fait par radiation	SRPIC (Sewage and solid waste refuse-polymer concrete)	
Déchets urbains incinérés	Tamisage	Agrégats pour bétons	
Déchets d'incinérateur à haute température (1600° C.)	Portions métalliques et vitreuses des déchets incinérés sont séparés automatiquement (due à des différences de densité) coulées et refroidies	Blocs, briques tuiles	
Déchets de papier	Papier décheté, ciment, silicate de sodium et gypse	Briques légères	
Papier journal	Le papier journal (en feuilles) est immergé dans une solution de monomères. La polymérisation se fait sous pression	PPC (Paper plywood)	
Déchets de verre	Addition de fondants et d'autres substances au verre pour qu'il atteigne au moment de la fusion un degré suffisant d'ouvrabilité; air comprimé projeté au travers une coulée de verre en fusion	Laine minérale	
Déchets de verre	Mélange de dolomite, de verre et d'alumine; fusion; air pulsé et fibrification	Laine minérale	
Déchets de verre		Laine minérale	
Déchets de verre	Une poudre de carbonate de calcium est mélangée à du verre de récupération finement broyé. Elévation de température et formation de bioxyde de carbone qui induit une expansion dans le verre ramoli	Laine minérale	
Déchets de verre		Mousse de verre	
Déchets de verre	- Addition de verre de récupération à des agrégats de qualité inférieure; cuisson dans un four rotatoire et formation d'agrégats expansés - Mélange de verre, d'argile, et d'un agent moussant (silicate de sodium); pelletisation et expansion	Mousse de verre	

## MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUÉS À PARTIR DE DÉCHETS SOLIDES

3. DÉCHETS URBAINS			
DÉCHETS RECUPERÉS	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	
Déchets de verre	Déchets de verre broyés en remplacement du marbre	Terrazo	
Déchets de verre	Mélange de verre de récupération finement broyé et d'argile; mise en forme par extrusion; cuisson	Briques	
Déchets de verre	Mélange de verre de récupération broyé et d'argile; mise en forme par extrusion et par pressage à sec; séchage; cuisson	Briques	
Déchets de verre	Mélange d'argile, de verre de récupération broyé, de carbonate de barium; pressage; cuisson	Briques	
Déchets de verre	Addition de verre de récupération à l'argile	Briques	
Déchets de verre	Mélange de verre de récupération broyé, d'argile, d'eau et de déchets solides divers (filler); mise en forme par vibrations; cuisson	Panneaux muraux	
Déchets de verre	Addition de verre de récupération broyé aux agrégats utilisés dans les mélanges bitumineux	Mélanges bitumineux	
Déchets de verre	Mélange de verre broyé avec les agrégats conventionnels; addition de chaux hydratée comme agent liant	Glassphalt	
Déchets de verre, matériaux plastiques	Particules de verre insérées dans une matrice de polymères (sous l'action de la chaleur); extrusion hydrostatique et conventionnelle	Produits extrudés (cylindriques ou rectangulaires)	
Déchets de verre	Insertion de verre de récupération finement broyé dans une solution de monomères; polymérisation	Panneaux muraux, sewerpipe, etc.	
Déchets de verre	Verre utilisé comme agrégats dans une matrice de polymères	GPC (Glass polymer composite)	
Déchets de verre	Mélange de verre de récupération finement broyé, de sable, d'une résine phénolique (agent liant) et d'un catalyseur; pressage à chaud (avec élévation graduelle de la température)	Briques	
Déchets de verre	Mélange d'argile réfractaire, de sable et de verre de récupération broyé; vernissage	Revêtement protecteur sur matériaux céramiques	
Déchets de verre	Mélange de verre de récupération broyé, de ciment, d'additifs chimiques et d'eau; mise en forme sous pression	Briques	
Déchets de verre	Broyage; tamisage	Agrégats pour béton	
Déchets de verre	Tamisage	Agrégats pour béton	
Vinyle provenant des sièges d'automobiles mis en morceaux	Liquéfaction du vinyle sous l'action de la chaleur; le vinyle liquide est mélangé aux agrégats	Bétons avec polymères comme agents liants	

