

JONATHAN BOUCHER

**DÉVELOPPEMENT D'UNE POUTRE DE BÉTON  
ARMÉ DE BAMBOU PRÉFABRIQUÉE POUR  
L'HABITAT URBAIN DE HANOI**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en sciences de l'architecture  
pour l'obtention du grade de maître en sciences de l'architecture (M. Sc.Arch.)

FACULTÉ D'AMÉNAGEMENT, D'ARCHITECTURE ET DES ARTS VISUELS  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2006

## Résumé

Ce mémoire porte sur le développement d'un système de plancher de béton préfabriqué destiné à l'habitat urbain de Hanoi et plus particulièrement sur la préfabrication d'une poutre de béton armé de bambou. Une partie de la recherche fut menée conjointement avec M. Dany Blackburn qui s'intéressa à l'habitation à faible coût et aux bétons cellulaires.

Dans la première partie de ce mémoire, notre travail consistait à dresser le portrait du marché de la construction locale afin d'en saisir les réalités et les enjeux principaux. Les observations réalisées sur le terrain à l'été 2002 sont donc présentées dans la première partie de ce mémoire ainsi que dans celui de Dany Blackburn (2006).

En second lieu, une recension d'écrits fait le point sur l'état actuel des publications les plus récentes sur la technologie du béton armé de bambou. Les thèmes retenus sont très étroitement liés à cette recherche exploratoire. Il s'agit des propriétés physiques et mécaniques du bambou, des méthodes de préservation de la matière, des critères de choix de l'espèce de bambou, du problème d'adhérence entre le bambou et le béton et l'utilisation des armatures de bambou dans le béton dans le cas d'une poutre. Notons enfin que cette recension ne prétend aucunement être exhaustive. L'accent est mis davantage sur les études récentes et sur les résultats les plus marquants.

C'est à partir de l'information recueillie sur le terrain et de celle recensée dans la littérature que fut réalisé l'objectif premier de ce mémoire, soit la préfabrication d'une poutre de béton armé de bambou destiné à l'habitat urbain de Hanoi. La troisième partie de la recherche expose donc la méthodologie empruntée lors des expérimentations.

Finalement, un prototype de plancher préfabriqué en grandeur réelle fut soumis à un essai de chargement. La maquette se compose de 3 poutres de béton armé de bambou ainsi que de 10 dalles de béton cellulaire produites par Dany Blackburn dans le cadre de son mémoire. Des essais mécaniques ont ensuite été menés afin de mesurer l'efficacité structurale des poutres de béton armé de bambou et du système de plancher préfabriqué. Les résultats présentés dans la dernière partie de ce mémoire démontrent que l'utilisation du bambou comme armature de béton dans la préfabrication de poutres est une alternative intéressante et peut être utilisée efficacement pour la construction résidentielle de Hanoi.

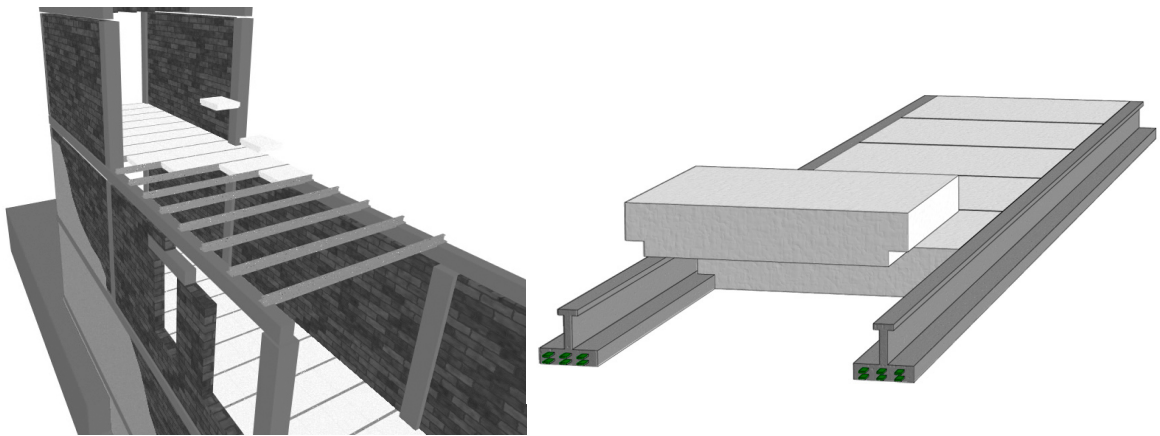


Figure 0.1 : Modélisation des éléments du système de plancher (illustration par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)

## **Abstract**

This thesis relates on the development of a precasted concrete floor intended for the urban habitat of Hanoi and more particularly to the prefabrication of a concrete beam reinforced with bamboo. A part of this research was carried out jointly with Mr. Dany Blackburn which was interested to low cost housing and gas concrete slabs.

Initially, our work consisted in drawing up the portrait of the local construction market to seize the principal realities and stakes of them. The observations carried out on the ground at summer 2002 are thus presented in the first part of this thesis. In the second part, a recension of writings gives a progress report on the current state of the most recent publications on the bamboo reinforced concrete technology. With the information collected on the ground and listed in the literature, the principal objective of this thesis was carried out: the prefabrication of a concrete beam reinforced with bamboo. The third part of research exposes the methodology used during the experiments.

Finally, a real size prototype of the prefabricated floor system was assembled. The model is composed of 3 concrete beams reinforced with bamboo and 10 gas concrete slabs produced by Dany Blackburn within its report. Mechanical tests were then carried out to measure the structural effectiveness of the concrete beams reinforced with bamboo and of the prefabricated floor system. The results presented in the last part of this thesis show that the bamboo as concrete reinforcement in the prefabrication of beams are an interesting alternative and can be used effectively for the residential construction of Hanoi.

## **Avant-Propos**

Ce projet de maîtrise a été réalisé conjointement entre l'Université Laval et l'École Nationale Supérieure de Génie Civil de Hanoi (ENSGCH) a été rendue possible grâce à l'appui de plusieurs personnes et organismes que je tiens à remercier chaleureusement.

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de recherche, monsieur Richard Pleau. Je le remercie pour l'attention assidue qu'il m'a accordée tout au long de la réalisation des expérimentations ainsi que pendant les étapes de l'analyse des résultats et de la rédaction.

Je remercie dans un second temps, l'équipe du Projet Vietnam et plus spécifiquement madame Myriam Blais, monsieur André Casault et madame Denise Piché qui m'ont constamment appuyé et soutenu dans cette recherche en plus de m'avoir donné la chance de me joindre à leur projet de coopération avec le Vietnam. Je n'oublierai jamais la confiance et le respect qu'ils ont eu à mon égard. J'aimerais particulièrement souligner leurs qualités humaines, leur compétence, et leur appui moral et financier.

J'aimerais aussi exprimer mes sincères remerciements à Dany Blackburn, mon coéquipier et ami, sans qui ce projet n'aurait certainement pas vu le jour. Tout au long de mes études, Dany a occupé une place importante dans ma vie académique et personnelle par sa présence et son grand dévouement. Je le remercie d'avoir cru en nous et d'avoir toujours donné le maximum pour la réalisation de ce projet passionnant. Enfin, j'espère avoir le privilège de travailler à nouveau aux côtés de Dany dans le futur.

Un grand merci également au professeur Monsieur Dinh Chinh Dao de l'École Nationale Supérieure de Génie Civil de Hanoi (ENSGCH) pour son accueil chaleureux et sa générosité.

Enfin, je voudrais remercier ma famille et mes amis, dont l'amour, la compréhension et la patience sont en bonne partie responsables de mon arrivée au terme de ce projet.

# Table des matières

|  |      |
|--|------|
| <b>Résumé</b> .....  | i    |
| <b>Abstract</b> .....  | iii  |
| <b>Avant-propos</b> .....  | iv   |
| <b>Tables des matières</b> .....                                       | v    |
| <b>Liste des tableaux</b> .....  | vii  |
| <b>Liste des figures</b> .....   | viii |
| <b>Introduction</b> .....  | 1    |
| <b>Chapitre I Le marché de la construction vietnamienne</b> .....      | 4    |
| 1.1 Contexte : la Ville de Hanoi                                       | 4    |
| 1.2 L'évolution de l'habitation urbaine de Hanoi (Doan The Trung 2003) | 7    |
| 1.3 L'habitation vietnamienne : quelques caractéristiques              | 9    |
| 1.3.1 Résidence urbaine type : Le 106 Nguyen Du, Hanoi                 | 9    |
| 1.3.2 Réalités constructives et problématiques                         | 10   |
| 1.3.2.1 Les travaux de fondations                                      | 10   |
| 1.3.2.2 Les travaux de structure                                       | 12   |
| 1.3.2.3 Les murs extérieurs  | 14   |
| 1.3.2.4 Les travaux de toiture   |      |
| 1.3.2.5 Les travaux de finitions                                       | 17   |
| 1.3.3 Matériaux de construction et mise en œuvre                       | 18   |
| 1.3.3.1 Le bois  | 19   |
| 1.3.3.2 Le bambou  | 20   |
| 1.3.3.3 Le béton   | 21   |
| 1.3.3.4 La brique  | 23   |
| 1.3.3.5 L'acier  | 25   |
| 1.4 La main d'œuvre locale   | 26   |
| 1.5 Le Climat  | 26   |
| 1.6 Problématiques observées et objectifs de recherche                 | 28   |
| 1.7 Les objectifs de recherche   | 29   |

|  |    |
|--|----|
| <b>Chapitre 2 Revue de la littérature</b> .....  | 32 |
| 2.1 Les propriétés physiques et mécaniques du bambou   | 32 |
| 2.2 La sélection d'une espèce de bambou  | 36 |
| 2.3 Traitements et préservation du bambou  | 38 |
| 2.4 L'adhérence béton-bambou   | 41 |
| 2.5 L'utilisation du bambou comme armature dans le béton: le cas des poutres                       | 46 |
| <br>   |    |
| <b>Chapitre 3 Fabrication et mise à l'essai d'un prototype de plancher en laboratoire</b><br>..... | 51 |
| 3.1 La sélection d'une espèce de bambou pour le Vietnam  | 51 |
| 3.2 Sélection d'une espèce particulière pour la fabrication des poutres de béton armé de bambou.   | 53 |
| 3.2.1 La sélection d'une espèce de bambou pour la réalisation du projet au Québec                  | 54 |
| 3.3 La préparation des armatures de bambou   | 54 |
| 3.4 Les méthodes de préservation des tiges de bambou   | 55 |
| 3.5 L'adhérence béton-bambou   | 57 |
| 3.6 Dimensionnement structural de la poutrelle de béton armé de bambou                             | 60 |
| 3.6.1 Propriétés mécaniques du bambou  | 60 |
| 3.6.2 Mesure de la résistance à la traction de nos lanières de bambou                              | 61 |
| 3.6.3 Calcul de la résistance à la flexion d'une poutrelle armée de bambou                         | 65 |
| 3.6.4 Calcul de la résistance en flexion du système de plancher                                    | 72 |
| 3.7 Préparation du coffrage de la poutre   | 75 |
| 3.8 La préparation et la coulée du béton   | 78 |
| 3.9 Mise à l'épreuve du système constructif de plancher  | 87 |
| <br>   |    |
| <b>Conclusion</b> .....  | 90 |
| <br>   |    |
| <b>Bibliographie</b> .....   | 93 |
| <br>   |    |
| <b>Annexes</b> .....   | 96 |

# Liste des tableaux

## Introduction

Tableau 1 : Énergie requise à la production de matériaux en comparaison à leur résistance Janssen (1981)

## Chapitre 2

Tableau 2: Performances structurales des poutres, Ferreira, Moreno et Beraldo (2001)

## Chapitre 3

Tableau 3 : Portrait forestier vietnamien (Duyen 1995)

Tableau 4 : Composition du mélange de béton auto-plaçant (Jonathan Boucher 2005)

## Conclusion

Tableau 5 : Comparaison du poids des systèmes de plancher (Jonathan Boucher 2005)



## Liste des figures

### Résumé

Figure 0.1 Modélisation des éléments du système de plancher (Illustration par Jonathan Boucher et Dany Blackburn 2004)

### Chapitre 1

Figure 1.1 Carte géographique de Hanoi, Projet Vietnam, École d'architecture, Université Laval, 2005

Figure 1.2 La densité urbaine de Hanoi (Photo par Jonathan Boucher, 2001)

Figure 1.3 Élévation de la rue Trieu Viet Vuong, Hanoi (Illustration par Marika Vachon, 2001)

Figure 1.4 La parcelle urbaine traditionnelle ou compartiment chinois (Illustration par Doan The Trung, 2003)

Figure 1.5 La maison urbaine typique (Illustration par Doan The Trung, 2003)

Figure 1.6 La maison contemporaine (Illustration par Doan The Trung, 2003)

Figure 1.7 Le 106 Nguyen Du en construction, Hanoi (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

Figure 1.8: Schématisation de la disposition des pieux de bambous sur un terrain, pour améliorer la capacité portante du sol. (Dessin par M. Le Duc hanh, 2002)

Figure 1.9 Schématisation de la disposition des pieux de béton armé. (Dessin par M. Le Duc hanh, 2002)

Figure 1.10 Réalisation des coffrages de la dalle par section (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

Figure 1.11 Continuité du système d'armatures entre les poutres et les colonnes (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

Figure 1.12: Mur de brique (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

Figure 1.13 Progression du chantier, 106 Nguyen Du, Hanoi (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

- Figure 1.14 Représentation du système constructif de l'habitat urbain de Hanoi (Illustration par Dany Blackburn et Francis Bouchard, 2001)
- Figure 1.15 Construction terminée du 106, Nguyen Du, Hanoi (Photo par André Casault, 2005)
- Figure 1.16 Transport des matériaux en cyclo-pousse (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.17 Entreposage des matériaux dans la rue et fabrication du béton (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.18 Utilisation du bois pour la confection des coffrages (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.19 Distributeur de pieux de bambou, Hanoi (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.20 Préparation du béton dans la rue (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.21 Manutention du béton sur le chantier (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.22 Four à briques artisanal (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.23 Utilisation de briques usinées (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)
- Figure 1.24 Pliage des armatures d'acier par les ouvriers (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn 2002)
- Figure 1.25 Conditions climatiques de Hanoi (illustration par Dany Blackburn et Mathieu Simard, 2001)

## **Chapitre 2**

- Figure 2.1 Distribution géographique du bambou (Illustration : Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 2.2 Section d'une tige de bambou (Illustration : Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 2.3 Structure cellulaire du bambou (NATIONS UNIES, 1972)
- Figure 2.4 Rupture en tension d'une tige de bambou (auteur et année de publication inconnus)

- Figure 2.5 Phénomène d'instabilité dimensionnelle du bambou dans le béton (Dessin : Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 2.6 Test d'arrachement du bambou dans le béton (Ghavami, 1995)
- Figure 2.7 Crénelage des lanières de bambou (Kawai, 2001)
- Figure 2.8 Structure périodique de confinement (Foudjet et Fomo, 1989)
- Figure 2.9 Réalisation d'une poutre de béton armé de bambou, (Ghavami, 1995)
- Figure 2.10 Courbe contrainte-déformation, (Balaguru, 1985)

### **Chapitre 3**

- Figure 3.1 Découpage des armatures (Photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.2 Dimensions et forme d'une section de lanière de bambou (Kawai, 2000)
- Figure 3.3 Lanières de bambou (Photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.4 Application du SIKAFLOOR 90 (Photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.5 Application des grains de silice (photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.6 Crénelage des lanières de bambou (Kawai, 2001)
- Figure 3.7 Confection des crénelures à l'aide d'une ponceuse à ruban (Photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.8 Crénelures (Photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.9 Les armatures, après les traitements d'imperméabilisation et d'accroissement de l'adhérence (Photo par Jonathan Boucher, 2003)
- Figure 3.10 Essai de traction sur une éprouvette de bambou (Jonathan Boucher, 2004)
- Figure 3.11 Forme et dimensions des éprouvettes de bambou utilisées pour les essais de traction (illustration de Jonathan Boucher, 2004)
- Figure 3.12 Éprouvette de bambou après rupture (photo par Dany Blackburn, 2004)

- Figure 3.13 Relation entre la charge et le déplacement mesurée lors d'un essai de traction sur une éprouvette de bambou (Illustration Richard Pleau, 2005)
- Figure 3.14 Relation entre la contrainte ( $\sigma$ ) et la déformation ( $\epsilon$ ) de l'éprouvette de bambou (Illustration Richard Pleau, 2005)
- Figure 3.15 Hypothèse de Navier-Stokes (Illustration par Richard Pleau, 2005)
- Figure 3.16 Conditions balancées (Illustration par Richard Pleau, 2005)
- Figure 3.17 Conditions pour une poutre surarmée ( $A_s > A_s$  balancé) (Illustration par Richard Pleau, 2005)
- Figure 3.18 Géométrie des poutrelles armées de bambou (Illustration par Jonathan Boucher, 2005)
- Figure 3.19 Système de plancher (Illustration par Jonathan Boucher, 2005)
- Figure 3.20 Coffrage de bois (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.21 Profil et disposition du coffrage (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.22 Fixation des armatures (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.23 Mesure de l'affaissement du béton (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.24 Mesure de l'étalement du béton (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.25 Essai d'étalement montrant des signes de ségrégation (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.26 Malaxage du béton (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.27 Coulée du béton dans le coffrage (photo par J. Boucher et D. Blackburn, 2004)
- Figure 3.28 Poutres décoffrées (Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)
- Figure 3.29 Fissuration des poutres (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)

- Figure. 3.30 Essai de flexion 4 points
- Figure 3.31 Adhérence entre les armatures le béton suite au test de flexion  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)
- Figure 3.32 Construction d'une section de plancher en grandeur réelle  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)
- Figure 3.33 Empilement de sacs de sable jusqu'à la charge totale admissible  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)
- Figure 3.34 Modifications apportées à la poutre (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)

## Introduction

La présente crise de l'énergie provoquée par la croissance de l'industrie suscite de plus en plus de questionnement quant à la préservation de l'environnement. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs recherches se sont intéressées à la mise au point de matériaux et de technologies non-polluants qui consomment un minimum d'énergie lors de leur production. L'attention des chercheurs s'est progressivement tournée vers des matériaux non-industriels, tels les fibres végétales, l'argile et le bambou. Pourtant, les matériaux traditionnels utilisés dans les pays en développement, comme le Vietnam, ont fait l'objet de peu de travaux de recherche. Le peu d'information disponible sur les propriétés de ces matériaux ainsi que sur la façon de les utiliser incite les habitants de ces pays à utiliser des matériaux industriels éprouvés, comme l'acier, pour lesquels l'information technique est abondante. Parmi les matériaux naturels, le bambou représente un potentiel économique immense, d'une part, parce qu'il atteint sa pleine croissance en quelques mois et sa résistance mécanique maximale en quelques années et d'autre part, parce qu'on le retrouve en abondance dans toutes les régions tropicales et subtropicales du globe dont le Vietnam (Ghavami, 2001).

*Tableau 1 : Énergie requise à la production de matériaux en comparaison à leur résistance  
Janssen (1981)*

| Matériaux     | Énergie nécessaire à la production (MJ/m <sup>3</sup> ) | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | Résistance (MPa) | Rapport de l'énergie de production nécessaire sur la résistance |
|---------------|---|--------------------------------------|------------------|---|
| Béton         | 1920  | 2400                                 | 8                | 240   |
| Acier         | 234000  | 7800                                 | 160              | 1500  |
| Bois          | 600   | 600                                  | 7.5              | 80  |
| <b>Bambou</b> | <b>300</b>  | <b>600</b>                           | <b>10</b>        | <b>30</b>   |

Actuellement, le bambou est surtout utilisé en milieu rural pour la réalisation d'ossature, de planchers ou de toiture dans la construction légère. Il est aussi largement utilisé pour

construire les échafaudages. Mais certaines études ont démontré qu'il peut aussi être utilisé comme armature dans le béton. Lorsque cette possibilité fut démontrée la première fois dans les années soixante<sup>1</sup>, cela généra un intérêt considérable de la part de la communauté scientifique. Le bambou n'est donc pas seulement un matériau du passé, mais bien un matériau dont les usages sont aujourd'hui innombrables et croissants, même dans les pays industrialisés. Il ouvre la voie à de nouvelles perspectives d'avenir qui enrichiront le développement humain dans les diverses sphères suivantes de la vie:

- amélioration des conditions de vie des collectivités rurales;
- affirmation de l'identité culturelle;
- développement durable de l'environnement;
- production de produits industriels;
- produit de remplacement du bois au 21e siècle.

Le marché des produits écologiques est en plein essor, offrant de nouvelles occasions de promouvoir le bambou comme substitut à des matériaux industriels comme l'acier. Le bambou est un matériau très polyvalent qui se prête à la création d'une nouvelle génération de matériaux de construction et à un vaste éventail d'articles de toutes sortes, créant ainsi beaucoup d'emplois.

Matériau largement répandu au Vietnam, qui s'adapte à différents climats, facile d'utilisation, accessible et ayant des vertus écologiques, le bambou comme armature de béton demeure une possibilité inexploitée au Vietnam qui pourrait favoriser le développement social et économique pour les habitants de Hanoi. La « plante miracle » peut avoir un impact important et positif sur plusieurs aspects du développement humain dans les décennies à venir.

