



# LUND UNIVERSITY

## Matériaux thermiquement isolants : béton mousse : panneaux en laine de bois

Åstrand, Johnny; Bessadi, Lynda; Johansson, Erik; Laïd, Saadia; Teggour, Hocine; Toumi, Nadjia

1994

[Link to publication](#)

### *Citation for published version (APA):*

Åstrand, J., Bessadi, L., Johansson, E., Laïd, S., Teggour, H., & Toumi, N. (1994). *Matériaux thermiquement isolants : béton mousse : panneaux en laine de bois*. Lund Centre for Habitat Studies, Lund University.

*Total number of authors:*

6

### **General rights**

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

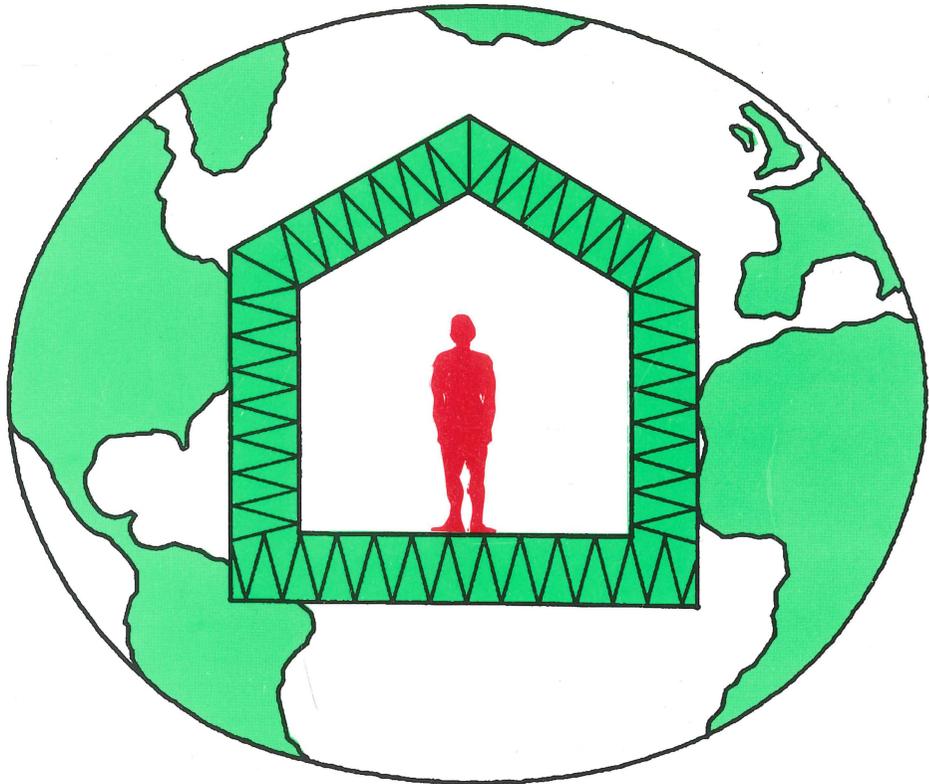
### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

# Matériaux thermiquement isolants



## Béton mousse Panneaux en laine de bois

Centre d'Etudes de l'Habitat de Lund  
Département Matériaux  
de Construction  
Université de Lund  
Suède

Centre National d'Etudes  
et de Recherches Intégrées  
du Bâtiment  
Ministère de l'Habitat  
Algérie

# **Matériaux thermiquement isolants**

**Béton mousse**

**Panneaux en laine de bois**

## **Mots clef (CNUEH<sup>1</sup> Thesaurus)**

Algérie	Economies d'énergie
Amélioration du logement	Essai
Analyse de coûts	Isolation thermique
Béton	Matériaux de construction
Climat	Recherche
Climat intérieur	Technologie
Coopération technique	Toitures

1 Centre des Nations Unies pour les Etablissements Humains (Habitat)

**Matériaux thermiquement isolants**  
Béton mousse  
Panneaux en laine de bois

ISSN 1101-7988

ISSN 0348-7911

ISBN 91-87866-06-4

ISRN LCHS-A3-R-2-SE

Rapport TVBM-3054

Coden : LUTVDG/TVBM-3054-SE

© 1993, Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées  
du Bâtiment (CNERIB), Algérie, Centre d'Etudes de l'Habitat de Lund (LCHS),  
Université de Lund, Suède et Département Matériaux de Construction,  
Université de Lund, Suède

Ce rapport a été publié avec la participation économique  
du BITS (Agence Suédoise pour la Coopération Technique  
et Economique Internationale) et de l'Université de Lund.

Mise en page : Jan-Anders Mattsson, LCHS

Traduction des parties suédoises : Franska Gruppen, Malmö, Suède

Illustrations : Mattias Rückert

Imprimerie : BTJ Tryck AB, Lund, 1994

Imprimé en Suède

Cette publication peut être commandée de

LCHS

Université de Lund

Box 118

S-211 00 LUND

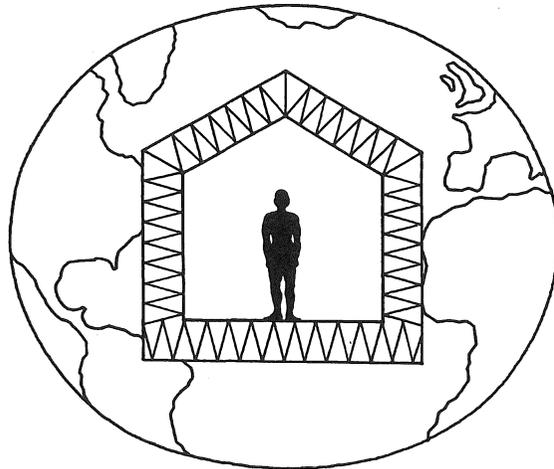
Suède

Tél. +46-46 10 97 61

Télefax +46-46 10 45 45

Telex 8305203 LUBUILD S

# Matériaux thermiquement isolants



## Béton mousse Panneaux en laine de bois

*Johnny ÅSTRAND  
Lynda BESSADI  
Erik JOHANSSON*

*Saadia LAÏD  
Hocine TEGGOUR  
Nadjia TOUMI*

# Préface

L'expérience de deux décennies d'efforts de l'Etat pour la satisfaction du besoin fondamental en logement du citoyen algérien et l'accent plus marqué sur l'aspect quantitatif devaient fatalement conduire à l'impérieuse nécessité de concilier le côté qualitatif. L'inscription au programme de recherche d'un thème portant sur les matériaux thermiquement isolants en est une des illustrations. Les travaux menés à ce titre sous l'égide du Ministère de l'Habitat ont été l'occasion d'une double démonstration pour le CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment) dans la mise au point d'une solution permettant une isolation passive des constructions par l'adjonction de matériaux permettant de multiples économies ; création d'activités productives de ces matériaux valorisant des ressources locales et réduction des dépenses de climatisation du logement pour toute sa durée de vie.

L'assistance suédoise à travers le LCHS (Centre d'Etudes de l'Habitat de Lund) et le département Matériaux de Construction à l'Université de Lund a également permis au CNERIB d'appréhender les conditions d'adoption de technologies de production de matériaux thermiquement isolants basées sur une ressource végétale, une essence d'eucalyptus largement répandue sous différents climats algériens, sur les capacités algériennes de mise en oeuvre et sur l'adhésion de partenaires suédois universitaires et industriels au concept de transfert de technologie sous-tendu par la démarche de coopération au développement.

Ainsi, le présent ouvrage résumant les travaux CNERIB – Université de Lund et leurs résultats est présenté pour susciter les relais de valorisation de la recherche à travers, les acteurs économiques intéressés de développer les activités de production conséquentes, ainsi que les chercheurs intéressés de prospecter les axes d'investissement en prolongement.

*Lakhdar KHALDOUN*

Directeur du CNERIB

# Remerciements

Ce rapport est le résultat de travaux de recherches réalisés en collaboration au cours de la période 1991–1993, et il est le fruit de l'expérience de tous ceux qui ont été en contact avec ce projet. C'est pourquoi nous tenons ici à mentionner quelques uns de ceux qui nous ont apporté leurs précieux conseils et leurs connaissances. Nous citerons, tout d'abord, les participants marocains, algériens, tunisiens et suédois à la table ronde (6 juin 1993) et au séminaire (7–8 juin 1993), tenus à Alger sur le thème « Matériaux et Isolation Thermique ». Les avis exprimés à cette occasion, tant par les autorités et les opérateurs de l'industrie du bâtiment que par les chercheurs et les consultants, nous ont été d'une aide précieuse et ont contribué largement à la mise au point de notre rapport.

Nous tenons à remercier tout particulièrement les services de l'Ambassade de Suède à Alger pour leur aide précieuse, et pour l'intérêt qu'ils ont montré pour notre projet tout au long de sa réalisation. Les interventions de l'Institut National de Recherche Forestière (INRF algérien) ainsi que celles des sociétés suédoises Isoleringbetong AB et T-produkterna AB ont été décisives pour la bonne marche du projet.

Le personnel technique et administratif aussi bien du CNERIB que du Département Matériaux de Construction et de LCHS a participé d'une manière active à la réalisation du projet et nous les en remercions.

Enfin nous n'aurions garde d'oublier dans nos remerciements le professeur Göran Fagerlund du Département Matériaux de Construction et monsieur Lakhdar Khaldoun, Directeur du CNERIB. Les connaissances du professeur Fagerlund dans le domaine des matériaux de construction et la longue expérience de monsieur Khaldoun pour ce qui est des travaux de recherche et de développement nous ont toujours confortés dans nos travaux.

*Les rédacteurs*

# Sommaire

Résumé	9
Summary	13
1 Introduction	15
1.1 Historique	17
1.2 L'objectif du projet	19
1.3 Réalisation	20
2 L'isolation thermique	21
2.1 Pourquoi des matériaux isolants	23
2.1.1 Diminution de la consommation d'énergie	24
2.2 Conception de l'isolation thermique	34
2.3 Qu'est-ce qu'un matériau isolant	39
2.4 Quels sont les matériaux isolants les mieux adaptés	41
2.4.1 Philosophie globale	41
2.4.2 Agir au niveau local	44
3 Béton mousse	47
3.1 Caractéristiques techniques	49
3.1.1 Conductivité thermique	49
3.1.2 Résistances mécaniques	50
3.1.3 Retrait	50
3.1.4 Absorption d'eau	52
3.1.5 Dosage en ciment	52
3.2 Essais en laboratoire	52
3.2.1 Résultats des essais réalisés	54
3.3 Production	60
3.3.1 Matières premières	60
3.3.2 Malaxage	61
3.3.3 Coûts de production	63
3.4 Applications	65
3.4.1 Exemple d'application et essais	66
4 Panneaux en laine de bois	69
4.1 Caractéristiques techniques	71
4.1.1 Conductivité thermique et résistances mécaniques	72
4.1.2 Retrait	72
4.1.3 Absorption d'eau	72
4.1.4 Autres propriétés	73

4.2	Production	73
4.2.1	Matières premières	74
4.2.2	Production semi-automatisée	75
4.2.3	Coûts de production	79
4.2.4	Inventaire et essais de production	81
4.3	Applications	85
4.3.1	Domaine d'application	85
4.3.2	Exemple d'application et essais	86
Annexe 1 : Description détaillée des propriétés des parois utilisées pour les calculs des coûts énergétiques au chapitre 2		93
Annexe 2 : Malaxeur pour béton mousse		95
Annexe 3 : Types de bois ayant fait l'objet de tests pour la production de panneaux en laine de bois		97
Bibliographie		103

# Résumé

En Algérie, comme dans le reste de l'Afrique du Nord, le climat intérieur des maisons laisse à désirer. En été, il y fait trop chaud et en hiver trop froid. C'est pourquoi de nombreux foyers installent des équipements de chauffage et de climatisation, grands consommateurs d'énergie, avec les frais élevés que cela entraîne pour eux.

Il serait toutefois possible d'arriver à une amélioration notable du climat intérieur en utilisant *des matériaux thermiquement isolants*. L'importance du recours à de tels matériaux ainsi que la possibilité d'introduire de nouveaux matériaux thermiquement isolants sur le marché algérien a fait l'objet d'une étude réalisée par le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), pour la partie algérienne et par l'Université de Lund, départements Matériaux de Construction et Lund Centre for Habitat Studies (LCHS), pour la partie suédoise. Ce projet s'est étendu sur la période 1991-1993.

Même sans apport d'énergie, il est possible d'améliorer notablement le climat intérieur d'un bâtiment en le modelant judicieusement. On y parvient en utilisant aussi bien des matériaux thermiquement isolants qu'accumulateurs de chaleur, en pratiquant la ventilation nocturne, en tirant profit du rayonnement solaire hivernal, etc., c'est à dire la climatisation passive.

Dans le cas de bâtiments à usage d'habitation, il est possible d'abaisser les frais de chauffage et le refroidissement en procédant à leur isolation thermique. Les calculs énergétiques furent conduits à partir d'un bâtiment de dimensions moyennes (situé à Ghardaïa, dans la partie septentrionale du Sahara). Si on admet une température intérieure de 18°C minimum et de 28°C maximum, on peut arriver à une diminution de la consommation énergétique annuelle d'environ 20%, en isolant la toiture de façon à ramener le coefficient de transmission thermique, la valeur  $K$ , de 2,3 (actuellement la valeur normale), à 0,5 W/m<sup>2</sup>C. Si, en plus, on isole les murs de façon à abaisser la valeur  $K$  de 1,9 à 0,8 W/m<sup>2</sup>C et qu'on utilise un double vitrage, on arrive à une diminution des coûts énergétiques annuels d'environ 40%.

L'Algérie manque de matériaux locaux thermiquement isolants adaptables aux techniques de construction algériennes. L'objectif du projet était de préparer, sur le marché des matériaux de construction algérien, l'introduction de nouveaux matériaux thermiquement isolants, pouvant être produits avec des matières premières locales à de faibles coûts d'investissement. Les matériaux étudiés sont *le béton mousse* et *le panneau en laine de bois*, tous deux faciles à produire et parfaits pour l'isolation thermique des toitures, souvent la partie la

plus importante d'un bâtiment à isoler, mais également pour l'isolation d'autres parties du bâtiment.

Le béton mousse destiné à l'isolation thermique (faible densité) est fabriqué à partir de trois matières premières seulement : ciment, eau et agent moussant. Ce dernier est un produit chimique utilisé pour produire la mousse qui donne au béton mousse sa structure poreuse. Le béton mousse est fabriqué dans un simple malaxeur, donc pour un faible coût d'investissement. Il est généralement coulé in situ et est idéal pour l'isolation des surfaces horizontales, comme les toitures plates, par exemple. Il peut être coulé en faible pente ce qui permet de l'utiliser tout particulièrement comme forme de pente.

Le béton mousse est un matériau qui a fait ses preuves depuis plus d'un demi-siècle d'utilisation, connu pour sa bonne durabilité. Le matériau a une bonne capacité d'isolation thermique (la conductivité thermique,  $\lambda$ , est  $0,08 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  pour une densité de  $300 \text{ kg/m}^3$ ) et il est extrêmement résistant au feu.

Un béton mousse d'origine suédoise a été testé dans des conditions identiques à celles de l'Algérie, avec des matières premières algériennes (en plus de l'agent moussant, importé). Le malaxeur fut fabriqué en Algérie. Les essais réalisés ont démontré que le produit peut être facilement fabriqué en Algérie et qu'il répond aux normes de résistance exigées. L'agent moussant est également facile à produire. Une production en Algérie même implique, toutefois, l'importation de certaines des matières premières entrant dans sa composition.

Les panneaux en laine de bois sont fabriqués en ciment, laine de bois et eau. La laine de bois est obtenue par rabotage des troncs d'arbre. Un certain nombre de types de bois se prête à cet usage (voir liste à l'annexe 3). Ces panneaux sont fabriqués en usine. L'équipement en machine le plus important concerne les raboteuses servant à la production de laine de bois et le malaxeur dans lequel on mélange la laine de bois humide et le ciment.

Les panneaux en laine de bois sont, en général, 2 à 2,5 m de long sur 50 à 60 cm de large et 2 à 15 cm d'épaisseur. Ils ont une excellente propriété d'isolation thermique (conductivité thermique,  $\lambda$ , de  $0,08 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  pour une densité de  $300 \text{ kg/m}^3$ ). Les panneaux en laine de bois sont en usage depuis plus de 80 ans et bien qu'ils contiennent du bois, ils sont connus pour leur excellente résistance à la pourriture et à la moisissure. Ils sont, en outre, difficilement inflammables.

Le bois est considéré, en Algérie, comme un produit rare. Un inventaire montre, toutefois, qu'il y a suffisamment d'arbres pour la production de panneaux en laine de bois. Cette activité permettrait de préserver et développer l'espace forestier par une meilleure gestion de la forêt en y créant des activités économiques. On a eu recours à deux types d'arbres locaux : les eucalyptus *camaldulensis* et *gomphocephala*. Les essais préliminaires avec de petits panneaux produits artisanalement, ont donné de bons résultats. Des panneaux furent également produits en série en utilisant de l'*eucalyptus camaldulensis* dans une usine suédoise. Ces panneaux ont été

transportés en Algérie et utilisés en faux-plafond pour l'isolation du laboratoire du CNERIB.

Le grand avantage, tant du béton mousse que du panneau en laine de bois, est qu'on peut facilement les intégrer aux techniques de construction prévalant en Algérie, et qu'il n'est donc pas nécessaire d'innover en la matière. Les deux matériaux possèdent une résistance relativement élevée, ce qui fait qu'ils remplacent des matériaux moins isolants, utilisés jusqu'à maintenant. Le rapport présente de possibles domaines d'utilisation des deux matériaux pour l'isolation des toitures.

Le béton mousse et le panneau en laine de bois devraient être concurrentiels sur le marché algérien. Etant donné qu'il est intégré à la nouvelle construction de telle façon qu'il remplace les autres matériaux et que la production en est simplifiée, et donc accélérée, les coûts d'isolation thermique d'une maison seront faibles ou même inexistants.



# Summary

Many buildings in Algeria, and the rest of North Africa, have a poor indoor climate. They are too hot during the summer and too cold in the winter. People use heaters or air conditioners for better comfort. This equipment consumes much energy, which means that households must pay a lot for acceptable room temperatures.

Indoor climate can be improved significantly by using thermal insulation. The importance of thermal insulation, and the feasibility of introducing new thermal insulation materials to the Algerian market, were studied in a research cooperation between the National Centre for Building Research and Studies (CNERIB), Algeria, and the Department of Building Materials and Lund Centre for Habitat Studies (LCHS), Lund University, Sweden. The project took place during 1991–1993.

Indoor climate can be greatly improved, even without the addition of extra energy, by good building design. This includes using heat insulating and heat storing materials, practising night ventilation, taking advantage of solar radiation during the winter, and other techniques of passive climatization.

If active heating and cooling are used, energy consumption can be significantly reduced with heat insulation materials. Computer calculations were done for a typical building in Ghardaïa, in the northern Sahara. For an indoor temperature between 18–28°C, annual energy consumption can be reduced by 20% through insulating the roof and reducing its U-value from the current average of 2.3 to 0.5 W/m<sup>2</sup>°C. If one further insulates the walls to reduce the U-value from 1.9 to 0.8 W/m<sup>2</sup>°C, and fits double glazed windows, annual energy consumption is reduced by 40%.

There is a lack of local thermal insulation materials in Algeria suitable for local building techniques. The aim of the project was to prepare for the introduction of new thermal insulation materials to the Algerian market. These new materials can be produced from local ingredients and with small investment. The materials studied were foamed concrete and woodwool slabs. Both materials are simple to produce and are very suitable for thermal insulation of roofs, often the most important part of the building to insulate. They are also very good for insulating other building components.

Foamed concrete intended for thermal insulation has a low density and is made from only three ingredients: cement, water and a foaming agent. The foaming agent is a chemical compound that gives the foamed concrete its porous structure. Foamed concrete can be made in a simple mixer, so the investment cost is low. It is normally cast in place and is excellent as thermal insulation of horizontal components.

It can be cast with a gentle slope which makes it particularly useful as an insulating screed on flat roofs.

Foamed concrete is a proven material, in use for over 50 years, with good durability. It has good thermal insulation and extremely good fire protection properties. Heat conductivity  $\lambda$  is 0.08 W/m°C at a density of 300 kg/m<sup>3</sup>.

A Swedish formula for foamed concrete was tested with local cement in a locally produced mixer in Algeria. (The foaming agent was imported from Sweden.) The tests showed that the material can be produced in Algeria, and it fulfils all requirements for strength. The foaming agent would also be simple to produce in Algeria, but might require some imported components.

Woodwool slabs are made of cement, woodwool and water. Woodwool is produced by shredding logs of one of several suitable trees. A list of woods, tested for woodwool slab production, is found in Appendix 3. Woodwool slabs are produced in a factory. The most important pieces of equipment are a shredding machine to produce the woodwool and a mixer to blend the damp woodwool and cement.

Woodwool slabs are normally produced 200–250 cm long, 50–60 cm wide and 2–15 cm thick. They have very good thermal insulation properties. Heat conductivity  $\lambda$  is 0.08 W/m°C at a density of 300 kg/m<sup>3</sup>. Woodwool slabs have been used for over 80 years, and despite their wood content, are known to have good resistance to mould, rot and flame.

Wood is considered a scarce resource in Algeria. A survey showed however that there is more than enough forest to produce woodwool slabs. Pilot production was done with two local types of eucalyptus, *E. camaldulensis* and *E. gomphocephala*. The preliminary tests, making small slabs by hand, gave good results. *E. camaldulensis* was also tested in mass production in a Swedish factory. These slabs were transported to Algeria and used as ceiling in the laboratory of CNERIB.

A great advantage of both foamed concrete and woodwool slabs is that they are simple to integrate in traditional Algerian buildings. That is, it is not necessary to develop new construction methods. In addition both materials have a relatively high strength, so they can replace currently used materials that give less thermal insulation. The report suggests applications for both materials, primarily as roof insulation.

Foamed concrete and woodwool slabs should be economically competitive on the Algerian market. Since the material is integrated in the building and replaces other materials, construction can in some cases be simpler, and faster, so that the actual cost for thermal insulation is very small or nothing.

# Introduction



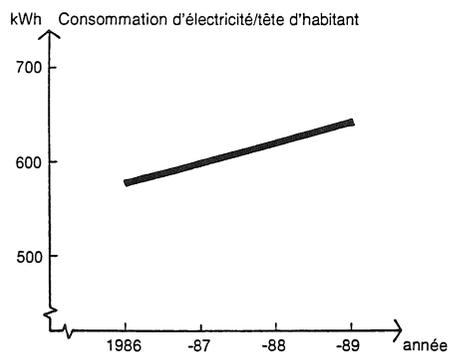
# 1 Introduction

## 1.1 Historique

La conception actuelle des toitures dans les constructions modernes en Afrique du Nord est souvent à l'origine d'un niveau de confort insuffisant. En général, l'isolation thermique de la toiture est insuffisante, ce qui entraîne des températures intérieures trop élevées en été et trop basses en hiver. Cela implique que l'on installe des équipements de chauffage et de climatisation au fur et à mesure que l'économie des ménages s'améliore. Il en résulte une augmentation de la consommation d'énergie dans le pays tandis que les ménages deviennent de plus en plus dépendant de l'énergie afin de maintenir un climat intérieur satisfaisant. Pour les ménages les moins favorisés, ces coûts d'énergie représentent une forte part du budget familial. Il s'avère donc important de pouvoir réduire la transmission de chaleur à travers les bâtiments afin d'abaisser la consommation énergétique et par ce fait les coûts.

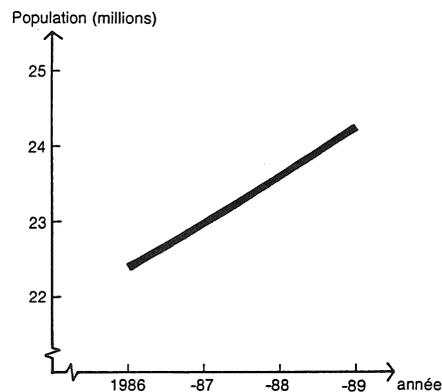
**Fig. 1.1**  
Consommation d'électricité par tête d'habitant en Algérie 1986-89.  
(Source : Rapport statistique annuel sur l'énergie, 1989).

Electricity consumption per person in Algeria 1986-89.  
(Source: Energy Statistics year book 1989).



**Fig 1.2**  
Croissance démographique en Algérie 1986-89.  
(Source : Nations Unies, Département population).

Population growth in Algeria 1986-89.  
(Source: United Nations Population Division).



Les simulations par ordinateur effectuées par l'Université de Lund, Suède, en collaboration avec le CNERIB (*Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment*), Algérie, ont démontré que pour les zones à climat désertique d'Afrique du Nord, les toitures ayant une bonne isolation thermique, associées à des murs à bonne capacité de stockage thermique, procureraient un niveau de confort intérieur satisfaisant aussi bien en été qu'en hiver. Les calculs coïncident bien avec nos expériences des 20 dernières années menées en Algérie et en Tunisie, où l'on a noté une détérioration du niveau de confort intérieur lorsqu'on est passé des constructions traditionnelles ayant une certaine isolation thermique dans la toiture et avec une bonne capacité de stockage thermique des murs à des constructions modernes. Les simulations ont également démontré que seul un complément d'isolation thermique des constructions modernes contribuerait à une amélioration du niveau de confort intérieur.

Un passage à des toitures à bonne isolation thermique nécessite l'utilisation de matériaux thermiquement isolants.

En Algérie, il est actuellement difficile de se procurer des produits isolants de bonne qualité et à des coûts abordables, d'où la nécessité de développer des matériaux thermiquement isolants à base de matériaux localement disponibles faisant appel à des techniques de production et de mise en oeuvre simples.

Le précédent projet de recherche algéro-suédois traitant du climat intérieur des bâtiments a été mené à bien. Des études ont été réalisées sur les possibilités d'amélioration du confort intérieur. Ce projet a débouché entre autres sur un avant projet concernant les possibilités d'utiliser les ressources locales en alfa comme composant essentiel d'un matériau isolant.

Cette étude avait pour but, à travers des essais de laboratoire, de développer un matériau thermiquement isolant pour les toitures. Les panneaux étaient produits dans des moules en bois et le matériau de base était les fibres d'alfa agglomérées au ciment.

Les résultats obtenus ont montré que l'alfa utilisé à l'état naturel présentait une mauvaise adhérence avec le ciment et qu'il fallait procéder à un traitement chimique ou mécanique de la fibre pour améliorer l'adhérence alfa-ciment.

Le prix élevé du traitement de la fibre ainsi que les difficultés rencontrées dans la récolte de l'alfa (cueillette manuelle) ont conduit à étudier d'autres matières premières (par exemple le bois d'eucalyptus) pour développer des matériaux thermiquement isolants.

Les économies d'énergie sont plus que jamais à l'ordre du jour. Une diminution de la consommation d'énergie représente pour l'individu une abaissement de ses coûts de production et pour la société une amélioration de l'environnement. Le CNUEH exprime ses stratégies pour la conservation de l'énergie<sup>1</sup> :

« Les stratégies pour la conservation de l'énergie dans les nouvelles constructions visent les utilisateurs, les architectes et les entrepreneurs tandis que les stratégies pour la conservation de l'énergie dans les anciens bâtiments visent principalement les utilisateurs. L'implantation des stratégies pour la conservation de l'énergie exige une coopération entre les organisations clés, telles les instituts financiers, les ministères, les instituts de recherche sur les matériaux et la construction ainsi que les petites organisations commerciales et les communautés. De la part des gouvernements il est nécessaire de mettre en place, un programme de politique intégrée afin d'utiliser d'une manière effective et efficace les quelques ressources allouées. »

## 1.2 L'objectif du projet

La fonction essentielle d'une construction est de créer un élément intérieur adapté au besoin de l'occupant et de son confort. En Algérie ce n'est que ces temps présents qu'il est apparu la nécessité de développer l'isolation thermique dans les préoccupations des constructeurs.

L'utilisation de parois lourdes dans le domaine de la construction est l'une des solutions classiques pour se protéger des agressions climatiques. Cette solution exige une consommation excessive de matériaux non disponibles en abondance sur le marché algérien. De plus cette solution ne permet pas d'atteindre un niveau de confort satisfaisant surtout dans les régions chaudes où l'inertie des parois doit être associée à une isolation thermique.

Pour faire face à une importation de matériaux ou de techniques non adaptés et contraire aux exigences locales, nous proposons dans cette étude l'intégration de matériaux locaux dans la conception de composants thermiquement isolants.

L'objectif du projet réalisé a été de développer un matériau thermiquement isolant particulièrement adapté aux toitures en :

- Développant un matériau thermiquement isolant de faible coût à base de matériaux localement disponibles ainsi que sur la base de techniques simples de production. Cela est précédé de la définition

---

<sup>1</sup> « Energy efficiency in housing construction and domestic use in developing countries », Centre des Nations Unies pour les Etablissements Humains (CNUEH), Nairobi, Kenya, 1991.

des exigences d'isolation thermique, de résistance mécanique et de durabilité en fonction des conditions climatiques locales.

- Développant des techniques de fabrication de matériaux thermiquement isolants rationnelles et concurrentielles. Ces techniques doivent être adaptées au contexte local et rendre possible le développement d'une fabrication à grande échelle.

## Réalisation

1.3

Le projet a été réalisé en collaboration entre le CNERIB et les Départements LCHS (Lund Centre for Habitat Studies) et Matériaux de Construction au sein de l'Université de Lund. L'étude du projet a mis l'accent sur la production d'un matériau adapté aux conditions algériennes et sur son utilisation pratique. Les essais ont été réalisés en laboratoire, afin de tester l'aptitude et les caractéristiques techniques du matériau, et à échelle réelle en réalisant des toitures afin de tester l'aptitude d'utilisation du matériau.

Ce projet a été suivi par deux entreprises industrielles suédoises en tant que consultants : *Isoleringsbetong AB* qui produit un agent moussant et un malaxeur pour béton mousse et *T-produkterna AB* qui est le plus grand producteur de panneaux en laine de bois en Scandinavie. Ces deux sociétés, implantées sur le marché depuis près de 50 ans, ont mis à notre disposition leur expérience afin de réaliser dans de bonnes conditions les essais en laboratoire.