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

3. DECHETS URBAINS			
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fibres de polymères provenant d'automobiles abandonnées lorsqu'elles sont mises en pièces</li> </ul>	Fibres des polymères sont ajoutées à du verre de récupération broyé	Agrégats et matrice de renforcement pour bétons	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets plastiques: chlorure de polyvinyle; polystyrène; polyéthylène</li> </ul>	Mélange de ces déchets plastique dans un liant asphaltique ou dans des agrégats (augmentation de l'aductilité)	Bétons asphaltiques	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Coque de riz; déchets plastiques; billes de polystyrène</li> </ul>	Mélange des déchets (agissant comme renforcement) et d'un agrégat donné dans une matrice inorganique (L'agent liant)	Agent de renforcement dans un matériau composite	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets plastiques</li> </ul>	Fusion des matériaux plastiques en l'absence d'O <sub>2</sub> , immersion dans l'H <sub>2</sub> O et solidification subséquente; réduction en poudre; mélange avec sable et utilisation pour fabriquer produits céramiques	Briques	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pneus usagés</li> </ul>		Additifs dans les bétons asphaltiques	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pneus usagés</li> </ul>	Broyage	Agrégats pour le béton	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pneus usagés</li> </ul>	Addition de pneus broyés aux agrégats utilisés dans les mélanges bitumineux	Mélanges bitumineux	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pneus usagés</li> </ul>	Addition de pneus usagés broyés aux émulsions utilisées dans les mélanges bitumineux	Surface de recouvrement routière	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pneus usagés</li> </ul>	Mélange de pneus usagés broyés, de sable, d'asphalte et d'émulsions	Constitution d'un film protecteur entre l'ancien et le nouveau revêtement bitumineux (accroissement de la durabilité de la nouvelle surface)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pneus usagés</li> </ul>	Addition de pneus usagés broyés dans de l'asphalte liquide	Scellant posé à chaux pour colmater les craques et joints	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Déchets de verre, déchets de briques</li> </ul>	Mélange de verre de récupération broyé, de briques concassées, d'argile et d'eau; procédé de mise en forme par vibration; cuisson; séchage	Briques	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bétons de récupération</li> </ul>		Agrégats pour nouveaux bétons	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Batteries d'automobiles</li> </ul>	Les batteries sont broyées et mélangées aux agrégats	Mélange bitumineux	

## MATERIAUX DE CONSTRUCTION FABRIQUES A PARTIR DE DECHETS SOLIDES

4. DECHETS AGRICOLES			
DECHETS RECUPERES	PROCESSUS DE TRANSFORMATION	MATERIAUX DE CONSTRUCTION	
• Coque de riz, écailles d'arachides, épis de maïs, copeaux de bois	Mélange des déchets (agissant comme renforcement) avec un agrégat donné dans une matrice organique (l'agent liant)	Renforcement dans une matrice organique	
• Déchets organiques riches en cellulose et en pentose (épis de maïs, paille, copeaux de bois, coques de riz)	Les déchets sont trempés dans une solution (3%) d'acide sulfonique et 1% de chlorure d'aluminium; séchage; pressage à chaud	Matériaux de construction (panneaux structuraux substitués du bois)	
• Paille de riz, Bégasse (provenant du traitement de la canne à sucre)		Panneaux isolants ou structuraux, tuiles décoratives	
• Déchets d'oxychlorure de magnésium, coques de riz	Agent liant (contenant des déchets d'oxychlorure de magnésium) et coques de riz comme agrégat et élément de renforcement	Mousse isolante	
• Crottins de vaches	Mélange de crottins de vaches brûlés de ciment et d'un filler	Bétons	
• Fumier de vaches, déchets de verre	Une fois brûlé le fumier est réduit en poudre et mélangé avec des déchets de verre broyés; cuisson	Matériau de densités variables	
• Fumier de cheval	Mélange de fumier de cheval séché et d'agrégats; addition de bitume	Mélanges bitumineux (fiberphalt)	