Ce mémoire porte donc sur la préfabrication d'une poutre de béton armé de bambou destinée à l'habitat urbain de Hanoi. Dans le cadre de cette recherche, nous mettrons en parallèle les données observées sur le terrain à Hanoi, l'état des connaissances sur la

---

<sup>1</sup> Information tirée d'une entrevue avec M. Dinh Chinh Dao, professeur à l'École Nationale Supérieure de Génie Civil de Hanoi (ENSGCH), 2002

technologie des bétons armés de bambou et finalement, la méthodologie empruntée pour la fabrication de la poutre de béton armé de bambou.

Cette recherche fut menée en étroite collaboration avec Dany Blackburn qui s'intéressa à l'habitation à faible coût et aux bétons légers (bétons cellulaires). Le mémoire de Monsieur Blackburn porte spécifiquement sur le développement d'un système de plancher dont la poutre de béton armé de bambou fait partie intégrante.

Premièrement, le travail des auteurs consistait à dresser le portrait du marché de la construction locale vietnamienne afin d'en saisir les réalités et les enjeux. Les observations réalisées sur le terrain à l'été 2002 sont donc présentées dans la première partie de ce mémoire ainsi que dans celui de Dany Blackburn (2006) co-auteur de cette partie.

La deuxième partie de ce mémoire fait état des connaissances actuelles quant à l'utilisation du bambou comme matériau de construction et sa potentielle utilisation comme armature de béton. L'information recueillie sur le terrain et celle recensée dans la littérature ont ainsi permis de guider les objectifs de cette recherche commune.

La troisième partie du mémoire expose la méthodologie utilisée lors des expérimentations. Ainsi, trois poutres de grandeur réelle furent préfabriquées en vue d'assembler un prototype de plancher composé également de dix (10) dalles de béton cellulaire. Des essais mécaniques ont ensuite été réalisés afin de mesurer l'efficacité structurale des poutres de béton armé de bambou. D'autres essais ont également été réalisés sur le système de plancher afin d'évaluer son potentiel structural. La méthodologie et les résultats de cette partie sont exposés dans le mémoire de D. Blackburn (2005).

Finalement, les résultats obtenus sont présentés dans la dernière partie de cette mémoire et démontrent que la préfabrication d'une poutre mettant à profit l'utilisation du bambou comme armature de béton est une alternative intéressante qui pourrait être utilisée efficacement pour la construction résidentielle de Hanoi.



## Chapitre 1 - Le marché de la construction vietnamienne

*Le contenu du présent chapitre (pages 4 à 31) a été rédigé conjointement avec M. Dany Blackburn et est identique aux pages 27 à 29 et 31 à 58 du chapitre 2 de son mémoire.*

### 1.1 Contexte : la Ville de Hanoi

Hanoi, la capitale de la République Socialiste du Vietnam, a une superficie de 2139 km<sup>2</sup> et une population de 2,6 millions d'habitants. Hanoi se trouve actuellement dans une période d' "industrialisation et de modernisation " et connaît un développement urbain phénoménal. Riche de ses mille ans d'histoire, la ville possède également un patrimoine architectural et urbain unique en Asie. Toutefois, la transition entamée il y a une quinzaine d'années par l'ouverture à l'économie de marché et aux investissements internationaux remet en question cette spécificité.

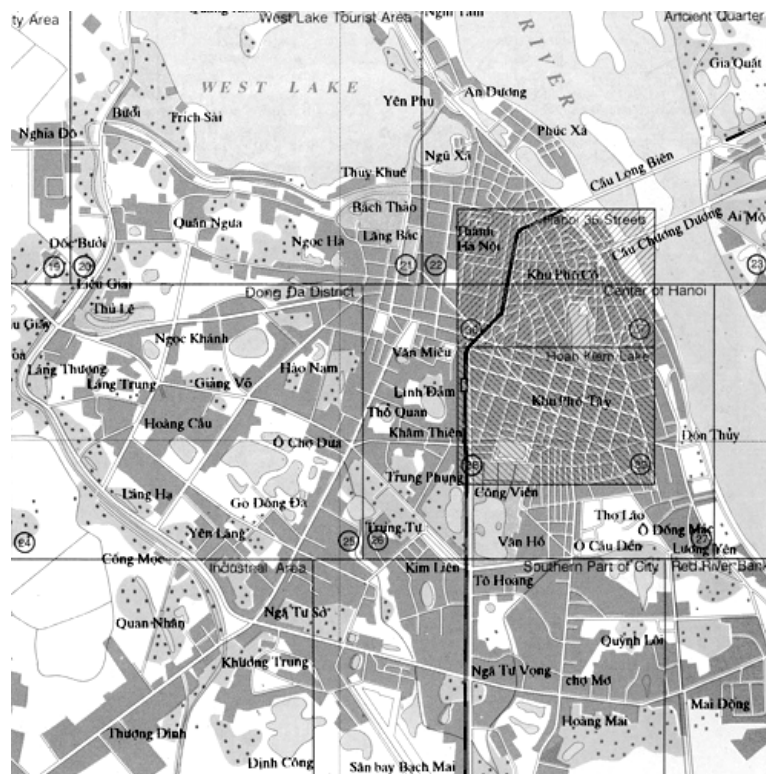


Figure 1.1 : Carte géographique de Hanoi, Projet Vietnam, École d'architecture, Université Laval, 2005

En effet, en adoptant en 1986 une politique d'ouverture, dite *doi moi*, le gouvernement communiste du Vietnam se prononçait en faveur de l'économie de marché afin d'attirer les investissements étrangers. L'État se retirait donc de plusieurs volets du développement urbain au moment même où la pression exercée par la migration urbaine se faisait sentir plus que jamais. Le processus de densification urbaine et la pression démographique transforment un peu plus chaque jour l'image de la ville. Ainsi, près de 80 000 nouveaux arrivants<sup>2</sup> s'installent chaque année à Hanoi, principalement dans les quartiers centraux où la densité moyenne est supérieure à 20 000 habitants par kilomètre carré. Une des conséquences de ce phénomène incontrôlé est que l'on construit des bâtiments de cinq à huit étages sur des parcelles occupées jusque-là par des maisons de un ou deux étages. Ce nouveau milieu urbain se caractérise par une salubrité réduite et un cadre bâti qui offrent une sécurité et une durabilité précaires. La ventilation naturelle, la vue, l'ensoleillement et la facilité de circulation d'autrefois sont tant de facteurs hypothéqués au nom du gain d'espace. Citons quelques chiffres révélateurs à propos de Hanoi:

- Superficie : 2139 km<sup>2</sup>
- Population : 2 591 000 habitants
- Le centre est divisé en 4 districts
- Le grand Hanoi comprend 11 districts périphériques
- Climat tropical chaud et humide

Les habitants de Hanoi sont donc parvenus à un stade de développement où des choix déterminants s'imposent pour l'avenir du milieu urbain et pour sa conservation. Le prix des terrains y est aujourd'hui devenu prohibitif. Il est beaucoup plus rentable de démolir sa maison à un ou deux étages pour construire sur le même terrain un édifice de cinq, six ou sept étages sans trop se soucier de la qualité de construction et de la viabilité des espaces intérieurs. Autrefois uniforme et dominé jusqu'à récemment par les constructions traditionnelles à deux étages, le paysage urbain présente maintenant un aspect quelque peu anarchique.

---

<sup>2</sup> Projet Vietnam, École d'architecture, Université Laval, 2005



Figure 1.2 : La densité urbaine de Hanoi (photo par Jonathan Boucher, 2001)

Les autorités municipales n'exercent qu'un contrôle minimal sur la situation. La législation sur la construction existe, mais, par manque de moyens financiers et techniques, les règlements sur l'aménagement urbain et les codes de la construction ne sont que partiellement appliqués. Pour leur part, les professionnels de la construction sont peu sensibilisés à la question et se conforment plutôt à la demande. De plus, la nouvelle architecture vietnamienne est en redéfinition et elle semble avoir quelques difficultés à trouver sa voie.



Figure 1.3 : Élévation de la rue Trieu Viet Vuong, Hanoi  
(illustration par Marika Vachon, 2001)

## 1.2 L'évolution de l'habitation urbaine de Hanoi

Le portrait urbain de Hanoi a connu, tout au cours de son histoire, des types d'habitations variés et spécifiques à ses différentes périodes d'évolution (Doan The Trung, 2003). La maison traditionnelle a ainsi subi plusieurs changements et transformations pour parvenir à ce que l'on connaît aujourd'hui. Au 19<sup>e</sup> siècle, Hanoi n'était pas encore très urbanisée et englobait de petits hameaux dont les maisons étaient de type traditionnel rural en bois avec une toiture en feuillage. Dès le début du 20<sup>e</sup> siècle, ces maisons traditionnelles disparaissent à cause d'un incendie, pour laisser place à un tout nouveau type d'habitation plus urbain.

Cette nouvelle urbanisation commence par l'influence de la maison rurale chinoise, appelé «compartiment chinois». Dans la forme d'origine, elle est étroite (4 mètres environ), très longue (jusqu'à 50 mètres), mitoyenne et alignée le long des rues. Ce premier modèle, se compose de plusieurs petits bâtiments alignés sur la parcelle et entrecoupés de cours extérieures (figure 1.4).

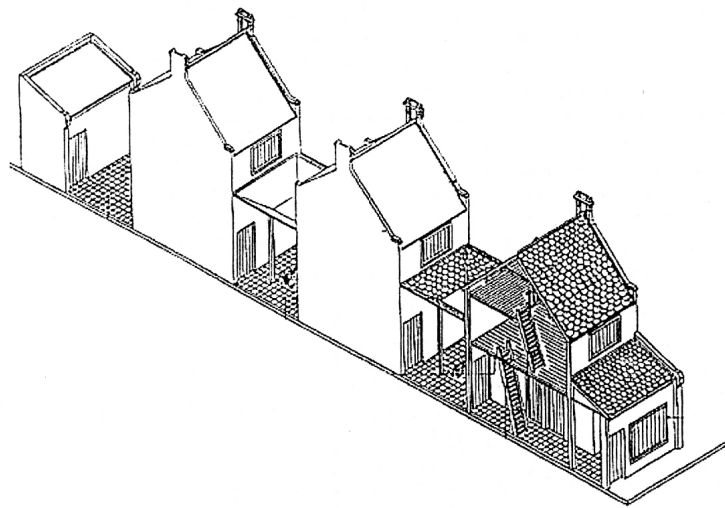


Figure 1.4 : La parcelle urbaine traditionnelle ou compartiment chinois (illustration par Doan The Trung, 2003)

Aussi appelée maison tube, le compartiment chinois s'est ensuite transformé pour devenir la maison urbaine typique, très présente dans le quartier historique des trente-six rues de Hanoi de même que dans la majorité des quartiers centraux. Celle-ci se distingue également par l'étroitesse de sa façade et la profondeur de son espace bâti. Plus tard, ce modèle s'adaptera à différents courants architecturaux avec l'apparition des styles coloniaux (sous l'influence coloniale française), du style mixte (traditionnel + colonial), du style moderne, et du style d'inspiration vietnamienne.

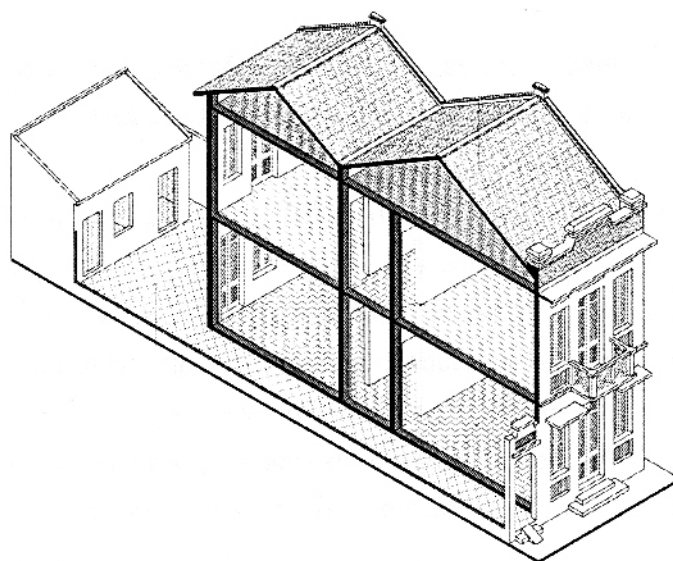


Figure 1.5 : La maison urbaine typique (illustration par Doan The Trung, 2003)

Aujourd'hui, la maison urbaine typique tend à être remplacée par la maison contemporaine qui se caractérise par une pleine occupation de la parcelle et une hauteur de bâtiment pouvant atteindre 5 à 8 étages (figure 1.6). Il était donc tout indiqué de s'intéresser à ce type architectural en particulier, puisqu'il est le résultat direct du processus de densification urbaine affectant Hanoi.

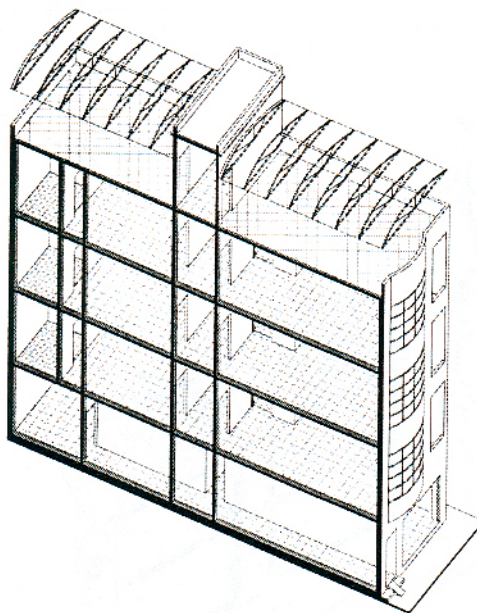


Figure 1.6 : La maison contemporaine (illustration par Doan The Trung, 2003)

### *1.3 L'habitation vietnamienne : quelques caractéristiques*

#### **1.3.1 Résidence urbaine type : Le 106 Nguyen Du, Hanoi**

Une partie de cette recherche consistait à dresser le portrait du marché de la construction locale afin d'en saisir les réalités et les enjeux principaux. Cette section présente les observations effectuées sur le terrain à l'été 2002. Un chantier résidentiel typique a été visité quotidiennement lors de notre séjour à Hanoi, de manière à comprendre le fonctionnement et les subtilités de la construction de ces nouvelles maisons urbaines qui transforment profondément le paysage du quartier. Le chantier choisi est sis au 106 Nguyen Du. Ce choix nous a été suggéré par monsieur Dinh Chinh Dao, un expert local de la construction oeuvrant au département des bâtiments à l'École Nationale Supérieure de Génie Civil de Hanoi. Cette résidence de 5 étages possédant un commerce au rez-de-chaussée est située dans le quartier Hai Bà Trưng près du centre de Hanoi (figure 1.7). Elle est très représentative du type de construction que l'on retrouve dans ce quartier.



Figure 1.7 : Le 106 Nguyen Du en construction à Hanoi  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

### **1.3.2 Réalités constructives et problématiques**

Les méthodes de construction qui caractérisent l'habitation urbaine à Hanoi et celle du reste du Vietnam, sont en lien direct avec les moyens matériels et financiers précaires du pays. Ces procédés diffèrent donc de ceux observés en occident, car ils sont influencés par un système politique, économique et culturel unique et propre au Vietnam. Toutefois, les principales étapes de construction sont comparables.

#### *1.3.2.1 Les travaux de fondations*

En premier lieu, les ouvriers vietnamiens débutent le chantier par l'excavation du sol pour la réalisation des fondations. Le niveau de la nappe phréatique est assez élevé à Hanoi, ce qui a pour effet de rendre le sol spongieux et d'affaiblir considérablement sa capacité portante. En effet, les premiers 4 à 5 mètres sont composés de boue et le sol est compact en deça de ce niveau.. Plusieurs problèmes peuvent découler de cette réalité dont le tassement

différentiel du sol. Ce phénomène se caractérise par une portion de la maison qui s'enfonce plus profondément dans le sol que le reste du bâtiment provoquant la rupture de la maçonnerie, des fissurations en façade et même l'affaiblissement structural de la maison. Il arrive également que ce problème se produise entre deux constructions voisines dont la différence de poids est significative. Par exemple, entre une maison traditionnelle de 2 étages et une maison contemporaine de 8 étages.

Afin d'améliorer la portance du sol et d'assurer une assise solide au futur bâtiment, les ouvriers vietnamiens enfonce dans le sol, des tiges de bambou humidifiées, d'une longueur de deux mètres. Ils procèdent en enfonçant les pieux de façon circulaire, de l'extérieur vers le centre de la parcelle, pour presser le sol et rapprocher les particules de terres (figure 1.8). On peut enfoncer de 20 à 25 tiges de bambou par mètre carré.

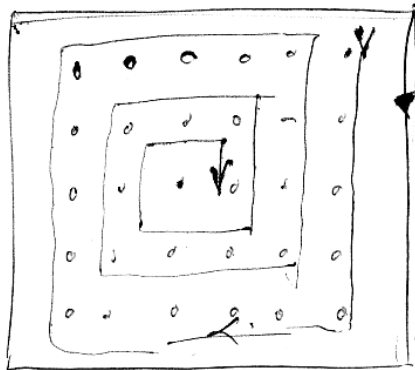


Figure 1.8 : Schématisation de la disposition des pieux de bambous sur un terrain pour améliorer la capacité portante du sol (dessin par M. Le Duc Hanh, 2002)

Une autre solution consiste à utiliser des pieux de béton armé préfabriqués que l'on enfonce à l'aide d'un vérin hydraulique (figure 1.9). Les pieux sont localisés dans l'axe des colonnes structurales sous la semelle de fondation. Plus dispendieux que les pieux de bambou, les pieux de béton armé offrent une capacité portante de 20 tonnes chacun et, contrairement au bambou, ils ne sont pas sujets à la décomposition dans un sol humide.



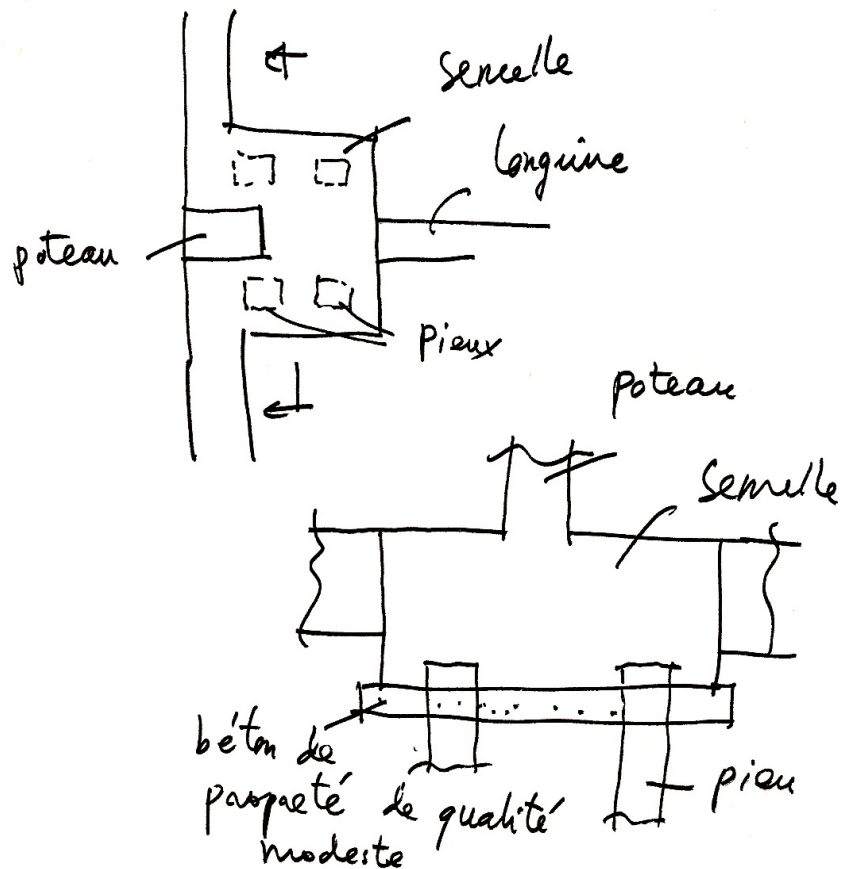


Figure 1.9 : Schématisation de la disposition des pieux de béton armé  
(dessin par M. Le Duc hanh, 2002)

Les ouvriers coulent ensuite une semelle de béton armé au-dessus des pieux. Cette semelle supporte trois rangées de briques qui constituent la base des murs de fondations. Un lit de béton est ensuite coulé afin de cimenter les rangs de briques. Les vides créés par l'excavation sont remblayés avec du sable, sauf pour une partie à l'avant de la maison où sera installé le réservoir d'eau. Ce réservoir est disposé de façon indépendante à la structure portante du bâtiment et est également réalisé en béton armé.

### 1.3.2.2 Les travaux de structure

Une fois les travaux de base achevés, une première dalle de béton est coulée sur toute la surface habitable au rez-de-chaussée. La méthode de conception des dalles de plancher

couramment utilisée subdivise le plancher en plusieurs parties. Les ouvriers coffrent chacune des sections de planches entre les axes structuraux, à l'aide de planches de bois et utilisent des tissages de bambous et des toiles de plastique pour assurer l'étanchéité du système (figure 1.10). Cette stratégie s'explique par le fait que les ouvriers ne disposent pas de l'équipement nécessaire à la préparation de grandes quantités de béton à la fois. Par ailleurs, la première dalle de plancher n'est pas armée, car elle est déposée directement sur le remblai de sable.