Au cours de ce projet, nous avons été en étroite contact avec l'Institut National de Recherche Forestière (INRF) algérien qui nous a été d'une aide précieuse en nous renseignant sur le peuplement des forêts en Algérie et qui a montré un intérêt positif dans l'utilisation commerciale des forêts d'eucalyptus entre autres, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

Du côté algérien, le projet a été financé par le Gouvernement algérien et pour le côté suédois par l'intermédiaire de l'Agence Suédoise pour la Coopération Technique et Economique Internationale (BITS) et par l'Université de Lund.

# L'isolation thermique



# 2 L'isolation thermique

## 2.1 Pourquoi des matériaux isolants

En Algérie, l'indifférence dont l'isolation thermique était l'objet auparavant s'explique par :

- Le mode de construction : on construisait de façon massive et les matériaux employés avaient une bonne inertie thermique, les parois réagissait donc moins vite aux variations de températures extérieures.
- La notion de confort thermique : on disposait des sources de chaleur (ou des climatiseurs) et on se contentait de leur rayonnement afin d'assurer un certain confort thermique.
- Les faibles coûts énergétiques : on se permettait une consommation excessive d'énergie afin de compenser les déperditions à travers les parois.

Dans ces trois domaines, des changements très importants sont intervenus au cours de ces dernières années, dont les principaux sont :

- L'évolution des méthodes de construction : les constructions actuelles sont moins lourdes et les matériaux utilisés ont une faible inertie thermique, les parois réagissent donc plus vite aux variations de températures extérieures.
- L'exigence d'un meilleur confort thermique : l'obtention d'un meilleur confort thermique n'est plus résolu uniquement par le chauffage ou la climatisation, il nécessite une répartition plus homogène de la température dans les constructions.
- L'économie d'énergie : le poids croissant des dépenses en chauffage et climatisation préoccupe actuellement les gestionnaires et les usagers, ce qui conduit à étudier des dispositions de construction visant à réduire les déperditions à travers les parois.

L'évolution des méthodes de construction, le besoin d'un confort thermique plus approprié et le souci d'économie d'énergie ont suscité un intérêt pour une amélioration de l'isolation, c'est-à-dire la recherche des matériaux et des techniques de mise en oeuvre susceptibles de réduire le flux de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments.

Ces techniques ont pour rôle principal la conservation des calories par un ensemble de dispositions réduisant l'échange de chaleur entre deux espaces de températures différentes (l'intérieur et l'extérieur d'une construction), mais elle procure également un certain nombre d'avantages supplémentaires dont les principaux sont :

- l'amélioration du confort en élevant les températures superficielles des parois,
- la diminution du coût globale de construction en associant l'isolation à des structures légères,
- l'économie d'énergie en diminuant la puissance des installations de chauffage et de climatisation,
- la durabilité des constructions en protégeant les éléments du bâtiment contre les effets de variation de température.

A cet effet une isolation thermique inexistante, insuffisante ou incorrecte entraînerait des dégâts importants à la construction et une dévalorisation du cadre bâti.

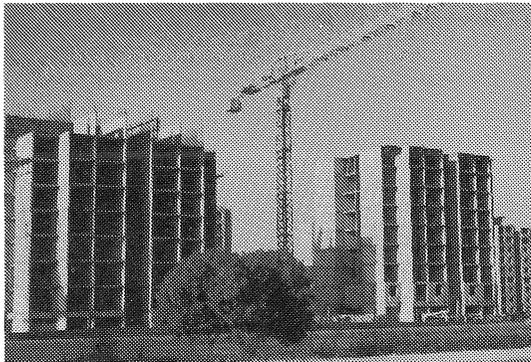


Fig. 2.1 Construction typique moderne d'un immeuble sans utilisation de matériaux thermiquement isolants.

Typical modern construction of multi-storey buildings without thermal insulation.  
(Photo Ali Arbaoui)

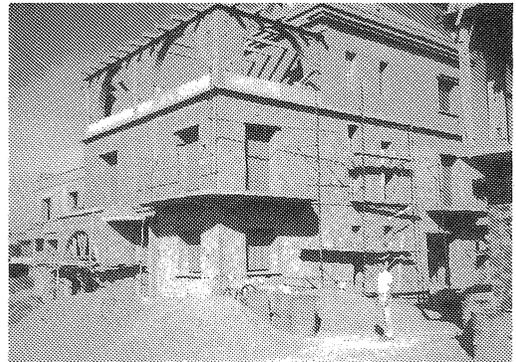


Fig. 2.2 Construction typique moderne d'une maison individuelle sans utilisation de matériaux thermiquement isolants.

Typical modern construction of a one-family house without thermal insulation.

## Diminution de la consommation d'énergie

### 2.1.1

De nombreuses régions d'Algérie, principalement les zones sahariennes, celle des montagnes de l'Atlas et celle des Hauts-plateaux entre les deux chaînes de l'Atlas, connaissent d'importantes variations de température du climat extérieur, tant journalières que saisonnières.

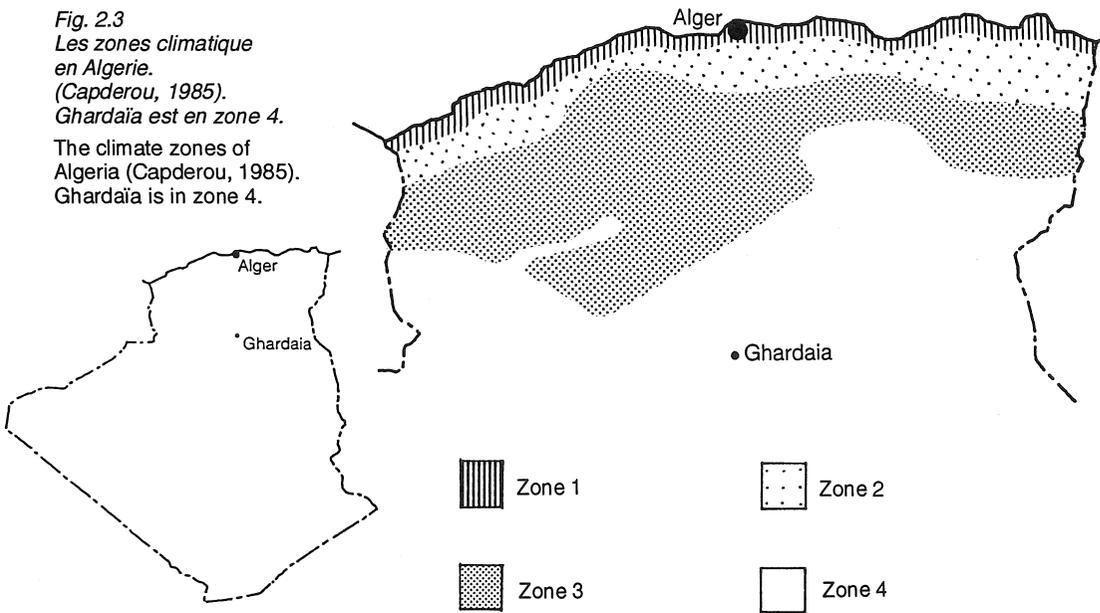
Ce qui implique qu'il faut chauffer les logements durant la saison froide et les climatiser durant la saison chaude. La consommation d'énergie sera importante, tant en hiver qu'en été. Les coûts également : ces temps-ci, le prix de l'énergie a d'ailleurs tendance à augmenter rapidement en Algérie.

Dans les régions sahariennes, la consommation énergétique en relation avec la climatisation des locaux est appelée à augmenter. Et ce, en raison, entre autres, du mauvais rendement des climatiseurs.

La consommation d'énergie des maisons algériennes pourrait être largement diminuée si les toitures, mais aussi les murs, avaient une meilleure isolation thermique. Aujourd'hui, le coefficient de transmission de chaleur des toitures et des murs est très élevé. Ces valeurs

Fig. 2.3  
Les zones climatique  
en Algérie.  
(Capderou, 1985).  
Ghardaïa est en zone 4.

The climate zones of  
Algeria (Capderou, 1985).  
Ghardaïa is in zone 4.



peuvent être sensiblement abaissées si on a recours à des matériaux thermiquement isolants. Les calculs ci-dessous montrent que les économies d'énergie réalisées peuvent être importantes, ce qui implique donc une diminution des coûts d'exploitation.

### Consommation d'énergie d'une maison « type »

Des calculs énergétiques ont été réalisés pour mettre en évidence la quantité d'énergie que l'on peut économiser en utilisant des matériaux thermiquement isolant dans un bâtiment. Les calculs sont effectués à partir d'un bâtiment non-isolé dont on commence par isoler la toiture avant d'isoler ensuite les murs.

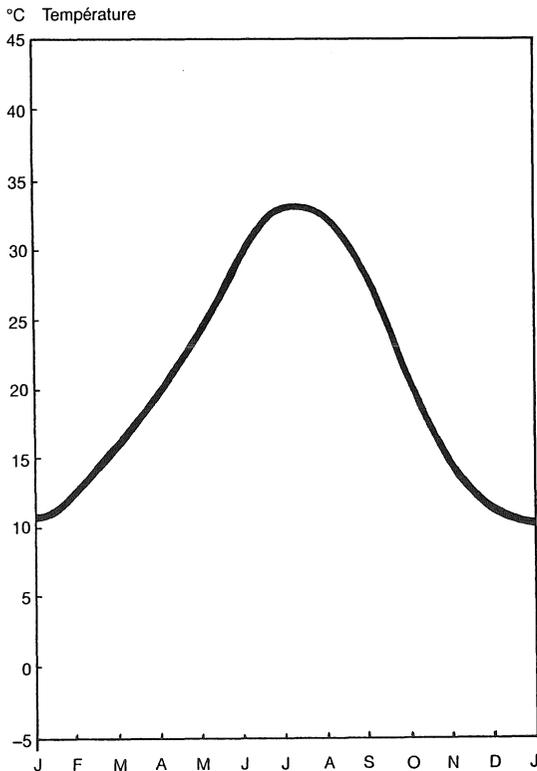
#### **Programme de calcul**

Le programme utilisé<sup>2</sup> est destiné à des calculs concernant la consommation énergétique d'un bâtiment durant une période déterminée d'un an au moins.

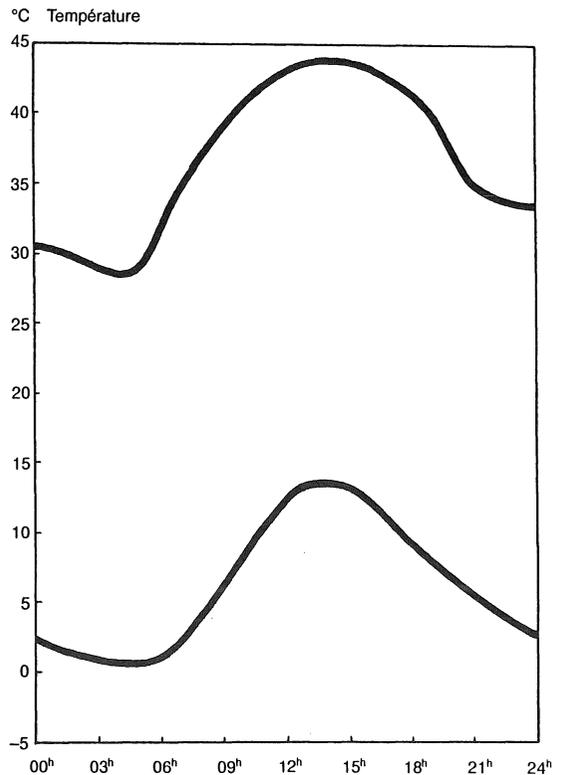
Le programme utilise un modèle de calcul dynamique permettant de tenir compte de l'inertie thermique du bâtiment et des déperditions d'air. Les données du programme sont : la température extérieure, le rayonnement solaire et le vent. Le calcul fonctionnant sur une base horaire, il est nécessaire de disposer de données horaires, sur une période d'un an concernant la localité en question.

La consommation d'énergie obtenue est fonction du climat, de la configuration du bâtiment et de la température intérieure souhaitée.

<sup>2</sup> VIP+, mis au point par Skanska AB, la première entreprise suédoise de construction et une des plus importantes en Europe.



*Fig. 2.4*  
 La température ambiante quotidienne moyenne au cours de l'année 1975 à Ghardaïa.  
 The daily mean air temperature for the year of 1975 in Ghardaïa.



*Fig. 2.5*  
 La température ambiante pour le jour de janvier le plus froid et le jour de juillet le plus chaud à Ghardaïa 1975.  
 The air temperature for the coldest day (January) and the warmest day (July) of the year 1975 in Ghardaïa.

***Climat : choix de la ville de Ghardaïa***

Lors des calculs, on a utilisé le climat de la ville de Ghardaïa. Celle-ci est située dans la partie septentrionale du Sahara algérien, à la latitude de 32,4. Le climat de Ghardaïa se caractérise par d'importantes variations de température, tant diurnes qu'annuelles. Les jours de fort ensoleillement sont nombreux et le rayonnement solaire est extrêmement puissant. La figure 2.4 montre la température quotidienne moyenne à l'ombre au cours de l'année 1975 (Boudiaf, 1984), (année normale sur le plan climatique). La température moyenne cette année-là était de 21,1°C. Le mois le plus froid était janvier et le plus chaud juillet.

La figure 2.5 montre respectivement les températures à l'ombre pour le jour de janvier le plus froid et pour le jour de juillet le plus chaud.

***Configuration de la maison «type»***

Lors des calculs, nous avons considéré un bâtiment correspondant à une maison moderne abritant une famille (Ouahrani, 1993), voir

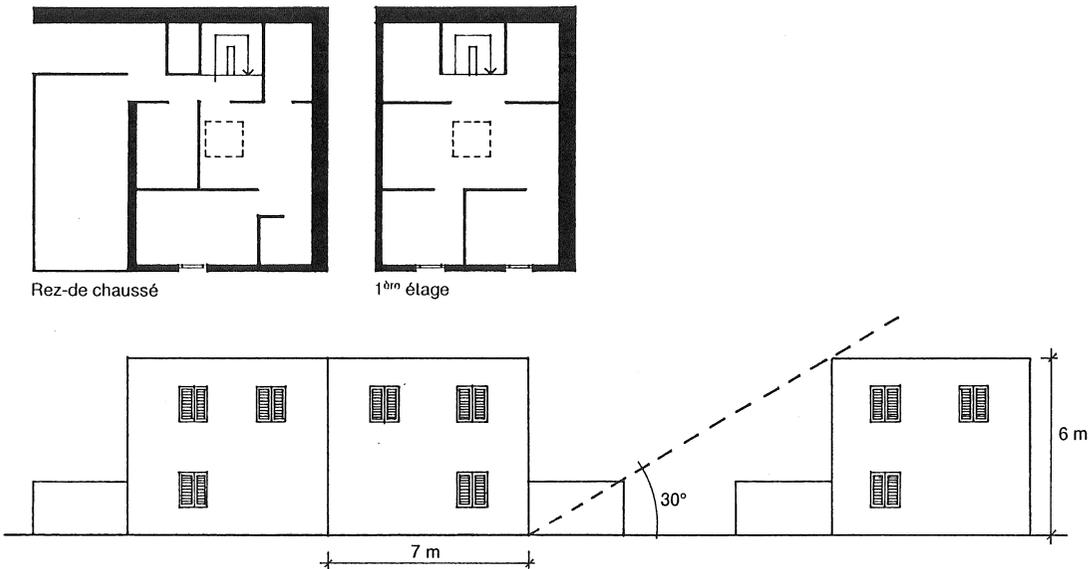


Fig. 2.6 Plan de la maison «type» qui a servi de référence comme base de calcul. Exposition de la maison type au rayonnement solaire.

Plans of the reference house for the calculations. Exposure of the reference house to solar radiation.

figure 2.6. La maison est située près d'autres bâtiments. Le volume du bâtiment est de  $380 \text{ m}^3$  et la surface utile de  $130 \text{ m}^2$ . Deux des murs de la maison sont mitoyens avec les maisons voisines, alors que les deux murs extérieurs sont exposés au soleil et au vent. La conception des fondations, de la toiture et des murs de cette maison « type » est indiquée au tableau 2.1.

Pour les fondations, on considère que  $0,5 \text{ m}$  de terre contribue à l'inertie thermique. On a également considéré que dans la limite d'un mètre au delà des murs extérieurs, la résistance thermique de la terre est de  $1,0 \text{ m}^2\text{C/W}$  alors que sous la maison, elle est de  $3,4 \text{ m}^2\text{C/W}$ .

La toiture est badigeonnée (à la chaux), ce qui a pour effet de réfléchir la majeure partie de la lumière solaire. Pour une surface badigeonnée, l'absorption,  $\alpha$ , est fixée à  $0,3$ . Ce qui veut dire que  $30\%$  du rayonnement solaire est absorbé par la toiture et que  $70\%$  est réfléchi. La toiture est considérée comme parfaitement étanche à l'air.

Les murs extérieurs sont constitués d'une structure combinée poteau-poutre en béton armé avec une entraxe de  $3 \text{ mètres}$  entre les poteaux. L'espace entre les poteaux est constitué de parpaings en béton. Les murs sont recouverts d'une peinture assez claire, ce qui veut dire que  $\alpha$  est fixé à  $0,5$ . La surface des fenêtres est évaluée à  $15\%$  de chacun des deux murs exposés au soleil et au vent. La maison a une porte de  $2 \text{ m}^2$ . Les murs ne peuvent être considérés comme étanches car il y a des déperditions d'air en raison de la perméabilité à l'air au niveau des fenêtres et des portes. On considère qu'il y a un changement de l'air intérieur pour les murs fixée à  $0,5$  par heure.

Les caractéristiques techniques des différentes parois du bâtiment, comme le coefficient de transmission,  $K$ , le stockage thermique,

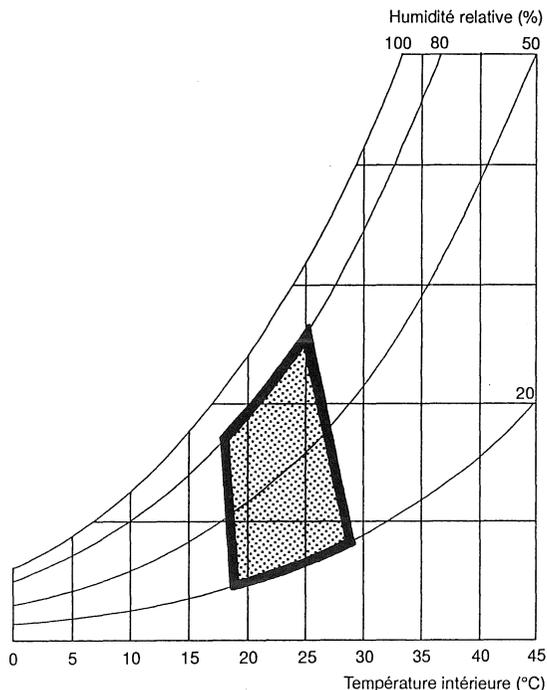


Fig. 2.7  
Diagramme de confort selon  
Markus & Morris, 1980.

Comfort diagramme  
according to Markus  
& Morris, 1980.

$C$ , l'absorption,  $\alpha$ , et la transmission,  $\tau$ , sont indiquées au *tableau 2.1*. La conception exacte des différentes parois du bâtiment, est indiquée à l'annexe 1.

### Confort

Selon Markus & Morris (1980) on a un confort intérieur acceptable pour des températures variant entre 18 et 28°C, voir figure 2.7. La température supérieure n'est valable qu'à la condition que l'humidité relative soit inférieure à 40%. Ceci étant le cas pour Ghardaïa pendant l'été, on a utilisé les limites suivantes lors des calculs :

- température maximum : 28°C
- température minimum : 18°C

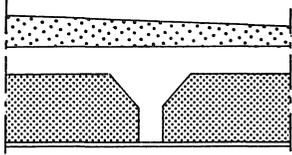
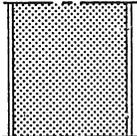
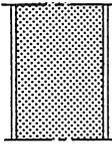
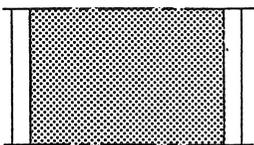
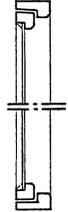
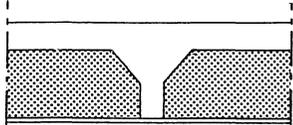
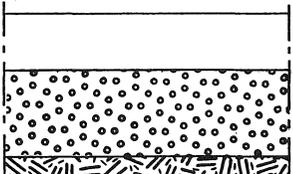
### Calculs

Les calculs ont été réalisés pour trois cas de figure :

1. Murs et toiture non isolés
2. Murs non isolés, toiture isolée
3. Murs et toiture isolés, fenêtres à double vitrage au lieu de vitrage simple.

Dans les trois cas, on a utilisé la même fondation. Le solivage d'étage, qui est du même type que le toit du cas no. 1, et les murs intérieurs, formé de parpaings en béton, sont identiques dans les trois cas de figure. Les caractéristiques de chaque parois sont indiquées aux tableaux 2.1–2.3 et la description détaillée des propriétés des parois figure à l'annexe 1.

## Cas 1

		matériaux	$K^1$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$C$ ( $Wh/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$\alpha$	$\tau$
toiture		forme de pente + béton + hourdis	2,3	90	0,3	—
murs extérieurs		parpaings en béton	1,9	70	0,5	—
murs intérieurs		parpaings en béton	—	53	—	—
murs mitoyens		Pierre	—	210	—	—
fenêtres		simple vitrage	5,9	—	—	1,12
plancher		béton + hourdis	—	65	—	—
fondations		béton + gravier + terre	0,3 <sup>2</sup>	320	—	—

1 Y compris les ponts thermiques.

2 On a tenu compte du fait que la résistance thermique du sol est plus faible aux bords du mur extérieur.

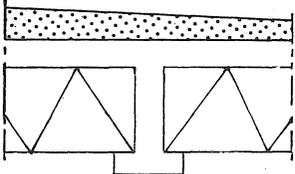
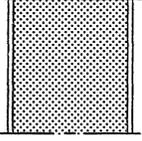
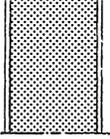
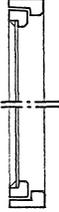
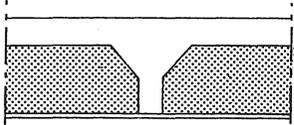
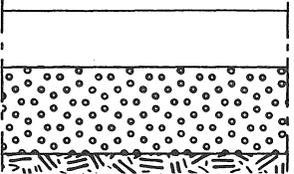
Tableau 2.1 Caractéristiques de la toiture, des murs, des fenêtres et des fondations dans le cas no. 1.

( $K$  = le coefficient de transmission thermique;  $C$  = le stockage thermique;  
 $\alpha$  = l'absorption du rayonnement solaire;  $\tau$  = la transmission du rayonnement solaire.)

Properties of roof, walls, windows and foundation for the three calculated cases.

( $K$  = thermal conductance;  $C$  = heat capacity;  $\alpha$  = absorptivity;  
 $\tau$  = transmission of solar radiation.)

## Cas 2

		matériaux	$K^1$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$C$ ( $Wh/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$\alpha$	$\tau$
toiture		forme de pente + béton + panneaux en laine de bois	0,5	69	0,3	—
murs extérieurs		parpaings en béton	1,9	70	0,5	—
murs intérieurs		parpaings en béton	—	53	—	—
murs mitoyens		pierre	—	206	—	—
fenêtres		simple vitrage	5,9	—	—	1,12
plancher		béton + hourdis	—	65	—	—
fondations		béton + gravier + terre	0,3 <sup>2</sup>	320	—	—

1 Y compris les ponts thermiques.

2 On a tenu compte du fait que la résistance thermique du sol est plus faible aux bords du mur extérieur.

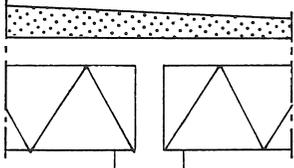
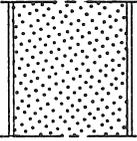
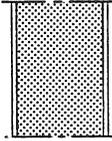
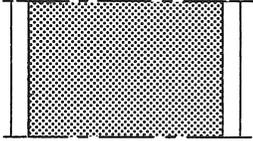
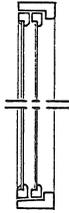
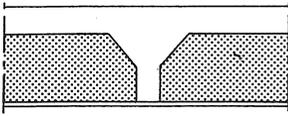
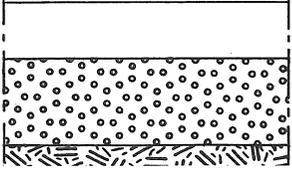
Tableau 2.2 Caractéristiques de la toiture, des murs, des fenêtres et des fondations dans le cas no. 1.  
( $K$  = le coefficient de transmission thermique;  $C$  = le stockage thermique;  
 $\alpha$  = l'absorption du rayonnement solaire;  $\tau$  = la transmission du rayonnement solaire.)

Properties of roof, walls, windows and foundation for the three calculated cases.

( $K$  = thermal conductance;  $C$  = heat capacity;  $\alpha$  = absorptivity;

$\tau$  = transmission of solar radiation.)

## Cas 3

		matériaux	$K^1$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$C$ ( $Wh/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$\alpha$	$\tau$
toiture		forme de pente + béton + panneaux en laine de bois	0,5	69	0,3	—
murs extérieurs		blocs en béton léger (siporex)	0,8	53	0,5	—
murs intérieurs		parpaings en béton	—	53	—	—
murs mitoyens		Pierre	—	206	—	—
fenêtres		double vitrage	2,9	—	—	1
plancher		béton + hourdis	—	65	—	—
fondations		béton + gravier + terre	0,3 <sup>2</sup>	320	—	—

1 Y compris les ponts thermiques.

2 On a tenu compte du fait que la résistance thermique du sol est plus faible aux bords du mur extérieur.

Tableau 2.3 Caractéristiques de la toiture, des murs, des fenêtres et des fondations dans le cas no. 1.  
( $K$  = le coefficient de transmission thermique;  $C$  = le stockage thermique;  
 $\alpha$  = l'absorption du rayonnement solaire;  $\tau$  = la transmission du rayonnement  
solaire.)

Properties of roof, walls, windows and foundation for the three calculated cases.  
( $K$  = thermal conductance;  $C$  = heat capacity;  $\alpha$  = absorptivity;  
 $\tau$  = transmission of solar radiation.)

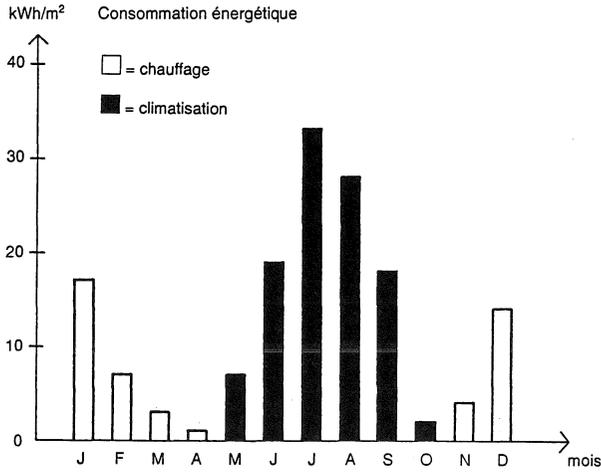


Fig. 2.8  
La consommation énergétique calculée sur l'année pour le cas no. 1.  
Energy consumption over the year for case 1.

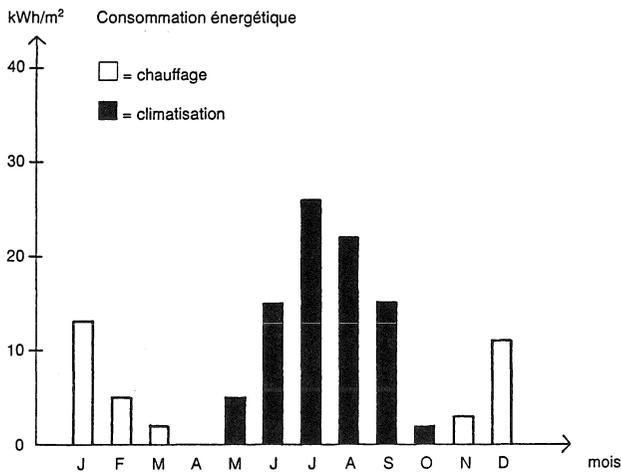


Fig. 2.9  
La consommation énergétique calculée sur l'année pour le cas no. 2.  
Energy consumption over the year for case 2.

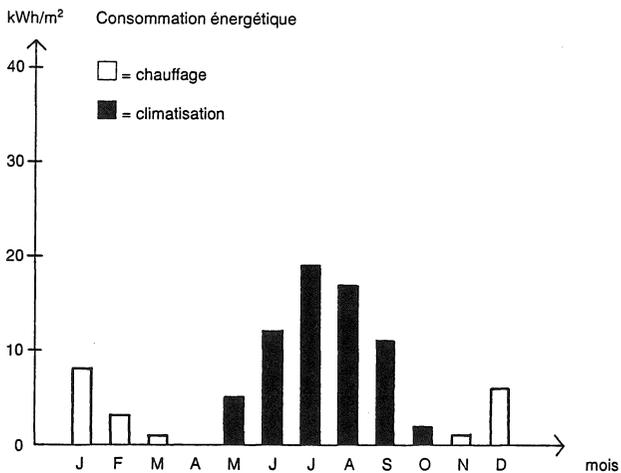


Fig. 2.10  
La consommation énergétique calculée sur l'année pour le cas no. 3.  
Energy consumption over the year for case 3.

Si la température intérieure descend en-dessous de 18°C, on calcule le besoin calorifique en kWh et si la température intérieure dépasse 28°C, on calculera le besoin de climatisation. Lors du calcul du besoin calorifique, on tient compte de la chaleur dégagée par les locataires. On compte, qu'en moyenne, trois personnes séjournent là, qui dégagent chacune 100 W, c'est-à-dire 2 600 kWh par an. L'énergie nécessaire pour l'eau chaude, l'éclairage, les travaux ménagers etc., n'entre pas en ligne de compte.

**Cas 1 : murs et toiture non isolés.** La maison est une maison type avec fondation, toiture et murs, selon le tableau 2.1. La consommation énergétique calculée sur l'année est indiquée sur la figure 2.8. La consommation d'énergie totale sur l'année était de 153 kWh/m<sup>2</sup>. Elle se caractérise par un besoin calorifique durant l'hiver (46 kWh/m<sup>2</sup>) et un besoin de climatisation pendant l'été (107 kWh/m<sup>2</sup>).