AJOUT DE SCIURES DE BOIS A UNE PATE D'ARGILE  
LISTE COMPAREE DES AVANTAGES ET DESAVANTAGES

		<u>AVANTAGES</u>		<u>DESAVANTAGES</u>
Emplois des matières premières Préparation des mélanges et moulages	M	Les manufacturiers utilisent moins d'argile.		
	M	Utilisation réduite d'eau lors du malaxage de la pâte, diminuant ainsi l'énergie requise lors du séchage.	I	Les sciures ont tendance à s'accumuler sur les tamis
	J	Les sciures (sèches) peuvent agir comme agent absorbant et amoindrir si nécessaire la plasticité d'une argile.	I	20% d'augmentation du temps de broyage et de la main-d'oeuvre
	F	Les sciures peuvent améliorer l'ouvrabilité d'un mélange et éliminer des problèmes de stratification	I	5% d'augmentation du temps de malaxage
	I	L'ajout de sciures ramolit la pâte et facilite l'extrusion	M	Plus grande résistance au tranchage des colonnes extrudées (l'utilisation de fines particules de sciures peut minimiser ce problème.
	I	Diminution de 25% de l'ampérage habituellement nécessaire pour chaque malaxeur et machine à brique	I	5% d'augmentation du temps de découpage des briques après extrusion
Séchage	F	Le séchage est plus rapide	I	Risque accru d'affaissement à cause d'un taux de séchage plus rapide
	K			
	M			
Cuisson	K	Pertes de volumes sont moindres et meilleure stabilité dimensionnelle	I	Diminution de 20% de la résistance après séchage
	M			
	M			
Durée de vie des équipements	M	La quantité d'argile par brique est moindre, réduisant les charges de cuisson des fours. (économie d'énergie)	I	Augmentation de 5% des quantités de sable requis sur la surface des briques
	F	La combustion des sciures à l'intérieur des briques diminue les coûts en combustibles	M	Libération de matières volatiles au cours de la phase précédant la cuisson à température maximale (d'où la nécessité de prévoir des conduits pour canaliser ces émissions et les récupérer dans la zone maximale de cuisson)
Propriétés des briques cuites	M			
	I	Augmentation de 40% de la durée de vie des tarières et autres pièces d'équipements servant au malaxage et à l'extrusion	I	Risque de gonflement après la cuisson si le taux d'élévation de la température des fours n'est pas modifié.
	F	Réduction du poids des briques	I	Diminution de 20% de la résistance après cuisson (teneur en sciures: 15% vol.)
	I	Coefficients de saturation moins élevés	I	Augmentation des taux d'absorption de 10% (teneur en sciures: 15%)
	I	Amélioration de la valeur isolante des briques	I	Augmentation des taux de succion de 20% (teneur en sciures: 15% vol.)
Propriétés des briques cuites	I	Nouvelles textures et couleurs	I	Augmentation du nombre de fissures capillaires
	K	Diminution du craquelage	I	Augmentation du personnel chargé du contrôle de la qualité

AJOUT DE SCIURES DE BOIS A UNE PATE D'ARGILE LISTE COMPAREE DES AVANTAGES ET DESAVANTAGES			
		<u>AVANTAGES</u>	<u>DESAVANTAGES</u>
Distribution	F M	Diminution des frais de transport; en particulier lorsque des grandes distances doivent être franchies	
Utilisation	M M M	Du point de vue structural, allègement des charges Les maçons travaillent avec des briques plus légères Ouvrabilité et sciabilité accrues favorisant certains travaux de construction	

M: Murray & Léversidge  
I: Isenhour

J: Jeffers  
K: Khigerovide

F: Fortin

ADDITION DE DECHETS DE VERRE BROYES A UNE PATE D'ARGILE  
LISTE COMPAREE DES AVANTAGES ET DES DESAVANTAGES

		<u>AVANTAGES</u>		<u>DESAVANTAGES</u>
. Emploi de matières premières			T&F	. Nécessité d'ajouter du carbonate de barium au mélange pour supprimer les problèmes d'efflorescence
			T&F	. Nécessité d'augmenter la résistance des briques avant la cuisson à l'aide d'un agent liant organique ajouté au mélange au moment du malaxage (lorsqu'une production commerciale est envisagée)
. Préparation du mélange et moulage			T&F	. Modification nécessaire des méthodes de malaxage pour éviter des agglomérations dans le mélange
. Cuisson	T&G	. Réduction des temps et/ou température de cuisson	T&G	. Les faibles résistances à chaud des briques lors de la cuisson limitent les charge-ments des convoyeurs
	T&G	. Accélération de la cuisson due à des températures moins élevées	C&A	. Les mélanges contenant une forte proportion de verre (94%) nécessitent un contrôle serré de la température maximale de cuisson pour éviter les gonflements et les distorsions dans les briques cuites
. Propriétés des briques cuites	S, C&A F&G	. Augmentation du module de rupture et de la résistance en compression		
	T&G	. Diminution des taux d'absorption		
	S, C&A	. Diminution du coefficient de saturation		

## ANNEXE C

## REACTIONS CHIMIQUES DE L'ARGILE AU COURS DE LA CUISSON

Les réactions chimiques se produisant à l'intérieur des briques d'argile, du début de la cuisson à la température maximale sont décrites ci-dessous (39):