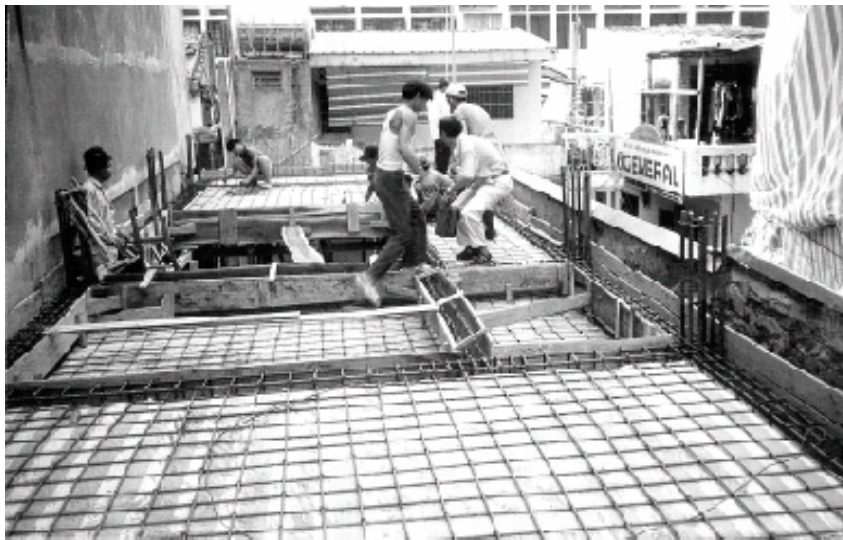


Figure 1.10 : Réalisation des coffrages de la dalle par section  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

La réalisation de la structure de béton armé constitue l'étape suivante dans le processus de construction. La structure se compose de colonnes et de poutres de béton armé coulées sur place. Les colonnes sont disposées latéralement sur les murs de fondations à tous les 4 mètres environ. Celles-ci ont une hauteur moyenne de 4 mètres pour le rez-de-chaussée et de 3,3 à 3,6 mètres pour les étages. Les poutres sont jointes aux colonnes par les armatures d'acier. Leur dimensionnement est grossièrement établi selon les portées souhaitées qui varient entre 3 et 6 mètres. Les armatures qui lient les poutres et les colonnes se chevauchent et sont attachées ensemble avec des tiges métalliques. Une fois coulées, les poutres et les colonnes forment un cadre rigide grâce à la continuité du système d'armatures (figure 1.11). Une colonne compte en moyenne 6 tiges d'armature et une poutre environ 5.



Figure 1.11 : Continuité du système d'armatures entre les poutres et les colonnes  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

### *1.3.2.3 Les murs extérieurs*

En ce qui concerne la fabrication des murs extérieurs, le principe du mur de masse est adopté. Celui-ci se caractérise par l'empilement successif de rangées 2 ou 3 briques d'argile de largeur (figure 1.12). Ces briques sont posées par des maçons engagés uniquement pour le montage des murs. C'est un mortier réalisé sur place qui consolide les briques. Une fois terminé, le mur de briques constitue le contreventement principal de la structure et lui confère sa rigidité. La dernière rangée de briques est disposée de façon à créer des niches servant de points d'appui aux échafaudages ou aux coffrages de la dalle du plancher supérieur. Des cavités seront ensuite taillées dans la paroi murale afin d'y dissimuler les éléments de plomberie et d'électricité.

La construction d'une maison se réalise donc par étage. Les vietnamiens construisent souvent entre 5 à 8 étages pour des résidences et jusqu'à une dizaine d'étages pour les hôtels. Après quelques jours, lorsque le béton a suffisamment mûri, les coffrages sont démontés aux étages inférieurs et repositionnés aux étages supérieurs en respectant la même trame structurale. Subséquemment, les autres étapes de construction seront répétées dans le même ordre. La figure 1.13 montre la progression du chantier.

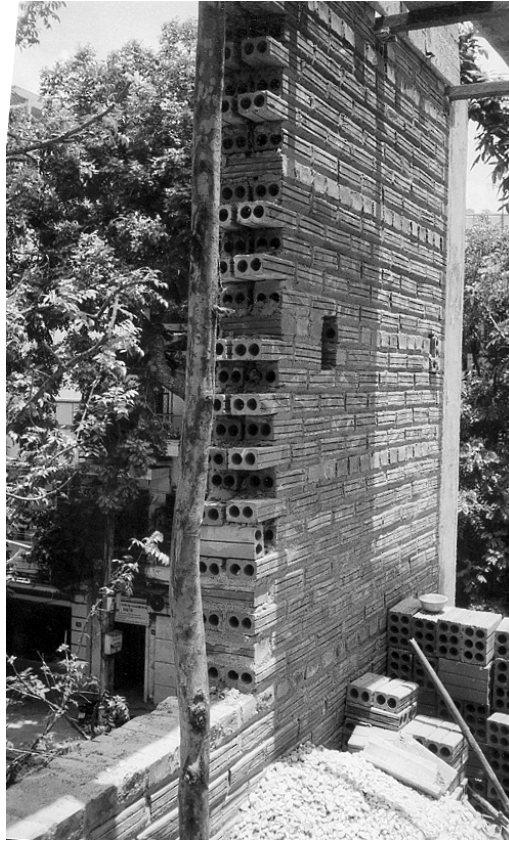
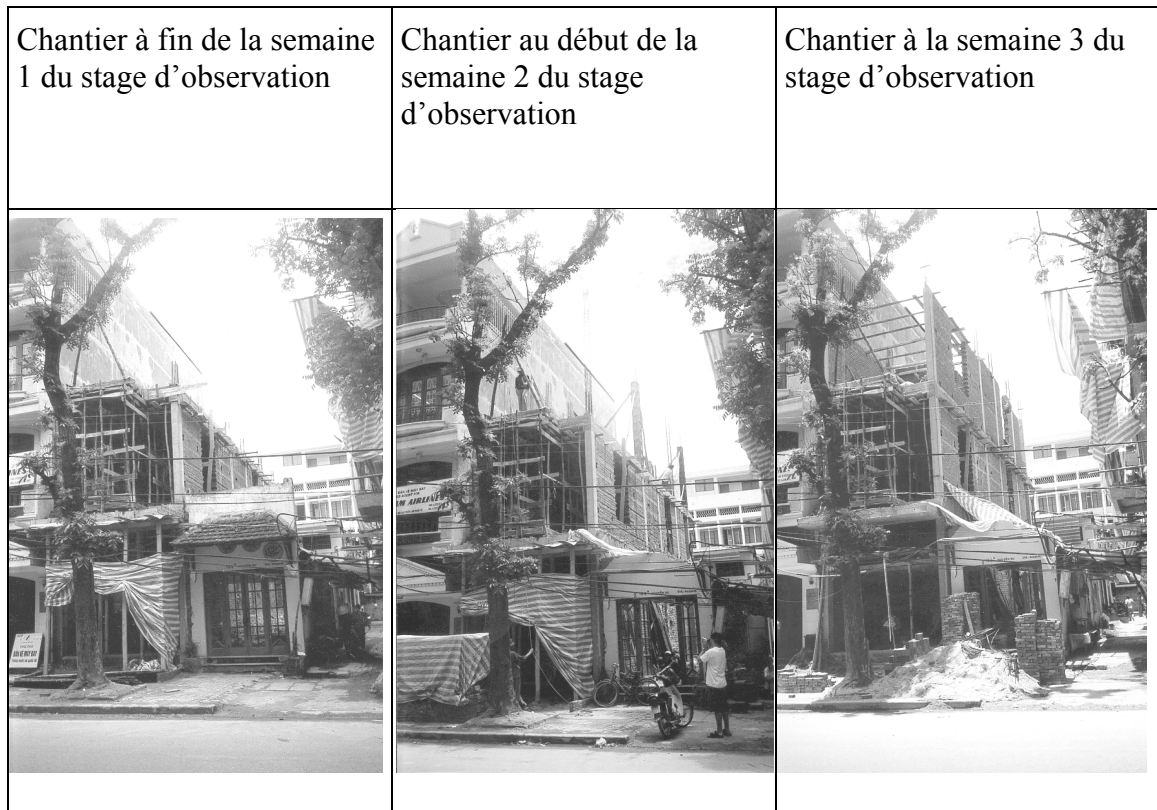


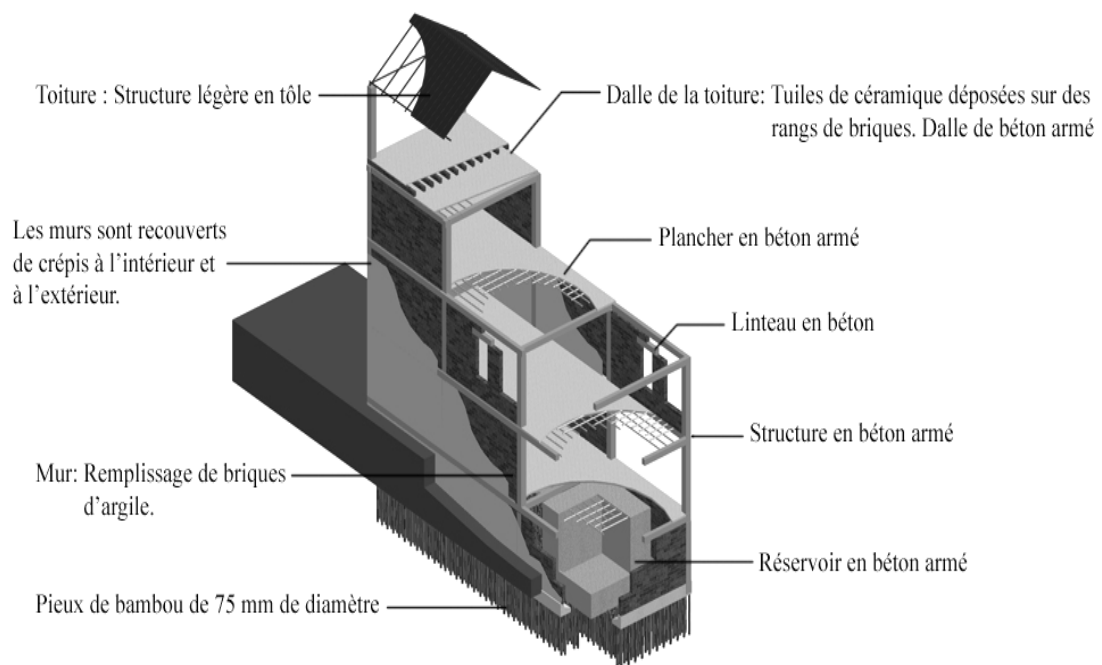
Figure 1.12 : Mur de briques (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

#### *1.3.2.4 Les travaux de toiture*

Lorsque l'érection du dernier niveau est complétée, différents types de toiture peuvent être édifiés. Le premier est le toit plat, réalisé selon les mêmes techniques constructives que les dalles de plancher. Afin de réduire les transferts thermiques et la surchauffe du bâtiment, une rangée de brique est ajoutée puis recouverte d'une deuxième dalle afin de créer une paroi ventilée. (figure 1.14) . Le deuxième type est le toit en pente, où deux parois de béton armé sont coulées, puis recouvertes de tuiles d'argile cuites. Ces tuiles sont disposées de façon à optimiser le ruissellement des eaux de pluie et ainsi protéger la paroi poreuse en béton. Un troisième type complémentaire au premier est souvent remarqué dans le paysage urbain de Hanoi, il s'agit de la toiture de tôle. Cette structure légère peut se construire facilement, même quelques années après la fin du chantier. Il permet de réduire davantage la surchauffe du toit et permet de créer un espace utilisable supplémentaire.



**Figure 1.13** : Progression du chantier au 106 Nguyen Du à Hanoi  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)



**Figure 1.14** : Représentation schématique du système constructif de l'habitat urbain à Hanoi  
(illustration par Dany Blackburn et Francis Bouchard, 2001)

### 1.3.2.5 Les travaux de finition

La dernière étape de la construction est la finition du bâtiment qui consiste à enduire les surfaces murales tant à l'extérieur qu'à l'intérieur. Le crépi intérieur uniformise les parois et dissimule la structure de béton et les murs de béton. Les ouvriers sculptent, avec l'aide d'une simple truelle, toutes les moulures et les autres ornements décoratifs désirés (figure 1.15).



Figure 1.15 : Construction terminée au 106, Nguyen Du à Hanoi  
(photo par André Casault, 2005)

### 1.3.3 Matériaux de construction et mise en oeuvre

Les matériaux de construction nécessaires à un chantier sont achetés par l'entrepreneur et le propriétaire. Ils sont acquis en petite quantité chez les distributeurs locaux dans la ville et sont livrés par camion ou cyclo-pousse (figure 1.16). Les matériaux sont acheminés au chantier en petite quantité parce la densité urbaine propre à Hanoi ne permet pas l'entreposage de grande quantité de matériaux sur le site. Souvent les ouvriers déposent les matériaux sur le trottoir ou dans la rue (figure 1.17). Pour certaines phases de construction, ils assemblent ou fabriquent les matériaux directement dans la rue. Advenant un encombrement des voies publiques, les autorités municipales peuvent émettre des infractions. La densité urbaine est donc un obstacle sérieux, car elle rend le stockage et la manutention des matériaux et des équipements difficiles<sup>3</sup>.



Figure 1.16 : Transport des matériaux en cyclo-pousse  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn 2002)

---

<sup>3</sup> Information tirée d'une entrevue avec M. Dinh Chinh Dao, professeur à l'École Nationale Supérieure de Génie Civil de Hanoi (ENSGCH), 2002



Figure 1.17 : Entreposage des matériaux dans la rue et fabrication du béton  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

Les principaux matériaux utilisés dans le marché local de la construction sont le bois et le bambou pour les coffrages, la brique et le béton pour la structure et les murs et l'acier pour les armatures et la toiture. La grande majorité de ces matériaux sont produits localement excepté l'acier qui est importé de la Chine. Les prix sont fixés selon la disponibilité et selon les quantités achetées. Les distributeurs sont situés un peu partout dans la ville, et ils s'approvisionnent auprès de paysans ou d'industries situées à l'extérieur de la ville.

### *1.3.3.1 Le bois*

À cause d'une déforestation massive depuis les années 70, le bois est un matériau de plus en plus rare au Vietnam. Il n'est plus utilisé pour la construction des structures depuis l'apparition du béton. Il est encore utilisé pour la finition intérieure, mais son usage tend à diminuer. En général, les planches de bois sont récupérées d'anciens bâtiments, puis elles sont raboutées et réutilisées pour la confection de coffrages (figure 1.18). Certains entrepreneurs louent le bois de coffrage étant donné son prix élevé à l'achat. Le prix des coffrages pour les planchers est d'environ 2 USD/m<sup>2</sup> et représente 2 à 3% du coût total de la construction<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Le dollar américain servira de base de référence pour les prix du marché à l'été 2002.





Figure 1.18 : Utilisation du bois pour la confection des coffrages  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

### *1.3.3.2 Le bambou*

Actuellement, le bambou est peu utilisé dans la construction vietnamienne malgré l'abondance de la matière à travers tout le pays. Il sert surtout de pieux pour les fondations et pour le soutien temporaire des coffrages. Peu dispendieux, son usage est toutefois limité, car il est perçu comme un matériau pauvre dont l'utilisation réfère davantage aux bâtiments ruraux et aux abris temporaires. Son usage est plus répandu pour la fabrication de meubles et d'accessoires. Les tiges provenant des régions rurales en périphérie de Hanoi, sont coupées, puis acheminées directement chez les distributeurs en ville en longueur de 2 à 3 mètres pour un diamètre d'environ 7 cm (figure 1.19). Le coût du bambou est d'environ 0,10 USD/m incluant le transport. L'exploitation du bambou n'est pratiquement pas contrôlée mettant ainsi en péril la pérennité de la ressource de même que la préservation d'un environnement naturel déjà durement éprouvé.



Figure 1.19 : Distributeur de pieux de bambou à Hanoi  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

### *1.3.3.3 Le béton*

Combiné à l'acier, le béton est un excellent matériau pour la construction de structures. La capacité portante du béton pour la construction résidentielle est de l'ordre de 20 MPa. Son utilisation est d'ailleurs presque généralisée dans la construction résidentielle à Hanoi. La possibilité de créer des formes variées, sa technologie facile à assimiler, sa grande disponibilité et l'économie de moyens pour sa mise en œuvre sont des raisons pour lesquelles le béton est si utilisé dans un pays en voie de développement comme le Vietnam. Le prix moyen du béton est de 25 USD/m<sup>3</sup> ou 7,5 USD/m<sup>2</sup> pour la confection de planchers de 30 cm d'épaisseur.

Habituellement, le béton est confectionné et coulé directement sur le chantier. Seuls les constructions d'envergure nécessitent l'utilisation d'une bétonnière. Le ciment, le sable et les granulats, provenant du Fleuve Rouge, sont malaxés dans la rue, en face du chantier (figure 1.20). Un ouvrier se spécialise dans le malaxage du béton. Dans le cas où l'étroitesse des rues ou des ruelles empêche le passage d'un malaxeur, le béton est mélangé au moyen de pelles dans un bassin ou une brouette. L'ouvrier en charge du béton connaît, par expérience, les quantités nécessaires pour l'obtention d'un béton de qualité. Selon

monsieur Dinh Chinh Dao, la recette couramment utilisée pour la fabrication d'un mètre cube de béton est donnée au tableau 2.

Tableau 2 : Recette pour la fabrication de 1 m<sup>3</sup> de béton pour la construction résidentielle à Hanoi (Dinh Chinh Dao, 2002)

| Matériaux | Quantité                            |
|-----------|-------------------------------------|
| Gravier   | 0,8 m <sup>3</sup>                  |
| Sable     | 0,5 m <sup>3</sup>                  |
| Ciment    | 300 à 325 kg                        |
| Eau       | Déterminé par intuition au chantier |



Figure 1.20 : Préparation du béton dans la rue  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

Le béton est ensuite versé dans des paniers de tressage, et acheminé au niveau de la coulée du coffrage. Les paniers sont montés au moyen d'un treuil improvisé aux étages ou manuellement par les ouvriers (figure 1.21).



Figure 1.21 : Manutention du béton sur le chantier  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

#### 1.3.3.4 La brique

La brique utilisée pour le remplissage des murs est en argile cuite. Elle peut provenir de fours à briques artisanaux ou d'usines. Dans le cas de briques artisanales, le procédé est assez simple. On place l'argile dans des moules que l'on empile dans des fours à briques alimentés au charbon (figure 1.22). On allume ensuite le combustible et on laisse cristalliser les briques dans les fours. Les briques ainsi produites, sont de qualité moyenne étant donné les conditions précaires de mise en œuvre.

Le second procédé est industriel. L'argile est transvasée mécaniquement dans des moules et disposée sur des chariots à rails. Ces chariots sont ensuite envoyés dans des fours au gaz contrôlés automatiquement. Le procédé industriel produit ainsi des briques uniformes et de meilleure qualité. De plus, les briques produites sont ajourées pour plus de légèreté et une meilleure isolation thermique (figure 1.23). Les briques ajourées, plus légères ne sont

utilisées que pour le cloisonnement des étages. Au rez-de-chaussée on emploie des briques pleines, car elles sont plus résistantes.



Figure 1.22 : Four à briques artisanal (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

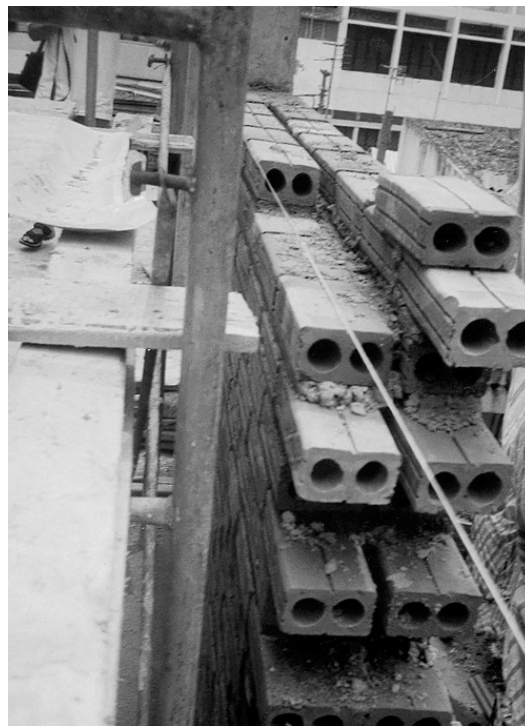


Figure 1.23 : Utilisation de briques usinées (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2002)

### 1.3.3.5 L'acier

L'acier est souvent importé des pays limitrophes au Vietnam. Récemment, la Chine exportait l'acier à l'état brut dans la région de Haiphong où il est transformé. Les ouvriers reçoivent donc cet acier en tiges d'armatures sur le chantier. Ils doivent plier et couper manuellement chacune des tiges selon les besoins spécifiques du chantier (figure 1.24). Elles sont destinées à armer les colonnes, les poutres et les dalles de plancher. Elles sont attachées avec de la broche, de manière à créer un réseau d'armature continu entre les divers éléments structuraux de béton.