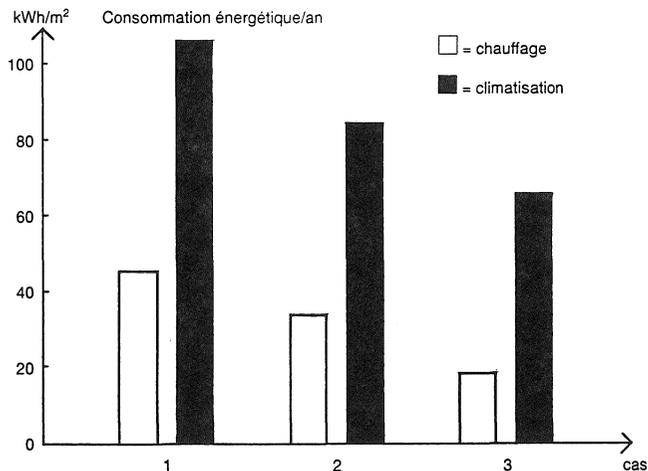
**Cas 2 : murs non isolés et toiture isolée.** Dans cette maison, on a installé une isolation thermique de la toiture, voir tableau 2.2. La consommation énergétique annuelle, indiquée à la figure 2.9, est descendue à 119 kWh/m<sup>2</sup>. Une meilleure isolation de la toiture a surtout un effet sur le besoin de climatisation qui descend à 85 kWh/m<sup>2</sup>. Le besoin calorifique sera de 34 kWh/m<sup>2</sup>.

**Cas 3 : murs et toiture isolés ainsi que des fenêtres à double vitrage.** Si même les murs sont isolés, et si on utilise des fenêtres à double vitrage, (voir tableau 2.3), la consommation énergétique annuelle descend à 85 kWh/m<sup>2</sup>. Le besoin calorifique descend à 19 kWh/m<sup>2</sup> et le besoin de climatisation à 66 kWh/m<sup>2</sup>, voir figure 2.10.

### Conclusions

Avec un climat comme celui de Ghardaïa, la consommation d'énergie d'une maison peut diminuer notablement si on utilise des matériaux thermiquement isolants, voir figure 2.11. Une amélioration de l'isolation thermique de la toiture permet de diminuer le besoin de climatisation de 20% et le besoin de chauffage de 25%. Une meilleure isolation tant de la toiture que des murs permet de diminuer le besoin de climatisation de 40% et le besoin de chauffage de 60%.

**Fig. 2.11**  
La consommation énergétique calculée sur l'année pour les cas 1, 2 et 3.  
Energy consumption over the year for cases 1, 2 and 3.



# Conception de l'isolation thermique

2.2

Le rôle d'une habitation est de procurer un abri dont la fonction est de créer un élément intérieur adapté aux besoins de l'occupant. Parmi ces besoins, le confort thermique doit être pris en considération, car il découle d'une sensation naturelle de l'être humain.

Les moyens de régulation de la température sont le chauffage quand il fait froid, et la climatisation quand il fait chaud. Ces moyens de régulation, quand ils existent, ne permettent pas d'avoir une répartition homogène de la température dans la construction d'une part et conduisent à des surcoûts d'exploitation des habitations d'autre part.

La conception d'une habitation doit donc reposer sur ces deux critères qui sont le confort thermique et l'économie d'énergie. A cet effet il convient d'étudier des dispositions constructives visant à réduire les déperditions à travers l'enveloppe des bâtiments. Afin de réduire ces déperditions, il est nécessaire que les parois du bâtiment aient la capacité de résister au flux de chaleur. Cette propriété est définie par la résistance thermique,  $R$ , elle est proportionnelle à l'épaisseur,  $e$ , du matériau et inversement proportionnelle à sa conductivité thermique,  $\lambda$ .

$$R = e/\lambda \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$$

La transmission de la chaleur à travers une paroi s'exprime par le coefficient de transmission thermique,  $K$  :

$$K = 1/R_t \text{ (W/m}^2 \text{ °C)} ; (R_t = \text{la résistance thermique totale})$$

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est inversement proportionnel à la résistance thermique totale de la paroi.

Dans la conception des constructions il faut donc prendre en compte ces différentes considérations dans le choix des matériaux à

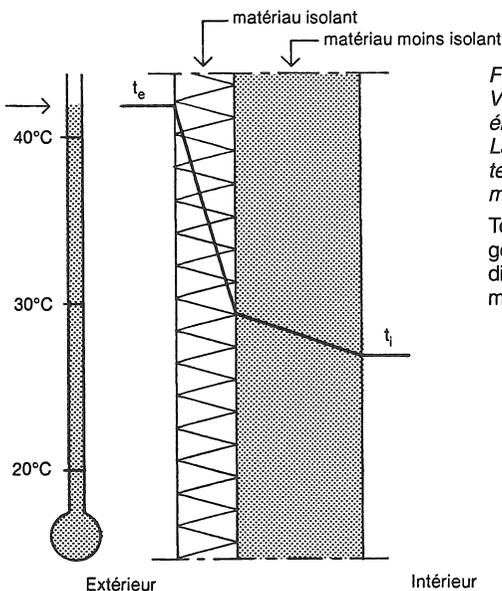


Fig. 2.12  
Variation de température dans un élément de construction hétérogène. La majeure partie de la différence de température est absorbée par le matériau isolant.

Temperature variation in a non-homogenous wall. Most of the temperature difference occurs in the insulation material.

utiliser en relation avec les températures extérieures moyennes et le climat intérieur souhaité.

La conception doit tenir compte de la position de l'isolant dans la construction car celle-ci revêt une grande importance. Une habitation construite en parois lourdes du côté extérieur et un isolant de l'intérieur met peu de temps à atteindre les exigences du confort thermique. Cependant dès que les moyens pour fournir les calories sont interrompus, elle retrouve rapidement son ambiance initiale. Par contre une habitation dont les parois lourdes sont du côté intérieur et isolée de l'extérieur met plus de temps pour atteindre le niveau de confort thermique mais quand les moyens pour fournir les calories sont interrompus, les parois restituent l'énergie emmagasinée.

Dans la conception il faut également tenir compte des aspects économiques (investissement et exploitation), car la capacité d'isolation d'un matériau dépend de sa conductivité thermique (valeur fixe) et de son épaisseur (valeur variable). Pour un matériau isolant donné les déperditions calorifiques, donc la consommation d'énergie, sont directement liées à l'épaisseur de l'isolant mis en oeuvre. Afin de réduire les consommations d'énergie il est donc nécessaire d'augmenter l'épaisseur de l'isolant, mais cette opération impliquera directement des surcoûts de construction. Il convient donc de concevoir l'isolation en fonction du niveau de confort requis, du prix des matériaux et de l'économie d'énergie à réaliser, voir figure 2.13.

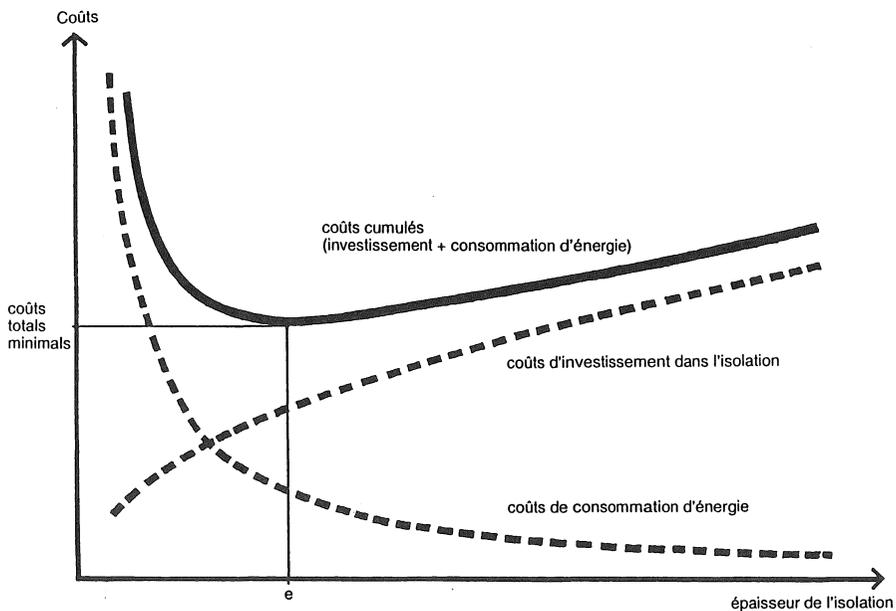


Fig. 2.13 Relation entre le coût d'investissement et les dépenses en énergie.

La somme des coûts d'investissement et des coûts énergétiques (coûts totaux) atteint un minimum pour une certaine épaisseur d'isolant (e).

Relationship between investment cost and energy cost. The total sum of these costs (total costs) has a minimum for a certain insulation thickness (e).

D'autres méthodes de conception existent; celles-ci prennent en compte, outre les températures extérieures et intérieures et les matériaux à utiliser, d'autres paramètres ayant une influence directe ou indirecte sur le climat intérieur des constructions. Les paramètres d'étude les plus importants sont la ventilation diurne et nocturne, l'orientation des bâtiments, l'ensoleillement, les modes de vie, l'inertie thermique des parois. Pour pouvoir utiliser ces méthodes et pouvoir prendre en compte différents climats et d'autres conditions sociales il est nécessaire d'effectuer des simulations sous la forme d'un programme informatique (conception assistée par ordinateur).

### Conception assistée par ordinateur

La conception optimale d'un bâtiment, c'est-à-dire une conception qui apporte le meilleur climat intérieur possible, peut être obtenue à l'aide de simulations effectuées sur ordinateur. Au sein de la recherche, on utilise des programmes puissants, par exemple DEROB (Dynamic Energy Respons of Buildings, développé par l'Université du Texas, Etats-Unis). Ces programmes utilisent des modèles de calculs dynamiques, c'est-à-dire que l'on suit l'évolution heure par heure au cours d'une longue période tout en considérant les facteurs dépendants du temps comme par exemple l'inertie thermique de la construction. Un programme de type DEROB, utilisé dans le précédent projet de collaboration entre le CNERIB et l'Université de Lund, demande un travail de longue haleine.

Il existe des programmes plus simples qui demandent moins de travail mais ceux-ci sont souvent limités et les résultats obtenus ne sont pas aussi précis. Un tel programme est celui utilisé dans les calculs de consommation énergétique ci-dessus. Il ne tient pas compte, par exemple, des températures intérieures mais uniquement du besoin énergétique. Vu l'évolution actuelle, on peut s'attendre à trouver bientôt des programmes plus simples pour l'utilisateur et plus rapides pour la conception de bâtiments mieux adaptés au climat.

Indépendamment du programme utilisé, les paramètres suivants seront introduits dans le modèle :

- *Conception du bâtiment* : emplacement et dimensions des fenêtres, orientation du bâtiment, dispositifs de ventilation, etc., ainsi que l'ensemble des paramètres sur les matériaux comme la conductivité thermique, le stockage thermique, la densité, l'absorption du rayonnement solaire, etc.
- *Climat* : relevés horaires des températures sur une période d'un an, le rayonnement solaire, les vents, l'humidité, etc., relevés effectués sur le site où le bâtiment est construit.
- *Apports de chaleur* : chaleur humaine, énergie ménagère, éclairage, etc., en fait tout ce qui provient de l'utilisation du bâtiment par un ménage.

Le but des simulations est de faire varier les paramètres influençant le climat intérieur du bâtiment. C'est ce qu'on appelle une étude paramétrique. En pratique, cela revient à étudier un «cas de référence» en faisant varier un paramètre à la fois sans toucher aux autres.

On effectue ensuite une optimisation des résultats obtenus dans l'étude paramétrique, il s'agit ensuite de combiner les valeurs qui permettent d'obtenir le meilleur climat intérieur. Cela n'est pas toujours facile. En effet, un paramètre d'une valeur élevée peut être intéressant à une période de l'année tandis que le même paramètre d'une valeur faible est intéressant dans une autre période de l'année. En outre, il est nécessaire de considérer la relation entre les paramètres. La combinaison choisie sera celle qui donne le meilleur climat intérieur moyen pendant toute l'année.

L'isolation thermique, le stockage thermique, etc. sont invariables sur toute l'année tandis que d'autres facteurs varient tout au long de l'année et même dans une journée. La ventilation est gérée en ouvrant ou en fermant les prises d'air et les fenêtres. Le rayonnement solaire peut être réglé par des pare-soleil, des volets, des persiennes, etc.

L'optimisation implique en pratique que l'on modifie le cas de référence et que l'on effectue une deuxième étude de paramètres plus détaillée. Cette étude permet d'aboutir à la conception finale du bâtiment.

### ***Exemple de conception assistée par ordinateur***

La maison de jeunes de Tameghza dans le sud-ouest tunisien est une construction conçue par ordinateur avec un programme de simulation. Située au nord du désert à une altitude de 1 000 mètres, les variations climatiques sont très importantes au cours de l'année et même entre les nuits et les jours. Les hivers sont froids avec des températures descendant jusqu'à 0°C et les étés sont très chauds avec des températures montant jusqu'à 40°C.

Le chauffage et la climatisation d'un bâtiment peuvent être obtenus d'une manière active ou passive. La manière active signifie que l'on utilise des apports d'énergie sous forme d'équipements de chauffage et de climatisation. La manière passive implique une conception de la construction prenant en compte, de la meilleure façon, les facteurs climatiques : rayonnement solaire, vents, température humaine, température extérieure, etc.

La maison de jeunes de Tameghza, une étude élaborée par la SADEL (Swedish Association for Development of Low-Cost Housing), est une réalisation de conception passive. Construite en 1992 et d'une surface de 300 m<sup>2</sup>, cette maison a été bâtie à partir des matériaux locaux disponibles à l'exception de la toiture pour laquelle on a utilisé, comme matériau isolant, des panneaux en laine de bois fabriqués en Autriche.

Les simulations par ordinateur à partir du programme DEROB sont à la base de la conception du bâtiment et le choix des matériaux. Le programme permet de calculer les températures intérieures, aussi

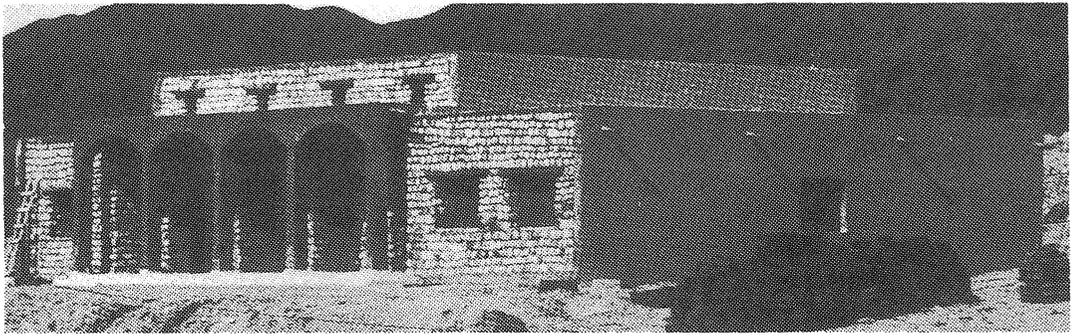


Fig. 2.14 La maison de jeunes à Tameghza, Tunisie. Un exemple de conception assistée par ordinateur.

The youth centre in Tameghza, Tunisia. An example where the building has been designed after computer simulations.

bien celles de l'air ambiant que les températures superficielles des parois extérieures. La température telle que la ressent les habitants, appelée température opérative, se situe entre la température de l'air ambiant et les températures superficielles.

L'isolation de la toiture est particulièrement importante. En effet, l'isolant permet de réduire les effets du rayonnement solaire, en été, tandis que pendant l'hiver ce même isolant permet de maintenir la chaleur à l'intérieur. De type traditionnelle, cette toiture plate est conçue en panneaux en laine de bois au lieu de hourdis en terre cuite, voir chapitre 4 : *Applications*.

La toiture possède une valeur  $K$  de  $0,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , à comparer avec une valeur normalement d'environ  $2,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$  d'une toiture classique.

Les murs côté est, ouest et nord sont des doubles cloisons en briques creuses. Ce sont des murs légers qui apportent une certaine isolation. Le mur côté sud, ainsi que deux murs intérieurs, sont en pierre naturelle (50 cm d'épaisseur). Ces murs permettent d'emmagasiner la chaleur et le froid et l'idée majeure de cette conception est de diminuer les variations entre jour et nuit en ce qui concerne le climat intérieur. Durant la période d'été, ces murs jouent un rôle important car ils permettent de stocker le froid en provenance de la ventilation nocturne. Les fenêtres, côté sud, sont de grandes dimensions. Durant la période hivernale, le mur sud et les murs intérieurs emmagasinent la chaleur provenant du rayonnement solaire.

Les fenêtres assurant la ventilation ont été placées sur la partie élevée du bâtiment afin d'obtenir le plus grand « effet cheminée » possible.

Il est très important de faire fonctionner ce bâtiment de la meilleure manière possible. En été, ce sont les fenêtres de ventilation qui assurent le refroidissement nocturne du bâtiment. Par contre, pendant la journée, il est nécessaire de laisser rentrer le moins d'air possible car l'air extérieur est plus chaud que l'air intérieur. En hiver, les volets resteront ouverts pendant la journée afin de laisser passer les rayons du soleil qui chauffent le bâtiment. Cette manière d'opérer, permet d'obtenir une température ambiante maximale de  $33\text{°C}$  en été (soit 3 à

4°C de moins comparée à celle obtenue dans une maison classique) et une température minimale de 16°C en hiver (soit 5 à 6°C de plus comparée à une maison classique).

## 2.3 Qu'est-ce qu'un matériau isolant

Entre deux corps ou deux locaux de températures différentes se produit inévitablement un flux calorifique, se déplaçant du corps chaud vers le corps froid jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de température.

L'échange de chaleur s'effectue de trois manières différentes :

- La conduction : c'est la transmission de la chaleur dans un corps d'une molécule à une autre, cette transmission se fait des parties chaudes vers les parties froides.
- La convection : c'est la transmission de la chaleur dans un corps à travers une molécule en déplacement par le mouvement de l'air.
- Le rayonnement : c'est la transmission de la chaleur entre deux corps séparés par un milieu perméable (exemple du rayonnement solaire vers la terre).

Dans un élément de construction, les trois modes d'échanges thermiques se produisent simultanément. La conduction pure n'existe pas dans un élément de construction du fait de la présence d'alvéoles plus ou moins grosses et régulières; il s'agit d'une conduction apparente tenant compte des phénomènes de rayonnement et de convection à l'intérieur des alvéoles.

Aucun moyen ne permet d'empêcher l'échange de chaleur, seule son intensité peut être modifiée. Un matériau thermiquement isolant est un matériau dont le rôle principal est de réduire la transmission de chaleur entre deux espaces de températures différentes.

La propriété d'isolation thermique des matériaux de construction est définie par le coefficient de conductivité thermique :  $\lambda$  ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ). C'est la densité de flux de chaleur traversant une paroi pour une différence de 1°C entre les températures des deux faces séparées par 1 mètre d'épaisseur.

Plus le coefficient de conductivité thermique est faible plus le corps s'oppose au transfert de chaleur et par conséquent plus il est isolant. Ce coefficient n'est jamais nul, un matériau ne peut que ralentir le flux de chaleur. La valeur de la conductivité thermique d'un matériau est fonction de la densité de ce matériau; plus la densité diminue plus la conductivité thermique baisse. La conductivité thermique varie avec la température du corps considéré. Elle varie également en fonction de l'eau contenue dans le matériau, elle croît si le volume d'eau contenue augmente.

Tout isolant thermique doit satisfaire certaines conditions :

- il doit tout d'abord conserver dans le temps les caractéristiques qui ont déterminé son choix,
- ses propriétés thermiques doivent lui permettre d'atténuer l'intensité d'un flux de chaleur,
- ses propriétés mécaniques doivent lui permettre de résister à son propre poids ou selon le cas résister lorsqu'il est soumis à des charges,
- son comportement à l'eau doit lui permettre une faible perméabilité à la vapeur d'eau et une bonne résistance à l'humidité sinon il doit être protégé par des dispositions spécifiques,
- son comportement aux mouvements différentiels doit lui permettre d'éviter toute altération de sa structure,
- son comportement aux agents externes doit lui permettre d'éviter toute détérioration de sa structure.

Les isolants se caractérisent par une faible conductivité thermique, ce qui implique qu'ils ont également une faible densité. La conductivité thermique et la densité de certains matériaux thermiquement isolants sont indiquées au tableau 2.4.

<i>matériau</i>	<i>densité (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>conductivité thermique, <math>\lambda</math> (W/m°C) (matériau sec)</i>
béton cellulaire autoclavé	400	0,10
	650	0,15
béton mousse	300	0,08
	500	0,12
	700	0,16
laine de verre, laine de roche	15–200	0,03
liège expansé	150–200	0,04
panneau en laine de bois	260	0,07
	360	0,09
	450	0,11
polystyrène	15–30	0,03
polyuréthane	30–50	0,02

Tableau 2.4 Densité et conductivité thermique de différents isolants.

Density and thermal conductivity of different insulation materials.

Le choix de l'isolant indépendamment de toute préoccupation économique, est dicté par :

- Le type de parois à isoler : parois horizontales ou parois verticales. Un isolant en vrac pourra être plus facilement utilisé pour isoler une paroi horizontale plutôt qu'une paroi verticale.

- Le système d'isolation adapté : la position de l'isolant dans la paroi et le mode d'application ou de fixation de l'isolant. Un isolant hydrophile ne peut être noyé, sans précautions dans du béton lors du coulage et ne peut être mis directement en contact avec une maçonnerie, il risque de s'humidifier.
- Les dimensions de l'emplacement de l'isolation. Lorsqu'on ne dispose que d'une faible épaisseur pour placer l'isolant, on doit rechercher un matériau ayant un coefficient de conductivité thermique le plus faible possible afin d'obtenir l'isolation souhaitée sous la plus faible épaisseur possible d'isolant.

## 2.4 Quels sont les matériaux isolants les mieux adaptés

### 2.4.1 Philosophie globale

Dans un contexte d'environnement et des risques de dégradation de la nature et d'appauvrissement des ressources naturelles, l'Agenda 21<sup>3</sup> (ONU, 1992) définit les mesures suivantes dans le but de promouvoir des activités soutenables dans le secteur de la construction en bâtiments.

« Tous les pays doivent, dans les cas où les circonstances sont favorables dans le cadre de leur planning, de leurs priorités et de leurs objectifs nationaux :

- a) mettre en oeuvre et renforcer les productions nationales de matériaux permettant dans le domaine du possible d'utiliser les ressources naturelles existantes localement,
- b) mettre en place des programmes afin de promouvoir l'utilisation de matériaux locaux dans le secteur du bâtiment en assurant une aide technique plus importante et en permettant, par différentes mesures, le développement de la capacité et l'accroissement des ressources économiques des activités à petite échelle et informelles qui utilisent ces matériaux et les techniques traditionnelles de construction,
- c) introduire des normes et des réglementations permettant de promouvoir la construction de bâtiments à économie d'énergie avec des techniques et l'utilisation des ressources naturelles durables et soutenables aussi bien du point de vue économique que de l'environnement,
- d) mettre en place des programmes d'utilisation du foncier et introduire des règles d'urbanisme dont le but sera de protéger les régions écologiques sensibles contre un éfrètement physique dû à la construction et par ce fait à des activités continues

<sup>3</sup> Programme d'action de la Conférence des Nations-Unis sur l'Environnement et le Développement, Rio de Janeiro 1992.

- e) promouvoir une construction et des techniques de maintenance faisant appel à une main-d'oeuvre importante afin de créer de nouveaux emplois dans le bâtiment et d'utiliser une main-d'oeuvre sous-employée qui existe dans la plupart des grandes agglomérations et permettre ainsi le développement d'un savoir-faire dans le secteur de la construction,
- f) mettre en place un programme et des méthodes permettant de soutenir le secteur informel et les auto-constructeurs par des mesures limitant le prix des matériaux pour les plus démunis dans les régions rurales et urbaines, mesures qui peuvent être des prêts particuliers, des grandes commandes passées par des groupements d'achat qui vendent ensuite les matériaux à de petites entreprises en bâtiment ou à des groupes locaux. »

Il est peut-être ici nécessaire de dire ce que l'on entend par une construction soutenable et économique. En fait, lorsque le concept «matériaux locaux» et «technologie appropriée» fut introduit il y a plusieurs décennies, il s'agissait d'une construction soutenable et économique. Nous proposons ici trois paramètres afin de pouvoir comparer différents matériaux et de se rendre compte si ces matériaux sont économiques ou pas :

- Transport
- Dépense d'énergie
- Technologie

### Transport

Plus un matériau doit être transporté sur de longues distances avant d'arriver sur le chantier de construction, et moins il peut être qualifié d'économique. La brique d'adobe fabriquée avec la terre du chantier ne nécessite aucun transport alors que le matériau importé est un exemple du contraire.

### Dépense d'énergie

Plus on dépense de l'énergie pour fabriquer un matériau et moins ce matériau peut être qualifié d'économique. Les pierres naturelles ne demandent qu'un minimum d'énergie pour être utilisables alors que briques de terre cuite sont un exemple du contraire.

### Technologie

Plus on a recours à la technologie sous forme de machines et d'équipements pour la fabrication du matériau et moins on peut parler de matériau économique. Les briques artisanales n'exigent qu'un équipement minimal et donc peu d'investissement, tandis que le ciment est un exemple du contraire.

En analysant différents matériaux par rapport au transport, à la dépense d'énergie et à la technologie, on peut les classer et les

évaluer. Il apparaît que la fabrication du ciment exige une technologie avancée. Ce qui ne veut pas dire qu'il ne faille pas fabriquer de ciment : au contraire, le ciment sera toujours nécessaire dans l'avenir. L'objectif est uniquement de donner un modèle de référence en tenant compte de l'utilisation des ressources.

Si on veut s'orienter, dans l'avenir, vers un développement prometteur, il faut donner la priorité à la mise au point d'un matériau de construction nécessitant :

- Un transport minimum,
- Une dépense d'énergie raisonnable,
- Une technologie de conception appropriée.

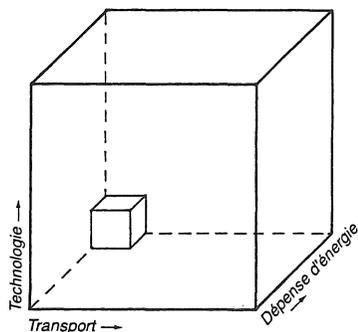


Fig. 2.15  
La fabrication artisanale de briques est un exemple de matériau grand consommateur d'énergie lors de sa fabrication.  
Hand made bricks need a lot of energy to produce.

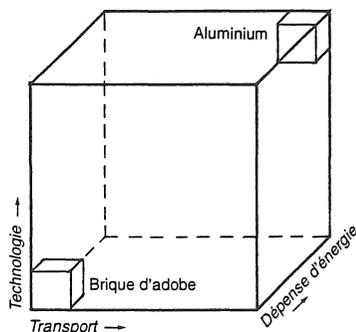


Fig. 2.16  
La brique d'adobe est un exemple de matériau économique. L'aluminium est un exemple de matériau gros consommateur d'énergie.  
Adobe is a resource saving material. Aluminium is a material that needs a lot of energy to produce.

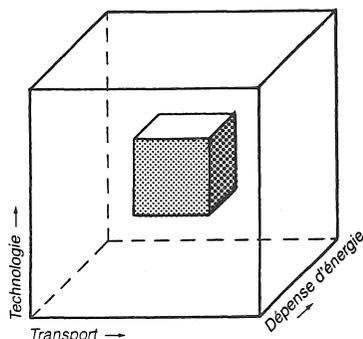


Fig. 2.17  
Les matériaux de construction de l'avenir les plus intéressants sont ceux qu'on pourrait qualifier « d'intermédiaires » si on fait la moyenne de leurs coûts de revient en énergie, transport et technologie. On peut ranger dans cette catégorie, par exemple le béton mousse et les panneaux en laine de bois.

The most interesting building materials of the future are those who can be classified as being in the "medium zone" if taking into account their energy consumption, transportation cost and technology. In this category one finds for example foamed concrete and woodwool slabs.

L'alternative zéro, c'est-à-dire utiliser uniquement la brique adobe par ex. est, pour la plupart des pays, aussi peu réaliste que d'importer des matériaux de construction. On peut aussi considérer qu'un grand nombre des matériaux de construction locaux mis au point, sont d'un niveau technologique plutôt artisanal. Ce qui explique, partiellement, le scepticisme du monde industriel et du bâtiment étant donné qu'il est difficile d'arriver à une production rationnelle et donc rentable.

Le béton mousse et les panneaux en laine de bois sont des exemples typiques de matériaux pouvant être fabriqués et distribués avec une distance de transport relativement limitée, une dépense d'énergie limitée et une technologie de conception simple. Ces matériaux peuvent être fabriqués d'une façon rationnelle pour de faibles coûts d'investissement. Le béton mousse se fabrique en général sur site. Les panneaux en laine de bois sont fabriqués souvent dans de petites ou moyennes unités qui couvrent les besoins d'une région.

## Agir au niveau local

### 2.4.2

Il est en effet important d'être à l'écoute des utilisateurs si l'on veut introduire de nouveaux matériaux de construction. Les entrepreneurs et les auto-constructeurs choisissent souvent un matériau à partir de son prix et de ses qualités. Dans le cadre d'un projet de recherche subventionné par l'Etat ou des activités ayant trait à l'aide aux pays en développement, il est important que les matériaux développés permettent l'évolution du pays considéré et que la qualité soit satisfaisante. A ceci, il faut ajouter les conséquences sur l'environnement, c'est-à-dire une production non polluante et un produit fini qui signifie pour l'utilisateur un logement sain.

Afin de juger du choix d'un isolant certains facteurs importants doivent être considérés :

- adaptation à l'environnement
- fiabilité
- adaptation aux méthodes de construction utilisées
- production rationnelle et rentable

On entend par matériaux isolants appropriés ceux qui sont *adaptés à l'environnement* c'est-à-dire que de ce point de vue, ils doivent être non dangereux et fiables. Cela signifie qu'un matériau approprié est basé sur des matières premières naturelles et renouvelables. Il est aussi vraisemblable qu'un tel matériau est plus sûr au niveau de la santé que ce soit pour celui qui travaille en production que pour celui qui utilise le bâtiment.