<u>Température (°C)</u>	<u>Réactions</u>
100 - 390	Evaporation de l'eau du mélange
390 - 540	Oxydation des sulfures (pyrite $\text{FeS}_2$ )
540 - 660	Déshydratation de l'argile (illite)
660 - 740	Déshydratation de la chlorite
770 - 890	Dissociation de la dolomite et de la calcite
905 - 1020	Cristallisation de l'anorthite

Des analyses des réactions chimiques effectuées lors de la cuisson, il en résulte les points suivants:

- La dissociation de la dolomite et de la calcite, aux environs de  $750^\circ\text{C}$  requiert un apport supplémentaire de chaleur au cours de la cuisson de façon à contrebalancer la réaction endothermique.
- La chaux résultante de la dissociation de la calcite réagit avec l'alumine et la silice pour former des cristaux d'anorthite ( $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ), qui sont dans une large mesure responsables de la résistance des briques. Cette réaction ne se produit qu'aux températures maximales, et elle ne sera complète que si la cuisson est maintenue suffisamment longtemps.

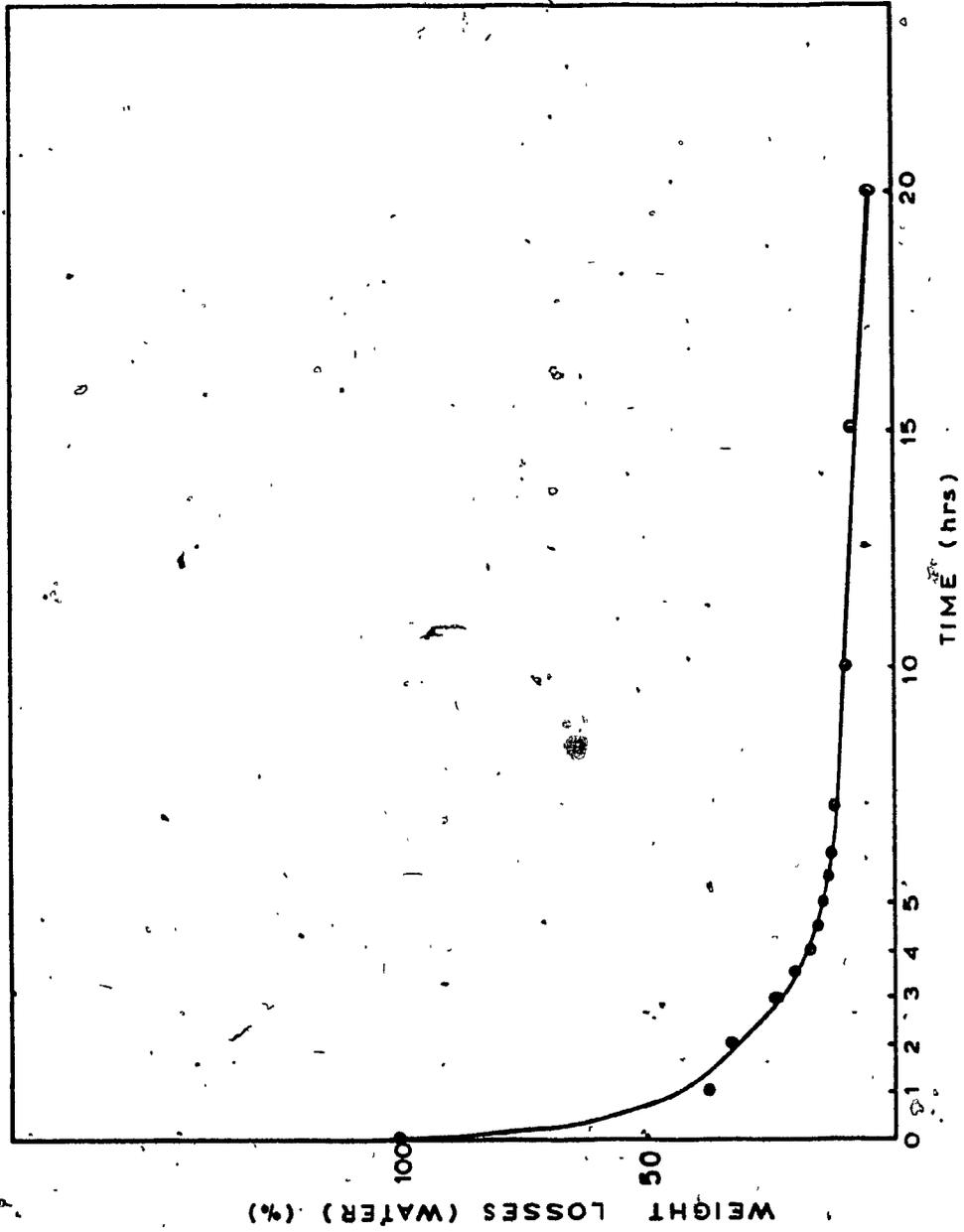
- Le bioxyde de carbone résultant de la dissociation de la calcite et de la dolomite, agit comme un agent oxydant aidant à la combustion complète des traces résiduelles de matières organiques et des sulfures qui peuvent encore être présentes à l'intérieur des briques à haute température.