**Figure 1.24** : Pliage des armatures d'acier par les ouvriers  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn,. 2002)

L'utilisation de l'acier est très coûteuse pour les vietnamiens et, par faute de moyens, on préfère souvent réduire la quantité d'armatures dans le béton ce qui affaiblit considérablement les structures. De plus, l'utilisation de ce matériau non-renouvelable et polluant soutient l'industrialisation accélérée du Vietnam contribuant ainsi à la destruction de son environnement.

## 1.4 La main d'œuvre locale

Quant à la main d'œuvre locale, celle-ci est non spécialisée. Souvent très jeunes, les ouvriers provenant de la campagne sont sous-payés et sans logis. Ils doivent donc vivre sur le site de construction pour toute la durée du chantier dans un environnement de travail où le bruit, la poussière, les odeurs, la fumée, et la pollution prévalent. De plus, les outils et les équipements sont vétustes et insuffisants et la plupart des interventions se font manuellement sans règles de sécurité ou de protection. Il n'y a pas de règles strictes concernant la surveillance des petits chantiers résidentiels. L'architecte est responsable, mais le propriétaire est celui qui prend les dispositions nécessaires. Le coût de la main d'œuvre représente environ 10 à 15% du coût total de la construction.

## 1.5 Le climat

Le Vietnam jouit d'un climat très diversifié grâce à l'étendue de ses latitudes et de la variété de ses altitudes. Le pays est situé dans la zone intertropicale entre le tropique du Cancer et l'équateur.

Les conditions climatiques locales peuvent être extrêmes et varient d'un hiver froid et humide au Nord, à une chaleur aride dans la région du Mékong. Le Vietnam est situé dans la zone des moussons<sup>5</sup> de l'est asiatique et connaît deux périodes de pluies abondantes par an d'intensité variable selon la région.

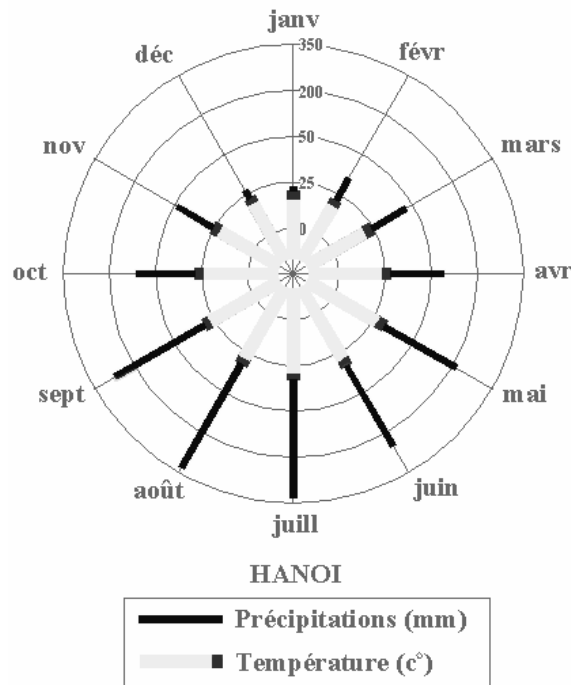
La majeure partie du Vietnam reçoit environ, 2500 millimètres de pluie à chaque année. La ville de Hanoi en reçoit en moyenne 1800 (figure 1.25). De plus, entre juillet et novembre, des typhons<sup>6</sup> peuvent venir de la mer de Chine et du golfe du Tonkin, situés à l'est du Vietnam. Ces typhons frappent le centre et le nord du pays, causant de terribles dévastations aux villes.

---

<sup>5</sup> Courant atmosphérique de la zone intertropicale, résultant du franchissement de l'équateur par les alizés, et généralement associé à des pluies abondantes. (Petit Larousse, 2002)

<sup>6</sup> Cyclone tropicale très violent (Petite Larousse, 2002)

Les zones situées au nord du 18<sup>e</sup> parallèle ont deux saisons soit l'été et l'hiver. Les étés sont chauds et humides, ils commencent au mois de mai et durent jusqu'en octobre. Les hivers sont assez frais et humides et viennent avec la mousson irrégulière du nord-est. Les mois de février et mars se caractérisent par une constante pluie fine, le crachin.



**Figure 1.25** : Conditions climatiques de Hanoi (illustration par Dany Blackburn et Mathieu Simard, 2001)

La saison des pluies que subit Hanoi entre les mois de juin et août, contraint les chantiers de construction. Cette période de l'année est marquée par des journées ensoleillées et des pluies plus qu'abondantes en début de soirée. Cette situation cause des problèmes pour les coulées de béton et peut retarder certains chantiers sur une longue période. Il s'avère difficile de contrôler les étapes de malaxage et de mise en œuvre du béton lors de pluies abondantes. Une trop grande quantité d'eau peut réduire considérablement les performances et la durabilité à long terme du béton.



### 1.6 *Problématiques observées et objectifs de recherche*

L'étude de la construction résidentielle vietnamienne a révélé que les contextes politiques, économiques, sociaux et culturels ont une incidence directe sur le fonctionnement et l'organisation d'un chantier de même que sur les conditions de mise en œuvre. Certains aspects problématiques de la construction ont été identifiés et permettront de guider le cours de cette recherche et d'orienter les objectifs à atteindre dans le cadre de ce mémoire. Les principaux problèmes identifiés sont :

- Le poids des bâtiments trop élevé pour la capacité portante du sol.
- L'utilisation de matériaux polluants, non-renouvelables et coûteux incitant une industrialisation accélérée et la destruction de l'environnement.
- Le manque de main d'œuvre spécialisée et l'abondance de main d'œuvre non spécialisés.
- L'outillage restreint.
- Les normes de constructions pratiquement inexistantes.
- L'absence de mesures de sécurité sur les chantiers.
- Le transport et l'entreposage des matériaux difficiles sur le chantier.
- Les conditions climatiques limitant la progression des chantiers.

D'autres considérations sont plus spécifiquement liées à notre hypothèse de départ voulant qu'un système de plancher préfabriqué sur place (formé de poutres de béton armé de bambou et de dalles de béton léger) soit une solution intéressante pour la construction urbaine de Hanoi. Afin de formuler des objectifs justes et adaptés à la réalité vietnamienne, il est donc important de prendre en compte les éléments suivants :

- Le bambou comme matériau de construction offre une image négative auprès de la population locale.
- L'exploitation du bambou et sa transformation ne sont pas organisées dans la grande région de Hanoi.

- L'approvisionnement difficile et la dégradation de l'environnement sont des enjeux importants mais qui sont habituellement négligés par les décideurs locaux.
- Contrairement au béton armé de barres d'armature en acier, il n'existe pas de normes ou de codes de construction régissant l'utilisation du béton armé de tiges de bambou.
- La préfabrication locale à petite échelle n'est pas une pratique courante dans la construction résidentielle de Hanoi.

## 1.7 Les objectifs de recherche

Le système constructif que nous voulons développer doit donc rencontrer les objectifs suivants :

### 1. Contrôle de qualité

Le système de préfabrication doit permettre d'assurer le contrôle de la qualité au chantier par des règles simples à respecter, des formulations de béton faciles à reproduire, une bonne coordination entre les divers intervenants et un respect assez strict des dimensions.

### 2. Assemblage facile et rapide

L'assemblage des éléments du système constructif doit être pensé de façon à ce que les éléments s'enchevêtrent aisément sans nécessiter d'équipements spécialisés.

### 3. Manutention des pièces par les ouvriers (dimensions et poids optimisés)

Prémisse essentielle au système, les poutres doivent pouvoir être facilement transportées et acheminées aux étages. Le poids total d'une poutre ne devrait pas excéder 100 kg de manière à ce que deux ouvriers puissent la manipuler sans trop d'efforts.

4. Coffrages réutilisables

La mise en œuvre des éléments préfabriqués du système doit être rapide et efficace. Le coffrage doit être fait de façon à pouvoir se réutiliser plusieurs fois, avec des matériaux le permettant.

5. Capacités structurales adéquates

Le béton armé de bambou doit posséder une capacité structurale suffisante pour supporter les exigences de charge et de portée de l'habitat urbain de Hanoi. Le calcul de cette capacité doit respecter les normes prescrites par le Code National du Bâtiment du Canada qui servira de référence à défaut de normes pour l'utilisation du bambou en construction.

6. Réduction du poids total du bâtiment

La section de la poutre devra être optimisée afin de réduire son poids au maximum et d'en faciliter la manipulation. Pour sa part, l'utilisation de dalles en béton léger aura pour effet de réduire significativement le poids total du bâtiment ce qui facilitera la construction (qui se fait manuellement avec très peu d'outils de levage) en plus de réduire la charge imposée aux fondations (et, par conséquent, de limiter les problèmes de tassement différentiel).

7. Durabilité des composantes

Le système de plancher doit être durable. On devra donc s'assurer que l'utilisation de bambou comme matériau d'armature ne compromet pas la durabilité du béton armé.

8. Réduction de la durée du chantier

La préfabrication d'éléments permet d'augmenter la rapidité d'exécution d'un chantier. La poutre et le système de plancher développés doivent s'insérer dans les séquences d'érection déjà établies.

9. Approvisionnement et distribution des poutres par des distributeurs locaux

La fabrication des poutres devrait pouvoir être réalisée par de petits ateliers locaux qui approvisionneront les chantiers. Cette mentalité commerciale est déjà implantée dans la ville de Hanoi pour d'autres matériaux, tels la brique, le bambou, le bois et l'acier. On peut donc espérer que l'idée d'un système préfabriqué localement devrait être relativement bien accepté.

10. Populariser l'utilisation du bambou dans la construction vietnamienne

Encourager l'utilisation de matériaux et de technologies non-polluantes qui consomment un minimum d'énergie lors de leur production.

## Chapitre 2 - Revue de la littérature

### 2.1 Les propriétés physiques et mécaniques du bambou

Pour proposer l'utilisation du bambou comme matériau de construction, il est primordial d'en saisir les caractéristiques et les propriétés intrinsèques. Les tissus des tiges de bambou sont composés de fibres cellulosiques qui expliquent sa grande résistance. Dans un article publié en 2001, Ghavami recense quelques-unes des études sur la microstructure et les propriétés générales du bambou. On y explique que le bambou est une plante vivace de la famille des graminées dont la croissance est parmi les plus rapides du monde végétal et peut atteindre 40cm par jour. Certaines espèces ont une hauteur de plus de 36m et leur diamètre varie entre 1cm et 30cm à maturité. C'est sur les rives du sud-est asiatique et dans les îles adjacentes que l'on retrouve la plus grande concentration de bambou, car il pousse mieux dans les territoires exposés à la mousson.

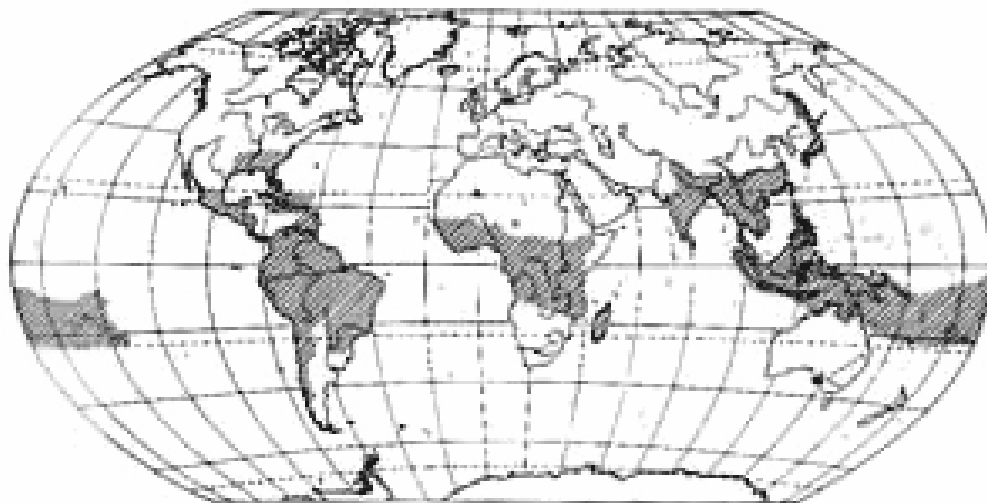
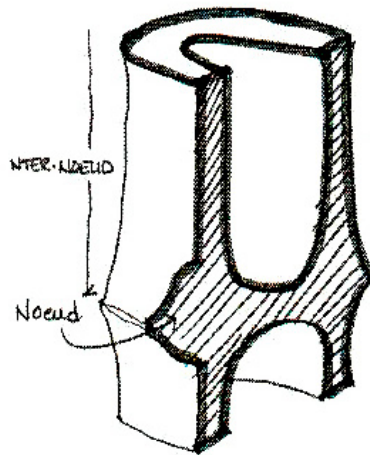


Figure 2.1 : Distribution géographique du bambou

(Illustration : Jonathan Boucher 2003)

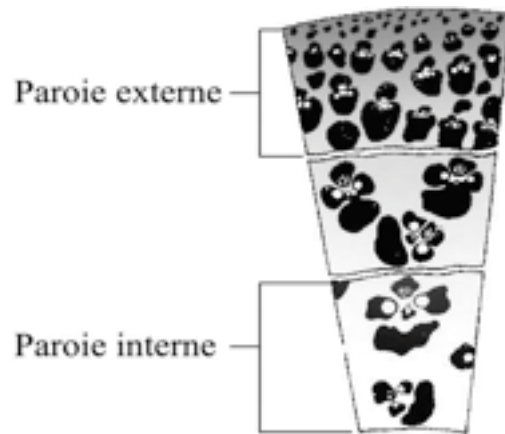
La distribution des fibres est plus uniforme à la base de la tige qu'au sommet. C'est donc à cet endroit que la paroi est la plus épaisse donc la plus résistante. Ceci peut

s'expliquer par le fait que le bambou doit supporter son propre poids. Les nœuds des tiges jouent également un rôle capital dans les propriétés physiques et mécaniques du bambou. (Ghavami 1995). La force des fibres augmente à partir du nœud jusqu'au centre de la partie inter-nodale et de la périphérie de la paroi jusqu'au centre. (Leise 1992). Selon l'auteur, la partie inter-nodale travaille comme une unité. Il conclut également que les propriétés physiques et mécaniques varient d'une espèce à l'autre à l'intérieur d'une même espèce dépendamment de l'habitat, de la position, et de l'âge des tiges. L'auteur soutient qu'il est préférable que seuls les bambous matures soient utilisés comme armatures de béton.



*Figure 2.2 : Section d'une tige de bambou (illustration par Jonathan Boucher 2003)*

Raj (1991) s'intéresse également aux facteurs influençant les propriétés mécaniques du bambou. Selon lui, les comportements en flexion et en tension du bambou doivent être bien compris si l'on désire l'utiliser comme armature de béton. L'auteur souligne que la partie externe des tiges de bambou est au moins deux fois plus résistante que la partie interne (figure 2.3). Des valeurs rapportées par certains chercheurs indiquent que le module de rupture en flexion du bambou se situe à 140 MPa pour l'extérieur tandis qu'il est de 52 MPa pour l'intérieur. Ces valeurs en tension sont de 210 à 250 MPa et 150 à 200 MPa pour l'extérieur et l'intérieur respectivement. Cela dit, pour obtenir de meilleurs résultats, l'auteur avance qu'il est préférable de retirer la portion interne des tiges de bambou.



*Figure 2.3 : Structure cellulaire du bambou (Nations Unies, 1972)*

Le module d'élasticité est un autre paramètre important qui affecte les performances structurales du bambou. Toujours selon Raj (1991), les investigations menées à ce jour indiquent que toutes les espèces de bambou présentent un très faible module d'élasticité ce qui peut entraîner l'affaissement ou la fissuration des structures. Des précautions supplémentaires devraient donc être prises lors de la fabrication d'éléments, telles les poutres, qui sont sujettes à des déformations importantes. La résistance en compression du bambou est quant à elle supérieure lorsqu'elle est mesurée perpendiculairement au grain comme la plupart des bois de charpente.

Dans leur étude, Ferreira, Moreno et Beraldo (2001) tentent de mesurer la valeur de rupture en tension et en compression du bambou et d'évaluer le module d'élasticité afin de définir le comportement structural des poutres de béton armé de bambou. Ainsi un essai de traction axiale permet d'obtenir la valeur de rupture en tension et le module d'élasticité. Un second essai de compression permet de déterminer la valeur de rupture en compression. Les résultats obtenus lors des essais ont permis d'obtenir les valeurs suivantes pour des tiges de section totale :

- Rupture en tension : 189 MPa
- Module d'élasticité : 22 200 MPa
- Rupture en compression parallèlement aux fibres : 78 MPa

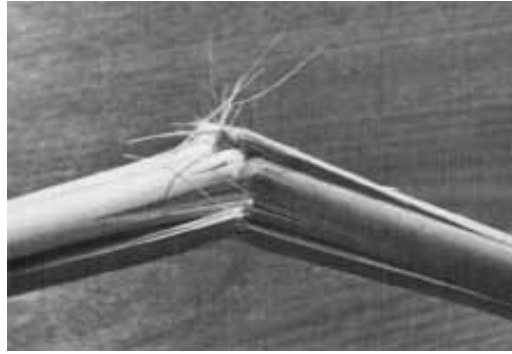


Figure 2.4 : Rupture en tension d'une tige de bambou

Les résultats de Ferreira et al. (2001) confirment les énoncés de Raj (1991). Il est important de connaître les propriétés mécaniques du bambou si l'on désire l'utiliser comme matériau structural. Ainsi les chercheurs peuvent calculer les états limites afin d'éviter la fissuration et l'affaissement des structures.

Mais avant toute chose, c'est le taux d'humidité qui définira la qualité des propriétés mécaniques du bambou. Il a été observé que les propriétés mécaniques sont optimales lorsque les tiges, après séchage, ont un taux d'humidité situé entre 15 et 20%. De façon générale, Hidalgo (2001) affirme que plus les conditions d'humidité sont élevées, moins les propriétés du bambou sont bonnes. Tout comme le bois, le bambou subit un retrait dû au séchage après que l'on ait coupé la tige. Ce retrait est de l'ordre de 3 à 12% pour le diamètre, tandis qu'il est plutôt négligeable longitudinalement (0.01%). Ferreira et al. (2001) ont mesuré la stabilité dimensionnelle du bambou en menant des essais sur des tiges différentes. Certaines étaient séchées naturellement, d'autres étaient saturées d'eau et quelques unes étaient cuites. Les résultats démontrent qu'à une augmentation des conditions d'humidité correspond une diminution des qualités physiques du bambou. Ainsi, la meilleure stabilité dimensionnelle a été obtenue pour les tiges de bambou ayant subi la cuisson. La variation volumétrique mesurée du bambou cuit est de 17.52% et selon Raj (1991), cette valeur confère au bambou des propriétés mécaniques optimales.



Les recherches de Hidalgo (2001) démontrent que l'intérieur de la tige qui représente 70% de l'épaisseur, a une texture plus douce et absorbe la plus grande quantité de l'eau contenue dans le béton frais. Au contraire, la partie externe qui est plus dense et représente 30% de l'épaisseur totale de la tige, absorbe une quantité minimale d'eau ( $2052 \text{ g/m}^2$  contre  $706 \text{ g/m}^2$ ) et offre une résistance supérieure à celle de la partie interne. Les conclusions de Hidalgo (2001) rejoignent donc celles de Raj (1991), car il propose de retirer la partie interne des tiges de bambou afin de ne retenir que la partie la plus résistante. On utilise donc la partie externe pour y tailler des lanières qui serviront d'armatures.

Les conclusions de Ferreira et al. (2001), Raj (1991), Ghavami (2001) et Hidalgo (2001), sont les mêmes concernant le rôle de l'humidité sur les propriétés mécaniques du bambou. Leurs travaux démontrent que la portion inférieure des tiges de bambou mature ayant subi un séchage ou une cuisson offre une plus grande résistance mécanique. Le bambou est vulnérable aux attaques des insectes et des champignons à cause de l'amidon contenu dans l'eau. Sa durabilité et ses performances mécaniques varient selon l'espèce et l'âge, tandis que sa dégradation dépend principalement de sa teneur en eau, c'est pourquoi son usage nécessite des traitements imperméabilisants.

## **2.2 La sélection d'une espèce de bambou**

Les chercheurs ne sont pas toujours familiers avec les différentes espèces de bambou. On évalue à plus de 1300 le nombre d'espèces qui peuplent les forêts du monde et chacune d'elles a des propriétés physiques et mécaniques particulières. Beaucoup d'essais ont été effectués sans tenir compte des caractéristiques propres à chaque espèce en pensant que les caractéristiques étaient uniformes. De plus, Leise (1992) mentionne dans son article que l'on postule à tort que le bambou a la même structure anatomique que le bois, donc le même comportement structural. Ainsi, plusieurs chercheurs recourent aux procédures standardisées utilisées pour le bois lors de leurs expérimentations, compromettant ainsi la validité de leurs résultats.

Dans la plupart des cas, les chercheurs utilisent les espèces qui leur sont disponibles. Ainsi, Hidalgo travaille avec le *Guadua de Castilla*, l'une des espèces les plus importantes de Colombie. Pour leur part, Abdurachim et Firmanti (2001) font leurs essais sur le *Gigantichloa Apus*, une espèce bien connue en Indonésie. La disponibilité et l'accessibilité de la matière sont donc des facteurs importants lors de la sélection d'une espèce de bambou.