On entend par matériaux isolants appropriés ceux qui sont *fiables du point de vue technique*. Cela signifie qu'ils doivent être résistants et de qualité uniforme. Dans ce cas, tout plaide pour l'utilisation de matériaux connus et bien éprouvés puisque ceux-ci ont été utilisés depuis très longtemps dans différents pays. Dans le cas de l'Afrique du

Nord, il est préférable et plus sûr de modifier certains matériaux que d'expérimenter des matériaux entièrement nouveaux.

On entend par matériaux isolants appropriés ceux qui sont *adaptés aux méthodes utilisées* afin que les entrepreneurs et les auto-constructeurs n'hésitent pas à les utiliser. Il est donc important que les nouveaux matériaux retenus conviennent aux méthodes de construction utilisées normalement. En Afrique du Nord, la construction des bâtiments est basée sur le béton. Il faudra donc choisir des matériaux isolants qui s'intégreront facilement à ce type de construction.

On entend par matériaux isolants appropriés ceux qui permettront une *production rationnelle et rentable à long terme*. Il s'agit de choisir une technologie permettant l'utilisation d'une main-d'oeuvre importante ce qui signifie des investissements limitant les équipements importés avec les risques que cela implique. Le niveau technique doit cependant être suffisamment élevé afin de garantir la qualité et la continuité de production.

Dans un premier temps, l'introduction de matériaux thermiquement isolants devrait contribuer non à augmenter mais plutôt à réduire les coûts de la construction afin d'y intéresser les entrepreneurs et les auto-constructeurs. Ce qui implique que le matériau thermiquement isolant remplace un des autres composants de la construction et, de préférence, à un prix plus intéressant.

Dans une perspective plus lointaine, on peut accepter une augmentation des coûts de construction entraînés par l'utilisation de matériaux thermiquement isolants, à condition de réduire les coûts de chauffage et de climatisation ou bien d'améliorer le climat ambiant. Cela implique, sans aucun doute, des contraintes administratives de la part des autorités sous forme de normes à respecter, ou alors différentes formes de mesures d'encouragement à la construction sur le plan de l'économie nationale et sous l'angle des économies d'énergie.

Il ne faut guère s'attendre à ce que les entrepreneurs prennent une responsabilité à long terme quant à la construction et à l'utilisation des bâtiments, ni à ce qu'ils prennent l'initiative de réduire les coûts globaux de construction et de gestion. Par contre, ceux qui gèrent ces bâtiments seront en mesure d'exiger une modification de la construction basée sur des perspectives à long terme, comprenant les économies d'énergie, le respect de l'environnement et la rentabilité globale.

Dans un souci de diversification des produits pour la construction, nous avons étudié la faisabilité technique de deux matériaux isolants : le béton mousse et le panneau en laine de bois.

Le premier, car il ne nécessite pas d'équipements complexes pour sa production (un malaxeur uniquement, et sa mise en oeuvre est simple). Les domaines d'emplois du béton mousse sont très variés et il peut être produit directement sur site ou en unités de préfabrication d'éléments de construction.

Le second, car la principale matière première nécessaire à sa fabrication est issue du bois d'Eucalyptus, arbre dont les plantations sont très répandues en Algérie et très peu valorisées sur le plan

économique, ou du bois de pin d'Alep. La mise en oeuvre de ces panneaux est très simple et leur technologie de production est facilement maîtrisable.

# Béton mousse



# 3 Béton mousse

## 3.1 Caractéristiques techniques

Les bétons mousse sont des bétons dans lesquels des bulles d'air sont introduites par l'intermédiaire d'une mousse qui est elle-même produite par agitation d'un agent moussant.

Le béton mousse possède des propriétés d'isolation thermique et acoustique ainsi qu'une bonne résistance au feu et au gel.

Le béton mousse peut être obtenu avec des densités variant de 200 à 1 800 kg/m<sup>3</sup> en fonction des domaines d'utilisation. Pour de faibles densités, on emploie pour la production de béton mousse uniquement du ciment, de l'eau et de la mousse. Pour des densités dépassant 600 kg/m<sup>3</sup>, on ajoute aussi du sable. Le béton mousse peut être produit aussi bien sur site pour l'isolation des murs et des planchers qu'en usine pour la fabrication d'éléments de construction. Cela différencie le béton mousse du béton cellulaire autoclavé qui ne peut être fabriqué que dans de grandes unités de production. Ce dernier présente toutefois, en raison de l'autoclavage, une résistance mécanique plus élevée et un retrait plus faible.

Les bulles sont introduites soit par addition d'un entraîneur d'air au cours du malaxage soit par brassage d'une mousse aqueuse fabriquée séparément. Avec un agent entraîneur d'air, la quantité de bulles va dépendre dans une certaine mesure de la quantité de mousse, de la durée de malaxage, de la composition du mortier et de l'intensité du mélange.

Les agents moussants sont classés en deux grandes catégories :

- Les agents moussants protéiques qui sont le plus souvent des produits albumineux.
- Les agents moussants synthétiques qui sont dans la majorité des cas des « détergents ».

Les bétons mousse les plus lourds, de 1 200 à 1 800 kg/m<sup>3</sup>, intéressent surtout les préfabrifications alors que les plus légers de 200 à 600 kg/m<sup>3</sup>, concernent essentiellement les marchés de la réhabilitation et de l'isolation thermique.

### 3.1.1 Conductivité thermique

Quelque soit le type de matériau, il y a un rapport évident entre la conductivité thermique et la densité. La conductivité thermique dépend aussi de la teneur en eau dans le matériau; dans un climat sec, la conductivité thermique sera plus basse et donc l'isolation thermique meilleure.

## Résistances mécaniques

3.1.2

Les résistances mécaniques varient d'une façon relativement importante selon les différents types de béton mousse. Les résistances à la compression dépendent beaucoup de la nature de l'agent moussant. Il faut également noter que les résistances des mortiers de mousse protéique, à égalité de densité apparente à l'état sec, sont plus élevées que celles des mortiers de mousse synthétique.

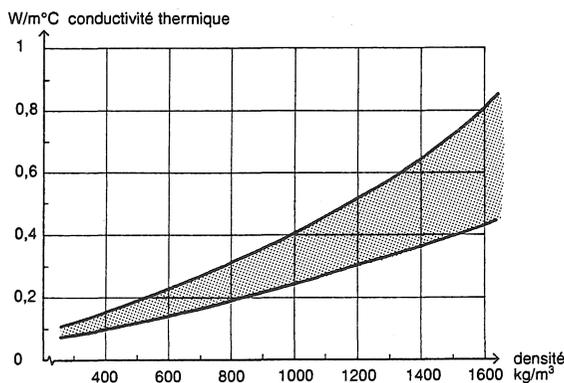
Les bétons mousse avec granulats légers, tel que l'argile expansée, sont plus résistants que les bétons mousse seuls à densité égale. Cette catégorie de bétons intéresse les ouvrages devant être à la fois isolants et suffisamment porteurs. C'est le cas par exemple de certaines formes isolantes, de murs de maisons individuelles, de chapes, de routes etc...

D'une manière générale, les granulats les plus légers sont très intéressants car ils permettent une amélioration des performances mécaniques des bétons mousse les plus légers.

## Retrait

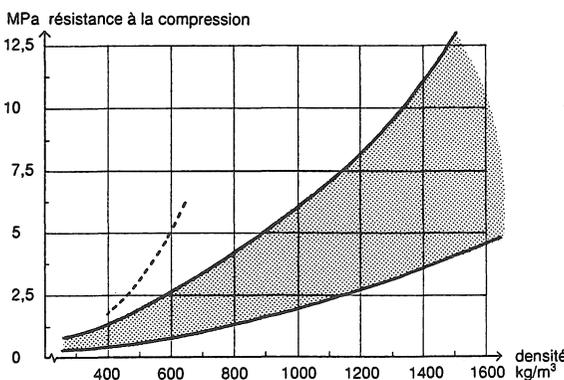
3.1.3

Le retrait est plus important pour le béton mousse que pour le béton ordinaire (surtout pour les faibles densités puisqu'il n'y a pas de granu-



*Fig. 3.1*  
Conductivité thermique du béton mousse en fonction de la densité. La courbe du bas concerne le matériau séché. En fonction de la teneur en eau du matériau, la conductivité thermique se trouve quelque part entre ces deux courbes. Les valeurs sont basées sur les études documentaires, voir Bibliographie.

The relationship between thermal conductivity and density for foamed concrete. The lower curve shows dry material. Depending on the moisture content in the material, the thermal conductivity is somewhere between the two curves. (The values are based on the References).



*Fig. 3.2*  
Résistance à la compression des bétons mousse (sans granulats légers). Les valeurs sont basées sur les études documentaires, voir Bibliographie. Les résistances des bétons mousse sont comparées avec celle du béton cellulaire autoclavé (ligne hachurée).

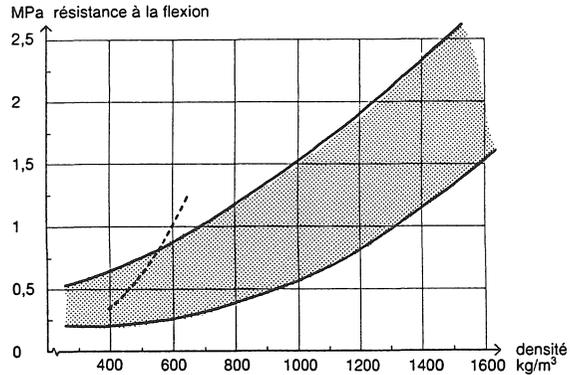
The relationship between compressive strength and density for foamed concrete (without lightweight aggregate). (The values are based on the References). The compressive strengths of foamed concrete are compared with that of autoclaved aerated concrete (dashed line).

lat). Il faut noter que comme pour tous les bétons légers, le retrait s'effectue très rapidement dans le temps.

Le retrait, qui peut atteindre plusieurs millimètres par mètre, provoque des fissurations, ce qui est souvent un inconvénient. Il est toutefois possible de diminuer considérablement le retrait par une prise en milieu humide les premiers jours suivant le coulage. Une autre manière de limiter le retrait du béton mousse est d'y ajouter du granulat de faible densité.

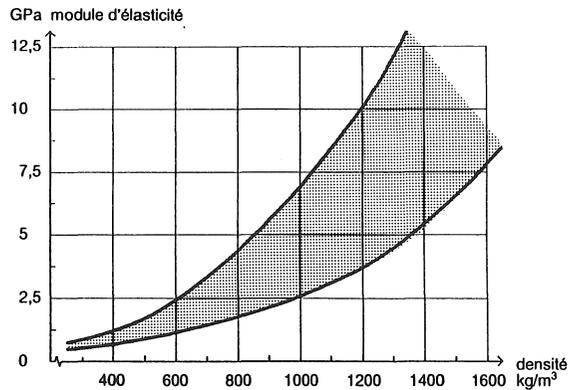
**Fig. 3.3**  
Résistance à la flexion des bétons mousse (sans granulats légers). Les valeurs sont basées sur les études documentaires, voir Bibliographie. Les résistances des bétons mousse sont comparées avec celle du béton cellulaire autoclavé (ligne hachurée).

The relationship between bending tensile strength and density for foamed concrete (without lightweight aggregate). (The values are based on the References).  
The bending tensile strengths of foamed concrete are compared with that of autoclaved aerated concrete (dashed line).



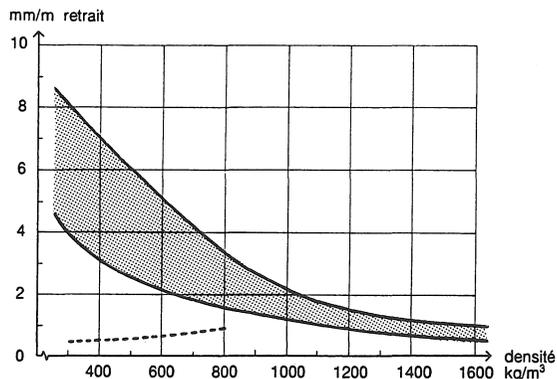
**Fig. 3.4**  
Module d'élasticité des bétons mousse (sans granulats légers). Les valeurs sont basées sur les études documentaires, voir Bibliographie.

The relationship between modulus of elasticity and density for foamed concrete (without lightweight aggregate). (The values are based on the References).



**Fig. 3.5**  
Retrait des bétons mousse (sans granulats légers). Les valeurs sont basées sur les études documentaires, voir Bibliographie. Le retrait des bétons mousse est comparé avec celui du béton cellulaire autoclavé (ligne hachurée).

The relationship between shrinkage and density for foamed concrete (without lightweight aggregate). (The values are based on the References). The shrinkage of foamed concrete is compared with that of autoclaved aerated concrete (dashed line).



## Absorption d'eau

3.1.4

Les bétons mousse compte tenu de leur grande porosité, absorbent beaucoup d'eau et rapidement; cependant, ils présentent la faculté de reperdre cette eau aussi très rapidement ce qui lui donne des propriétés de régulateur hygrométrique.

Pour ce qui est de l'absorption capillaire, celle-ci est très variable, selon les différents types de béton cellulaire. Cette différence est due au fait que la structure poreuse varie en fonction des agents moussants et du mode de fabrication. Lors de l'immersion du béton mousse, certaines sortes, pour des densités inférieures à  $1\ 000\text{ kg/m}^3$ , absorbent tellement d'eau qu'elles tombent au fond alors que d'autres n'en absorbent que très peu et se maintiennent à flot.

## Dosage en ciment

3.1.5

Les bétons mousse avec des densités de  $600\text{ kg/m}^3$  ou moins, ne sont souvent formés que de ciment, d'eau et d'agent moussant. Pour ces bétons mousse, le dosage en ciment augmente en tant que fonction de densité selon la figure 3.6.

Pour des densités plus fortes, on ajoute du sable, ce qui permet un dosage en ciment de  $300$  à  $400\text{ kg/m}^3$  (on augmente la densité en ajoutant plus de sable).

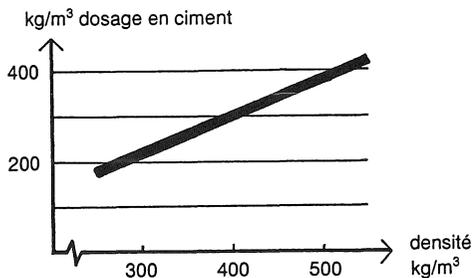


Fig. 3.6

Le dosage en ciment en fonction de la densité du béton mousse sans granulats. Pour les densités données, on suppose que la teneur en eau est d'environ  $40\text{ kg/m}^3$ .

The relationship between amount of cement and density for foamed concrete. For the given densities the moisture content is assumed to be  $40\text{ kg/m}^3$ .

## Essais en laboratoire

3.2

Le but essentiel des essais en laboratoire était, d'une part, d'acquérir une bonne connaissance générale des propriétés techniques du béton mousse et, d'autre part, d'étudier les propriétés techniques du béton mousse dans un contexte algérien.

Lors des essais, on a utilisé différents ciments suédois, avec une surface spécifique variant entre  $300$  et  $600\text{ m}^2/\text{kg}$ , et un ciment algérien. Les essais ont été effectués pour évaluer l'influence de différents paramètres ainsi que l'ajout de granulats légers sur la densité recherchée du béton mousse et sur ses propriétés physico-mécaniques.

Les propriétés considérées comme les plus importantes, dans l'optique de l'utilisation du béton mousse comme isolant de toiture, étaient :

- La conductivité thermique
- Les propriétés de résistance (résistance à la compression et à la flexion)
- Les modifications dimensionnelles (affaissement et retrait)
- La protection d'armatures éventuelles (vitesse de carbonatation)

Les essais ont été effectués avec le béton mousse *Bétocel*, fabriqué avec un agent moussant et un malaxeur de l'entreprise Isoleringsbetong AB, Suède. Lors de la fabrication, décrite en détail au paragraphe *Production*, on mélange d'abord de l'eau à l'agent moussant dans un malaxeur spécial de façon à former une mousse. On y ajoute ensuite du ciment. Un malaxeur destiné aux malaxages à grande échelle est également fabriqué par le CNERIB, voir plans à l'Annexe 2. Les grands malaxeurs se sont toutefois révélés trop volumineux pour des essais à petite échelle en laboratoire, et c'est pourquoi on a utilisé un petit malaxeur (destiné en fait au malaxage de mortier de ciment), tant à l'Université de Lund qu'au CNERIB. Ces petits malaxeurs se sont révélés tout aussi efficaces que le malaxeur original.

L'agent moussant utilisé pour les essais de laboratoire est un agent moussant protéique. Celui-ci a une couleur jaunâtre, c'est un produit résineux à base de protéine de soja.

### Dosages des constituants

Les éprouvettes furent fabriquées pour les densités 300, 400 et 500 kg/m<sup>3</sup>. La fabrication se révéla extrêmement fiable pour ce qui est d'obtenir la bonne densité, bien que les tests aient été réalisés pour de faibles densités. La densité humide lors du mélange est d'environ 100 kg/m<sup>3</sup> au-delà de la densité finale.

Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Densité humide (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg)	Ciment (kg)	E/C	Agent moussant (kg)
300	400	170	225	0,76	4,9
400	500	194	303	0,64	3,3
500	600	224	374	0,60	2,5

Tableau 3.1 Dosages des constituants du béton mousse *Bétocel*.

Mix details for Betocel foamed concrete. (Density, Wet density, Water, Cement, W/C ratio, Foaming agent.)

La quantité d'agent moussant en fonction de la densité du béton mousse *Bétocel* est indiquée à la figure 3.7. Les chiffres s'entendent sans granulats légers.

La quantité d'agent moussant nécessaire pour obtenir la densité souhaitée, pour un rapport eau-ciment (E/C) donné, variait en fonction

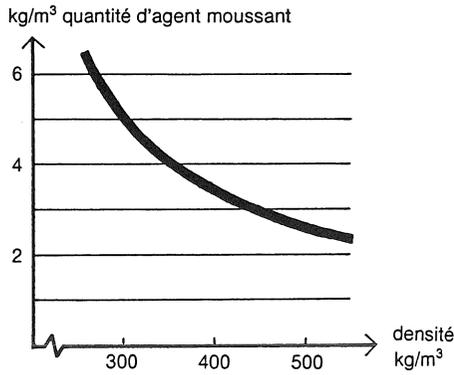


Fig. 3.7

La quantité d'agent moussant en fonction de la densité du béton mousse Bétocel.

The amount of foaming agent as a function of the density for Betocel foamed concrete.

du type de ciment. Pour les ciments d'une grande surface spécifique, on a eu besoin de plus d'agent moussant que pour un ciment normal et pour les ciments d'une petite surface spécifique, on en a utilisé moins.

La quantité d'agent moussant nécessaire est également fonction de la température et de la qualité de l'eau. Une température de malaxage élevée demande plus d'agent moussant. Une eau calcaire exige plus d'agent moussant qu'une eau douce.

La quantité de ciment en fonction de la densité est indiquée à la figure 3.6.

## Résultats des essais réalisés

3.2.1

### Conductivité thermique

La conductivité thermique pour le béton mousse Bétocel a été mesurée pour des éprouvettes qui avaient été conservées à l'air environ quatre mois. Les mesures ont été réalisées selon la méthode de la plaque chaude gardée. On a pu fixer la conductivité thermique en mesurant le flux thermique à travers l'éprouvette.

On compare ces chiffres aux courbes de la figure 3.1. La conductivité thermique est relativement près de la courbe sèche, bien que les éprouvettes n'aient jamais séché.

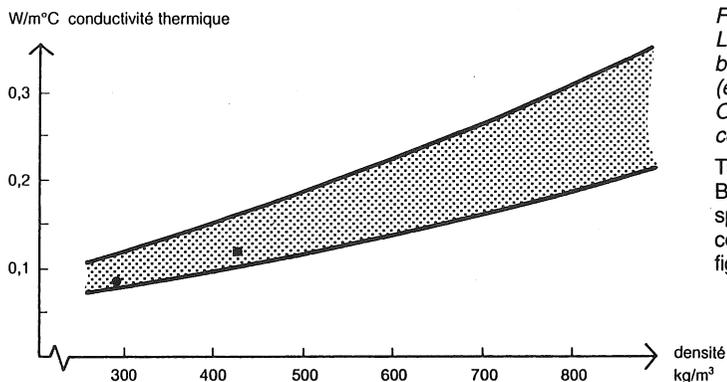


Fig. 3.8

La conductivité thermique du béton mousse Bétocel (éprouvettes non séchées). On compare ces chiffres aux courbes de la figure 3.1.

The thermal conductivity for Betocel foamed concrete (air-dry specimens). The values are compared with the curves from figure 3.1.

### Résistance à la compression

La résistance à la compression à 28 jours du béton mousse Bétocel a été testée pour des faibles densités. La figure 3.9 montre que les chiffres sont élevés, comparés aux autres bétons mousses. Les chiffres concernant le ciment à petite surface spécifique sont un peu plus bas que ceux des autres ciments.

### Résistance à la flexion

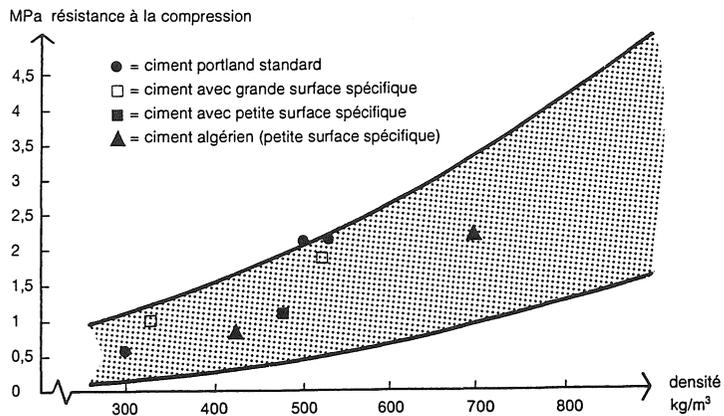
La résistance à la flexion a été mesurée pour le béton mousse Bétocel, voir figure 3.10. Les valeurs sont comparées avec les courbes de la figure 3.3.

### Affaissement

L'affaissement, c'est-à-dire la diminution de volume, a été observé seulement pour un ciment suédois d'une petite surface spécifique. L'affaissement est probablement dû au lent durcissement initial avec

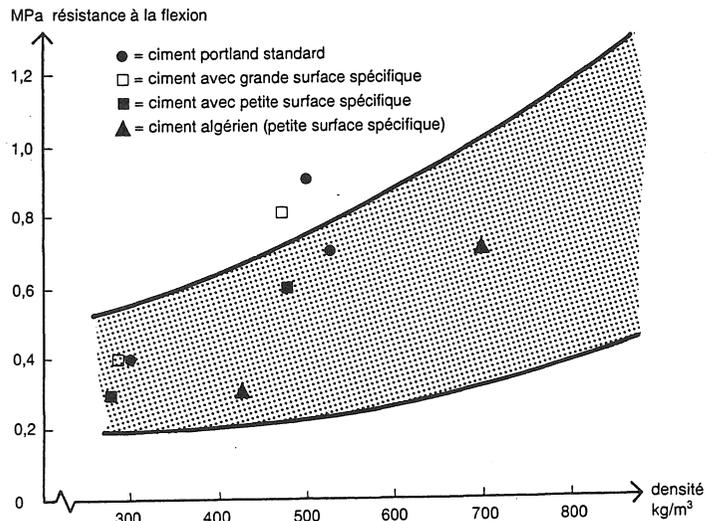
**Fig. 3.9**  
La résistance à la compression à 28 jours en fonction de la densité du béton mousse Bétocel. Les valeurs sont comparées avec les courbes de la figure 3.2.

The relationship between 28-day compressive strength and density for Bétocel foamed concrete. Different types of cement were used. The values are compared with the curves in figure 3.2.



**Fig. 3.10**  
Résistance à la flexion mesurée sur le béton mousse Bétocel. Les valeurs sont comparées avec les courbes de la figure 3.3.

The relationship between 28-day bending tensile strength and density for Bétocel foamed concrete. Different types of cement were used. The values are compared with the curves in figure 3.3.



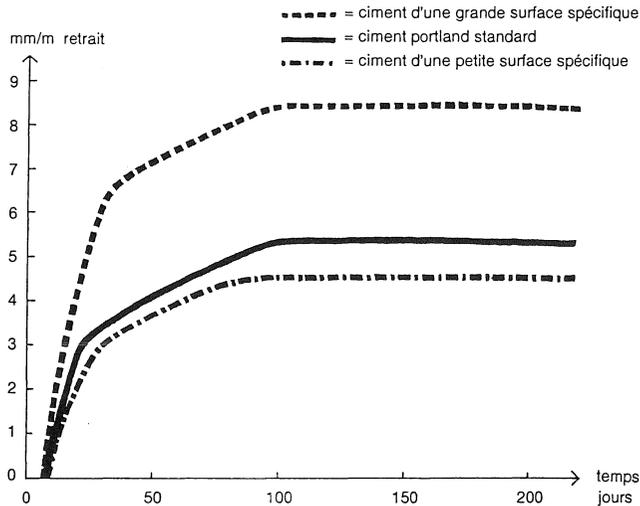


Fig. 3.11

Retrait du béton mousse Bétocel d'un densité d'environ  $500 \text{ kg/m}^3$ . Comparaison entre un ciment à grande surface spécifique, un ciment Portland standard suédois et un ciment à petite surface spécifique.

The shrinkage of Bétocel foamed concrete with a density of about  $500 \text{ kg/m}^3$ . Comparison between cement of a high specific surface, Swedish ordinary Portland cement and cement with a low specific surface.

ce ciment. Selon le fabricant, la mousse conserve sa structure cellulaire pendant environ six heures. Il y a donc affaissement si le ciment n'a pas eu le temps de prendre dans ce laps de temps. Il y a également risque d'affaissement si le ciment utilisé est trop vieux.

## Retrait

Le retrait a été mesuré sur les éprouvettes avec des densités de  $300$  et  $500 \text{ kg/m}^3$ . Pour le ciment Portland standard le retrait oscillait entre  $5$  et  $6 \text{ mm/m}$  pour les deux densités.

Le retrait est important et varie largement en fonction du type de ciment. Le ciment d'une grande surface spécifique donne des retraits beaucoup plus importants que ceux du ciment standard et presque le double de ceux du ciment d'une petite surface spécifique, voir figure 3.11.

## Carbonatation

Il y a carbonatation dans tous les bétons, en raison de la réaction du gaz carbonique de l'air au carbonate de calcium dans le matériau. Lors de la réaction, on a une diminution de la valeur de pH dans le béton de  $12$  à  $9$ . Une valeur de pH élevée protège l'acier contre la corrosion. Lorsque la valeur de pH est ramenée à  $9$ , cette protection disparaît.

Le processus de carbonatation est fonction de la teneur en eau du matériau. Si cette dernière est trop faible, il n'y a pas de carbonatation, ni d'ailleurs si la teneur en eau est trop élevée. Des mesures (Johansson, 1993), ont indiqué que, pour ce qui est du béton mousse, la carbonatation a lieu lorsque l'humidité relative (HR) se situe entre  $40$  et  $90\%$ . La carbonatation est particulièrement importante dans les zones avec une HR de  $75\%$ . Dans les bétons mousse à faible densité, donc à grande porosité, la carbonatation est très rapide en cas d'humidité relative favorable.

Avec un liquide indicateur coloré (phénolphtaléine plus éthanol), on a mesuré la profondeur de carbonatation sur une éprouvette de béton mousse âgée de trois mois (densité  $500 \text{ kg/m}^3$ ). La profondeur de carbonatation était d'environ 1 mm, ce qui fait une carbonatation annuelle approximative de 4–5 mm. C'est là une valeur relativement faible, qui semblerait due à l'environnement sec où l'éprouvette est conservée (environ 40% de HR).

En raison de la carbonatation, l'armature du béton mousse n'est pas recommandée et il n'est pas conseillé non plus de faire passer l'acier d'armature par une couche de béton mousse. Dans une toiture, qui peut subir les attaques de l'humidité dues à des infiltrations, le risque de corrosion est grand. On peut éviter ce problème en faisant subir à l'armature un traitement anti-corrosion.

## Hydratation

L'hydratation va assez vite au début, pour se ralentir par la suite. Il a lieu, presque entièrement, au cours des premiers mois.

L'hydratation des matériaux liés au ciment est rarement totale. Elle dépend de l'apport en eau, et donc le rapport eau-ciment joue un rôle essentiel, ainsi que la qualité du ciment. Pour une hydratation de 100%, le dosage de la quantité d'eau liée au ciment est égal à 25% du poids du ciment. Le taux d'hydratation est décidé en divisant la part d'eau hydratée par 0,25.

Le taux d'hydratation a été mesuré sur du béton mousse de densité sèche  $340 \text{ kg/m}^3$ . Le béton mousse avait été conservé enveloppé d'un film plastique, pour, dans la mesure du possible, limiter l'évaporation, dans un climat ambiant et pendant six mois environ. Le taux d'hydratation était de 90%.

## Densité

La densité du béton mousse varie en fonction de sa teneur en eau pondérale. Celle-ci dépend, entre autres, du dosage en ciment et du rapport eau-ciment.

Figure 3.12 indique l'isotherme de désorption, c'est-à-dire la courbe de dessiccation, du béton mousse Bétocel avec une densité humide de  $480 \text{ kg/m}^3$ . La teneur en eau pondérale,  $w$ , indiquée est valable si le béton est en équilibre avec l'humidité relative ambiante. La figure montre que pour une humidité relative de 20–70%, ce qui est normal, en intérieur, la teneur en eau pondérale est d'environ  $100 \text{ kg/m}^3$  de moins que pour le béton mousse frais. Ce chiffre est indépendant de la densité du béton mousse.

La densité normale pour un matériau en équilibre avec la HR ambiante s'exprime ainsi :

$$\rho = \rho_s + w$$

où

$$\rho = \text{densité (kg/m}^3\text{)}$$

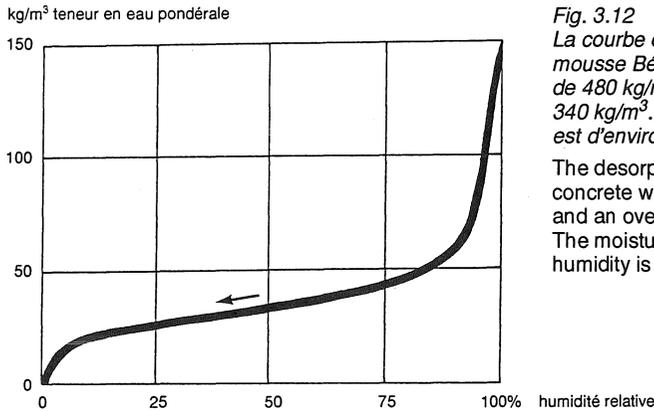


Fig. 3.12  
La courbe de dessiccation du béton mousse Bétocel avec une densité humide de  $480 \text{ kg/m}^3$  et une densité sèche de  $340 \text{ kg/m}^3$ . La teneur en eau pour 50% HR est d'environ  $40 \text{ kg/m}^3$ .