## ANNEXE D

## COMPOSITION CHIMIQUE TYPIQUE DU VERRE AU SODIUM

$\text{SiO}_2$	69.3%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.74%
$\text{Na}_2\text{O}$	13.91%
$\text{CaO}$	10.02%
$\text{MgO}$	0.43%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.86%
$\text{K}_2\text{O}$	0.55%
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.03%

ANNEXE E



## ANNEXE F

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES PARTICULES D'ARGILE ET DE SCIURES

DIM ( $\mu$ m) TAMIS (no.) PASSANT (%)

## Section 4.1 Système à une composante: argile

(argile)	2360	8	100
	1180	16	95.6
	600	30	60.5
	300	50	39.1
	150	100	25.7
	75	200	16.0
	75	pan	0

## Section 4.2.1 Variation de la température de cuisson avant l'élimination des sciures

(argile)	2360	8	100
	1180	16	95.6
	600	30	60.5
	300	50	39.1
	150	100	25.7
	75	200	16.0
	75	pan	0
(sciures)	600	30	100
	300	50	0

## Section 4.2.2 Variation du taux de cuisson pour obtenir une combustion complète des sciures

(argile)	2360	8	100
	1180	16	95.6
	600	30	60.5
	300	50	39.1
	150	100	25.7
	75	200	16.0
	75	pan	0
(sciures)	600	30	100
	300	50	0

**Section 4.2.3 Variation de la température et du temps de cuisson après l'élimination des sciures**

(argile)	2360	8	100
	1180	16	95.6
	600	30	60.5
	300	50	39.1
	150	100	25.7
	75	200	16.0
	75	pan	0
(sciures)	600	30	100
	300	50	0

**Section 4.2.4 Variation de la grosseur des particules d'argile**

(argile) non-tamisé	2360	8	100
	1180	16	95.6
	600	30	60.5
	300	50	39.1
	150	100	25.7
	75	200	16.0
	75	pan	0
(argile) 600 .m	1180	16	100
	600	30	0
(argile) 300 .m	600	30	100
	300	50	0
(argile) 150 .m	300	50	100
	150	100	0
(argile)	150	100	100
	150	pan	-
(sciures)	600	30	100
	300	50	0

**Section 4.2.5 Variation de la grosseur des particules de sciures**

(argile)	300	50	100
	300	pan	-
(sciures) 300 .m	600	30	100
	300	50	0

(sciures) 150 .m	300	50	100
	150	100	0
(sciures)	150	100	100
	150	pan	0
(sciures) H-70		60	98.5
		80	65.0
	150	100	28.0
	75	pan	0

## Section 4.2.6 Variation de la pression lors du moulage

(argile)	300	50	100
	300	pan	-
(sciures) H-70		60	98.5
		80	65.0
	150	100	28.0
	75	200	4.5
	75	pan	0

## Section 4.2.7 Variation de la quantité de sciures

(argile)	300	50	100
	300	pan	-
(sciures) H-70		60	98.5
		80	65.0
	150	100	28.0
	75	200	4.5
	75	pan	0

## Section 4.2.8 Optimisation de la température et du temps de cuisson, de la quantité de sciures et de la pression lors du moulage.

(argile)	300	50	100
	300	pan	-
(sciures) H-70		60	98.5
		80	65.0
	150	100	28.0
	75	200	4.5
	75	pan	0

Section 4.3 Système à trois composantes: argile, sciures et déchets de verre

et

Section 4.4 Conductibilité thermique des systèmes à une, deux et trois composantes.

(argile)	300	50	100
	300	pan	-
(verre)	150	100	100
	150	pan	-
(sciures) H-70		60	98.5
		80	65.0
	150	100	28.0
	75	200	4.5
	75	pan	0