Pour sa part, Ghavami (2001), a plutôt pris en considération certaines propriétés, telle l'hygroscopicité afin de sélectionner l'espèce la plus prometteuse pour la fabrication d'armatures dans le béton. Le *Bambusa Vulgaris Scard* est une espèce dont la teneur en humidité est relativement faible. Néanmoins, sa section transversale augmente de 6% après 7 jours d'immersion. Quoique minime, cette variation cause des macro-fissures dans le béton lors de la cure. Ghavami (2001) ne conseille donc pas d'utiliser cette espèce pour la fabrication d'armatures.

La possibilité d'utiliser le bambou comme armature fut également étudiée par Surjokusumo et Nugroho en 1993 en comparant plusieurs espèces de bambou, tels le *Gigantochloa Apus*, le *Verttiicillata* et le *Dendrocalamus Asper*. Cette dernière espèce, avec ses tiges droites, a les meilleurs résultats quant à la résistance à la traction et au module de rupture<sup>7</sup>.

Lors de leurs expérimentations, les tiges de *Dendrocalamus Asper* furent coupées dans le village de Leuwilliang dans l'Île de Java. Douze tiges matures de 30 ans prises dans des conditions géographiques différentes (sol humide et sol sec) furent sélectionnées et leurs propriétés physiques et mécaniques (densité, absorption d'eau, résistance en cisaillement, en tension et compression) furent mesurées (Surjokusumo

---

<sup>7</sup> Le « *Dendrocalamus Asper* » est une espèce atteignant une hauteur de 20 à 30 mètres. Ses zones inter-nodales ont 20 à 45 cm de longueur pour un diamètre de 8 à 20 cm et une épaisseur de 11 à 35 mm. Cette espèce est très utilisée en construction dans les communautés rurales, à cause de sa force et de sa durabilité. Dépendamment de son abondance, on l'utilise entre autres pour la construction de maisons et de ponts.

et Nugroho, 2001). Les résultats obtenus montrent que le *Dendrocalamus Asper* est sans doute l'une des meilleures espèces pour réaliser des armatures dans le béton.

Ainsi, la sélection d'une espèce de bambou pour la construction obéit à différents critères. Certains désirent un bambou performant au niveau structural alors que d'autres préfèrent choisir une espèce facilement accessible. Ce choix doit également dépendre de la fonction qu'occupera le bambou dans la construction. Il est évident que les conditions de son utilisation influenceront également son comportement structural et sa préservation.

### **2.3 Traitements et préservation du bambou**

L'instabilité dimensionnelle du matériau est l'une des principales limites de l'utilisation du bambou comme armature. Cela signifie que certains traitements doivent être appliqués afin d'assurer la durabilité des pièces de bambou servant d'armature de béton. Afin de préserver le matériau, les tiges doivent être traitées avant d'être transformées en armatures. Traditionnellement, ce traitement consiste à immerger le bambou dans l'eau stagnante pendant trois mois afin de dissoudre l'amidon ainsi que les autres substances nuisibles à la conservation des tiges. Il convient par la suite d'enduire les surfaces d'un produit imperméabilisant avant qu'elles n'entrent en contact avec le béton frais. En effet, soumis à des conditions d'humidité, le bambou devient un matériau hygroscopique : il absorbe l'humidité du béton et subit un important gonflement suivi d'un retrait lors du séchage. (Abdurachim et Firmanti, 2001).

S'appuyant sur les études menées par l'Institut de Recherche de Dehradun en Inde, Raj (1991) souligne que le traitement ayant donné les meilleures performances, consiste en l'application d'une couche de bitume chaud qui permet de réduire le pourcentage d'absorption d'eau à 12%. Dans son étude, Ghavami (1995) s'intéresse aussi à la question du traitement de surface du bambou. À partir d'une recension des solutions et traitements proposés par les chercheurs intéressés, il conclue que la solution bitumineuse la plus efficace est le *Négrolin* produit par la compagnie Sika.

Après 96 heures d'immersion, le bambou traité n'a absorbé que 4% d'eau, ce qu'il considère comme étant négligeable.

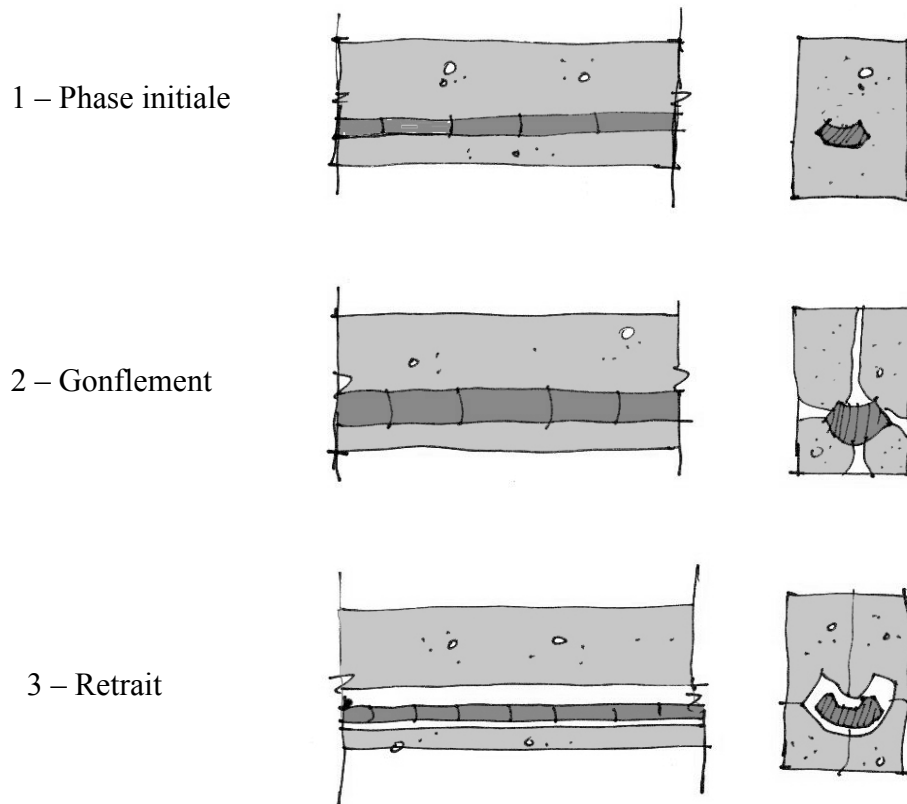


Figure 2.5 : Phénomène d'instabilité dimensionnelle du bambou dans le béton (Dessin : Jonathan Boucher 2003)

D'autres solutions utilisant des agents chimiques permettent également d'imperméabiliser le bambou. Toutefois, ces traitements ne doivent pas avoir d'effets sur les fibres et peuvent être injectés, après le processus de séchage, selon des méthodes simples, telles la transpiration, l'immersion et l'imprégnation. À cet effet, Hidalgo (2001) cite les travaux de Pama (1974) où il propose d'immerger le bambou dans une solution de chlorure de zinc à 2% ou dans une solution de néoprène mélangée à du sable.

L'équipe de Muchtadi et Adawiyah (2001) de la Faculté d'agriculture de l'Université de Bogor en Indonésie s'est également intéressée aux techniques de préservation du bambou. Ces chercheurs ont évalué l'efficacité de divers traitements et de solutions

chimiques avant le processus de séchage. Les traitements étudiés incluent la pré-cuisson et l'utilisation d'un agent anti-oxydant, soit le chlorure de sodium (NaCl) et le métabisulphite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ).

Les résultats démontrent que la pré-cuisson influence de façon significative la qualité des tiges. En effet, les tiges précuites se réhydratent plus rapidement et de façon plus significative (19 fois plus que le bambou séché) et elles présentent également une texture plus douce. Parmi les agents dessiccateurs, le métabisulphite de sodium (2000 ppm) s'avère le plus efficace contre le brunissage dû à l'oxydation de la matière à l'air libre. Cependant, l'étude permet aux chercheurs de constater que la submersion du bambou dans une solution d'acide ascorbique (0,05%) ne prévient pas le brunissage de la matière.

Les expérimentations de Muchtadi et Adawiyah (2001), bien qu'intéressantes, ne visent évidemment pas le traitement du bambou destiné à la réalisation d'armatures de béton. Comme le mentionnent leurs collègues Abdurachim et Firmanti (2001), en circonstances humides, le bambou devient un matériau hygroscopique absorbant l'humidité du béton. Il n'est donc pas souhaitable dans le cadre de cette présente étude que le bambou se réhydrate rapidement lorsqu'il est en contact avec le béton frais. La pré-cuisson n'est donc pas une technique intéressante pour le traitement des bambous destinés à la fabrication d'armatures de béton.

Étant donné sa simplicité et son moindre coût, la méthode de traitement traditionnelle énoncée précédemment par Raj (1991), combinée à l'application d'une solution bitumineuse proposée par Ghavami (1995), représente certes l'une des solutions les plus avantageuses pour la réalisation d'éléments de béton armé de bambou dans le cadre de cette recherche. Toutefois, il faut retenir que ces produits sont relativement coûteux, ce qui est un détail non-négligeable lorsque l'on désire intervenir dans des contextes économiques précaires, tel le Vietnam.

## 2.4 L'adhérence béton-bambou

Il est bien connu que l'adhérence entre les tiges de bambou et le béton est l'une des principales limites de la technologie des bétons armés de bambou. S'appuyant sur les travaux de Shui (1990), Raj (1995) avance que l'adhérence moyenne observée entre plusieurs espèces de bambou et le béton est de l'ordre de 0.25 à 0.5 MPa. D'ailleurs, Kankam et Perry (1989) ont mené une expérimentation afin de mieux comprendre les facteurs et les paramètres influençant l'adhérence béton-bambou. Ils ont tenté de déterminer l'influence du traitement du bambou et de la résistance du béton sur la qualité de l'adhérence entre le béton et les armatures de bambou, en tenant compte des variables suivantes :

- La valeur de la force en compression du béton;
- La présence de nœuds sur les tiges;
- La durée du séchage des tiges;
- Le sablage des surfaces de bambou;
- L'application d'un traitement au bitume avec et sans sable.

L'effet combiné d'une meilleure résistance à la compression du béton (44 MPa au lieu de 35 MPa), d'un séchage de quatre semaines et de la présence de nœuds sur les tiges semble avoir des résultats positifs sur l'adhérence. En effet, la valeur d'adhérence béton-bambou est de 1,13MPa pour des tiges sans nœuds et 2,04 MPa pour des tiges avec nœuds.

Il apparaît que les tiges de bambou ayant des nœuds obtiennent toujours une meilleure adhérence béton-bambou que celles sans nœuds. Les nœuds agissent comme des protubérances qui permettent au bambou de mieux s'agripper au béton.

Le séchage prolongé des tiges de bambou augmente l'adhérence du bambou au béton. En effet, la force ultime d'adhérence des tiges passe de 0,33MPa, sans

séchage, à 0,60MPa pour des tiges ayant séchées trois semaines à l'air libre. Selon les chercheurs, cela s'explique par le fait que les tiges sèches ont une meilleure stabilité dimensionnelle ce qui permet au bambou de rester ancré dans le béton et de conserver sa fonction d'armature.

Les éprouvettes avec des tiges de bambou dont la surface a été sablée ont une meilleure force d'adhérence (1,94 MPa) comparativement aux tiges demeurées intactes (1,65 MPa).

Enfin, le recouvrement des tiges par une couche de bitume semble améliorer l'adhérence de 12% tandis que le même traitement plus l'ajout de grains de sable repousse cette valeur à 27%. Les chercheurs expliquent ces résultats par le fait que les tiges imperméabilisées n'absorbent pas l'humidité contenue dans le béton frais et ne subissent donc pas le gonflement et le retrait qui occasionne la perte d'adhérence.

Ghavami (1995) arrive aux mêmes conclusions que Kankam et Perry (1989) dans son étude sur l'adhérence entre le béton et le bambou où une série d'essais d'arrachement (figure 2.6) ont été réalisés sur des tiges de bambou ayant été traitées différemment :

- tiges non-traitées ;
- tiges enduites de *Négrolin* mélangé à du sable ;
- tiges enduites de *Négrolin* mélangé à du sable et enroulées de fils métalliques de 1,5 mm de diamètre espacés à 4 cm.

Les résultats sont analysés considérant une distribution uniforme des charges le long des zones d'adhérence entre le béton et le bambou. Après avoir calculé la force d'adhérence, l'auteur remarque que les tiges enduites de *Négrolin* (solution bitumineuse) mélangé à du sable et enroulées de fils métalliques ont une adhérence avec le béton accrue de 90%.

Ferreira, Moreno et Beraldo (2001) ont obtenu des résultats semblables. Les chercheurs ont également tenté de trouver une façon d'accroître l'adhérence béton-bambou. Leurs essais prouvent que le recouvrement du bambou par un vernis et un grillage métallique offre le meilleur coefficient d'adhérence béton-bambou.

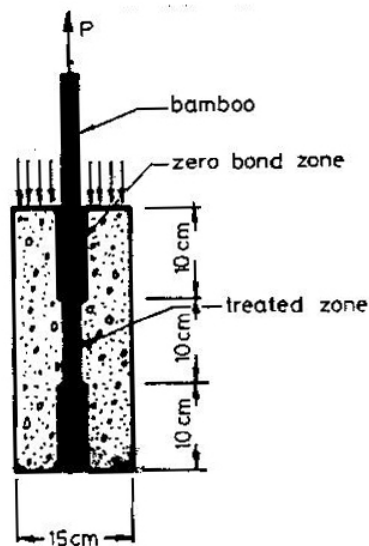


Figure 2.6 : Essai d'arrachement du bambou dans le béton (Ghavami, 1995)

En résumé, les études recensées démontrent qu'un séchage du bambou de quelques semaines, la présence de nœuds sur les tiges, le sablage, l'application d'un traitement hydrofuge, tel le *Négrolin*, mélangé à des grains de sable, le recouvrement des tiges par un grillage métallique ainsi qu'une résistance à la compression accrue du béton sont tous des facteurs qui contribuent à améliorer l'adhérence entre le béton et le bambou.

Désireux d'apporter une contribution supplémentaire à ces connaissances, Kawai (2001) s'est intéressé plutôt à la façon de tailler les armatures dans le but d'augmenter l'adhérence entre le béton et le bambou. Lors de son expérimentation, il réalisa des crénelures de 30 mm de longueur par 2 mm de profondeur dans la section longitudinale des lanières de bambou (figure 2.7). Ainsi ces protubérances exercent un meilleur accrochage au béton puisque les résultats obtenus montrent que les



armatures de bambou crénelées ont une adhérence de deux à trois fois supérieure à celle des armatures de bambou sans crénelures.

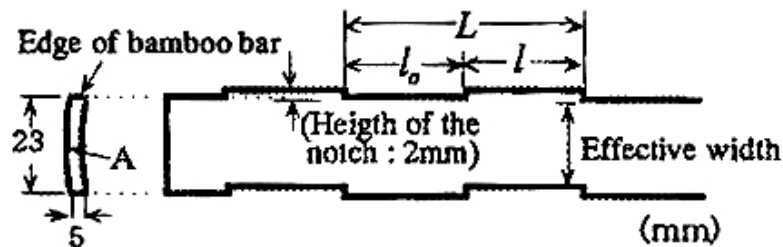


Figure 2.7 : Crénelage des lanières de bambou (Kawai 2001)

Néanmoins, Foudjet et Fomo (1995) affirment que les précédents résultats demeurent peu satisfaisants, si on les compare à l'adhérence acier-béton qui est très supérieure. Par conséquent, les auteurs proposent un procédé novateur : l'utilisation d'une structure périodique de confinement pour résoudre le problème d'adhérence. La technique de confinement consiste globalement à façonner les armatures de rotin ou de bambou en forme de cadres ayant un côté dans la zone comprimée (figure 2.8). La longueur de la tige de rotin pouvant atteindre 150 cm et plus, le problème de recouvrement ne se pose pas dans l'utilisation de cette technique de confinement. Le façonnage des cadres se fait à l'aide d'un bec à gaz, car, en chauffant le rotin aux endroits à plier, il se plastifie aisément et garde la forme imposée après refroidissement.

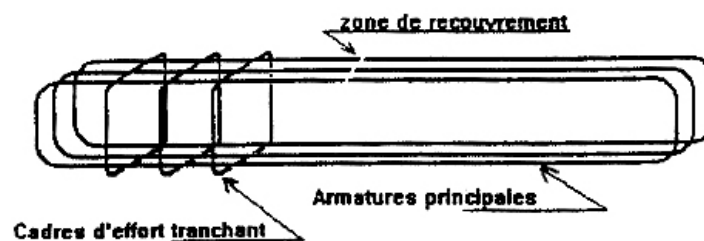


Figure 2.8 : Structure périodique de confinement, Foudjet et Fomo (1989)

Par leur expérimentation, Foudjet et Fomo (1989) cherchent à obtenir la contrainte de cisaillement qui serait développée à la limite de la rupture du rotin par traction. En

supposant que l'adhérence limite ( $\tau_e$ ) se produit au moment de la rupture en traction du rotin, les auteurs la déterminent par l'équation suivante :

$$\tau_e = \sigma_{rt} S_f \tau_{al} / F_{al}$$

À partir des essais d'arrachement, il est démontré que l'adhérence apparente varie de 2,8 MPa à 5,4 MPa pour des contraintes de rupture en traction du rotin allant de 52 à 100 MPa. Sachant que les contraintes d'adhérence du bambou et de l'acier dans le béton sont supérieures à celles du rotin et que la contrainte de rupture en traction du bambou peut atteindre 400 MPa, les chercheurs avancent que la valeur de  $\tau_e$  serait d'environ 20 MPa si ce procédé était appliqué au bambou. Ceci reviendrait à multiplier par environ 50 les valeurs d'adhérence du bambou atteintes par d'autres procédés. Cette valeur approche celle de 25 MPa couramment admise pour l'adhérence acier-béton.

Foudjet et Fomo (1995) soulignent que les recherches conduites précédemment pour améliorer les valeurs d'adhérence entre le béton et les matières ligneuses ont permis de multiplier les valeurs de la contrainte d'adhérence par trois ou quatre. Avec la méthode d'utilisation d'une structure périodique de confinement, les auteurs ont pu les multiplier par 50. Ils affirment donc que leur technique s'avère très efficace et laisse espérer des lendemains meilleurs pour l'association matière ligneuse-béton.

Toutefois, les essais réalisés par Foudjet et Fomo (1989) ont été menés sur des éprouvettes armées de rotin. Les résultats anticipés pour des armatures de bambou ne sont donc que pures spéculations et il serait nécessaire de faire subir le même test expérimental à d'autres matières ligneuses, le bambou par exemple, afin de vérifier la fiabilité de cette technique. En ce sens, les travaux de Ghavami (1995), de Kankam et Perry (1989) ainsi que ceux de Ferreira, Moreno et Beraldo (2001) s'avèrent plus fiables que ceux de Foudjet et Fomo (1995). Il n'est peut être pas souhaitable du point de vue scientifique, d'associer le bambou à un autre matériau, tel le rotin. Nous avons vu que le bambou a des propriétés physiques et mécaniques

qui lui sont particulières. Néanmoins, les travaux de Foudjet et Fomo (1995) amènent de nouvelles pistes de recherche qui pourraient s'avérer prometteuses si elles sont concrètement appliquées au bambou.

## **2.5 L'utilisation du bambou comme armature dans le béton: le cas des poutres**

Grâce à ses fibres longitudinales qui lui donnent une résistance élevée en tension, il le bambou peut être utilisé pour remplacer l'acier comme armature dans les éléments de béton, telles les poutres. Tous les auteurs recensés s'accordent pour dire que les équations et les procédures de design pour le béton armé d'acier peuvent être employées de façon tout à fait sécuritaire pour la conception des poutres de béton armé de bambou. Dans les équations, les valeurs (rupture en tension, module d'élasticité) reliées à l'acier sont remplacées par celle du bambou.

Quant à la préparation des armatures de bambou, quelques recommandations ont été formulées pour obtenir de meilleures performances. Balaguru (1985) conclut que la largeur des lanières doit se situer entre 20 et 25 mm et que l'espace entre celles-ci doit être au moins égal à la largeur des armatures plus 7,5 mm ou au diamètre maximal des granulats. De plus, il souligne que le côté concave des lanières doit être orienté vers le haut, de manière à ne pas emprisonner des bulles d'air lors de la coulée, ce qui nuirait à l'adhérence béton-bambou.

À partir de ces constats, Ferreira, Moreno et Beraldo (2001) ont évalué les performances structurales des poutres de béton armé de bambou. Pour ce faire, quatre poutres de section transversale rectangulaire de 15 cm x 20 cm et de 1,8 m de longueur ont été fabriquées. Les propriétés sont résumées au tableau 2.1.