The desorption isotherm for Betocel foamed concrete with a wet density of  $480 \text{ kg/m}^3$  and an oven-dry density of  $340 \text{ kg/m}^3$ . The moisture content at 50% relative humidity is about  $40 \text{ kg/m}^3$ .

$\rho_s$  = densité sèche ( $\text{kg/m}^3$ )

$w$  = teneur en eau pondérale pour la HR ambiante actuelle ( $\text{kg/m}^3$ ), voir figure 3.12.

La densité sèche du béton mousse provient des substances sèches du matériau, à savoir le ciment et, éventuellement, les granulats ainsi que l'eau chimiquement liée. Pour un taux d'hydratation de 80% ou plus, on peut fixer la part d'eau chimiquement liée à  $0,2 \times$  la quantité de ciment (ACI, 1986).

La densité sèche ( $w = 0$ ) du béton mousse peut être exprimée par la formule suivante :

$$\rho_s = 1,2 \times C + G$$

où

$\rho_s$  = densité sèche ( $\text{kg/m}^3$ )

$C$  = dosage en ciment ( $\text{kg/m}^3$ )

$G$  = poids sec des granulats ( $\text{kg/m}^3$ )

Pour du béton mousse sans granulats il faut donc que :

$$\rho_s = 1,2 \times C$$

La formule peut également servir pour calculer le dosage en ciment si la densité sèche est connue.

### Temps de malaxage

Dans le but de déterminer le temps optimal de fabrication du béton mousse avec le malaxeur réalisé au CNERIB, nous avons testé différents temps : 3 mn, 5 mn, 7 mn et 9 mn. Nous faisons varier uniquement le temps de malaxage après rajout du ciment le temps de mélange de l'eau et de l'agent moussant restant constant.

Les résultats montrent que plus on augmente le temps de malaxage, plus la densité diminue mais cette variation est moins sensible à partir de 5 minutes. Nous retiendrons donc que le temps optimal de malaxage est de 5 minutes.

## Essais avec ajout de granulats de liège

La poudre de liège est un produit résiduel que l'on trouve en grande quantité en Algérie. Dans le but de trouver une utilisation pratique de ce produit, des essais de mélange de poudre de liège avec du béton mousse ont été réalisés.

Les essais avec liège ont été réalisés avec des résidus de deux types de liège : *liège blanc* et *liège noir* ; les résidus de liège se trouvent sous la forme d'un produit de granulométrie variant entre 0 et 4 mm. Pour nos essais nous avons repartis chaque type de liège en trois granulométries différentes : 0–2 mm, 2–4 mm et 0–4 mm.

En fonction du type de liège et de sa granulométrie nous avons réalisé différentes séries d'éprouvettes avec la composition donnant une densité théorique de  $500 \text{ kg/m}^3$  en faisant varier les pourcentages de granulats de liège rajoutés à la composition.

Granulométrie	Densité apparente ( $\text{kg/m}^3$ )
0–2 mm	240
2–4 mm	150
0–4 mm	240

Tableau 3.2 Densité apparente de résidus du Liège blanc.

Density of white cork grains.

Granulométrie	Densité apparente ( $\text{kg/m}^3$ )
0–2 mm	60
2–4 mm	70
0–4 mm	60

Tableau 3.3 Densité apparente de résidus du Liège noir.

Density of black cork grains.

Les différents pourcentages testés sont déterminés par rapport au poids de ciment utilisé dans la composition. Nous avons réalisé pour chaque granulométrie, une série d'éprouvettes dont les pourcentages en liège ont été les suivants : 5%, 10%, 15% et 20%.

Les résultats montrent que les meilleurs résultats sont obtenus avec les granulométries 0–4 mm et 2–4 mm. Nous constatons que plus on rajoute du liège plus les densités diminuent mais à partir de 15% les éprouvettes n'ont plus une bonne stabilité dimensionnelle. Les résultats des essais effectués sur les bétons mousse associés aux granulats de liège montrent qu'ils sont plus résistants et ont une plus faible conductivité thermique que les bétons mousse seuls à densité égale. L'autre intérêt de cette association est la réduction de la consommation en ciment et en agent moussant pour un même volume de matériau produit.

## Production

3.3

Le béton mousse peut être fabriqué de différentes manières. Pour ce qui est du béton mousse utilisé, dénommé *BétoceI* par le fabricant Isoleringsbetong AB, on utilise une méthode où la porosité uniforme est obtenue par un malaxage rapide des composants et l'ajout d'un agent moussant qui crée une mousse volumineuse et stable. Cette méthode de fabrication ne nécessite comme équipement qu'un malaxeur.

Le béton peut être produit aussi bien « in situ » pour l'isolation des planchers qu'en usine pour des éléments de préfabrication. Les densités possibles varient entre 200 à 1800 kg/m<sup>3</sup>, en fonction de la nature et du dosage des composants ainsi que du domaine d'utilisation.

## Matières premières

3.3.1

La production du béton mousse BétoceI est basée sur les composants suivants : ciment, agent moussant et eau. Pour des densités supérieures à 600 kg/m<sup>3</sup> on utilise aussi du sable et pour certaines applications des agrégats légers.

### Ciment

Pour la fabrication de béton mousse, on utilisera un ciment portland. Le ciment ne doit pas être périmé.

### Eau

On utilise une eau courante non polluée. La quantité d'agent moussant est fonction de la qualité de l'eau; une eau calcaire exige plus d'agent moussant qu'une eau douce.

### Agent moussant

L'agent moussant qui est utilisé est protéique. Le composant essentiel de cet agent, de couleur jaunâtre, est la protéine de soja, celle-ci peut être remplacé par la caséine.

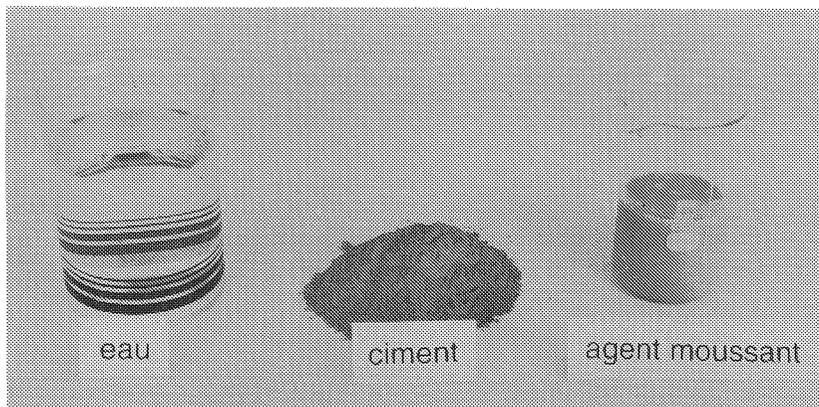


Fig. 3.13  
Les composants de  
béton mousse.

The materials used  
in foamed concrete  
(water, Portland  
cement and foaming  
agent).

## Granulats légers

Pour certaines applications l'utilisation d'agrégats légers, tels que l'argile expansée ou des granulats de liège, permet pour une même quantité de matériau obtenu de réduire les consommations en ciment et en agent moussant.

### *Inventaire des ressources en granulés de liège*

Les résidus de liège c'est l'ensemble des produits provenant de la transformation industrielle du chêne-liège. Cette transformation du chêne-liège en un produit fini nécessite diverses opérations d'usinage engendrant certains types de déchets :

- granulats de liège expansé,
- farine de liège expansé.

La quantité de résidus de liège totale engendrée par l'ensemble des unités en Algérie en supposant que celles-ci tournent à un rendement de 100% est :

- granulés : 1 900 tonnes/an,
- poudre : 5 600 tonnes/an.

Ces résidus de liège ne sont pas utilisés et sont régulièrement jetés à la décharge publique.

Les déchets de liège sont des sous-produits du liège, ils ont par conséquent les mêmes caractéristiques de légèreté, d'imperméabilité et d'élasticité. Ils pourraient donc tenir un rôle dans la production d'un produit pour l'isolation.

## 3.3.2 Malaxage

### Composition du béton mousse

La proportion des différents constituants entrant dans la composition est fonction de la densité du béton donc directement de l'application projetée. Pour le béton mousse Bétocel de densité de 300, 400 et 500 kg/m<sup>3</sup>, les compositions sont données dans le tableau suivant :

Densité (kg/m <sup>3</sup> )	300	400	500
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	225	303	374
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	170	194	224
Agent moussant (kg/m <sup>3</sup> )	4,9	3,3	2,5
Densité humide (kg/m <sup>3</sup> )	400	500	600

Tableau 3.4 La composition du béton mousse Bétocel de différentes densités.

Proportion of ingredients in Betocel foamed concrete.

La quantité d'agent moussant à introduire est variable selon l'allègement souhaité, pour des densités de béton plus élevées la

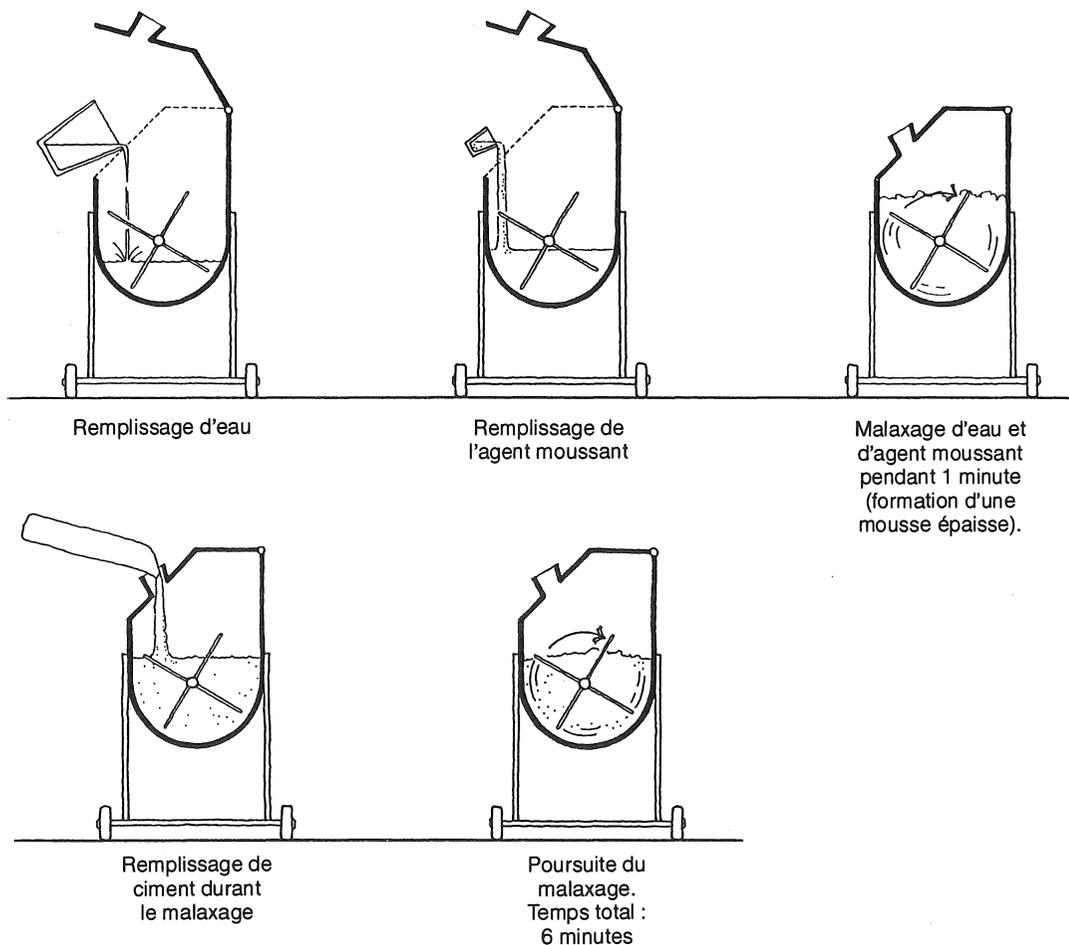


Fig. 3.14 Schéma de production du béton mousse Bétocel.

Production of Betocel foamed concrete.

quantité de ciment augmente tandis que la quantité d'agent moussant diminue.

## Malaxeur

La production nécessite un malaxeur ayant une vitesse de rotation de 60 à 70 tours/minute.

Un malaxeur pour la production de béton mousse a été réalisé au CNERIB avec une intégration de 100%. Sa capacité optimale est de 120 litres, elle correspond au 3/4 de la capacité totale. Cependant cette capacité peut être modifiée en fonction des besoins. Le malaxage est obtenu par la rotation d'un arbre comportant quatre palettes disposées en croix et tournant à une vitesse de 63 tours/minute, chaque palette a une surface de 1 750 cm<sup>2</sup> et recouverte d'une grille à mailles carrées de 2×2 cm.

## Malaxage

Pour obtenir le béton mousse Bétocel, on procède comme suit (voir figure 3.14) :

- malaxage de l'eau et de l'agent moussant durant une minute;
- rajout du ciment et éventuellement d'autres agrégats;
- malaxage de l'ensemble durant 5 minutes.

Le volume de production du béton mousse dépend de l'importance du malaxeur. Au cours d'une journée de travail, il est possible de réaliser environ 50 malaxages. Le volume de production journalier,  $P_j$ , sera de :

$$P_j = 50 \times V_m \text{ (m}^3\text{)}$$

où

$$V_m = \text{le volume de malaxeur (m}^3\text{)}.$$

### 3.3.3 Coûts de production

L'investissement pour la fabrication de béton mousse reste dans les limites du malaxeur décrit précédemment. La possibilité de production de l'agent moussant en Algérie est réellement envisageable car l'équipement nécessaire est simple (une cuve de cuisson de grande capacité) et le savoir faire repose sur la connaissance ou l'acquisition de la formulation. En cas de production locale, les coûts de l'agent moussant pourront diminuer.

L'évaluation des coûts de production a été établie en tenant compte des coûts du matériau, des dépenses salariales, de la consommation énergétique et de l'immobilisation du capital. Ils sont basés sur une production annuelle de 1 200 m<sup>3</sup> de béton mousse (la production annuelle maximum avec un malaxeur d'une capacité de 2 m<sup>3</sup> par heure est de 2 400 m<sup>3</sup> correspondant à une capacité journalière de 10 m<sup>3</sup>). Les prévisions sont de l'ordre de 290 francs français (FF)<sup>4</sup> la première année. L'année suivante, les frais diminuent mais viennent par contre s'y ajouter l'entretien du malaxeur, ce qui permet d'évaluer le coût total de production au même niveau que la première année.

<sup>4</sup> 1 FF = 4,25 Dinars algériens (DA) = US\$ 0,17 (1993).

### Coût des matériaux

Les frais de matériaux sont calculés pour une densité de 400 kg/m<sup>3</sup>.

ciment :	$303 \text{ kg/m}^3 \times 0,5 \text{ FF/kg} =$	152 FF
agent moussant :	$3,3 \text{ kg/m}^3 \times 20 \text{ FF/kg}^* =$	69 FF
<hr/>		
Coût/m <sup>3</sup>		221 FF

\*Frais de transport de 3 FF/kg inclus.

### Coût salarial

Ouvriers :	$2 \times 2\,000 \text{ FF/mois} =$	4 000 FF/mois
Affiliation syndicale collective 50%		2 000 FF/mois
<hr/>		
Total		6 000 FF/mois
Coût salarial global		72 000 FF/an
Coût/m <sup>3</sup>		60 FF

### Coûts énergétiques

Coût énergétique annuel :	$600 \text{ h} \times 1 \text{ kW} \times 0,25 \text{ FF/kWh} =$	150 FF
Coût/m <sup>3</sup>		0 FF

### Coût du capital immobilisé pour le matériel

Malaxeur		40 000 FF
Autres équipements		4 000 FF
<hr/>		
Total des investissements d'équipements		44 000 FF
Amortissement (10 ans)		4 400 FF
Frais (10%)		4 400 FF
<hr/>		
Coût annuel		8 800 FF
Coût/m <sup>3</sup>		7 FF

### Coût de production total

Coût de production total/m<sup>3</sup> de béton mousse avec une densité de 400 kg/m<sup>3</sup> pour une production de 1 200 m<sup>3</sup>/an :

Coût des matériaux	221 FF
Coût salarial	60 FF
Coût énergétique	0 FF
Coût du capital immobilisé pour le matériel	7 FF
<hr/>	
Coût total/m <sup>3</sup>	288 FF

Le coût total par m<sup>3</sup> pourrait être ramené à 250 FF avec une production de l'agent moussant localisée en Algérie.

En termes de rentabilité le béton mousse doit être à même de pouvoir concurrencer les matériaux déjà existants sur le marché. Aussi, toute décision d'investissement reste conditionnée par une étude de faisabilité financière et une étude de faisabilité commerciale (étude de marché).

	densité (kg/m <sup>3</sup> )	conductivité thermique (W/m <sup>2</sup> C)	coût/m <sup>3</sup>
béton mousse	400	0,10	290 FF
panneau en laine de bois	300	0,08	330 FF
polystyrène expansé	12–40	0,04	500–600 FF*

\*Prix de vente en Algérie, juin 1993

Tableau 3.5 Comparaison des prix entre le béton mousse, le panneau en laine de bois et le polystyrène expansé.

Price comparison between foamed concrete, woodwool slab and expanded polystyrene.

## 3.4 Applications

Les différentes utilisations du béton mousse sont fonction de sa densité.

### Densité entre 200 et 800 kg/m<sup>3</sup>

La conductivité thermique de ces bétons varie entre 0,08 et 0,30 W/m<sup>2</sup>C selon leur densité apparente.

- Isolation thermique de remplissage des murs et des planchers.
- Remplissage isolant de murs préfabriqués.
- Formes de pentes, formes sur terre-plein.
- Blocs pleins manufacturés à condition que la résistance du béton soit supérieure à 2,5 MPa.
- Isolation des toitures inclinées par des éléments préfabriqués.

### Densité comprise entre 800 et 1800 kg/m<sup>3</sup>

Ces bétons mousse ont de faibles résistances mécaniques comparés avec un béton normal (résistance à la compression supérieure à 5 MPa), mais peuvent dans certaines limites être porteurs. La conductivité thermique utile de ces bétons varie entre 0,3 et 0,8 W/m<sup>2</sup>C.

- Éléments de construction préfabriqués.
- Blocs manufacturés pleins ou creux.
- Béton non-armé (les armatures nécessitent une protection spéciale).
- Murs banchés faiblement sollicités.

### Isolation d'éléments de construction horizontaux

L'isolation thermique des éléments de construction horizontaux, tels que toitures plates, terrasses et autres, est une des utilisations pour lesquelles le béton mousse est vivement recommandé, ainsi que comme complément d'isolation pour des toitures existantes.

Ce complément d'isolation peut être avantageusement réalisé lors de réparations de toitures (en raison d'infiltrations ou autres).

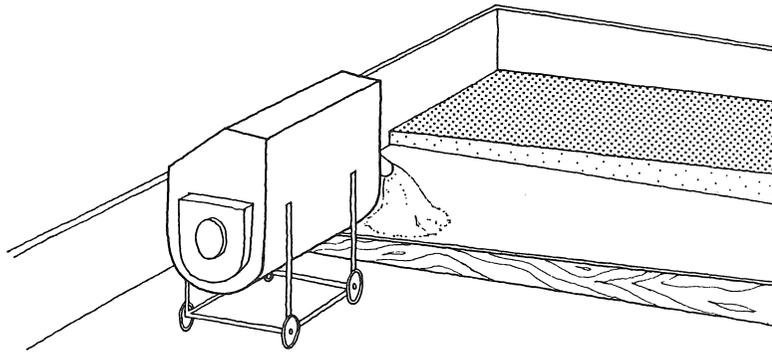


Fig. 3.15  
Coulage d'une forme de  
pente avec béton moussé.  
Casting of roof screed  
with foamed concrete.

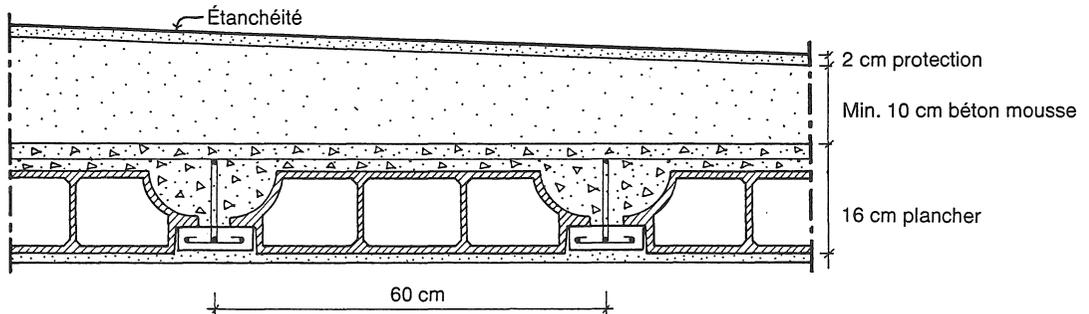


Fig. 3.16 Toiture avec forme de pente en béton moussé. Le béton moussé isolant est protégé par une couche de béton d'une densité plus élevée avant la couche de finition (bitume ou autre).

Roof with screed of foamed concrete. The insulating foamed concrete is covered with a layer of mortar before applying the roofing membrane.

Dans l'isolation des toitures et planchers ou en utilisation dans la forme de pente, il est recommandé de mettre en oeuvre un béton de densité de  $300 \text{ kg/m}^3$  et de le protéger par une couche de béton d'une densité supérieure à  $1\,200 \text{ kg/m}^3$  avant la couche de finition (bitume ou autre), voir figure 3.16.

## Exemple d'application et essais

### 3.4.1

Parmi les différentes applications possibles du béton moussé nous avons testé à échelle réelle un modèle de plancher constitué par une construction en sandwich avec du béton moussé comme isolant thermique entre deux dalles en béton, voir figure 3.17. On coule le béton moussé sur des dalles en béton préfabriqués, puis une dalle de compression sur le béton moussé. Celle-ci est solidarifiée aux dalles en béton de dessous avec des armatures, qui sont destinés à absorber les efforts de cisaillement. Le coefficient  $K$  du plancher est environ de  $0,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ; la portée est de 3.6 m.

Le plancher a été soumis à des essais de chargement afin de vérifier les résistances statiques et à la flexion. Le chargement était tout d'abord de  $100 \text{ kg/m}^2$  afin de simuler la forme de pente, plus  $400 \text{ kg/m}^2$ , ce qui correspond à la charge normalisée. Le chargement total était

donc de 500 kg/m<sup>2</sup>. La valeur de la flexion était notée pour chaque palier de 100 kg/m<sup>2</sup> de chargement. La flexion autorisée est 1/500 de la portée, dans ce cas-là 7,2 mm.

Le plancher a résisté au chargement. Aucune fissure sérieuse n'a été observée dans les parties portantes. Seules des fissures, non-préjudiciables, ont été observées dans le béton mousse.

En conclusions nous pouvons dire que les résultats des essais montrent que le plancher ainsi conçu répond pleinement aux exigences de résistances mécaniques et possède une bonne capacité d'isolation thermique mais il est nécessaire de protéger les armatures contre les risques de corrosion. En outre la construction de ce type de toitures ne nécessite pas de coffrages mais uniquement des étais de soutènement et élimine les ponts thermiques.

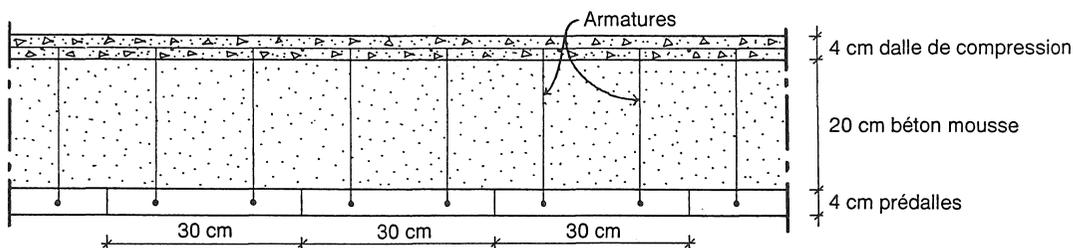


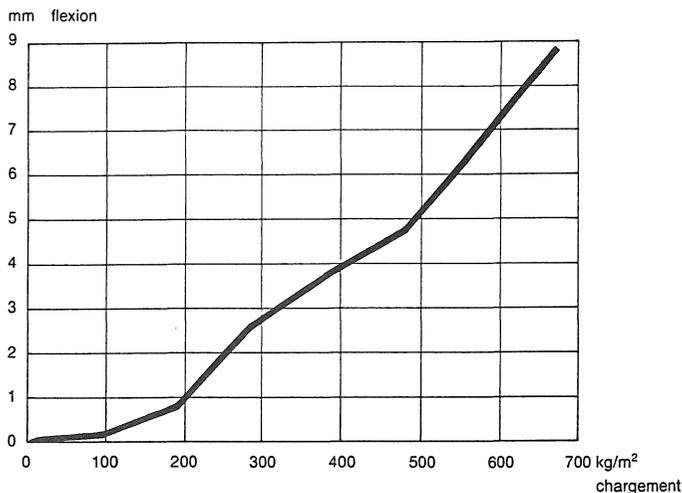
Fig. 3.17 Plancher avec comme isolant thermique du béton mousse. La force de traction et de compression est absorbée par le béton armé tandis que les tensions de cisaillement sont absorbées par les armatures verticales.

Roof with thermal insulation of foamed concrete. The compression and tensile forces are taken by the reinforced concrete whereas the shear forces are taken by the vertical reinforcements.

Fig. 3.18

Courbe de chargement du plancher de la figure 3.17. La valeur de la flexion obtenue correspond à une moyenne calculée sur trois points de mesures.

Relationship between displacement and charge for the roof in figure 3.17. The values of the displacement are the mean values of three measurements.





# Panneaux en laine de bois



# 4 Panneaux en laine de bois

## 4.1 Caractéristiques techniques

Il existe différents types de panneaux en laine de bois dont les principaux sont :

- *Les panneaux standards* qui sont principalement utilisés comme panneaux thermiquement isolants de murs et de toitures.
- *Les panneaux acoustiques* qui sont utilisés comme absorbants acoustiques dans les plafonds.

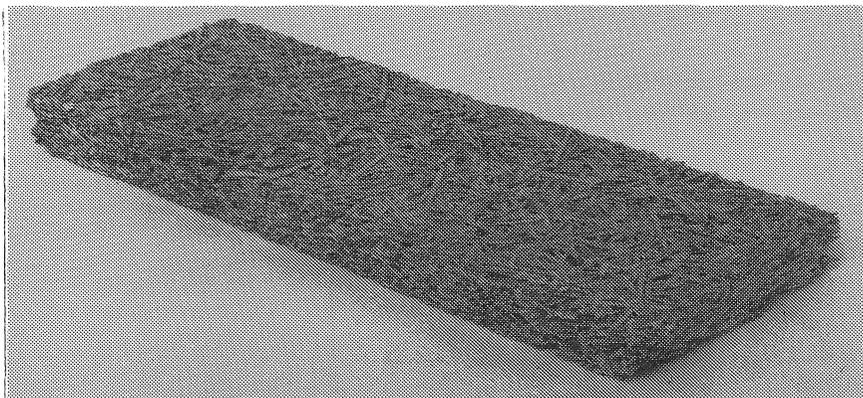
Il existe aussi des panneaux armés utilisés dans la construction des toitures.

La laine de bois qui est utilisée provient du rabotage des troncs d'une longueur d'environ 50 cm. La largeur des fibres varie entre 1 et 4 mm et leur épaisseur entre 0,2 et 0,5 mm. Les panneaux acoustiques ont normalement des fibres plus étroites (1-2 mm) que les panneaux standards. Dans la fabrication des panneaux, les fibres sont d'abord humidifiées avec de l'eau, puis elles sont malaxées avec un liant dans un malaxeur et ensuite pressées dans des moules où on les laisse durcir. Le liant est généralement le ciment. Cependant d'autres liants peuvent être utilisés comme la magnésite ou le plâtre. La proportion pondérale entre le ciment et la laine de bois est de 2/1.

La densité des panneaux en laine de bois peut varier entre 250 et 650 kg/m<sup>3</sup>. Pour de telles densités, la conductivité thermique varie entre 0,075 (panneaux à faible densité) et 0,16 (panneaux à densité élevée). La densité est d'une part fonction de la méthode de fabrication et d'autre part de l'élasticité des fibres de la laine de bois. La densité est aussi partiellement fonction de l'épaisseur des panneaux; plus ceux-ci sont minces et plus elle augmente. Si on utilise un

*Fig. 4.1*  
*Exemple d'un*  
*panneau en laine*  
*de bois d'une*  
*épaisseur de 5 cm.*

Example of  
a woodwool slab  
with a thickness  
of 5 cm.



panneau en laine de bois comme matériau isolant la densité la plus faible est à recommander. En général, les panneaux en laine de bois sont fabriqués dans les dimensions : 2–2,5 m × 50–60 cm × 2–15 cm.

## Conductivité thermique et résistances mécaniques

4.1.1

Le tableau 4.1 représente la conductivité thermique et les résistances mécaniques des panneaux en laine de bois à faible densité. L'avantage d'une densité faible est une meilleure conductivité thermique et la quantité de matériau utilisé est moindre. La résistance mécanique du panneau sera toutefois moins bonne.

Épaisseur (cm)	3	5	10	15
Poids (kg/m <sup>2</sup> )	11	16	28	42
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	320	300	260	260
Conductivité thermique (W/m°C)	0,080	0,075	0,075	0,075
Résistance à la flexion (MPa)	0,7	0,5	0,4	0,3
Résistance à la compression (MPa)	0,4	0,3	0,2	0,2
Résistance à la compression à 10% déformation (MPa)	0,05	0,10	0,10	0,15

Tableau 4.1 Caractéristiques techniques des panneaux en laine de bois à faible densité. (Les chiffres du tableau concernent les panneaux suédois fabriqués en bois de sapin, *Picea abies*.)

Properties of low density woodwool slabs. (The values in the table concerns Swedish slabs produced with spruce, *Picea abies*.)

## Retrait

4.1.2

Si les panneaux en laine de bois subissent une dessiccation de 50 kg/m<sup>3</sup> (l'humidité relative diminue de 100% à 50%) on a un retrait d'environ 3 mm/m.

## Absorption d'eau

4.1.3

Les panneaux en laine de bois ont une grande capacité d'absorption de l'humidité. La capacité de stockage de l'humidité est d'environ 70 kg/m<sup>3</sup>.

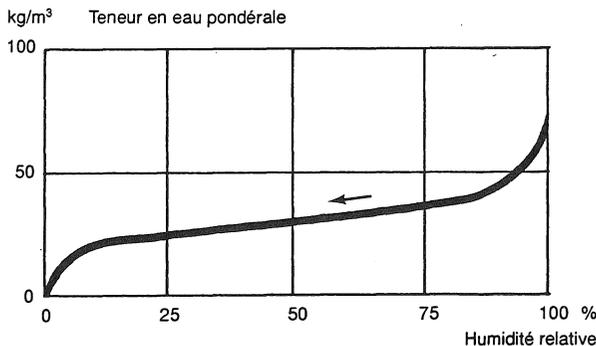


Fig. 4.2

La courbe de dessiccation d'un panneau en laine de bois avec une densité humide de 350 kg/m<sup>3</sup> et une densité sèche de 280 kg/m<sup>3</sup>. La teneur en eau pour 50% HR est de 20 à 30 kg/m<sup>3</sup>.

The drying curve for a woodwool slab with a wet density of 350 kg/m<sup>3</sup> and an oven-dry density of 280 kg/m<sup>3</sup>. The moisture content at 50% relative humidity is 20–30 kg/m<sup>3</sup>.

L'humidité absorbée sèche rapidement, l'humidité relative (HR) ambiante diminuant. La relation entre la teneur en eau pondérale du panneau en laine de bois et la HR ambiante est indiquée sur la figure 4.2. Etant donné que le panneau en laine de bois peut stocker beaucoup d'humidité, on l'utilise souvent dans des locaux à haute concentration d'humidité, par exemple les piscines.

Bien que le panneau en laine de bois contiennent du bois, il est connu pour sa résistance au pourrissement et à la moisissure. Ce qui est également valable après une longue période dans de l'eau. Le milieu basique engendré par le ciment contribue à la protection du bois. Les panneaux en laine de bois sont classés comme résistants à l'humidité.

#### 4.1.4 Autres propriétés

Les qualités acoustiques des panneaux en laine de bois sont excellentes et ils sont souvent utilisés comme absorbants acoustiques. Les panneaux sont très résistants au feu et ils sont classés comme non inflammables. Ils sont aussi résistants à l'attaque des termites.

## 4.2 Production

Le panneau en laine de bois est aujourd'hui répandu à travers le monde. Ses procédés de fabrication sont simples et bien connus : on mélange de la laine de bois, du ciment et de l'eau et on les presse pour obtenir un panneau. La quantité de ciment, en proportions pondérales, est environ le double de celle de la laine de bois. La laine de bois peut être fabriqué à partir d'un certain nombre de type de bois. A condition que le taux de sucre dans le bois utilisé ne soit pas trop élevé, ce qui rendrait le durcissement plus difficile, et que la laine ait la bonne «souplesse» pour la formation des pores d'air. A l'annexe 3, figurent des listes de types d'arbres dont on a testé l'aptitude à être utilisée dans la production de panneaux en laine de bois.

On fabrique, en général, le panneau en laine de bois dans des usines. Celles-ci peuvent avoir différents niveaux de mécanisation et d'automatisation. Dans les pays industriels, la production est presque entièrement automatisée alors que dans les pays en voie de développement, comme précédemment dans les pays industriels, on a recours à des unités de production plus manuelles.

L'instrument de production le plus important est une raboteuse pour la fabrication de la laine de bois. Il est également important de disposer d'un bon malaxeur pour abaisser la densité, ce qui est nécessaire pour obtenir, par la suite, une bonne isolation thermique. Avec une raboteuse et un malaxeur auxquels il convient d'ajouter un certain nombre d'accessoires, il est parfaitement possible de démarrer la production de panneaux.

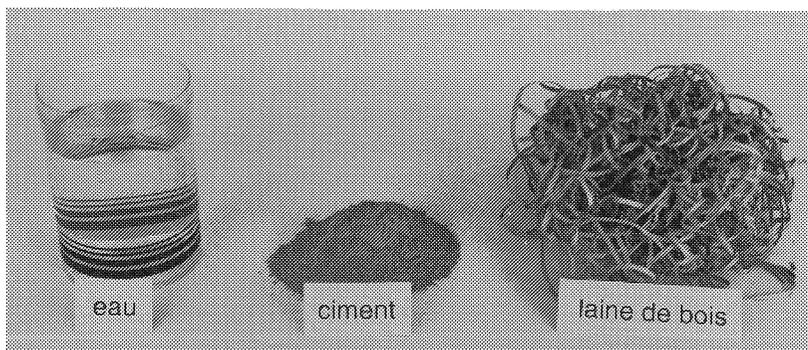


Fig. 4.3 Les composants de panneaux en laine de bois.

The ingredients used in woodwool slabs (water, Portland cement and woodwool).

## Matières premières

### 4.2.1

La production de panneaux en laine de bois est basée sur les composants suivants : ciment, laine de bois et eau, voir figure 4.3. En vue d'accélérer le durcissement, on ajoute souvent du chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ), ou autres accélérateurs, à l'eau de gâchage.

### Laine de bois

La laine de bois utilisée est obtenue à partir de rondins de 50 cm de long, passés au rabot. La qualité du bois doit correspondre à certaines conditions. Le taux de sucre doit être limité (un pourcentage trop important empêcherait la prise du ciment). Pour certains types de bois, on peut diminuer le taux de sucre par stockage (en général 6 à 12 mois). Le bois ne doit pas être trop dur pour faciliter son rabotage. Enfin, pour obtenir des panneaux contenant de l'air, facteur qui améliore les qualités d'isolation, le bois choisi ne devra pas être tendre mais plutôt élastique.

A cet effet, différentes qualités de bois ont été testées, voir annexe 3. Dans les bois retenus, certains sont plus appropriés que d'autres si l'on prend en compte la nécessité d'un traitement, par exemple un temps de stockage afin d'abaisser le taux de sucre.

La quantité de bois nécessaire à la production annuelle d'une usine correspond à un rendement annuel d'une forêt de 200 à 500 ha de bois. La superficie exacte étant fonction du type de bois et du climat.

### Ciment

On utilise généralement du ciment portland standard, mais il est également possible d'utiliser du ciment à haute résistance initiale. Pour des raisons esthétiques, certains panneaux acoustiques sont fabriqués avec du ciment portland blanc.

## Eau

Afin d'éviter une mauvaise prise du ciment il faut utiliser une eau courante non polluée.

## Accélérateur de prise

Le sel, ajouté à l'eau, permettra d'accélérer le durcissement des panneaux. Normalement, on utilise du chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) mais il est aussi possible d'utiliser du chlorure de magnésium ( $\text{MgCl}_2$ ), silicate de soude ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), sulfate d'aluminium ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ou autres. Le sel permet d'effectuer les opérations de démoulage après 24 heures. Le pourcentage de chlorure de calcium est de 1 à 5% du poids de l'eau en fonction des caractéristiques de la laine de bois.

### 4.2.2 Production semi-automatisée

Les différentes opérations de production sont décrites ci-après pour une unité de production semi-automatique (voir figure 4.4). Une telle unité n'exige qu'un investissement limité pour un niveau de production acceptable lors du lancement de la production. On peut transformer progressivement une usine semi-automatisée en usine entièrement automatisée. Le degré d'automatisation choisi est fonction des coûts de main-d'oeuvre, de la demande du produit, du prix de revient énergétique etc...

#### Préparation de la laine de bois

- découpage des troncs
- décorçage des troncs
- stockage des troncs pour séchage
- découpage en rondins de 50 cm et envoi aux raboteuses des rondins pour l'obtention de la laine

Le stockage des rondins peut être rendu nécessaire pour deux raisons: d'une part à cause de la nécessité de réduire le taux de sucre du bois, et d'autre part celle de réduire le taux d'humidité. Lors du rabotage, il est important d'avoir un taux d'humidité satisfaisant. S'il est trop élevé, les fibres ne se séparent pas correctement, ils restent collés; mais si, par contre, le taux d'humidité est trop faible, il sera difficile de raboter le bois. La laine sèche sera, en outre, plus friable et les fibres plus cassantes. Le taux d'humidité idéal est de l'ordre de 15 à 20%.

#### Production des panneaux

- pesée de la laine de bois et du ciment séparément
- immersion de la laine dans l'eau (l'eau peut contenir du chlorure de calcium,  $\text{CaCl}_2$ , pour accélérer la prise du ciment)

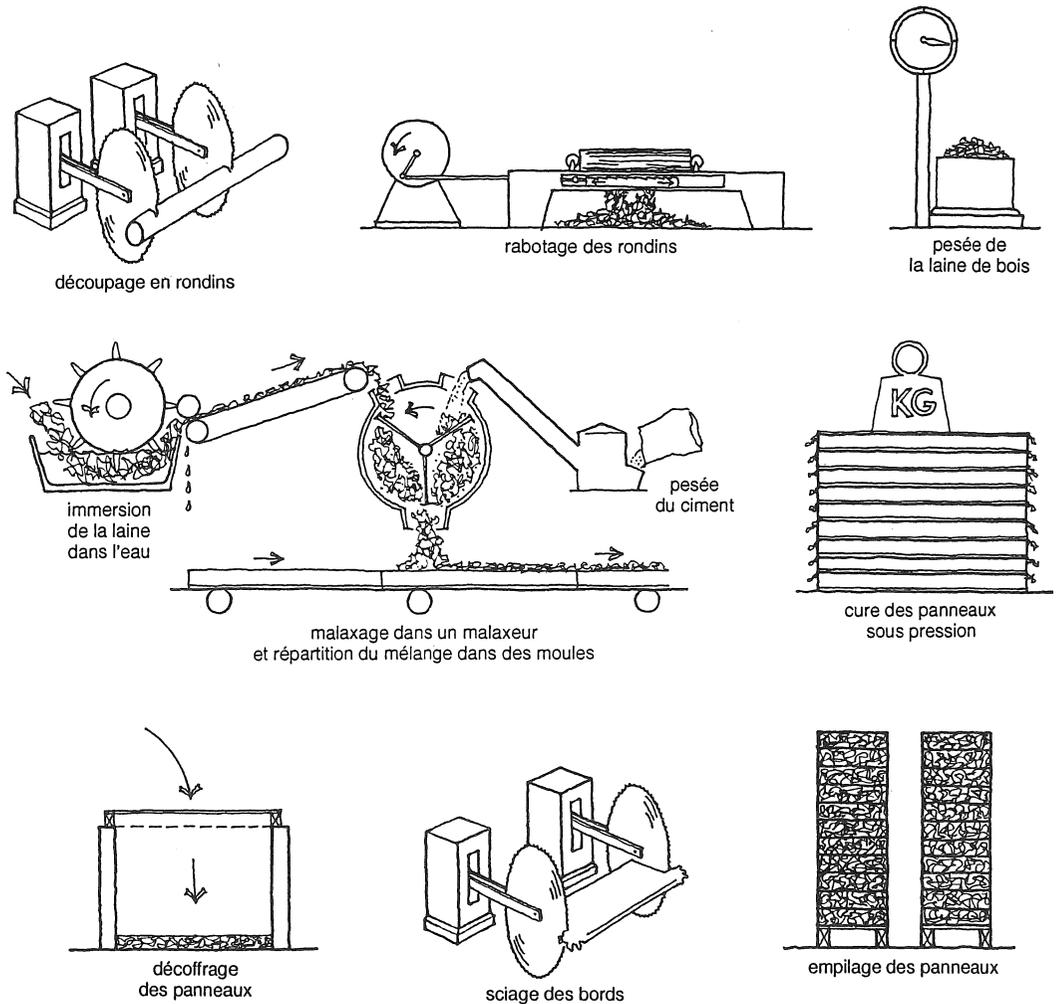


Fig. 4.4 Schéma de fabrication semi-automatique de panneaux en laine de bois.  
The production process for woodwool slabs in a semi-automatic factory.

- malaxage des deux constituants (laine – ciment) dans un malaxeur à axe horizontal, le ciment étant introduit dans le malaxeur en poudre sèche
- répartition du mélange dans des moules en bois
- transport des moules vers l'aire de cure en piles superposés
- cure des panneaux sous pression pendant 24 heures ou plus
- décoffrage des panneaux et sciage des bords
- empilage des panneaux et transport vers l'aire de stockage

Avant d'être décoffrés, les panneaux doivent avoir atteint une certaine résistance. Lors du décoffrage, ils sont soumis à une certaine sollicitation, puisqu'ils sont extraits de leurs moules. Ils ne doivent pas, non

plus, durcir trop longtemps dans leurs moules car ils peuvent alors rester collés.

Les panneaux sont stockés généralement pendant 2 à 3 semaines avant livraison au client.

### Consommation en matières premières

Calculée sur une production de panneaux en laine de bois légers d'une densité humide de  $360 \text{ kg/m}^3$ , la consommation annuelle s'élèvera à :

bois :	1 000 tonnes	(déchets compris)
ciment :	1 875 tonnes	
eau :	1 100 tonnes	(pour tous usages)
sel ( $\text{CaCl}_2$ ) :	20 tonnes	

Le calcul se base sur une production de  $42 \text{ m}^3$  par équipe, sur 240 jours de travail par an et sur une (1) équipe de travail. Dans ces conditions, le volume de production s'élèvera à  $10\,000 \text{ m}^3$  de panneaux en laine de bois.

### Effectifs

- sciage et rabotage :  3 ouvriers
- Production :  1 contremaître  
 15 ouvriers
- Livraison :  1 ouvrier
- Maintenance :  1 ingénieur  
 1 ouvrier

### Consommation d'énergie

Calculée sur l'utilisation de deux raboteuses, sur 240 jours de travail par an et sur 7 heures effectives de travail par jour, la consommation s'élèvera à  $75\,000 \text{ kWh}$ .

### Equipements

Pour la production proprement dite, les équipements concernés qui devront être importés, en partie ou totalement, sont les suivants :

- raboteuse
- machine à doser le ciment
- malaxeur pour mélange en continu
- poste de distribution pour le remplissage des moules
- scie (pour les bords)
- meule pour raboteuse (maintenance)

Le prix de ces équipements s'élève (juin 1993) à environ 2,7 millions de francs français (FF)<sup>5 6</sup> (2 raboteuses comprises).

Le reste des équipements de production peut être acheté sur place; une bascule pour peser la laine de bois, un malaxeur pour la solution de chlorure de calcium, une unité pour humidifier la laine de bois, un dispositif de compression des panneaux en cours de durcissement, etc. Le prix d'achat de ces équipements, sur le marché international, s'élève au total à environ 1,5 million de FF.

Ce type d'équipement, très robuste et fiable, peut très bien être acheté d'occasion ce qui permettrait de diminuer de beaucoup les coûts d'investissement.

Les moules font partie des équipements importants de la production. Ils se composent normalement d'un fond en contre-plaqué et de côtés en planches de bois. Le nombre de moules nécessaire dépend de la capacité de production envisagée, du nombre de types de panneaux et de leurs épaisseurs. Pour une production de 42 m<sup>3</sup> par jour dans les dimensions 240×60×5 cm, 1 300 moules seront à prévoir à condition que l'on puisse décoffrer les panneaux au bout de 24 heures. Dans le cas où l'on produit des panneaux plus épais, le nombre de moules sera moins important par équipe. Il est évident que ces moules s'usent et qu'ils seront à changer après quelques années.

Equipements et accessoires divers :

- équipement pour écorçage et appareil à couper les rondins
- meule pour lame de scie
- compresseur (entrée d'air 2 Nm<sup>3</sup>, pression de travail 6 bars)
- outillage d'atelier de réparations (poste de soudage, perceuse, etc.)
- équipements de laboratoire (contrôle de qualité)
- transformateur
- accessoires électriques
- alimentation en eau
- chariot élévateur manuel (3 chariots)
- huile pour systèmes hydrauliques
- palettes
- conteneurs pour transport
- équipements divers pour entretien : balais, racloirs, brouettes, wagons à bascule, etc.

### Unité de production

Un bâtiment de 2 500 m<sup>2</sup> et d'une hauteur sous plafond de 5 m sera prévu. Pour certaines machines, on prévoira des fondations et des

---

5 1 FF = 4,25 Dinars algériens (DA) = US\$ 0,17 (1993).

6 Offre d'Elten Systems, Barneveld, Pays-Bas 1993.

dispositifs spéciaux. Pour le poste de durcissement des panneaux, certains équipements seront nécessaires par exemple, un dispositif de chauffage, des cloisons, etc.

Le bâtiment sera raccordé aux réseaux d'électricité et d'alimentation en eau. Un éclairage, une protection contre le feu et des équipements sanitaires seront aussi prévus.

Le bâtiment sera raccordé à l'infrastructure routière. On prévoira aussi un endroit pour le stockage des rondins et leur sciage ainsi qu'une surface permettant le chargement des panneaux finis et leur stockage avant enlèvement. Le terrain sera entouré d'un grillage et éventuellement d'un poste de garde.

### Installation et mise en marche de la production

L'installation des machines et les tests de mise en marche devront être effectués par du personnel qualifié, c'est-à-dire des techniciens ayant déjà l'expérience de ce type de production. Au cours de l'installation et des tests de production, le personnel futur sera formé.

L'installation exige des compétences en mécanique et en électricité. La période de montage est estimée à deux mois.

Les tests commenceront une fois l'installation terminée. Chaque machine sera testée individuellement pour aboutir à des tests en production. La durée des tests est estimée à un mois environ.

Il semble opportun que les spécialistes restent quelques semaines de plus, afin de surveiller le bon fonctionnement en production. Cette période permettra de contrôler que le produit fini correspond bien à la qualité demandée et que la capacité de production est bien conforme aux délais prévus.

#### 4.2.3 Coûts de production

Les coûts d'investissement nécessaires pour une unité de production semi-automatisée sont rapportés ci-dessous. Les calculs sont basés sur la production de panneaux en laine de bois dont la longueur, la largeur et l'épaisseur maximales sont de  $300 \times 60 \times 10$  cm. La production, pour des panneaux d'une densité de  $300 \text{ kg/m}^3$  (ce qui correspond à une densité humide d'environ  $360 \text{ kg/m}^3$ ), pourra atteindre  $42 \text{ m}^3$  par équipe travaillant 7 heures effectives en utilisant 2 raboteuses. Dans le cas où l'on utilise seulement une raboteuse, la production diminuera de moitié. Ainsi, la capacité de production dépend principalement du nombre de raboteuses utilisées.

L'évaluation des coûts de production a été établie en tenant compte des coûts du matériau, des dépenses salariales, de la consommation d'énergie ainsi que d'une immobilisation du capital pour l'équipement et l'unité de production. Ils sont établis en fonction d'une production annuelle de  $10\,000 \text{ m}^3$  de panneaux en laine de bois. Les prévisions par  $\text{m}^3$  sont de l'ordre de 330 francs français (FF) la première année. L'année suivante, les frais diminuent mais viennent par contre s'y

ajouter l'entretien des équipements, ce qui permet d'évaluer le coût total de production au même niveau que la première année.

### **Coût des matériaux**

Les frais de matériaux sont calculés pour une densité humide de 360 kg/m<sup>3</sup>.

ciment :	1 875 tonnes × 500 FF/tonne =	940 000 FF
bois :	1 000 tonnes ÷ 0,6 tonne/m <sup>3</sup> × 200 FF/m <sup>3</sup> * =	330 000 FF
CaCl <sub>2</sub> :	20 tonnes × 500 FF/tonne =	10 000 FF
<hr/>		
Coût/annuel		1 280 000 FF
Coût/m <sup>3</sup>		128 FF

\*Frais de transport et de décortication inclus.

### **Dépenses matériels consommables**

Coûts pour moules/an (durée de vie : 5 ans)	65 000 FF
Autres	35 000 FF
<hr/>	
Coût annuel	100 000 FF
Coût/m <sup>3</sup>	10 FF

### **Coût salarial**

Ingénieur :	1 × 4 000 FF/mois =	4 000 FF/mois
Contremaître :	1 × 3 000 FF/mois =	3 000 FF/mois
Ouvriers :	20 × 2 000 FF/mois =	40 000 FF/mois
Affiliation syndicale collective 50%		24 000 FF/mois
<hr/>		
Total		71 000 FF/mois
Coût salarial global		852 000 FF/an
Coût/m <sup>3</sup>		85 FF

### **Coûts énergétiques**

Coûts énergétiques annuels,		
machines :	75 000 kWh × 0,25 FF/kWh =	19 000 FF
autres :	25 000 kWh × 0,25 FF/kWh =	6 000 FF
<hr/>		
Coût énergétique total :		25 000 FF
Coût/m <sup>3</sup>		3 FF

### **Coût du capital immobilisé pour le matériel**

Machines importées	2 700 000 FF
Transport (6%)	160 000 FF
Autres équipements	1 500 000 FF
<hr/>	
Total des investissements d'équipements	4 360 000 FF
Amortissement (15 ans)	291 000 FF
Frais (10%)	436 000 FF
<hr/>	
Coût annuel	727 000 FF
Coût/m <sup>3</sup>	73 FF

**Coût du capital immobilisé pour l'unité de production**

Bâtiment : 2 500 m <sup>2</sup> avec bureaux	2 200 000 FF
Terrain	300 000 FF
<b>Total</b>	<b>2 500 000 FF</b>
Amortissement (30 ans)	83 000 FF
Frais (10%)	250 000 FF
Coût annuel	333 000 FF
Coût/m <sup>3</sup>	33 FF

**Coût de production total**

Coût de production total/m<sup>3</sup> de panneaux en laine de bois avec une densité de 300 kg/m<sup>3</sup> pour une production de 10 000 m<sup>3</sup>/an :

Coût des matériaux	128 FF
Dépenses matériels consommables	10 FF
Coût salarial	85 FF
Coût énergétique	3 FF
Coût du capital immobilisé pour le matériel	73 FF
Coût du capital immobilisé pour l'unité de production	33 FF
<b>Coût total/m<sup>3</sup></b>	<b>332 FF</b>

En termes de rentabilité le panneau en laine de bois doit être à même de pouvoir concurrencer les matériaux déjà existants sur le marché. Aussi, toute décision d'investissement reste conditionnée par une étude de faisabilité financière et une étude de faisabilité commerciale (étude de marché).

	densité (kg/m <sup>3</sup> )	conductivité thermique (W/m <sup>2</sup> C)	coût/m <sup>3</sup>
béton mousse	400	0,10	290 FF
panneau en laine de bois	300	0,08	330 FF
polystyrène expansé	12-40	0,04	500-600 FF*

\*Prix de vente en Algérie, juin 1993

Tableau 4.2 Comparaison des prix entre le béton mousse, le panneau en laine de bois et le polystyrène expansé

Price comparison between foamed concrete, woodwool slab and expanded polystyrene.

#### 4.2.4 Inventaire et essais de production

##### Inventaire en Algérie – Eucalyptus et autres types de bois

L'inventaire des ressources forestières en Algérie montre d'importantes plantations de différents types de bois.

Il existe en Algérie plus de 150 espèces d'eucalyptus. Les eucalyptus sont des arbres à croissance très rapide capables de se développer dans des conditions diverses.

L'inventaire national recense 43 235 hectares (ha) pour une possibilité annuelle récoltable de 144 000 m<sup>3</sup>. Ces reboisements, qui ne sont pas valorisées par des industries de transformation, ont été effectués surtout dans l'Est du pays : Annaba 16 310 ha, Guelma 3 940 ha, Skikda 2 845 ha, Tizi Ouzou 6 070 ha. Les essences principalement utilisées sont *Eucalyptus camaldulensis* et *Eucalyptus globulus*. De façon très limitée ont été introduits *E. grandis*, *E. gomphocephala* et *E. leucoxylon*. Bien que des eucalyptus ait été installés dans le semi-aride les meilleurs résultats sont obtenus dans l'humide et le sub-humide doux et chaud.

L'espèce dominante est actuellement *E. camaldulensis*. Dans les meilleurs sols l'accroissement total atteint 13,8 m<sup>3</sup> par hectare et par an. Une partie des surfaces a atteint l'âge de 30 ans ce qui est notablement élevé pour une espèce à traiter en taillis, à révolution de plus ou moins dix ans avant renouvellement.

Un autre arbre intéressant est le pin d'Alep (*Pinus halepensis*), qui pousse naturellement dans les pays méditerranéens et dont les plantations couvrent d'importantes surfaces en Algérie.

La production locale qui s'est établie en moyenne des 5 dernières années à 140 000 m<sup>3</sup> de bois rond a fournis 28% de bois d'oeuvre, 46% de bois de trituration, 19% de bois de chauffage et 7% de perches et piquets. Le pin d'Alep y a représenté plus de 60% et l'eucalyptus près du quart.

Malgré la demande insatisfaite, cette production n'a représenté que 11% des possibilités totales d'exploitation qui se chiffrent à 1 200 000 m<sup>3</sup> par an. Pour l'eucalyptus cela pourrait concerner 145 000 m<sup>3</sup>. Le prix de revient du bois d'oeuvre est de 190 francs français (750 dinars algériens) par m<sup>3</sup>.

## Tests de compatibilité avec les types de bois algériens

La méthode choisie pour tester la compatibilité d'un type de bois pour la production de panneaux consiste à fabriquer des éprouvettes et analyser les résultats obtenus. On a ainsi examiné deux types de bois algériens. Les essais ont été réalisés à la société *T-produkterna AB*<sup>7</sup>.

On effectua un premier test avec quelques troncs d'*eucalyptus camaldulensis*. Les troncs ont été rabotés pour avoir les fibres nécessaires. Les fibres de la laine de bois avaient les dimensions 500 × 4 × 0,3 mm. On utilisa une méthode de fabrication qui consiste à tremper la laine dans une laitance de ciment (méthode dite humide), au lieu d'humidifier la laine et de la saupoudrer de ciment (méthode sèche). (La méthode humide a l'inconvénient de produire un panneau plus

---

<sup>7</sup> Le plus important fabricant de panneaux en laine de bois en Scandinavie et le seul en Suède.

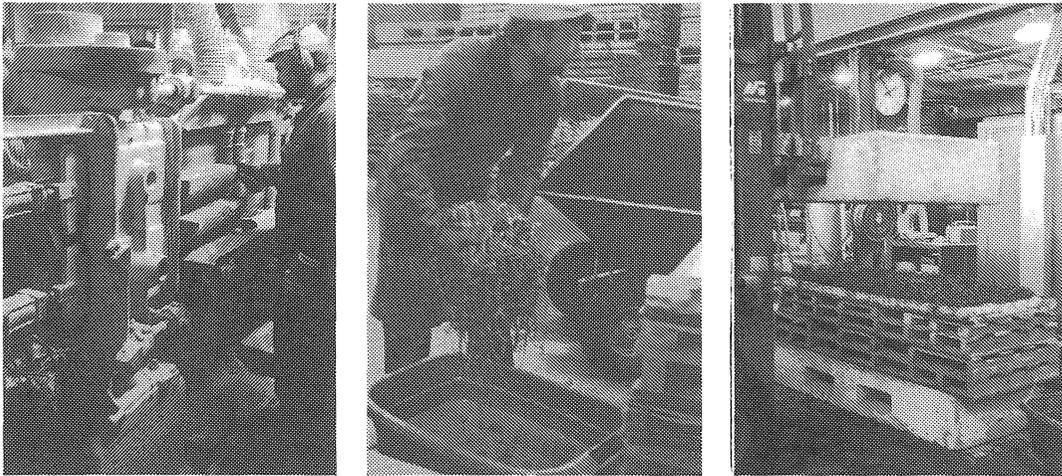


Fig. 4.5 Test de compatibilité de l'eucalyptus camaldulensis à l'unité de production des T-produkterna AB, Suède. Rabotage du bois (à gauche). On a trempé la laine dans une laitance de ciment puis on l'a répartie dans un moule (au milieu). Celui-ci est rempli à environ le double de sa hauteur. On a pressé la mélange de laine de bois/ciment avec un poids en béton (à droite). Au bout de trois jours, on l'a démoulé.

Suitability test of eucalyptus camaldulensis at the factory of T-produkterna AB, Sweden. Shredding of woodwool (left). The woodwool is immersed in a cement slurry and put into a mould to double thickness (centre). The mix of woodwool/cement is compressed with a concrete block (right). The slab was un moulded after three days.

lourd, mais elle est largement suffisante pour apprécier l'adhésion entre la laine et la pâte de ciment.)

Le produit ainsi obtenu fut introduit dans des moules en bois d'une profondeur de 5 cm et pressé avec un bloc en béton. Le décoffrage eu lieu après 72 heures. L'essai a bien réussi car on a obtenu une excellente adhésion entre le ciment et la laine de bois. En raison du procédé de fabrication, le panneau était lourd. Au bout de quelques mois de conservation dans une température ambiante (HR 40–50%), le panneau avait une densité de 380 kg/m<sup>3</sup>.

Fig. 4.6 Une éprouvette d'un panneau en laine de bois fabriqué à la main (avec eucalyptus camaldulensis).

A piece of a hand made woodwool slab (made with eucalyptus camaldulensis).



Un autre essai de production a été réalisé avec l'*eucalyptus gomphocephala* mais cette fois par la méthode dite sèche. Un peu de chlorure de calcium a été ajouté dans l'eau de gâchage pour accélérer la prise du ciment. Les fibres imbibées d'eau furent saupoudrées de ciment puis malaxées manuellement. Le décoffrage eu lieu après 24 heures, les panneaux présentait une bonne stabilité et l'adhérence des fibres avec le ciment était satisfaisante.

## Production à grande échelle

A la suite des tests de compatibilité, on est passé à la production à grande échelle en usine, en Suède. On a utilisé environ 3 m<sup>3</sup> de *E. camaldulensis* algérien.

Lors de la fabrication, le taux d'humidité du bois était d'environ 30%, ce qui est trop élevé (en général, le taux d'humidité ne doit pas dépasser 20%). Ce qui eut pour conséquence des difficultés pour séparer les fibres de bois lors du rabotage.

Lors du rabotage de la laine, l'usure des rabots était importante, due au fait que l'*E. camaldulensis* est un type de bois dur; la densité était d'env. 900 kg/m<sup>3</sup>. A titre de comparaison, l'*E. gomphocephala* a une densité de 700 kg/m<sup>3</sup> et les conifères, comme par ex. le pin d'Alep, ont une densité d'environ 500 kg/m<sup>3</sup>.