*Tableau 2 : Performances structurales des poutres  
(Ferreira, Moreno et Beraldo, 2001)*

|          |  |
|----------|--|
| Poutre 1 | Double armature d'acier longitudinale servant de groupe contrôle.  |
| Poutre 2 | Les mêmes attributs que la poutre 1, sauf qu'elle possède une rangée d'armature supplémentaire en bambou sans traitement |
| Poutre 3 | Reprend les caractéristiques de la 2 <sup>e</sup> en plus d'un recouvrement de grillage d'acier sur les tiges de bambou  |
| Poutre 4 | Idem à la 3 <sup>e</sup> , ajoutée d'une rangée d'armatures supplémentaire espacée à 5 cm de la première rangée.         |

Pour l'essai, une charge de 200 kg est appliquée à tous les 60 cm sur la longueur de chacune des poutres. Des jauges placées sous les poutres permettent de mesurer les déformations. Les résultats démontrent que plus la quantité d'armature de bambou augmente, plus la résistance à la flexion des poutres augmente tandis que les déformations diminuent. Selon Raj (1989), la décision quant au pourcentage d'armature utilisée dans le béton dépend de plusieurs facteurs, tel le type de structure, la résistance requise, l'économie, etc. L'auteur réfère aux travaux de Glenn (1950) pour recommander un pourcentage optimum de 4 à 5% de la section de la pièce de béton (poutre, dalle, colonne).

Ghavami (2001) expérimenta lui aussi l'utilisation de lanières de bambou comme armatures. Dans le cadre de son expérimentation, des poutres de béton de 12 x 30 x 300 cm furent fabriquées (figure 2.9). Les résultats démontrent qu'un ratio d'une section transversale du bambou par rapport à la section transversale de la poutre équivalent à 3% permet d'accroître de 400% la charge admise pour une poutre sans armature. De toute évidence, le point de vue de l'auteur quant à l'efficacité des armatures de bambou rejoint celui de Ferreira, Moreno, Beraldo (2001) et Raj (1991).

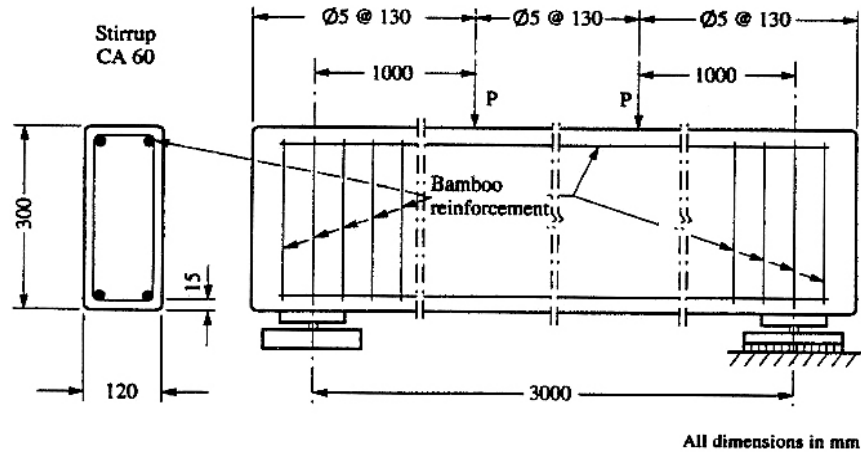


Figure 2.9 : Réalisation d'une poutre de béton armé de bambou (Ghavami 1995)

Cependant, Ghavami (1995) remarque que les déformations d'une poutre armée de bambou augmentent de façon significative comparativement aux déformations observées sur la poutre armée d'acier (figure 2.10). L'auteur attribue ce phénomène au faible module d'élasticité du bambou qui est 15 fois inférieur à celui de l'acier de même qu'à l'adhérence plus faible entre le bambou et le béton. Toutefois, la fissuration semble moins importante sur la poutre armée de bambou que sur la poutre armée d'acier ce qui serait également dû au faible module élastique du bambou. Quoiqu'il en soit, Balaguru et Shah (1985) soutiennent que la technologie des bétons armés de bambou devrait se limiter aux bâtiments de petite échelle. (comme l'habitation dans les pays en développement).

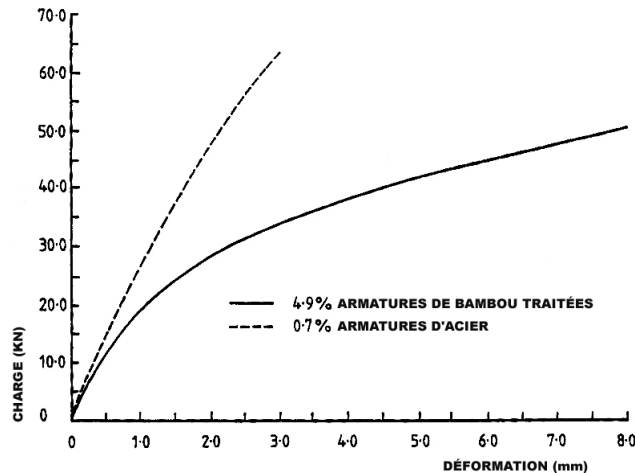


Figure 2.10 : Courbe contrainte-déformation, (Balaguru 1985)

La plupart des recherches sur la technologie des bétons armés de bambou portent sur les propriétés, les traitements et la transformation du bambou. Très peu d'études s'intéressent pour le moment à la mise au point et au développement du béton. De façon générale, les chercheurs partagent le même avis quant aux précautions à prendre lors de la fabrication des bétons. Par exemple, Balaguru (1985) et Brink (1966) soutiennent que la dimension des granulats ne doit pas dépasser 10 à 12 mm et qu'un ratio eau/ciment abaissé est préférable afin de limiter l'absorption d'eau par le bambou. De plus, ils soutiennent que le béton doit offrir une résistance en compression d'au moins 20 MPa pour assurer la durabilité des éléments fabriqués. La plupart d'entre eux utilisent un béton conventionnel composé de ciment de Portland.

Toutefois, Abdurachim et Firmanti (2001) ont travaillé à la mise au point d'un mélange de béton économique destiné à la construction dans les pays en développement. Ces chercheurs sont d'avis que le ciment de Portland, une composante importante du mélange, est devenu trop coûteux. Ceux-ci travaillent à développer un matériau alternatif, notamment le ciment pouzzolane. Les pouzzolanes se présentent sous la forme d'une fine poudre comme le ciment Portland. Constituées principalement de silice amorphe, elles réagissent chimiquement avec l'eau et la

chaux pour faire prise et durcir. Elles peuvent être d'origine naturelle (cendres volcaniques, écorce de riz brûlé, etc.) ou provenir de sous-produits industriels (cendres volantes, laitiers de haut fourneaux, fumée de silice). Elles sont généralement utilisées en remplacement partiel du ciment Portland (elles réagissent alors avec la chaux qui est naturellement dégagée par l'hydratation du ciment Portland) à des dosages variant entre remplaçant 5 à 10% (Neville, 1998). Des recherches ont cependant démontré qu'on peut les utiliser à des dosages allant jusqu'à 70% pour produire des bétons de faible résistance mécanique (environ 20 MPa en compression) (Malhotra et al., 1995).

Pour leurs essais, Firmanti et Abdurachim (2001), ont réalisé une maison avec une structure de béton armé de bambou. Deux types de mortiers furent préparés pour l'occasion, soit un mélange pouzzolane (avec fumée de silice) mélangé à des granulats fins et un ciment de Portland conventionnel. Différents mélanges de ciment pouzzolane furent testés suivant des ratios de 1 :3, 1 :5 et 1 :7. À partir des résultats obtenus, les chercheurs ont conclu qu'en suivant les standards indonésiens de la construction, le mortier pouzzolane dans un rapport 1 :3 peut être utilisé de façon sécuritaire, car il s'avère tout aussi performant qu'un béton conventionnel (ciment Portland) tout en étant moins dispendieux.

## Chapitre 3 - Fabrication et mise à l'essai d'un prototype de plancher en laboratoire

### 3.1 La sélection d'une espèce de bambou pour le Vietnam, survol du portrait vietnamien

Le Vietnam possède 9302 millions d'hectares de forêts, ce qui représente 28,2% de la superficie totale du territoire. Les terres agricoles couvrent 33 millions d'hectares tandis que 1049 millions d'hectares sont exploitées à des fins de plantations (Duyen 1995). Le tableau 3 illustre le portrait forestier du Vietnam.

Tableau 3 : Portrait forestier vietnamien (Duyen 1995)

| Type de forêt       | Superficie<br>(acres) | Pourcentage<br>(%) |
|---------------------|-----------------------|--------------------|
| Superficie          | 9 302 200             | 100                |
| Forêt naturelle     | 8252 500              | 88.5               |
| Arbres (bois)       | 6 787 000             | 73.0               |
| Bambou              | 846 000               | 9.0                |
| Mixte (bois-bambou) | 618 900               | 6.5                |
| Plantation          | 1 049 700             | 11.5               |

Le Vietnam est sous l'influence d'un climat tropical caractérisé par de hautes températures et une humidité élevée, conditions propices à la croissance du bambou. Selon l'inventaire forestier de 1993 réalisé par l'Institut des Sciences de la Forêt du Vietnam, le bambou représente 11,4% du portrait forestier vietnamien avec 5 551 milliards de plants de bambou. On retrouve le bambou principalement dans les forêts humides et denses, mais également sur l'ensemble du territoire, près des côtes, dans les plaines, en basses comme en hautes altitudes. Certaines espèces, telle le *Bambusa Stenostachya* tolèrent des conditions d'immersion pendant plus d'un mois.



Selon Pham Hoang Ho (1994), on retrouve 20 familles de bambou pour un total de 85 espèces (Annexe 1). On retrouve quelques une de ces espèces à l'état naturel dans de larges proportions au Nord du Vietnam . Il s'agit du :

- *Arundinaria griffithii*
- *Indosasa crassifolia*
- *Taeniostachyum dullooa* (*Schizostachyum dullooa*)
- *Dendrocalamus sericeus*
- *Dendrocalamus hamiltonii*
- *Phyllostachys bambusoides*

L'ensemble des espèces de bambou est principalement concentré dans 4 grandes régions :

- au centre de la région nordique vietnamienne ;
- dans la partie centrale-nord du Vietnam ;
- sur les hauts plateaux centraux ;
- dans le sud-est vietnamien.

Parmi les espèces recensées, certaines sont considérées comme ayant un potentiel économique important telles que:

- *Indosasa crassifolia*
- *Bambusa procera*
- *Bambusa stenostachya*
- *Dendrocalamus membranaceus*
- *Dendrocalamus asper*
- *Dendrocalamus sericeus*
- *Dendrocalamus giganteus*
- *Dendrocalamus latiflorus*
- *Phyllostachys pubescens*

Ces espèces sont couramment utilisées comme matériaux de construction, dans l'industrie papetière, dans la fabrication de meubles et dans l'artisanat. Le Vietnam possède également 14 espèces endémiques (Annexe 1) et 3 jugées en voie d'extinction : la *chimonobambusa quadrangulis* (cette espèce est l'une des plus rare du Vietnam et se retrouve dans une zone très restreinte), la *phyllostachys nigra* et la *phyllostachys bambusoides*. Le travail de conservation des espèces de bambou a débuté en 1990. Certaines espèces sont conservées dans des zones écologiques ou des jardins spécialement créés pour la recherche et le développement. Selon un rapport du Ministère de la Forêt paru en 1995, les zones destinées à la plantation du bambou recouvraient, en 1989, 43 700 acres. Depuis, on retrouve 37 300 acres de plantation de bambou dans la province de Thanh Hoa avec 28 000 acres consacrés à la culture du *dendrocalamus membranaceus*. Dans la province de Caobang, 510 acres de forêt essentiellement composée de *phyllostachys pubescens* et de *phyllostachys bambusoides* ont été aménagés. D'autres espèces comme le *Indosasa crassifolia*, le *bambusa stenostachya*, le *dendrocalamus Asper* et le *dendrocalamus giganteus* sont cultivées à petite échelle. Les espèces ayant la plus grande valeur économique ont été surexploitées, ce qui a entraîné une diminution de la ressource.

### 3.2 Sélection d'une espèce particulière pour la fabrication des poutres de béton armé de bambou.

Afin de protéger les espèces vulnérables, il convient de sélectionner une espèce dont l'abondance assure la pérennité de la ressource malgré une exploitation commerciale à petite échelle. Pham Hoang Ho (1994) identifie d'ailleurs 6 espèces que l'on retrouve abondamment dans le nord du Vietnam, dans un environnement relativement près de Hanoi. Parmi celles-ci, l'une se retrouve également dans la liste des espèces ayant une valeur commerciale ou un potentiel d'utilisation pour des matériaux de construction. Il s'agit du *dendrocalamus sericeus*. Cette espèce pourrait en effet convenir à la fabrication d'armature de bambou dans la fabrication des poutrelles.

L'utilisation et l'exploitation de cette espèce doit se faire de manière à ne pas dégrader l'environnement dans lequel elle pousse tout en assurant la survie de

l'espèce. Depuis très longtemps, le bambou a été implanté près des digues, des berges et des villages pour prévenir l'érosion des sols. Le prélèvement des tiges dans la nature doit se faire de manière à couper au maximum la moitié des tiges d'un plant. Après 4 à 5 ans, le plant aura retrouvé sa taille initiale. La période de coupe doit s'effectuer de novembre à avril et seules les tiges de 3 ans et plus peuvent être prélevées.

### **3.2.1 La sélection d'une espèce de bambou pour la réalisation des essais au Québec**

Étant donné que le contexte d'intervention n'est pas le même que le lieu d'expérimentation, il fut difficile de sélectionner une espèce disponible au Vietnam et que l'on peut se procurer au Québec. La disponibilité et l'accessibilité de la matière furent donc les principaux facteurs pris en compte pour la sélection de l'espèce de bambou utilisée à Québec. Aucune espèce de bambou ne pousse à l'état naturel et il n'est pas possible d'en faire la culture au Québec étant donné la rudesse du climat hivernal. Ainsi, 16 tiges de bambou ont été achetées chez un distributeur de matériaux de construction. Importée de Chine, l'espèce acquise demeure inconnue. Le diamètre moyen est d'environ 90 mm pour une longueur moyenne de 3 m. Toutes les tiges ont été séchées préalablement.

### *3.3 La préparation des armatures de bambou*

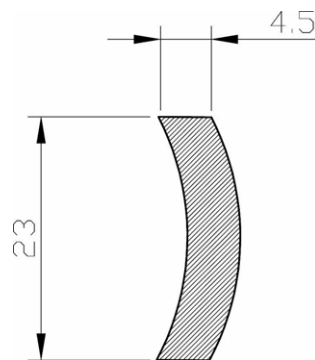
Les tiges acquises étaient dénuées de parties internes spongieuses vulnérables à la décomposition (Hidalgo 2001). Il s'avère que les sections de tiges montraient une densité et une texture homogène de la paroi externe jusqu'à la paroi interne. Il ne fut donc pas nécessaire, dans le cas présent, de retirer une partie des tiges de bambou comme le suggère Raj (1991). L'intégralité des tiges a donc pu être transformée en armature.

À l'aide d'un couteau à lame fine, les tiges ont été découpées en lanières de 23 x 4,5 mm soit l'épaisseur de la paroi des tiges, tel que le recommande Kawai (2000) et

Balaguru (1985) (figures 3.1 et 3.2). Le découpage se fit aisément dans le sens des fibres. Cinq armatures furent taillées en moyenne dans une tige de bambou.



*Figure 3.1 : Découpage des armatures (Photo par Jonathan Boucher 2003)*



*Figure 3.2 : Dimensions et forme d'une section de lanière de bambou*

### 3.4 *Les méthodes de préservation des tiges de bambou*

La couleur et la texture des tiges de bambou que nous avons utilisées pour nos essais indiquent que ces tiges ont subi un premier traitement d'immersion et de séchage selon la méthode traditionnelle décrite précédemment (Raj,1991). Ce traitement essentiel constitue le moyen le plus simple et le moins coûteux pour assurer la conservation des tiges de bambou. Il demeure que, dans un environnement humide,

le bambou devient un matériau hygroscopique qui absorbe l'eau du béton (Abdurachim et Firmanti, 2001). Pour la fabrication de nos poutres armées de bambou, il est donc nécessaire d'imperméabiliser les lanières de bambou pour éviter qu'elles s'imbibent d'eau au contact du béton frais et que leur gonflement ne fasse éclater le béton qui les recouvre.



*Figure 3.3 : Lanières de bambou (photo par Jonathan Boucher, 2003)*

Afin de bien les imperméabiliser, les tiges de bambou furent sablées et enduites d'un agent hydrofuge reconnu pour préserver la matière ligneuse (figure 3.4). Nous avons choisi le *SIKAFLOOR 90*, produit par la compagnie Sika, en raison de son efficacité supérieure (Ghavami 1995) et de la présence de la compagnie au Vietnam. Ce produit est une résine époxyde claire sans solvant à basse viscosité insensible à l'humidité et conçu pour une multitude d'usages. Son application est rapide et elle s'effectue au pinceau.



*Figure 3.4 : Application du SIKAFLOOR 90 (photo par Jonathan Boucher, 2003)*

### 3.5 L'adhérence béton-bambou

Concernant la question de l'adhérence béton-bambou, les travaux de Ghavami (1995), de Kankam et Perry (1989) ainsi que ceux de Ferreira et al. (2001) s'avèrent les meilleures références. Nous avons donc suivi leurs recommandations :

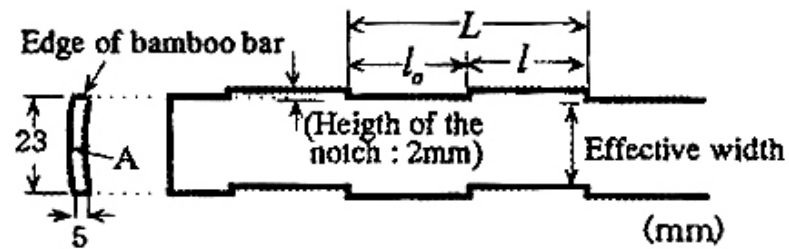
- S'assurer d'un séchage des tiges de bambou de 4 semaines
- Utiliser des tiges avec des nœuds
- Sabler les surfaces des armatures
- Appliquer un traitement hydrofuge (SIKAFLOOR 90)
- Enrober les tiges avec du sable de silice (figure 3.5)

S'inspirant des travaux de Kawai (2001), nous avons aussi choisi d'entailler les lanières de bambou pour leur conférer un meilleur ancrage mécanique au béton (l'adhérence s'en trouve doublée ou même triplée). Ainsi des crénelures de 30 mm de longueur par 2 mm de profondeur furent pratiquées dans la section longitudinale des lanières de bambou (figures 3.5 à 3.8). Cette étape fut réalisée avant l'application

de la résine époxyde à la section 4.3, de manière à ne pas rompre l'intégralité de l'imperméabilisation.



*Figure 3.5 : Application des grains de silice (photo par Jonathan Boucher, 2003)*



*Figure 3.6 : Crénelage des lanières de bambou (Kawai, 2001)*



Figure 3.7 : Confection des crénelures à l'aide d'une ponceuse à ruban  
(photo par Jonathan Boucher, 2003)



Figure 3.8 : Crénelures (photo par Jonathan Boucher, 2003)

Pour assurer une bonne adhérence entre le bambou et le béton, nous avons également respecter les recommandations de Balaguru (1985) à savoir que :

- La distance entre les lanières doit être au moins égal à la largeur des armatures plus 7,5 mm ou supérieur à la dimension maximale des granulats.



- La face concave des lanières ne doit être orientée vers le bas, de manière à ne pas emprisonner des bulles d'air lors de la coulée du béton.



Figure 3.9 : Les armatures après les traitements d'imperméabilisation et d'amélioration de l'adhérence (photo par Jonathan Boucher, 2003)

### 3.6 *Dimensionnement structural de la poutrelle de béton armé de bambou*

Comme on a pu le constater au chapitre 3, les auteurs s'accordent pour dire que les équations et les procédures de design pour le béton armé d'acier peuvent être employées de façon tout à fait sécuritaire pour la conception des poutres de béton armé de bambou. Dans les équations, les propriétés mécaniques de l'acier sont alors remplacées par celle du bambou.

#### 3.6.1 *Propriétés mécaniques du bambou*

Selon YANG (1998), il existe plus de 1250 variétés de bambou. De nombreuses études se sont employées à mesurer les propriétés mécaniques de plusieurs de ces variétés. Ces études ont démontré que, comme l'acier, le bambou montrait un comportement linéaire élastique lorsqu'il est sollicité en traction. La littérature scientifique révèle que la résistance ultime du bambou à la traction ( $F_y$ ) varie

entre 120 et 230 MPa, alors que son module élastique (E) se situe entre 6 et 12 GPa. (Balaguru 1985). Comme cette plage de valeurs est très large et plus ou moins applicable, nous avons voulu mesurer en laboratoire les propriétés mécaniques de l'espèce de bambou que nous avons utilisée dans nos essais comme le suggèrent Ferreira, Moreno et Beraldo (2001). Il s'agit d'une variété commune en Chine que l'on retrouve chez les marchands de matériaux de construction.

### 3.6.2 *Mesure de la résistance à la traction de nos lanières de bambou*

L'essai de traction sert à mesurer la résistance d'un matériau soumis à une force statique ou d'application progressive. Une éprouvette est serrée dans les mâchoires de l'appareil d'essai et une charge est appliquée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Une jauge de déformation (extensomètre) mesure l'élongation. La contrainte obtenue à la force appliquée la plus élevée est la résistance à la traction du matériau testé. La limite d'élasticité est la contrainte pour laquelle une portion spécifique de déformation plastique est produite. L'allongement ( $\Delta L$ ) est défini par la proportion d'étirement de l'éprouvette avant rupture. Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette; l'autre extrémité est fixée à une traverse mobile (figure 3.10).