Malgré l'apport de chlorure de calcium dans l'eau de gâchage, le durcissement des panneaux prit quatre jours avant le décoffrage et le sciage des bords.

Les panneaux fabriqués avaient une masse volumique élevée. La masse volumique humide était supérieure à 600 kg/m<sup>3</sup> (au lieu de 360 kg/m<sup>3</sup>, qui est la valeur courante pour cette épaisseur) et la masse volumique dans une température ambiante (HR 40–50%) était de 420 kg/m<sup>3</sup> (au lieu de 300 kg/m<sup>3</sup>). Cette masse volumique élevée était due à :

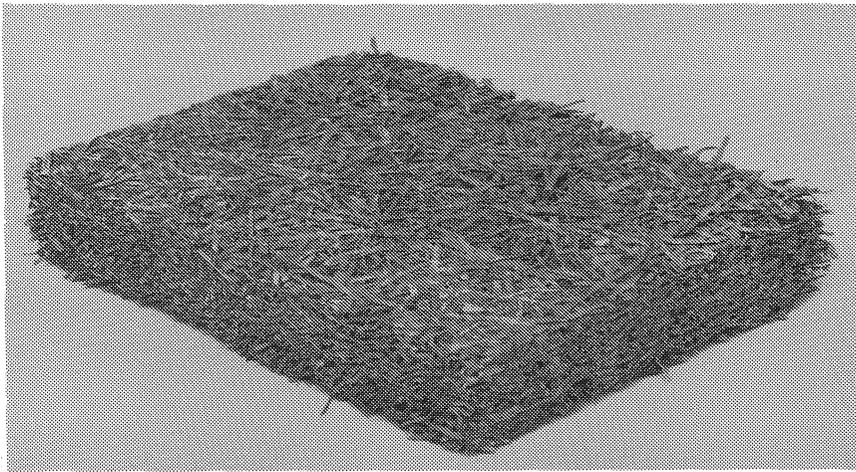
- la masse volumique élevée du type de bois;
- la tendance des fibres à se fractionner en éléments plus petits (ce qui entraîna un mélange pâte de ciment-laine de bois plus compact;
- un trop plein des moules (les panneaux pouvaient difficilement être comprimés à l'épaisseur voulue).

Ce dernier phénomène était dû à un mauvais réglage de l'alimentation du mélange pâte de ciment-laine de bois dans les coffrages. Pour une production à plus long terme celle-ci aurait été modifiée en fonction du type de bois et des tests de production. Si les coffrages avaient été remplis avec une quantité de pâte de cimentlaine de bois satisfaisante, la masse volumique aurait été plus faible et on aurait pu fabriquer un plus grand nombre de panneaux.

La fabrication prit une heure pour une centaine de panneaux de dimensions 200×60×5 cm, correspondant à environ 6 m<sup>3</sup> et pouvant couvrir une surface de 120 m<sup>2</sup>.

Fig. 4.7  
Un morceau d'un  
panneau en laine  
de bois fabriqué  
industriellement  
(avec eucalyptus  
camaldulensis).

A piece of an  
industrially pro-  
duced woodwool  
slab (made with  
eucalyptus camal-  
dulensis).



### Conclusions

Il est parfaitement possible d'utiliser *E. camaldulensis* pour une production industrielle de panneaux en laine de bois car les panneaux font preuve d'une résistance suffisante. La fabrication est rendue difficile du fait que le bois est dur et entraîne une usure de l'acier du rabot qui doit être aiguisé plus souvent. Les autres inconvénients sont que les panneaux ont une masse volumique relativement élevée et mettent un certain temps à durcir.

Il serait souhaitable de procéder à des tests plus poussés avec d'autres types de bois plus tendres existants en Algérie comme *Eucalyptus gomphocephala* et le pin d'Alep.

## 4.3 Applications

### 4.3.1 Domaine d'application

Le panneau en laine de bois convient parfaitement aux techniques de constructions usités dans le secteur du bâtiment algérien et devrait donc facilement pouvoir être introduit en Algérie.

Dans les toitures plates modernes, constituées par un plancher en béton réalisés avec des hourdis en terre cuite ou en agglomérés de ciment (voir figure 3.16), ceux-ci pourraient être remplacés par des panneaux en laine de bois. Une telle toiture pourrait être enduite ou laissée telle quelle, ce qui constituerait une absorption acoustique parfaite, par exemple pour des locaux recevant du public ou dans des ateliers bruyants.

Les panneaux en laine de bois sont parfaits pour être utilisés comme faux-plafonds : ils sont faciles à installer et ont de bonnes qualités acoustiques.

Le panneau en laine de bois peut aussi être utilisé pour des murs extérieurs pour en améliorer l'isolation thermique. Les panneaux

peuvent être utilisés en doublage des murs extérieurs ou en blocs pour constituer des maçonneries isolants.

### Avantages à l'utilisation de panneaux en laine de bois

En remplaçant, dans la construction de toiture utilisée actuellement, les hourdis par des panneaux en laine de bois, on pourrait abaisser le coefficient  $K$  de 1,9–2,3 à 0,4–0,5  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La cadence de production des planchers pourrait probablement augmenter, les panneaux étant plus grands que les hourdis traditionnels et donc plus rapides à installer avec une amélioration sensible du confort acoustique et thermique des bâtiments réalisés.

## Exemple d'application et essais

4.3.2

Parmi les applications possibles des panneaux en laine de bois nous avons conçu et testé deux types de plancher et réalisé un faux-plafond.

### Tests de planchers

Le premier est constitué par des panneaux en laine de bois comme coffrage perdu et une dalle de compression en béton armé, voir figure 4.8. La différence essentielle est qu'on a remplacé les hourdis par des panneaux en laine de bois, qui ont une bien meilleure isolation thermique. Le panneau en laine de bois convient parfaitement à ce type de construction étant donné qu'on le fabrique dans les dimensions qui correspondent à celles dont il est ici question. Les panneaux en laine de bois sont également suffisamment rigides pour supporter le poids d'un homme au cours des travaux. On peut les fabriquer dans des épaisseurs variées (ou les placer les uns sur les autres) et obtenir ainsi le coefficient  $K$  désiré. Le coefficient  $K$  du plancher réalisé est 0,5  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Le deuxième plancher a, comme le premier, une poutrelle porteuse en T avec laquelle on utilise des panneaux en laine de bois comme isolant, (voir figure 4.10). La différence est que le côté inférieur de la toiture est formé d'une suite de panneaux en laine de bois, ce qui contribue donc à atténuer l'effet des ponts thermiques. Le coefficient  $K$  du plancher est d'environ 0,4  $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

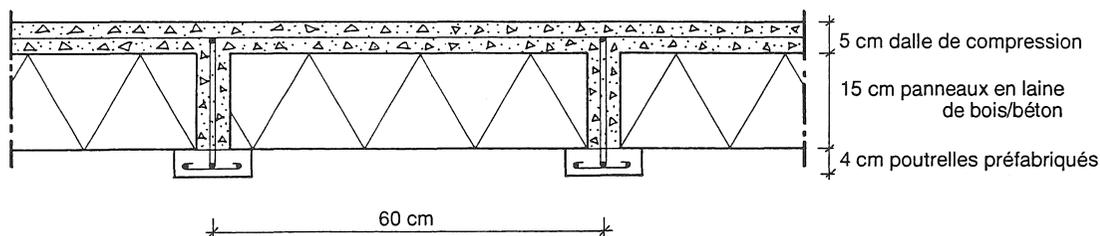


Fig. 4.8 Plancher avec ossature en béton armé et où on a remplacé les hourdis par des panneaux en laine de bois.

Roof with structure of reinforced concrete where the concrete hollow blocks (which are normally used) have been replaced by woodwool slabs.

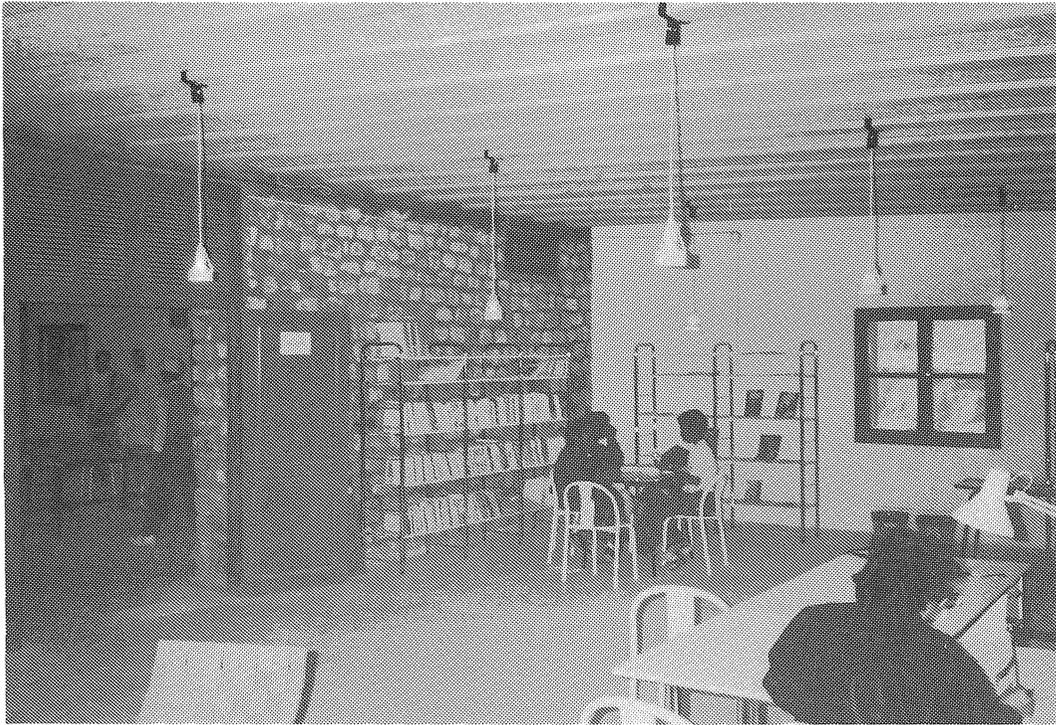


Fig. 4.9 Exemple d'utilisation de panneaux en laine de bois combinant l'isolation thermique et l'absorption acoustique selon la toiture de la figure 4.8 (la maison de jeunes à Tameghza, Tunisie).

Example of the use of woodwool slabs combining thermal insulation and acoustic absorption. (The youth centre in Tameghza, Tunisia). The roof construction is the same as in figure 4.8.

Les planchers, qui avaient une portée de 3,6 m, ont été soumis à des essais de chargement afin de vérifier les résistances statique et à la flexion, (voir figure 4.11). Le chargement était tout d'abord de  $100 \text{ kg/m}^2$  afin de simuler la forme de pente, plus  $400 \text{ kg/m}^2$ , ce qui correspond à la charge normalisée. Le chargement total était donc de  $500 \text{ kg/m}^2$ . La valeur de la flexion était notée pour chaque palier de  $100 \text{ kg/m}^2$  de chargement, voir figures 4.12 et 4.13. La flexion autorisée est  $1/500^{\text{ème}}$  de la portée, dans ce cas-là 7,2 mm.

Les planchers ont résisté au chargement. Aucune fissure sérieuses n'a été observée dans les parties portantes. Seule une augmentation des jointures entre les panneaux en laine de bois ont été observées.

En conclusions nous pouvons dire que les résultats des essais montrent que les planchers ainsi conçus répondent pleinement aux exigences de résistances mécaniques et possèdent une bonne capacité d'isolation thermique. En outre la construction de ce type de toitures ne nécessite pas de coffrages mais uniquement des étais de soutènement.

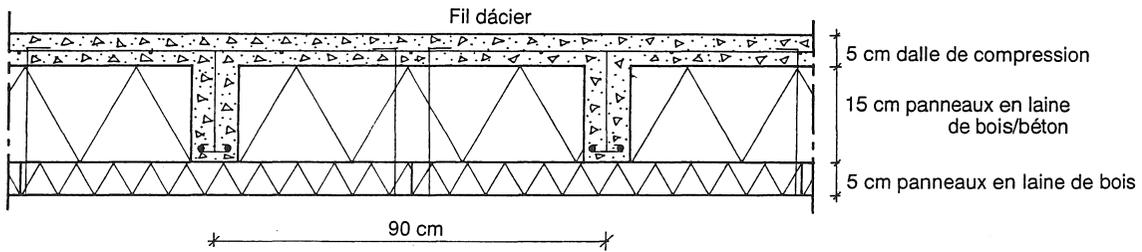


Fig. 4.10 Plancher avec ossature porteuse en béton armé et isolation thermique avec panneaux en laine de bois. Les ponts thermiques sont interrompus par une suite ininterrompue de panneaux en laine de bois.

Roof with structure of reinforced concrete and thermal insulation with woodwool slabs. The thermal bridges are cut off by the lower layer of woodwool slabs.

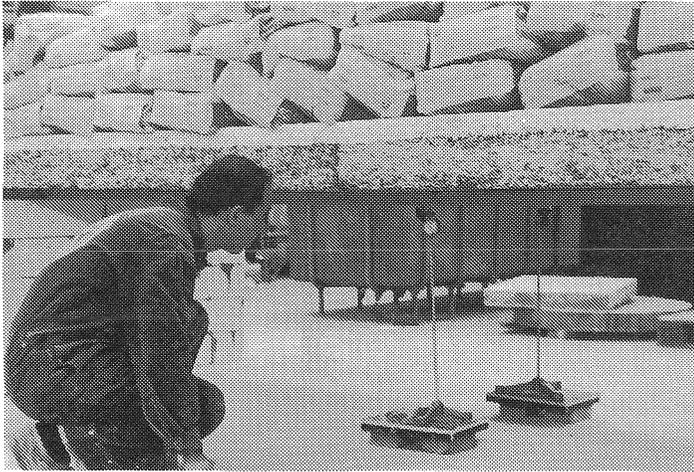
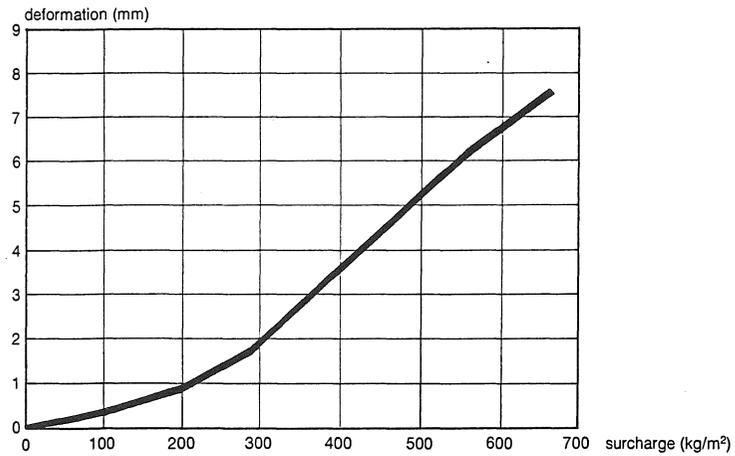


Fig. 4.11  
Chargement du plancher de la figure 4.8

Charging of the roof in figure 4.8.

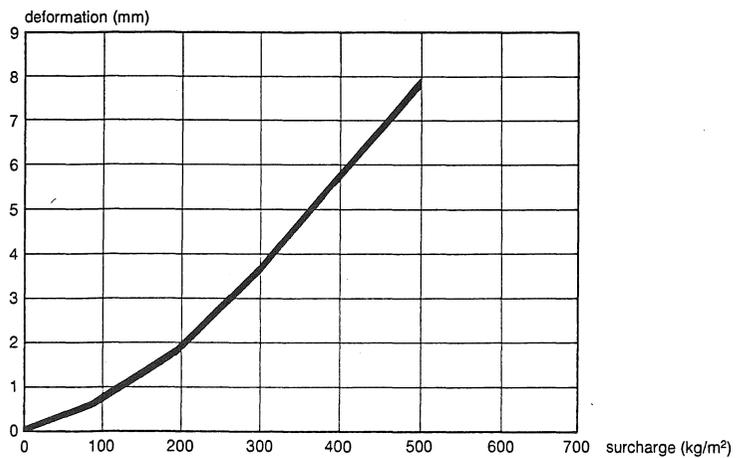
**Fig. 4.12**  
Chargement du plancher de la figure 4.8. La valeur de la flexion obtenue correspond à une moyenne calculée sur deux points de mesures.

Charging of the roof in figure 4.8. The value of displacement is a mean of two measures.



**Fig. 4.13**  
Chargement du plancher de la figure 4.10. La valeur de la flexion obtenue correspond à une moyenne calculée sur trois points de mesures.

Charging of the roof in figure 4.10. The value of displacement is a mean of three measures.



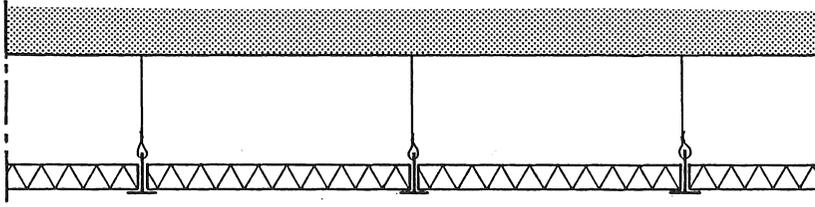


Fig. 4.14 Faux-plafond de panneaux en laine de bois. Les panneaux reposent sur des profiles en T, suspendus au plafond.

Suspended ceiling of woodwool slabs. The slabs rest on T-profiles which are hanging in the roof.



Fig. 4.15

Faux-plafond de panneaux en laine de bois au laboratoire du CNERIB. Les panneaux reposent sur des profiles en T, suspendus au plafond.

Ceiling of woodwool slabs in the laboratory of CNERIB. The slabs rest on T-profiles which are hanging in the roof.

### Panneaux en laine de bois servant de faux-plafond

Dans les faux-plafonds, les panneaux en laine de bois reposent normalements sur des profiles en T qui sont suspendus au plafond, voir figure 4.14. Les panneaux en laine d'eucalyptus fabriqués à grande échelle ont été utilisés pour ce type de faux-plafond dans le laboratoire du CNERIB, voir figure 4.15. Celui-ci avait, à l'origine, un toit en tôle avec comme conséquence une transmission de chaleur et une radiation importante à travers le toit. En outre, l'acoustique du laboratoire était des plus médiocre, entre autre lorsqu'il pleuvait. Grâce à ce nouveau fauxplafond, le climat s'est notablement amélioré aussi bien en hiver qu'en été et l'acoustique a été sensiblement amélioré.

# Annexe



## Annexe 1

## Caractéristiques des parois

parois	cas	matériau	e (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m°C)	R (m <sup>2</sup> /W°C)	c (Ws/kg°C)	C (Wh/m <sup>2</sup> °C)	
toiture, partie isolante (212 m <sup>2</sup> )	1	mortier	0,06	1900	0,9	0,07	800	25	
		béton	0,04	2400	1,5	0,03	800	21	
		hourdis	0,12	1100	—	0,2	900	33	
		mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		1/hi+1/he <sup>1</sup>				0,14			
total						0,46		85	
toiture, partie béton (44 m <sup>2</sup> )	1	mortier	0,06	1900	0,9	0,07	800	25	
		béton	0,16	2400	1,5	0,11	800	85	
		mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		1/hi+1/he				0,14			
		total						0,34	
toiture, partie isolante (243 m <sup>2</sup> )	2+3	mortier	0,06	1900	0,9	0,07	800	25	
		béton <sup>2</sup>	0,045	2400	1,5	0,03	800	24	
		panneau en laine de bois <sup>2</sup>	0,145	260	0,075	1,93	1500	16	
		1/hi+1/he				0,14			
		total						2,17	
toiture, partie béton (13 m <sup>2</sup> )	2+3	mortier	0,06	1900	0,9	0,07	800	25	
		béton	0,23	2400	1,5	0,15	800	123	
		mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		1/hi+1/he				0,14			
		total						0,38	
mur extérieur, partie isolante (67 m <sup>2</sup> )	1+2	mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		parpaings en béton	0,2	1100	—	0,33	900	55	
		mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		1/hi+1/he				0,17			
		total						0,54	
mur extérieur, partie isolante (67 m <sup>2</sup> )	3	mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		béton cellulaire	0,2	650	0,17	1,18	1000	36	
		mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		1/hi+1/he				0,17			
		total						1,39	
mur extérieur, partie béton (12 m <sup>2</sup> )	1+2+3	mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		béton	0,2	2400	1,5	0,13	800	107	
		mortier	0,015	1900	0,9	0,02	800	6	
		1/hi+1/he				0,17			
		total						0,34	

e = épaisseur de la paroi

R = résistance thermique (e/λ)

ρ = densité

c = capacité calorifique

λ = conductivité thermique

C = stockage thermique (c × ρ × e)

1 1/hi + 1/he = Total des résistances superficielles interne et externe.

2 On considère que, lors du bétonnage, 0,5 cm de béton pénètre dans les panneaux en laine de bois.

parois	cas	matériau	$e$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m°C)	$R$ (m <sup>2</sup> /W°C)	$c$ (Ws/kg°C)	$C$ (Wh/m <sup>2</sup> °C)
fenêtre, 1 vitre (15 m <sup>2</sup> )	1+2	1 verre 1/hi+1/he <sup>1</sup>				— 0,17		—
total						0,17		
fenêtre, 2 vitres (15 m <sup>2</sup> )	3	2 verres lame d'air 1/hi+1/he				— 0,18 0,17		—
total						0,35		—
porte (2 m <sup>2</sup> )	1+2+3	bois 1/hi+1/he	0,02	600	0,13	0,16 0,17	1500	5
total						0,33		5
mur mitoyen (96 m <sup>2</sup> )	1+2+3	mortier pierre mortier	0,03 0,34 0,03	1900 2100 1900			800 900 800	13 180 13
total								206
mur intérieur (144 m <sup>2</sup> )	1+2+3	mortier parpaings mortier	0,015 0,15 0,015	1900 1100 1900			800 900 800	6 41 6
total								53
plancher, partie isolante (212 m <sup>2</sup> )	1+2+3	béton hourdis mortier	0,04 0,12 0,015	2400 1100 1900			800 900 800	21 33 6
total								60
plancher, partie béton (44 m <sup>2</sup> )		béton mortier	0,16 0,015	2400 1900			800 800	85 6
total								91
fondations, sous le bâtiment (36 m <sup>2</sup> )	1+2+3	béton gravier terre 1/hi+1/he	0,1 0,15 0,5	2400 1850 1750	1,5 0,35	0,07 0,43 3,4 0,22	800 800 800	53 62 194
total						4,12		309
fondations, près de la façade (28 m <sup>2</sup> )	1+2+3	béton gravier terre 1/hi+1/he	0,1 0,15 0,5	2400 1850 1750	1,5 0,35	0,07 0,43 1,0 0,22	800 800 800	53 62 194
total						1,02		309

$e$  = épaisseur de la paroi

$\rho$  = densité

$\lambda$  = conductivité thermique

$R$  = résistance thermique ( $e/\lambda$ )

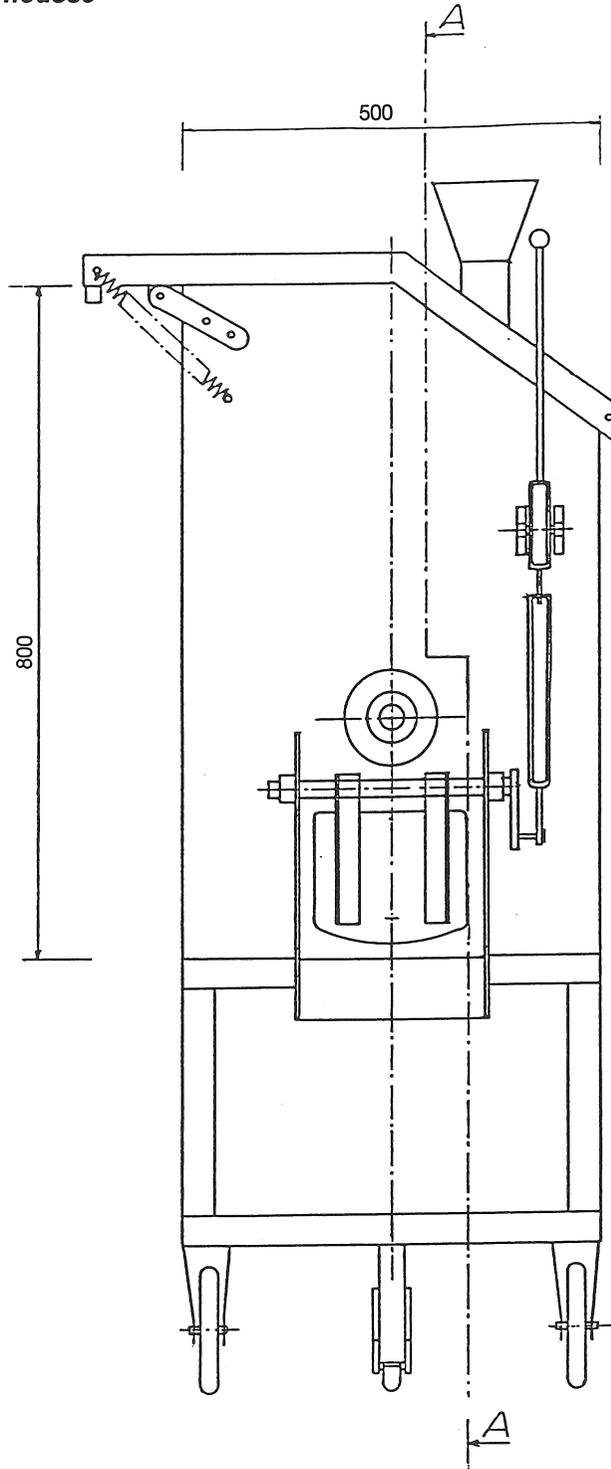
$c$  = capacité calorifique

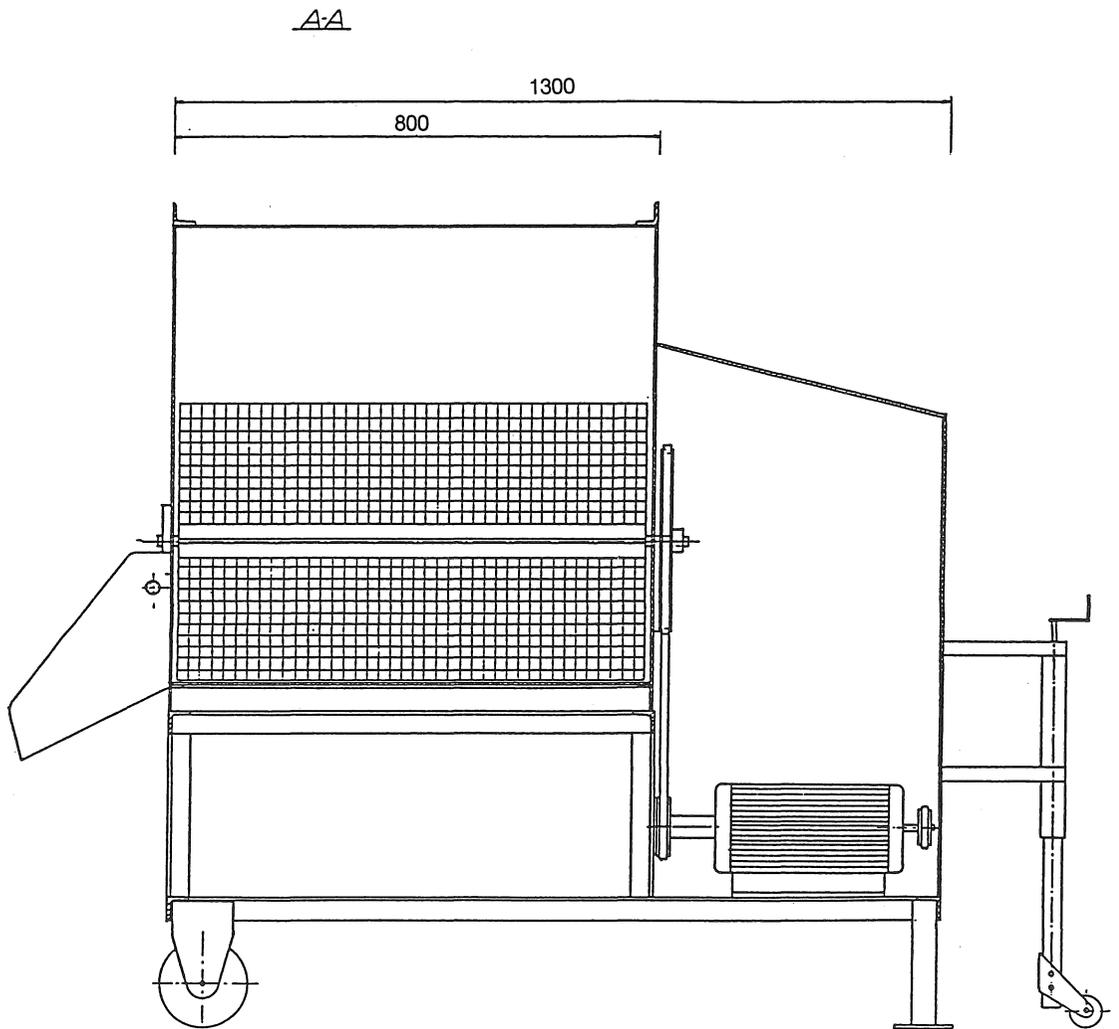
$C$  = stockage thermique ( $c \times \rho \times e$ )

1  $1/hi + 1/he$  = Total des résistances superficielles interne et externe.

# Annexe 2

## Malaxeur pour béton mousse





## Annexe 3

**Tableau 1 : Panneaux testés conformément aux normes BS et DIN**

L'aptitude des types de bois suivants pour entrer dans la composition de panneaux en laine de bois a été testé par une production à grande échelle. Les propriétés de résistance mécanique des panneaux ont été ensuite testées et comparées aux normes (British Standard ou DIN) pour ce qui est de la résistance à la compression et à la flexion.