Plusieurs éprouvettes de bambous ont été fabriquées en suivant les recommandations prescrites dans la littérature (RAJ, 1991). Suite à des essais préliminaires, la géométrie des éprouvettes (figure 3.11) a dû être adaptée afin de s'assurer que la rupture survenait dans le corps central de l'éprouvette (figure 3.12) et non au niveau de têtes d'ancrage où les concentrations de contrainte sont plus élevées. Au final, trois éprouvettes ont été testées et ont donné des résultats comparables.

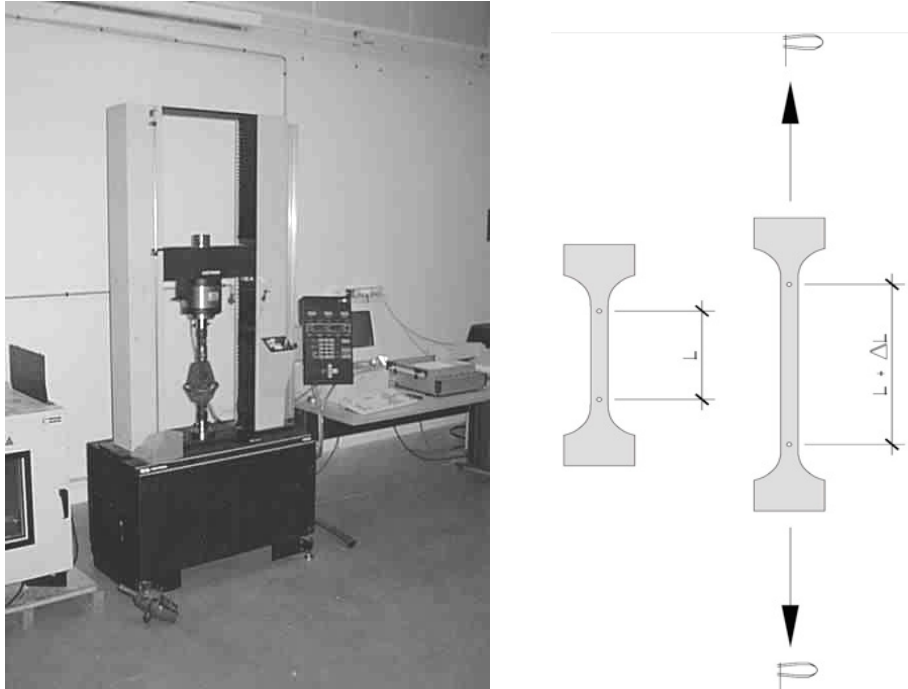


Figure 3.10 : Essai de traction sur une éprouvette de bambou (Jonathan Boucher, 2004)

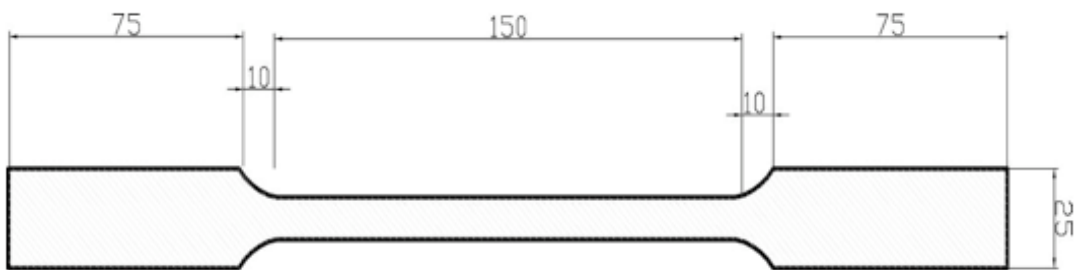


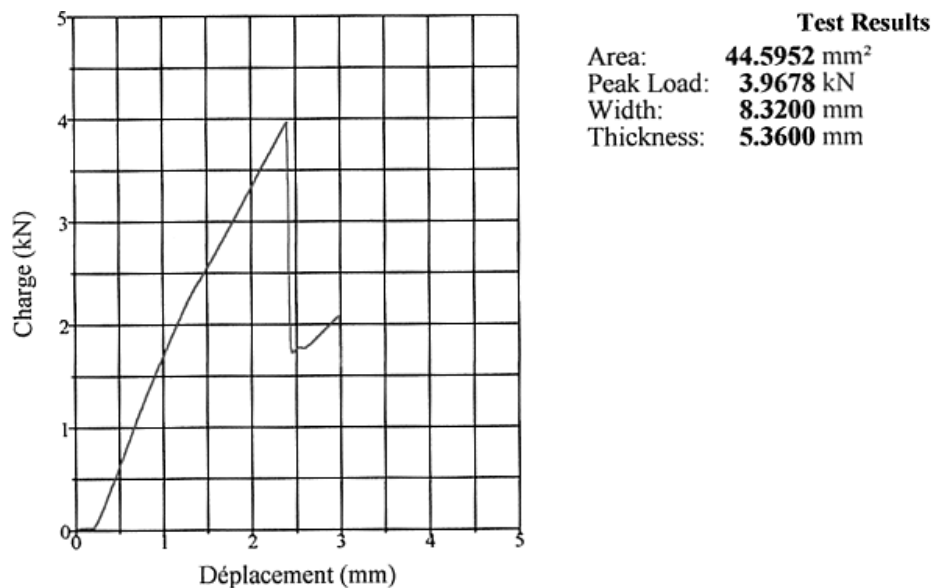
Figure 3.11 : Forme et dimensions (unités en mm) des éprouvettes de bambou utilisées pour les essais de traction (illustration de Jonathan Boucher, 2004)



Figure 3.12 : Éprouvette de bambou après rupture (photo par Dany Blackburn, 2004)

La figure 3.13 montre la relation entre la charge et le déplacement ( $\Delta L$ ) obtenue lors d'un essai de traction sur une éprouvette de bambou. On observe un comportement

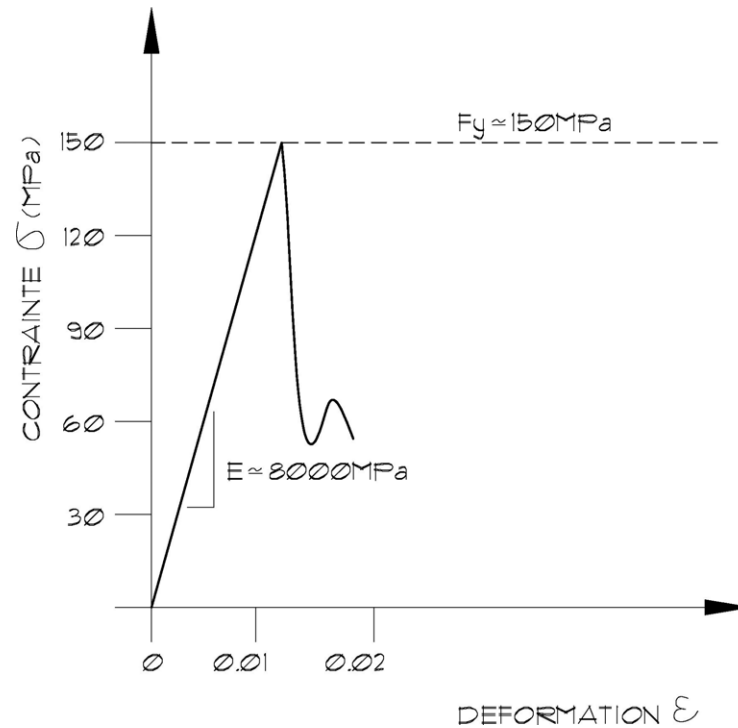
pratiquement linéaire jusqu'à la charge de rupture<sup>8</sup>. La rupture est dite fragile car la charge chute brutalement après l'atteinte de la charge maximale. Toutefois, la reprise de charge est importante après cette première rupture car on remarque que, après avoir chuté de moitié, la charge remonte par la suite. Ce comportement est semblable à celui que l'on observe pour le bois de construction et il assure au matériau une ductilité suffisante pour être utilisé dans des applications structurales.



**Figure 3.13** : Relation entre la charge et le déplacement mesurée lors d'un essai de traction sur une éprouvette de bambou

La figure 3.14 présente de façon schématique (à partir de la moyenne des résultats obtenus sur les trois éprouvettes testées) les mêmes résultats mais en remplaçant la relation charge vs déplacement pour une relation contrainte vs déformation. La contrainte ( $\sigma$ ) est simplement obtenue en divisant la charge ( $P$ ) par la section de l'éprouvette ( $A$ ) c'est-à-dire  $\sigma = P/A$ . La déformation ( $\epsilon$ ) est obtenue en divisant l'allongement ( $\Delta L$ ) par la distance initiale entre les deux points de mesure sur l'éprouvette ( $L$ ) :  $\epsilon = \Delta L/L$ .

<sup>8</sup> Au tout début de l'essai on remarque une déformation d'environ 0,25 mm sans augmentation de charge. Cette déformation correspond simplement à un glissement entre l'éprouvette de bambou et les têtes de serrage de l'appareil.



**Figure 3.14** : Relation entre la contrainte ( $\sigma$ ) et la déformation ( $\epsilon$ ) mesurée sur les éprouvettes de bambou

La figure 3.14 montre que la contrainte de rupture, ou limite élastique ( $F_y$ ) est égale à environ 150 MPa alors que le module élastique ( $E$ ), qui correspond à la pente de la courbe  $\sigma$  vs  $\epsilon$  est égal à environ 8000 MPa. Comme son nom l'indique, le module élastique définit la rigidité du matériau (plus  $E$  est élevé, moins le matériau est déformable). Évidemment, ces valeurs varient légèrement d'une éprouvette à l'autre. Pour nos calculs structuraux, nous avons donc utilisé une limite élastique ( $F_y$ ) de 150 MPa et un module élastique ( $E$ ) de 8000 MPa.

Par comparaison, l'acier doux de charpente possède une résistance à la traction de 300 MPa et un module élastique de 200 000 MPa. On peut donc en conclure que le bambou est environ 2 fois moins résistant que l'acier (150 MPa vs 300 MPa) et 25 fois moins rigide que l'acier (8000 MPa vs 200 000 MPa). La faible rigidité du bambou rend les poutres de béton armé de bambou beaucoup plus déformables que les poutres de béton armé d'acier. Cela constitue un handicap important pour les poutres de longues portées qui sont lourdement chargées, car la déformation

constitue alors un élément de dimensionnement important. Pour notre application cependant, cette faible rigidité n'est pas pénalisante, car nous avons affaire à des poutres de courtes portées (environ 4 m) faiblement chargées. Quant à la plus faible résistance du bambou par rapport à l'acier, elle peut être compensée en doublant l'aire de la section des armatures de bambou.

### 3.6.3 Calcul de la résistance à la flexion d'une poutre armée de bambou

Nos essais de laboratoires ont déjà permis d'estimer les propriétés mécaniques du bambou ( $F_y = 150$  MPa et  $E = 8000$  MPa). En supposant un comportement élastique, la déformation à la rupture ( $\epsilon_{rupt}$ ) est donc égale à :

$$\epsilon_{rupt} = \frac{\sigma}{E} = \frac{150}{8000} = 0,0188 \quad (1)$$

Le béton utilisé pour la fabrication des poutres était un béton autoplaçant de haute performance avec les propriétés suivantes (Blackburn, 2005) :

- Résistance à la compression :  $f_c = 80$  MPa
- Module élastique :  $E = 40\,000$  MPa
- Déformation à la rupture :  $\epsilon_{rupt} = 0,002$

Le dimensionnement structural des poutres est basé sur l'hypothèse de Navier-Stokes qui veut que les sections planes restent planes et que le profil des déformations longitudinales varie linéairement sur toute l'épaisseur de la poutre (figure 3.15).

L'axe neutre définit l'élévation sur la poutre où la déformation longitudinale est nulle. Tous les points de la poutre situés au-dessus de l'axe neutre sont sollicités en compression alors que tous les points situés en dessous de cet axe neutre sont sollicités en traction.

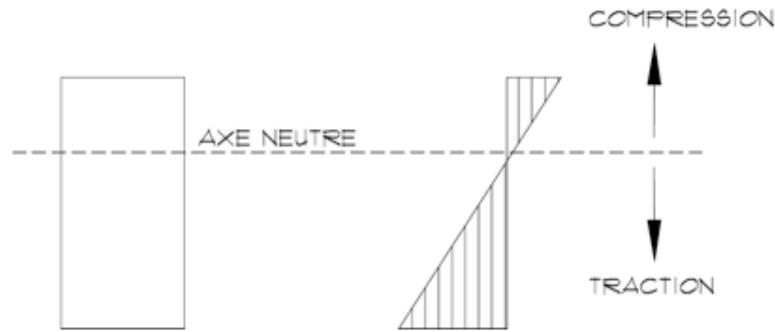


Figure 3.15 : Hypothèse de Navier-Stokes

La rupture d'une poutre de béton armé peut survenir de trois façons différentes. Dans un premier cas de figure, on peut atteindre l'allongement à la rupture du béton avant celui des armatures. La résistance de la poutre est alors gouvernée par la rupture du béton et, comme cette rupture est fragile, l'emploi de ce type de poutre est prohibé par les normes, car il peut conduire à l'effondrement des planchers. Dans un deuxième cas de figure, on peut atteindre l'allongement à la rupture des armatures avant celui du béton. On est alors en présence d'une rupture ductile qui préserve l'intégrité structurale du plancher. C'est ce type de rupture qui est imposé par les normes. Le troisième cas de figure survient lorsque l'on atteint l'allongement à la rupture du béton en même temps que celui des armatures. On dit alors que les conditions sont « balancées » et cela nous permet de déterminer la quantité maximale d'armatures qui sera autorisée dans la poutre. La figure 3.16 illustre ces conditions.

La variable  $a$  définit la position de l'axe neutre par rapport à la fibre supérieure de la poutre et la variable  $d$  représente la distance entre cette même fibre supérieure et le centre de gravité des barres d'armatures. Tout le béton situé au dessus de l'axe neutre est sollicité en compression (C). Le béton situé en dessous de l'axe neutre est tendu et comme sa résistance à la traction est très faible, on considère qu'il est fissuré que sa contribution structurale est nulle. L'effort de traction (T) sera donc entièrement repris par les armatures.

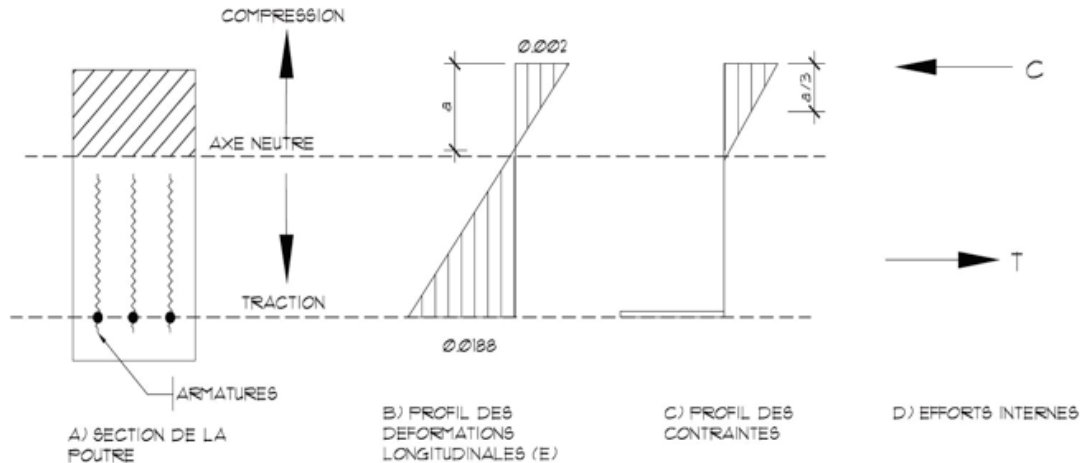


Figure 3.16 : Conditions balancées

Puisque les déformations aux fibres extrêmes sont connues ( $\varepsilon = 0,002$  et  $0,0188$ ), la position de l'axe neutre ( $a$ ) est obtenue géométriquement par triangle semblables :

$$\frac{a}{0,002} = \frac{d}{0,002 + 0,0188} \quad (2)$$

D'où :

$$a = \frac{0,002}{0,002 + 0,0188} d = 0,096d \quad (3)$$

Cela signifie que la zone de béton sollicitée en compression représente moins de 10% de l'épaisseur totale de la poutre. L'effort de compression dans le béton ( $C$ ) est obtenu à partir du profil des contraintes triangulaire:

$$C = \frac{\phi_c f_c ab}{2} \quad (4)$$

Où  $b$  correspond à la largeur de la poutre.

Le coefficient tenu ( $\phi_c$ ) est un coefficient de sécurité qui prend en compte la variabilité de la résistance à la compression du béton. Selon les normes canadiennes, on a ( $\phi_c = 0,7$ ). Cela signifie que, dans les calculs structuraux, on ne prend en compte



que 70% de la résistance à la compression du béton. L'effort de traction dans les armatures en bambou est obtenu simplement :

$$T = \phi_b A_b F_y \quad (5)$$

Où  $A_b$  correspond à l'aire de section des armatures en bambou.

Nous avons choisi de retenir un coefficient de tenue de 0,8 pour le bambou ( $\phi_b = 0,8$ ) pour tenir compte de la variabilité de résistance intrinsèque à ce matériau. Nous pensons en effet que ce matériau est plus homogène que le bois ( $\phi_{\text{bois}} = 0,7$ ). Par comparaison, le coefficient de tenue de l'acier ( $\phi_{\text{acier}}$ ) est égal à 0,9. L'équilibre statique des efforts internes exige que la force de compression  $C$  soit égale à la force de traction ( $T$ ) d'où :

$$C = T \rightarrow \frac{\phi_c f_c ab}{2} = \phi_b A_b F_y \quad (6)$$

En arrangeant les termes on obtient:

$$A_b = \frac{\phi_c f_c ab}{\phi_b F_y 2} = \frac{0,7}{0,8} \times \frac{80}{150} \times 0,096 db = 0,045 bd \quad (7)$$

Parce que le module élastique du bambou est très faible, la section des barres d'armatures en bambou dépasse habituellement la valeur de  $A_b$  associée aux conditions balancées contrairement au béton renforcé d'armatures en acier où la quantité d'armature est toujours inférieure à celle définie par les conditions. La résistance des poutres renforcées de bambou est donc gouvernée par la rupture du béton et non par la rupture des armatures comme dans le béton armé conventionnel. On doit donc reprendre l'équilibre des efforts internes en fonction de ces conditions. (figure 3.17).

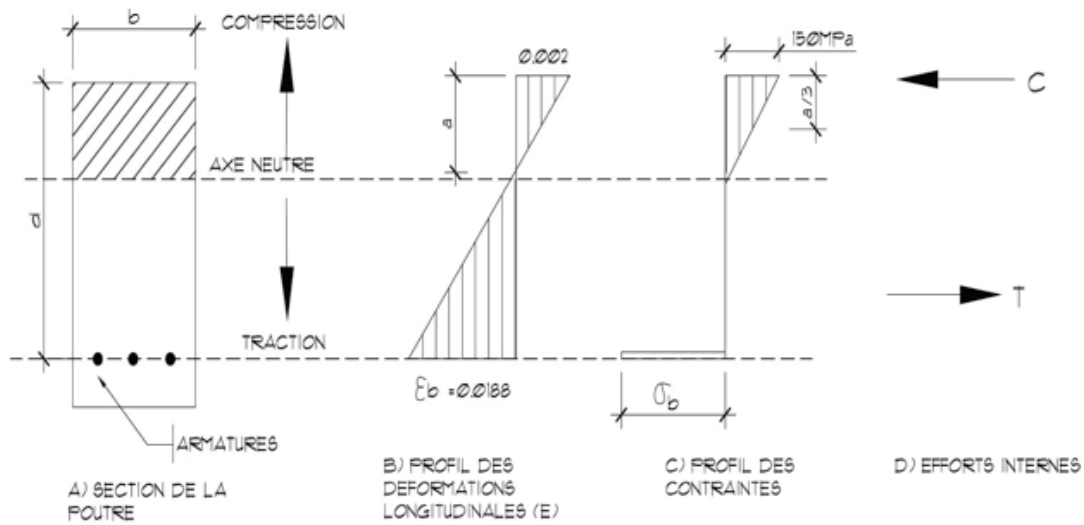


Figure 3.17 : Conditions pour une poutre surarmée ( $A_s > A_{s \text{ balancé}}$ )

Pour ces conditions, on peut évaluer les efforts de compression (C) et de traction (T).

La force de compression dans le béton (C) est donnée par :

$$C = \frac{\phi_c f_c ab}{2} \quad (8)$$

La contrainte de traction dans le bambou ( $\sigma_b$ ) est donnée par l'expression suivante :

$$\sigma_b = E_b \varepsilon_b \quad (9)$$

où  $\varepsilon_b$  représente la déformation à la fibre inférieure de la poutre.