Type de bois (nom botanique)	Aptitude	Source	Type de bois (nom botanique)	Aptitude	Source
<i>Abies pindrow*</i>	a	1, 4	<i>Koompasia malacencis Maing</i>	n	2
<i>Agathis borneensis Warb</i>	n	2	<i>Larix leptolepis</i>	a	10
<i>Albizzia falcata</i>	a	3	<i>Licania laxiflora</i>	n	3
<i>Albizzia lebbek</i>	a	3	<i>Liquidambar styraciflua L.</i>	n	11
<i>Anisoptera costata Korth.</i>	a	2	<i>Liriodendron tulipifera L.</i>	a	11
<i>Anisoptera marginata Korth.</i>	n	2	<i>Maesopsis eminii</i>	n	2
<i>Azadirachta indica</i>	ar	3	<i>Mangifera indica</i>	at	12
<i>Bombax cieba</i>	a	4	<i>Melanorrhoea wallichii Hook.</i>	n	2
<i>Calophyllum inophyllum</i>	a	3	<i>Miristica lowiana King</i>	n	2
<i>Cassia siamea</i>	ar	3	<i>Mora excelsa</i>	n	3
<i>Cinnamomum seylanicum</i>	n	3	<i>Palaquium ferox HJL.</i>	n	2
<i>Cratoxylon sp. ("Geronggang")*</i>	a	5	<i>Palaquium hexandrum Baill</i>	n	2
<i>Cryptomeria japonica</i>	n	12	<i>Palaquium rostratum Burck</i>	n	2
<i>Cunninghamia lanceolata Hook.</i>	a	6	<i>Parastemon versteeghii Meer et Perry</i>	n	2
<i>Dacryodes excelsa</i>	a	3	<i>Payena leerii Kurz</i>	n	2
<i>Dalbergia sisoo</i>	a	3	<i>Pericopsis elata</i>	n	3
<i>Daniellia ogea</i>	ar	7	<i>Picea abies*</i>	a	13
<i>Dehassia caesia Bl.</i>	a	2	<i>Picea smithiana*</i>	a	4
<i>Dialium platysepalum Baker.</i>	n	2	<i>Pinaceae sp.</i>	a	14
<i>Dipterocarpus appendiculatus Scheff.</i>	n	2	<i>Pinus sp. ("southern pine, USA")*</i>	a	11
<i>Dipterocarpus condiferus Merr.</i>	n	2	<i>Pinus araucaria*</i>	a	15
<i>Dipterocarpus costulatus V. Sl.</i>	n	2	<i>Pinus caribaea</i>	a	16
<i>Eperus falcata</i>	n	3	<i>Pinus densiflora</i>	a	10
<i>Eschweilera sp.</i>	n	3	<i>Pinus ellioti*</i>	a	15
<i>Eucalyptus globulus*</i>	a	8	<i>Pinus kesiya*</i>	a	9
<i>Eucalyptus grandis</i>	ar	9	<i>Pinus patula</i>	a	3
<i>Ganua motleyana Pierre</i>	n	2	<i>Pinus roxburghii*</i>	a	4
<i>Garcinia sp.</i>	n	2	<i>Pinus taiwanensis</i>	a	6
<i>Gonystilus brunescens A. Shaw.</i>	n	2	<i>Pinus wallichiana*</i>	a	4
<i>Hopea dryobalanoides Miq.</i>	a	2	<i>Polyathia hypoleuca HK. et TH</i>	n	2
<i>Irvingia malayana Olive</i>	n	2	<i>Populus deltoides Bartr.</i>	a	11
<i>Koompasia excelsa Tamb.</i>	n	2	<i>Populus tremula</i>	a	17

\* utilisé commercialement

a satisfait aux normes de résistance mécanique des panneaux en laine de bois.

n ne satisfait pas aux normes exigées des panneaux en laine de bois.

ar le bois peut être utilisé à certaines conditions.

at utilisable après traitement du bois.

1 Dass, 1974

2 Kliwon et al., 1982

3 Hawkes et Cox, 1992

4 Shukla et al., 1981

5 Wong et Ong, 1982

6 Jai et Chen, 1977

7 Ashiabor, 1973

8 Vasquez de Velasco, 1991

9 Hawkes et Robinson, 1978a

10 Takagi et Okuro, 1980

11 Lee et Short, 1989

12 Shukla et al., 1982

13 Utilisé commercialement en Suède (sapin)

14 Imamura, 1979

15 Utilisé commercialement au Brésil

16 Hawkes et Robinson, 1978b

17 Schubert et al., 1990

<i>Pterocarpus indica</i>	n	3	<i>Shorea palembanica</i> Miq.	a	2
<i>Quercus alba</i> L.	n	11	<i>Shorea pauciflora</i> King.	a	2
<i>Quercus falcata</i> Michx.	n	11	<i>Shorea pinanga</i> Scheff.	n	2
<i>Sandoricum indicum</i>	n	3	<i>Shorea</i> sp. ("Meranti")	ar	6
<i>Santiria laevigata</i> Bl.	n	2	<i>Simaruba amara</i>	ar	3
<i>Shorea bracteolata</i> Dyer	n	2	<i>Swietenia macrophylla</i>	n	3
<i>Shorea elliptica</i> Burck.	n	2	<i>Taxodium distichum</i>	a	18
<i>Shorea gibbosa</i> Brandis	n	2	<i>Terminalia spread</i>	n	3
<i>Shorea gysbertsiana</i> Burck.	a	2	<i>Tetrameles nudiflora</i> *	a	19
<i>Shorea hopeifolia</i> Sym	n	2	<i>Toona ciliata</i>	at	4
<i>Shorea leprosula</i> Miq.	n	2	<i>Tsuga chinensis</i> Pritz.	ar	6
<i>Shorea ovalis</i> Bl.	a	2	<i>Xylopia malayana</i> HK. f. et TH	n	2

18 Lee, 1985

19 Sandermann et Kohler, 1964

**Tableau 2 : Tests d'aptitude avec petites éprouvettes**

L'aptitude des types de bois suivants destinés à la fabrication de panneaux en laine de bois a été testée par la production de panneaux à petite échelle. Les types de bois jugés « aptes » ou « éventuellement aptes » doivent faire l'objet de tests à grande échelle pour confirmer leur aptitude à être utilisés pour une production commerciale de ces panneaux.

<i>Bois (nom botanique)</i>	<i>Aptitude</i>	<i>Source</i>	<i>Bois (nom botanique)</i>	<i>Aptitude</i>	<i>Source</i>
<i>Abies pindrow</i> *#	a	1	<i>Ficus sp. ("gular")</i>	a	1
<i>Azalia bipindensis</i>	n	2	<i>Ficus sp. ("bar")</i>	a	1
<i>Anogeissus latifolia</i>	n	1	<i>Grevillea robusta</i>	a	1
<i>Antiaris africana</i>	n	2	<i>Guarea cedrata</i>	n	2
<i>Antrocaryon micrastrer</i>	n	2	<i>Holoptelia integrifolia</i>	n	1
<i>Azardirachta indica</i> #	n	1	<i>Hymenodictyon excelsum</i>	a	1
<i>Berlinia grandiflora</i>	a	2	<i>Khaya sp. ("khaya, mahogany")</i>	n	2
<i>Bridelia retusa</i>	a	1	<i>Lanea coromandelica</i>	n	1
<i>Canarium schweinfurthii</i>	ar	2	<i>Lovoa trichilioides</i>	a	2
<i>Cedrela odorata</i>	a	2	<i>Mansonia altissima</i>	ar	2
<i>Cedrela toona</i>	a	1	<i>Mitragyna stipulosa</i>	ar	2
<i>Cedrus deodara</i>	a	1	<i>Morus sp. ("shehtoot")</i>	n	1
<i>Ceiba pentandra</i>	n	2	<i>Musanga cecropioides</i>	a	2
<i>Celtis zenkeri</i>	n	2	<i>Nauclea diderrichii</i>	n	2
<i>Chlorophora excelsa</i>	n	2	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	ar	2
<i>Chrysophyllum africanum</i>	a	2	<i>Ongokea gore</i>	n	2
<i>Chrysophyllum albidum</i>	a	2	<i>Ougeinia oojeinensis</i>	n	1
<i>Cola gigantea</i>	ar	2	<i>Pinus roxburghii</i> #*	a	1
<i>Cordia myxa</i>	a	1	<i>Pinus wallichiana</i> #*	a	1
<i>Cylicodiscus gabunensis</i>	a	2	<i>Piptadeniastrum africanum</i>	n	2
<i>Dalbergia sisoo</i> #	n	1	<i>Pterygota macrocarpa</i>	n	2
<i>Delonix regia</i>	at	1	<i>Salmalia malabarica</i>	a	1
<i>Dipterocarpus sp.</i>	at	1	<i>Syzygium cumini</i>	a	1
<i>Distemonanthus benthamianus</i>	n	2	<i>Tarrietia utilis</i>	ar	2
<i>Emblica officinalis</i>	n	1	<i>Tectona grandis</i>	a**	1,2
<i>Entandrophragma angolensis</i>	a	2	<i>Terminalia ivorensis</i>	ar	2
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	ar	2	<i>Terminalia superba</i>	a**	2
<i>Entandrophragma utile</i>	a	2	<i>Tieghemella heckelii</i>	n	2
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	a**	3	<i>Triplochiton scleroxylon</i>	ar	2
<i>Eucalyptus gomphocephala</i>	a	3			

\* utilisé commercialement

\*\* difficile à raboter

# voir également tableau 1

a apte

ar éventuellement apte

at utilisable après traitement du bois

n inapte

1 Dass, 1974

2 Ashiabor, 1973

3 Test réalisé pour ce projet, voir chapitre 4.

**Tableau 3 : Tests d'aptitude par adhérence.**

L'aptitude des types de bois suivants pour la fabrication de panneaux en laine de bois a été testée en étudiant l'adhérence entre des éclats de bois et pâte de ciment (Wong et Ong, 1982; Sudin et Ong, 1983). Certains de ces types de bois ont été chimiquement traités pour les rendre aptes (Sudin et Ong, 1983). Le résultat de ces tests n'indique pas s'ils sont rabotables et ne peut servir qu'à éliminer certains types de bois directement inaptes.

<i>Bois (nom botanique)</i>	<i>Aptitude</i>	<i>Source</i>	<i>Bois (nom botanique)</i>	<i>Aptitude</i>	<i>Source</i>
Acacia mangium	a <sup>4</sup>	1	Koompassia excelsa	a	2
Agathis borneensis	a	2	Koompassia malaccensis	a <sup>2</sup>	1
Albizzia falcataria	ar <sup>2</sup>	1	Lauraceae	a	2
Alstonia sp. ("Pulai")	ar <sup>5</sup>	1	Lophopetalum sp. ("Perupok")	ar	2
Anacardiaceae	a	2	Madhuca utilis	a	2
Anisoptera sp. ("Mersawa")	ar <sup>6</sup>	1	Mangifera sp. ("Machang")	a <sup>3</sup>	1
Anonaceae	a <sup>4</sup>	1	Mesua sp. ("Penaga")	a	2
Artocarpus sp. ("Keledang")	n	1,2	Myristicaceae	ar <sup>1</sup>	1
Artocarpus sp. ("Terap")	ar <sup>6</sup>	1	Neobalanocarpus heimii	n	2
Bombacaceae	a	2	Parashorea sp. ("Gerutu")	a	2
Burseraceae	ar <sup>3</sup>	1	Parishia sp. ("Sepul")	n	2
Calophyllum sp. ("Bintangor")	a	2	Parkia sp. ("Petai")	ar	2
Camptosperma sp. ("Terentang")	ar <sup>2</sup>	1	Pentace sp. ("Melunac")	a	2
Cotylelobium sp. ("Resak")	ar	2	Pinus caribaea	a	2
Cratoxylon sp. ("Geronggang")*	a	2	Pithecellobium sp. ("Kungkur")	a	2
Cynometra sp. ("Kekatang")	a	2	Pometia sp. ("Kasai")	a <sup>2</sup>	1
Dialium sp. ("KerANJI")	a	2	Rhizophora sp. ("Bakau")	ar	2
Dillenia sp. ("Simpoh")	a <sup>3</sup>	1	Sapotaceae	a	2
Dipterocarpus sp. ("Keruing")	a <sup>2</sup>	1	Scaphium sp. ("Kembang semangkok")	ar	2
Dryobalanops sp. ("Kapur")	a	2	Scorodocarpus borneensis	a	2
Dyera costulata	n	1,2	Shorea sp. ("Balau")	a	2
Elaeis guineensis	n	2	Shorea sp. ("Balau merah")	a	2
Endospermum malaccense	a <sup>1</sup>	1	Shorea sp. ("Meranti dark red")	a	2
Eucalyptus grandis	ar <sup>5</sup>	1	Shorea sp. ("Meranti light red")	ar	2
Fagraea sp. ("Tembusu")	a	2	Shorea bracteolata	a <sup>3</sup>	1
Gmelina arborea	a	1	Shorea longisperma	ar	2
Gonystylus sp. ("Ramin")	ar	2	Shorea macroptera	ar	2
Heavea brasiliensis	a <sup>4</sup>	1	Shorea rugosa	a <sup>1</sup>	1
Heritiera sp. ("Mengkulang")	a <sup>2</sup>	1	Sindora sp. ("Sepetir")	a <sup>3</sup>	1
Hopea sp. ("Giam")	n	2	Tetramerista glabra	a	2
Istia palembanica	ar	2	Vatica sp. ("Resak")	ar	2
Kokoona sp. ("Mata ulat")	a	2			

\* utilisé commercialement

1 si le bois est traité au CaCl<sub>2</sub>

2 si le bois est traité au CaCl<sub>2</sub> eller Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

3 si le bois est traité au CaCl<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> ou Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

4 si le bois est traité au Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>

5 si le bois est traité au Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> eller Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

6 si le bois est traité au Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

a apte

n inapte

ar éventuellement apte

at utilisable après traitement du bois.

1 Sudin et Ong, 1983

2 Wong et Ong, 1982

**Tableau 4 : Tests d'aptitude par la mesure de la résistance à la compression de cylindres formés de ciment portland, d'eau et de poudre de bois.**

L'aptitude des types de bois suivants pour la fabrication de panneaux en laine de bois a été testée en étudiant la résistance à la compression de cylindres formés de ciment portland, d'eau et de poudre de bois (Shukla, 1984). Cette méthode est très incertaine et ne donne qu'une indication sur l'aptitude du bois.

<i>Bois (nom botanique)</i>	<i>Aptitude</i>	<i>Bois (nom botanique)</i>	<i>Aptitude</i>
Abies pindrow*#	a	Hymenodictyon excelsum	a
Adina cordifolia	n	Lagerstroemia lanceolata	a
Albizia chinensis	n	Lagerstroemia speciosa	a
Albizia lebbeck	n	Machilus macrantha	ar
Amoora wallichii	ar	Madhuca longifolia	a
Anogeissus latifolia	ar	Mangifera indica	ar
Artocarpus chaplash.	n	Michelia champaca	a
Bombax cieba	ar	Miragyna parvifolia	ar
Borassus flabellifer	n	Picea smithiana #*	a
Callophyllum elatum	a	Pinus roxburghii #*	a
Cryptomeria japonica	ar	Pinus wallichiana #*	n
Dipterocarpus griffithii	a	Populus deltooides	ar
Dipterocarpus turbinatus	ar	Pterygota alata	a
Duabanga grandiflora	ar	Schima wallichii	n
Dysoxylum malabaricum	ar	Schrebera swieterioides	n
Eucalyptus camaldulensis #	a	Schima wallichii	n
Eucalyptus hybrid	n	Stereospermum personatum	ar
Grevillea robusta	n	Terminalia paniculata	a
Hardwickia binata	ar	Toona ciliata	ar
Holoptelia integrifolia	n	Xylia xylocarpa	n
Hopea parviflora	n		

\* utilisé commercialement

# voir également tableau 1

a apte

n inapte

ar éventuellement apte



# Bibliographie



# Bibliographie

## Chapitre 2 : L'isolation thermique

- Adamson, Bo et Åberg, Olle ; (1993)  
« Design for climatization; houses in warm-humid areas », *Building Issues*, vol 5, no.1, LCHS, Université de Lund, Suède.
- Boudiaf, M. ; (1984)  
*Recueil de données météorologiques. A l'usage des architectes*, Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, Alger, Algérie.
- Capderou, J. ; (1985)  
*Relève de radiation solaire pour l'Algérie*, Centre de Recherche en Architecture et Urbanisme, Alger, Algérie.
- CNERIB ; (1993)  
*Matériaux thermiquement isolants, Phase 01 : Recherche bibliographique*, CNERIB, Souidania, Algérie.
- Hillerborg et al. ; (1983)  
*Allmän kurs i byggnadsmateriallära (Cours général de matériaux de construction)*, Dép. Matériaux de Construction, Université de Lund, Suède. (en suédois)
- Marcus, T. A. et Morris, E. N. ; (1980)  
*Buildings, Climate and Energy*, Pitman, Londres, Grand-Bretagne. (en anglais)
- ONU ; (1988)  
*Proceedings of the Expert Group Meeting on Energy-Efficient Building Materials for Low-Cost Housing*, Economic and Social Commission for Western Asia, Amman, Jordanie. (en anglais)
- ONU ; (1992)  
*Agenda 21*, Programme d'action de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement, Rio de Janeiro, Brésil.
- Ouahrani, Djamel ; (1993)  
*TAGA – Daylighting of Houses in Desert Regions*, Thesis 1, Dept. of Architecture and Development Studies, Université de Lund, Suède. (en anglais)
- Rosenlund, Hans ; (1993)  
*Desert Buildings. A parametric study on passive climatisation*, Thesis 3, Dept. of Architecture and Development Studies, Université de Lund, Suède. (en anglais)

Sandin, Kenneth ; (1988)

*Värme, luftströmning, fukt (Chaleur, ventilation, humidité)*, Dép. Physique de Bâtiment, Université de Lund, Suède. (en suédois)

Skanska ; (1993)

*Manuel destiné au programme VIP+*, Skanska Software, Malmö, Suède. (en suédois)

## Chapitre 3 : Béton mousse

ACI ; (1986)

« Guide for Cast-in-Place Low-Density Concrete (Guide pour le béton léger coulé en place) », *ACI Journal*, September–October, American Concrete Institute, Detroit, Etats-Unis. (en anglais)

Alexandersson, Johan et Skarendahl, Åke ; (1981)

« Skumbetong – ett material i renässans? (Béton mousse – un matériau qui redevient d'actualité?) », *Byggnadskonst*, no. 1–2, Suède. (en suédois)

BCA ; (1991)

*Foamed Concrete*, British Cement Association, Slough, Grande-Bretagne. (en anglais)

BRE ; (1973)

« Manufacture and application of lightweight concrete », *Overseas Building Notes*, No. 152, Building Research Establishment, Watford, Grande-Bretagne. (en anglais)

Cormon, Pierre ; (1982)

« Améliorations des bétons mousse », *Le Bâtiment-Bâtir*, vol. 8, no. 11, France.

van Dijk, Simon ; (1991)

« Foam Concrete », *Concrete* (July/August). (en anglais)

Forsberg, C. Owe ; (1966)

« Platsgjuten lättbetong (Béton léger coulé sur place) », *Byggnadskonst*, no. 1, Suède. (en suédois)

Heerde, Werner ; (1984)

« Strong but not heavy: The structural use of cellular concrete », *Middle East Construction*, January. (en anglais)

Johansson, Erik ; (1993)

*Fuktegenskaper hos skumbetong (Propriétés hygroscopiques du béton mousse)*, Rapport TVBM-3053, Dép. Matériaux de Construction, Université de Lund, Suède. (en suédois)

Legatski, Leo A. ; (1987)

« Insulating Roof Decks with Cellular Concrete », *The Construction Specifier* (November), Etats-Unis. (en anglais)

- Malmberg, Bo et Samuelsson, Paul ; (1984)  
 « Skumbetong – ett material med möjligheter (Béton mousse – un matériau ouvrant des possibilités) », *Cementa*, no. 1, Cementa AB, Danderyd, Suède. (en suédois)
- Nischer, Peter ; (1983)  
 « Schaumbeton/Foamed concrete (Béton mousse) », *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, vol 49 no. 3, Allemagne (Ouest). (en anglais et allemand, résumé en français)
- Steiger, R. W. et Hurd, M. K. ; (1978)  
 « Lightweight insulating concrete for floors and roof decks », *Concrete Construction*, July. (en anglais)
- Taylor, W. H. ; (1974)  
 « The production, properties and uses of foamed concrete », *Precast Concrete*, February. (en anglais)
- Trenkwalder, Anton ; (1990)  
 « Leca-Schaumleichtbeton », *Neues vom Bau*, vol. 36 no. 7/8, Autriche. (en allemand)
- Valore, Rudolph C. ; (1954)  
 « Cellular Concretes (Bétons cellulaires) », *ACI Journal*, Proceedings V. 50, No. 9 (May) and No. 10 (June), American Concrete Institute, Etats-Unis. (en anglais)
- Walker, Brian et Clark, Alan ; (1988)  
 « Introducing foamed concrete », *Concrete Quarterly*, no. 159, Grande-Bretagne. (en anglais)
- Widman, Horst et Enoekl, Viktor ; (1991)  
 « Foam Concrete – Properties and Production », *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, vol. 57, no. 6, Allemagne (Ouest). (en anglais et allemand, résumé en français)

## Chapitre 4 : Panneaux en laine de bois

- Ashiabor, W. K. ; (1973)  
 « Suitability of some Ghanaian wood species for the manufacture of cement bound woodwool building slabs », *Technical Note*, No. 17, Forest Products Research Institute, Kumasi, Ghana. (en anglais)
- Cope, Derek et Sunderland, Peter ; (1985)  
 « Wide applications for the wood wool cement slab combination », *Building* (13 September), Londres, Grande-Bretagne. (en anglais)
- Dass, Arjun ; (1974)  
 « A simple method for determination of commercial suitability of timbers for Portland cement-bonded wood wool board », *IPRI Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 161–164, India. (en anglais)

DIN ; (1989)

« Panneaux légers en laine de bois et panneaux fibragglo composites utilisés en tant que matériaux isolants dans les bâtiments », *DIN 1101*, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, Allemagne. (en allemand)

van Elten, G. J. ; (1977)

« Prefab Elements from Wood Wool Cement for Economic and Low Cost Housing in Argentine, Brazil, Honduras, Malaysia, Mexico, Panama, Spain, Yugoslavia », *International conference on the use of prefabricated building elements constructions in developing countries*, Hamburg 19–22 September, Allemagne. (en anglais)

Flynn, G. et Hawkes, A. J. ; (1980)

*An industrial profile of wood wool/cement slab manufacture*, Tropical Products Institute, Londres, Grande-Bretagne. (en anglais, résumé en français)

Hawkes, A. J. et Robinson, A. P. ; (1978a)

*Technical evaluation of wood wool/cement slabs made from Pinus caribaea grown in Fiji (Evaluation technique de panneaux ciment/laine de bois réalisés avec du Pinus caribaea des îles Fidji)*, Tropical Products Institute Report L48, Londres, Grande-Bretagne. (en anglais, résumé en français)

\_\_\_\_\_ ; (1978b)

*The suitability of Eucalyptus grandis and two provenances of Pinus kesiya for wood wool/cement slab manufacture (Valeur de l'Eucalyptis grandis et de deux provenances de Pinus kesiya pour la fabrication de plaques de laine de bois/ciment)*, Tropical Products Institute Report L49, Londres, Grande-Bretagne. (en anglais, résumé en français)

Hawkes, A. J. et Cox, D. R. S. ; (1992)

*A small-scale process for manufacturing woodwool/cement slabs in developing countries*, National Resources Institute Bulletin 49, Chatham, Grande-Bretagne. (en anglais, résumé en français)

Imamura, Hiroto ; (1979)

« Sorption and bending tests of cemented excelsior board on the market », *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute*, No. 306, pp. 169–180, Tokyo, Japan. (en japonais, résumé en anglais)

INRF ; (1988)

*Bulletin technique forestier*, No. 26, Institut National de Recherche Forestière, Cheraga, Algérie.

Jai, S. Y. et Chen, S. S. ; (1977)

« Effect of extraction treatment on the strength properties of woodwool-cement board », *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute*, No. 296, Taipei, Taiwan. (en chinois, résumé en anglais)

- Kliwon, S., Sutigno, P. et Memed, R. ; (1982)  
« Wood-wool board properties of some Indonesian wood species », *Laporan Balai Penelitian Hasil Hutan*, No. 159, pp. 25–31, Indonesia. (en anglais)
- Lee, A. W. C ; (1985)  
« Bending and thermal insulation properties of cement-bonded cypress excelsior board », *Forest Products Journal*, Vol. 35, No. 11/12, pp. 57–58. (en anglais)
- Lee, A. W. C. et Short P. H. ; (1989)  
« Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board », *Forest Products Journal*, Vol. 39, No. 10, pp. 68–70. (en anglais)
- Méziane, Hamdane ; (1993)  
« Essences et ressources forestières algériennes », *Séminaire Matériaux et isolation thermique*, Alger 7 et 8 juin, Algérie.
- Sandermann, W. et Kohler, R. ; (1964)  
« Über eine kurze Eignungsprüfung von Hölzern für zementgebundene Werkstoffe. Studien über mineralgebundene Holzwerkstoffe, VI. Mitteilung », *Holzforschung*, Vol. 18, No. 1/2, pp. 53–59. (en allemand, résumé en anglais)
- Schubert, B et al ; (1990)  
« Einfluß unterschiedlicher Zementarten auf das Abbindeverhalten von Holz-Zement-Mischungen », *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 48, pp. 185–189. (en allemand, résumé en anglais)
- Shukla, K. S. et al. ; (1981)  
« Physical and mechanical properties of wood-wool boards », *Journal of the Timber Development Association of India*, Vol. 27, No. 4, Forest Research Institute & Colleges, Dehra Dun, UP, India. (en anglais)
- Shukla, K. S et al ; (1982)  
« Studies on the suitability of Toon and Mango for manufacture of wood wool boards », *Journal of the Timber Development Association of India*, Vol. 28, No. 3, Forest Research Institute & Colleges, Dehra Dun, UP, India. (en anglais)
- Takagi, Jun et Ôkuro, Akio ; (1980)  
« The qualities of wood-wool cement board (182×91 cm) made of young karamatsu (*Larix leptolepis*) », *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute*, No. 312, pp. 151–165, Tokyo, Japan. (en japonais, résumé en anglais)
- TPI ; (1980)  
« Wood Wool Manufacturing Plant for Malawi », *Tropical Products Institute, Newsletter 18* (August), Londres, Grande-Bretagne. (en anglais)

Vasquez de Velasco, G. ; (1991)

*Low cost housing by means of eucalyptus wood*, Faculteit der Bouwkunde, Technische Universiteit Delft, Netherlands. (en anglais)

Wong, W. C. et Ong, C. L. ; (1982)

« Compatibility of timber species with Portland cement », *The Malaysian Forester*, Vol. 45 No. 1. (en anglais)

## Adresses

CNERIB (Centre National d'Etudes et  
de Recherches Intégrées du Bâtiment )  
Cité Nouvelle El-Mokrani  
42 380 SOUIDANIA  
w. Tipasa  
Algérie

LCHS (Centre d'Etudes de l'Habitat  
de Lund)  
Université de Lund  
Box 118  
S-221 00 LUND  
Suède

Byggnadsmaterial  
(Dép. Matériaux de Construction)  
Université de Lund  
Box 118  
S-221 00 LUND  
Suède

INRF (Institut National  
de Recherche Forestière)  
Arboretum de Bainem  
B.P. 37  
CHERAGA  
Algérie

Fabricant de béton moussé et  
équipement pour la fabrication  
de béton moussé :

Elastizell  
P.O. Box 462  
ANN ARBOR  
Michigan 48106  
USA

Isoleringsbetong AB  
Box 5063  
S-161 07 EROMMA  
Suède

Neopor  
P.O.B 152  
D-7440 NÜRTINGEN  
Allemagne

VOTON  
Herenweg 116-118  
3648 CM VILNIS  
Les Baysas

Fabricant de  
panneaux en laine de bois :

FIBRALIT I GIE  
Zone Industrielle  
F-68190 UNGERSHEIM  
France

T-produkterna AB  
Box 20  
S-570 60 ÖSTERBYMO  
Suède

Fabricant d'équipement  
pour la fabrication de  
panneaux en laine de bois :

Elten Systems  
P.O. Box 5  
3770 AA ARNEVELD  
Les Pays-Bas

MECCAT  
Zona Industriale  
Via Braille 5  
391 00 BOZANO  
Italie

**CNERIB** (Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment)  
CNERIB a pour mission d'entreprendre tous travaux scientifiques et techniques se rapportant à la mise au point, au développement et à la maîtrise des techniques pour accroître les performances de l'appareil de production du secteur de la construction. Le CNERIB est organisé en trois départements de recherche : Structures et technologies des ouvrages; Matériaux et composants; Physique du bâtiment et instrumentation; et un département information scientifique et assistance technique. Le centre est également doté d'un Conseil d'Orientation et d'un Conseil Scientifique.

## Université de Lund

La plus grande institution pour la recherche et l'enseignement supérieure en Scandinavie fondée en 1666. Elle comprends aujourd'hui huit facultés avec 34 300 étudiants participant à 60 programmes généraux et environ 700 cours offerts par 170 départements à Lund et à Malmö. Environ 6 000 projets de recherche sont actuellement en cours.

## LCHS (Centre d'Etudes de l'Habitat de Lund)

LCHS a deux missions majeures : agir comme relai pour initier, encourager et coordonner la recherche dans les facultés Architecture et Génie Civil en relation avec les pays étrangers ; initier et poursuivre ses propres programmes de recherche qui comprennent essentiellement :

- les problèmes entre les activités de construction et le développement dans les pays en voie de développement,
- la conception bioclimatique des constructions,
- l'habitat pour familles aux revenus modestes,
- l'énergie domestique, l'environnement de la cuisine et de son foyer.

## Département Matériaux de Construction

Le Département Matériaux de Construction fait partie de la faculté Génie Civil au sein de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Lund. Les activités de ce département comprennent l'enseignement de base, les études de post-graduation et la recherche. Au niveau de la recherche, l'accent se porte sur :

- les problèmes d'humidité
- la durabilité des matériaux

Au sein de cette recherche, le béton, la brique, les enduits, le bois et la pierre naturelle sont les matériaux les plus étudiés. Aujourd'hui, on recherche des solutions sur la mécanique de rupture, l'humidité dans les matériaux, les enduits et la maçonnerie, le béton à haute performance, les attaques du sel et du gel sur les matériaux poreux de construction.



**Lund University**  
**Lund Centre for Habitat Studies**  
ISBN 91-87866-06-4  
ISSN 1101-7988