La force de traction (T) est donc égale à :

$$T = \phi_b A_b \sigma_b = \phi_b A_b E_b \varepsilon_b \quad (10)$$

Pour préserver l'équilibre statique de la poutre il faut que l'effort interne de compression (C) soit égal à l'effort interne de traction (T) d'où :

$$C = T \rightarrow \frac{\phi_c f_c ab}{2} = \phi_b A_b E_b \varepsilon_b \quad (11)$$

Par géométrie (triangles semblables), on trouve que :

$$\frac{a}{0,002} = \frac{d}{\varepsilon_b} \quad (12)$$

D'où :

$$\varepsilon_b = \frac{0,002d}{a} \quad (13)$$

En reportant cette valeur dans l'équation (11) on obtient :

$$\frac{\phi_c f_c ab}{2} = \phi_b A_b E_b \times \frac{0,002d}{a} \quad (14)$$

En isolant  $a$  dans cette équation on trouve que :

$$a = \sqrt{\frac{0,004 \phi_b A_b E_b d}{\phi_c f_c b}} \quad (15)$$

Le bras de levier entre les forces de compression (C) et de traction (T) est égal à  $d - a/3$  (figure 3.19). Le mouvement résistant de la poutre ( $M_r$ ) est alors donné par l'expression suivante :

$$M_r = C \times d - \frac{a}{3} = \frac{\phi_c f_c}{2} ab \times d - \frac{a}{3} \quad (16)$$

La géométrie que nous avons retenue pour les poutrelles est illustrée à la figure 3.18. Ce choix est l'aboutissement de plusieurs calculs effectués en prenant en compte différentes géométries. Le but visé était triple :

- procurer au plancher une résistance suffisante (selon les règles du Code National du Bâtiment du Canada à défaut de normes vietnamiennes) ;
- minimiser la hauteur des poutrelles et, par conséquent, l'épaisseur du plancher par souci d'économie de temps et de matériaux ;
- réduire au maximum le poids des poutrelles (on souhaitait demeurer en dessous de 100 kg par poutrelle pour permettre un manipulation relativement aisée par deux ouvriers).

Une série de calculs successifs ont démontré que quatre lamelles de bambou étaient nécessaires pour atteindre la résistance visée. La largeur et l'épaisseur de la semelle (respectivement 120 et 65 mm) ont été choisies afin de procurer un recouvrement suffisant des armatures conformément aux exigences de la norme canadienne ACNOR A23.1 et A23.2. pour obtenir la résistance souhaitée, la partie supérieure de la poutrelle devait faire 50 mm de largeur. La solution la plus simple consistait à utiliser une poutrelle en forme de T inversé. Cependant, afin de réduire le poids de la poutrelle, nous avons préféré une section en forme de I asymétrique (figure 3.18). La semelle supérieure fait 50 mm de largeur par 20 mm d'épaisseur (ce qui correspond approximativement à la position de l'axe neutre. L'âme de la poutrelle fait 20 mm de largeur. Des calculs plus complexes, qui ne sont pas rapportés ici, ont montré que cette largeur était suffisante pour prévenir une rupture en cisaillement sans avoir recours à des étriers.

Pour la géométrie illustrée à la figure 3.18, la quantité d'armature correspondant aux conditions balancées ( $A_{bal}$ ) est égal à :

$$A_{bal} = 0,045bd = 0,045 \times 50 \times 20 + 85 + \frac{65}{2} = 309 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

La quantité réelle d'armature ( $A_b$ ) est égale à :

$$A_b = (23\text{mm} \times 5\text{mm}) \times 4 = 460 \text{ mm}^2 \quad (18)$$

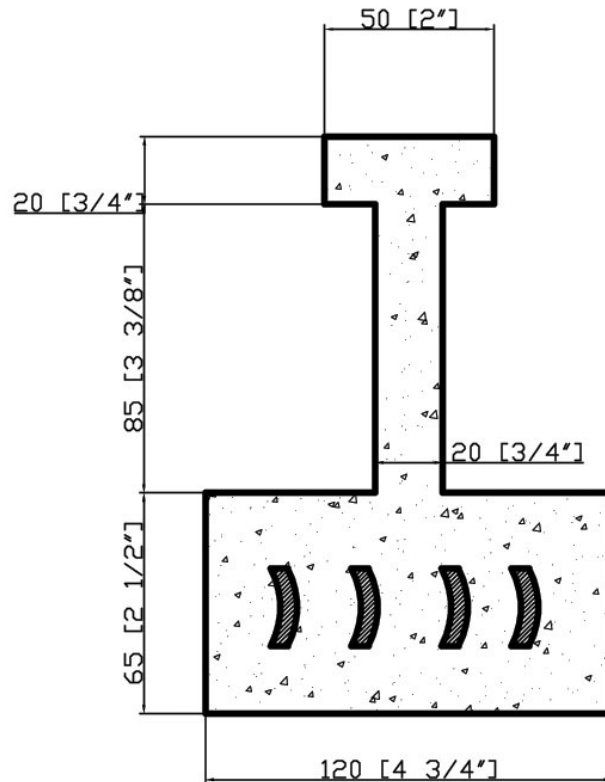


Figure 3.18 : Géométrie des poutrelles armées de bambou  
(illustration par Jonathan Boucher, 2005)

On constate que  $A_b > A_{bal}$  ce qui confirme que la poutre est surarmée et que :

$$a = \frac{0,004 \times 0,8 \times 460 \times 8000 \times 137,5}{0,7 \times 80 \times 50} = 24 \text{ mm} \quad (19)$$

et 
$$M_r = \frac{0,7 \times 80 \times 50 \times 24}{2} \times 137,5 - \frac{24}{3} \times 10^{-6} = 4,35 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (20)$$

### 3.6.4 Calcul de la résistance en flexion du système de plancher

Le système de plancher est illustré à la figure 3.19. Il est constitué de poutrelles de béton armé de bambou espacées à 800 mm c/c qui supportent des dalles de béton léger de 150 mm d'épaisseur.

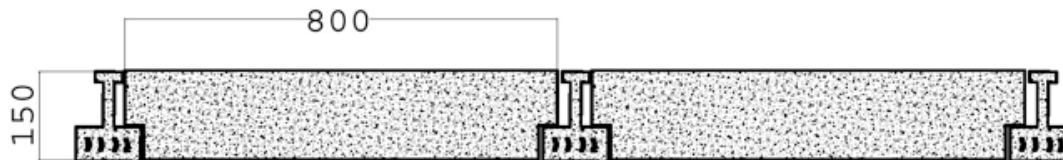


Figure 3.19 : Système de plancher (illustration par Jonathan Boucher, 2005)

L'aire de la section d'une poutre ( $A_{poutre}$ ) (figure 3.20) est égale à :

$$A_{poutre} = (50 \times 15) + (20 \times 85) + (65 \times 120) = 10250 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

La masse volumique de béton est égale à  $2400 \text{ kg/m}^3$ . La charge morte linéaire de la poutre est donc égale :

$$w_{poutre} = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{1000} \times \frac{10250}{10^6} \text{ m}^2 = 0,24 \text{ kN/m} \quad (22)$$

Les dalles sont fabriquées avec un béton léger de masse volumique égale à  $600 \text{ kg/m}^3$ . Le poids linéaire des dalles est donc égal à :

$$w_{dalle} = 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{1000} \times \frac{150 \times 800}{10^6} \text{ m}^2 = 0,7 \text{ kN/m} \quad (23)$$

La charge morte totale ( $W_d$ ) est donc égale à :

$$w_d = 0,24 + 0,7 = 0,94 \text{ kN/m} \quad (24)$$

Selon les normes canadiennes, la charge d'utilisation de plancher pour des immeubles résidentiels est égal à  $190 \text{ kg/m}^2$  ce qui signifie que la surcharge d'utilisation ( $w_l$ ) est égale à :

$$w_l = 190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{1000} \times 0,8 \text{ m} = 1,5 \text{ kN/m} \quad (25)$$

Selon le Code National du Bâtiment du Canada, la charge totale majorée ( $w_f$ ) est donc égale à :

$$w_f = 1,25w_d + 1,5w_l = (1,25 \times 0,94) + (1,5 \times 1,5) = 3,4 \text{ kN/m} \quad (26)$$

Pour une charge uniformément répartie, le moment de flexion maximal au centre de la poutre ( $M_f$ ) est égal à :

$$M_f = \frac{w_f L^2}{8} \quad (27)$$

où L représente la portée de la poutre.

Ce moment maximal ( $M_f$ ) doit être inférieur au moment résistant ( $M_r$ ) de la poutre d'où :

$$M_f = \frac{w_f L^2}{8} \leq M_r \quad \rightarrow \quad L \leq \sqrt{\frac{8 M_r}{w_f}} \quad (28)$$

On obtient finalement :

$$L \leq \sqrt{\frac{8 \times 4,35}{3,4}} = 3,2 \text{ m} \quad (29)$$

Cela signifie que, pour la géométrie retenue, les poutrelles armées de bambou peuvent supporter un plancher d'une portée d'environ 3 m. Ce système de plancher pourrait aussi être utilisé pour de plus longues portées à condition de diminuer l'espacement entre les poutrelles. En reprenant les mêmes calculs, on peut démontrer que, pour une portée de 4 m, les poutrelles devraient être espacées de 500 mm c/c. Étant donné que les portées excèdent rarement 4 m dans la construction résidentielle à Hanoi, ce système de plancher apparaît tout à fait adéquat pour l'application envisagée.

### **3.7 Préparation du coffrage de la poutre**

*Le contenu de la présente page (75) a été rédigé conjointement avec M. Dany Blackburn et est identique aux pages 86 et 87 de son mémoire.*

La préfabrication, soit l'utilisation d'éléments préfabriqués, permet de réduire les déchets, d'augmenter la rapidité d'exécution et la continuité du travail. A moyen terme, la préfabrication amène une répétition du travail favorable au rendement et à la sécurité. Cela exige cependant une coordination plus pointue et un respect assez strict des dimensions. De plus, la plus grande consommation de ressources est généralement associée aux coffrages des éléments de béton. Souvent, on utilise du bois de construction de première qualité pour les coffrages et on le jette par la suite. Par conséquent, des coffrages qui peuvent être démantelés et montés facilement et rapidement aident aussi à réduire l'énergie intrinsèque totale. Il est certain que les coffrages réutilisables sont plus chers à l'achat mais sont rapidement rentabilisés.

Dans le cadre de ce projet, le matériau utilisé pour la confection des coffrages fut le bois contreplaqué (figure 3.20) étant donné sa disponibilité au Vietnam, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût. La géométrie du coffrage a également été pensée de manière à pouvoir décoffrer les pièces facilement sans les abîmer. La longueur du coffrage est la même que celle des armatures, soit 3 m, mais les calculs de dimensionnement effectués à la section précédentes montrent, à condition de réduire leur espacement à 0,5 m c/c, que ces poutrelles pourraient être utilisées sur des portées de 4 m ce qui se rapproche davantage de la largeur habituelle des maisons vietnamiennes.





Figure 3.20 : Coffrage de bois (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)

Pour simplifier la mise en place des armatures de bambou et de leurs éléments de fixation ainsi que la coulée de béton, le coffrage reproduit la forme inversée de la poutrelle (i.e. la semelle inférieure de la poutrelle se retrouve dans le haut du coffrage) tel qu'illustré à la figure 3.21.



Figure 3.21 : Profil et disposition du coffrage (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn 2004)

Le support et le maintien des armatures de bambou dans le coffrage sont assurés par des tirants métalliques espacés à 600 mm c/c transversalement au coffrage. Ces tirants traversent chacune des armatures et l'espacement prescrit de 2 cm entre les armatures est maintenu à l'aide de 2 manchons d'aluminium d'un centimètre (figure 3.22). (Partie rédigée conjointement avec M. Dany Blackburn, présentée également à la page 88 de son mémoire.)



Figure 3.22 : Fixation des armatures (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)

Dans l'ensemble, le coffrage a bien résisté aux premières étapes de coulée et de décoffrage. En tout, quatre poutres ont été fabriquées avec le même coffrage. Néanmoins, quelques modifications ont dû être apportées durant le processus, afin d'optimiser la qualité des pièces. Par exemple, les étriers métalliques servant à retenir les pièces de bois du coffrages ont dues être renforcées. De plus, un *plexiglass* fut ajouté sur les parois internes du coffrage de manière à limiter le gonflement du bois à cause de l'absorption d'eau, ce qui risquait de faire éclater la poutre lors du

démoulage. Il est cependant peu probable que le même coffrage permette la fabrication de plusieurs autres poutres. Des éléments en polystyrène expansé et un contreplaqué enduit d'une couche spéciale sont maintenant disponibles pour remplacer le contreplaqué ordinaire et peuvent être réemployés une centaine de fois. Cette solution pourrait donc être envisageable dans le contexte vietnamien afin de garantir la rentabilité et l'efficacité de toute opération de préfabrication.

### **3.8 La préparation et la coulée du béton**

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné. Dans ce mélange, le ciment Portland est l'élément principal et joue le rôle de liant. Les granulats constituent l'autre composante importante du béton. Ils se caractérisent par les propriétés de la roche dont ils sont issus (coloration, propriétés mécaniques et physico-chimiques) et ces caractéristiques influencent directement les propriétés esthétiques, mécaniques et de durabilité du béton. Les adjuvants constituent la troisième composante du béton. Ces produits sont incorporés au béton en faible quantité (moins de 10 kg/m<sup>3</sup>) afin de modifier certaines caractéristiques du matériau. Par exemple, les agents réducteurs d'eau vont permettre d'utiliser moins d'eau pour une ouvrabilité donnée ou, au contraire, de produire un béton plus fluide avec une quantité d'eau moindre. Les superplastifiants ont des propriétés similaires à celles de réducteurs d'eau, mais avec une efficacité beaucoup plus importante. Ils permettent de produire des bétons de très grande fluidité que l'on appelle *bétons autoplaçants*. Ces bétons se comportent comme un liquide visqueux. Leur très grande fluidité permet de les mettre en place dans des coffrages de forme complexe sans avoir recours à de la vibration comme c'est habituellement le cas pour les bétons conventionnels. C'est ce type de béton que nous avons utilisé pour la fabrication des poutres dans le cadre du présent projet. La grosseur des granulats ne devant pas dépasser 20 mm, soit l'espacement entre les armatures, il convenait d'utiliser un béton fluide qui épouserait la forme du coffrage sans nécessiter l'utilisation d'aiguilles vibrantes ou autre équipement particulier (ces équipements sont rares et

coûteux au Vietnam). La rapidité et la facilité de mise en œuvre des bétons autoplaçants permet d'optimiser la fabrication des poutres tout en assurant une meilleure qualité de finition. L'eau de gâchage constitue la quatrième et dernière composante du béton. La quantité d'eau doit être soigneusement dosée afin d'atteindre simultanément les conditions de maniabilité, de résistance mécanique et de durabilité fixées au départ.

La maniabilité d'un mélange de béton est habituellement mesurée à l'aide d'un essai d'affaissement au cône d'Abrams conformément aux exigences de la norme ACNOR A23.2. Cet essai consiste à remplir un cône normalisé de 15 cm de diamètre maximal par 30 cm de hauteur et, après avoir retiré ce cône, à mesurer l'affaissement du béton (i.e. la différence entre la hauteur du cône affaissé et sa hauteur initiale). Pour un béton ordinaire, l'affaissement est généralement compris entre 7,5 et 12,5 cm. Si l'affaissement est trop faible, le béton sera difficile à mettre en place, la pièce de béton montrera des vides de compaction au démoulage et la qualité du béton sera réduite. En revanche, si l'affaissement est trop grand, le béton montrera des signes de ségrégation (i.e. une répartition non-homogène des diverses composantes du béton : eau, ciment, sable et pierre) ou de ressuage (remontée de l'eau en surface suite à la compaction du squelette granulaire) et la qualité du matériau en sera compromise.

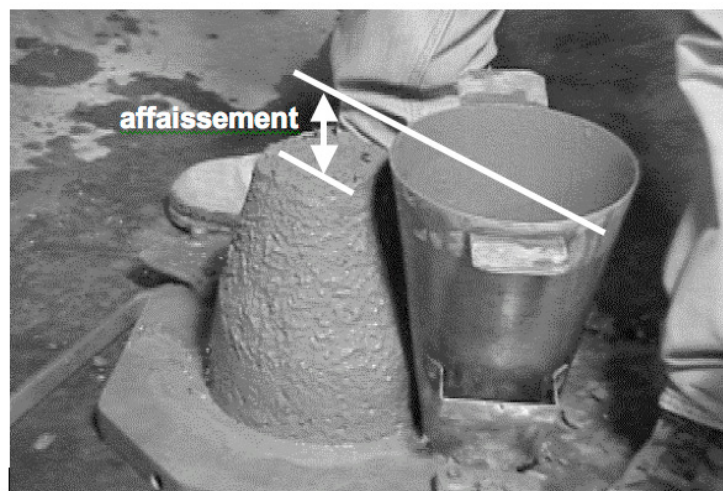


Figure 3.23 : Mesure de l'affaissement du béton

Dans le cas des bétons autoplaçants, l'affaissement est si élevé ( $> 25$  cm) que cette mesure n'a plus aucune signification. Pour mesurer la maniabilité de ces bétons, on effectue aussi un essai au cône d'Abrams mais, plutôt que de mesurer l'affaissement, on mesure l'étalement du béton qui correspond au diamètre moyen du cône de béton après qu'il se soit affaissé (figure 3.24). Si le béton est bien formulé, le mélange demeure homogène après l'essai au cône d'Abrams (figure 3.23). Dans le cas contraire, on observera des signes de ségrégation ou de ressuage. L'étalement des bétons autoplaçants est généralement compris entre 65 et 80 cm.

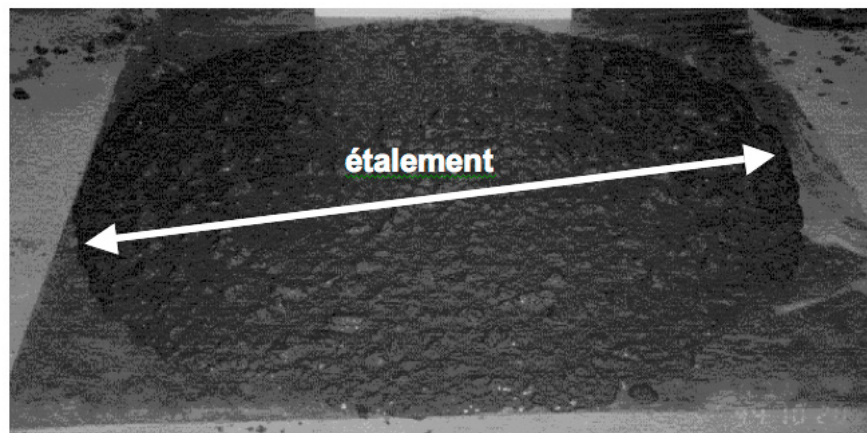


Figure 3.24 : Mesure de l'étalement du béton

En ce qui nous concerne, nous visions un étalement de 650 mm, une résistance à la compression de 80 MPa et une bonne homogénéité du mélange pour assurer la durabilité du béton de surface. Pour atteindre la résistance visée nous avons fixé le rapport eau/ciment à 0,35 (en masse). Pour permettre un bon enrobage des granulats par la pâte de ciment, nous avons fixé le volume de pâte à 36% du volume total de béton ce qui est environ 20% supérieur à ce que l'on retrouve dans les bétons ordinaires. Pour prévenir la ségrégation du mélange, nous avons mélangé deux tailles de gravier (2,5 à 14 mm et 14 à 21 mm) dans une proportion de 40-60 afin d'accroître la compacité du squelette granulaire. Dans un premier temps, nous avons utilisé un ciment Portland ordinaire de type 10. Parce qu'il manquait de particules fines (diamètre inférieur à 30  $\mu\text{m}$ ), ce mélange de béton a montré des signes de ségrégation et de ressuage (figure 3.25).



Figure 3.25 : Essai d'étalement montrant des signes de ségrégation  
(photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)

L'ajout d'un matériau pouzzolanique, en remplacement partiel du ciment Portland, contribuerait à réduire considérablement les problèmes de ségrégation. Ces matériaux sont formés de particules plus petites que les grains de ciment qui, en présence de la chaux libérée par l'hydratation du ciment Portland, réagissent avec l'eau pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Ces particules peuvent donc se loger entre les grains de ciment pour accroître la cohésion de la pâte de ciment et prévenir les problèmes de ségrégation et de ressuage. De plus l'activité pouzzolanique contribue à accroître la résistance mécanique en formant des C-S-H.

Dans le contexte vietnamien, l'écorce de riz brûlé est un matériau pouzzolanique de grande qualité qui est à la fois abondant et bon marché. Nous aurions souhaité l'utiliser pour nos essais de laboratoire mais il nous a été impossible de s'en procurer. Par commodité, nous avons donc choisi de remplacer le ciment Portland ordinaire de type 10 par un ciment Portland de type HSF contenant environ 7% de fumée de silice. La fumée de silice est un matériau pouzzolanique dont l'action est comparable à celle de l'écorce de riz brûlé. Ce ciment nous a permis de fabriquer un béton de très grande fluidité sans problèmes de ségrégation ou de ressuage. Le

tableau 4 donne la composition du béton autoplaçant utilisé pour la confection de nos poutrelles.

*Tableau 4 : Composition du mélange de béton autoplaçant*

| <b>Matériau</b>             | <b>Quantité (par m<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Eau                         | 190 kg                              |
| Ciment                      | 545 kg                              |
| Sable                       | 840 kg                              |
| Petit gravier (2.5 à 14 mm) | 315 kg                              |
| Gros gravier (14 à 21 mm)   | 470 kg                              |
| Superplastifiant            | 3,25 L                              |

Ce béton fut gâché dans un malaxeur à axe vertical pendant 10 minutes jusqu'à l'obtention d'un mélange fluide et homogène (figure 3.26). Après le malaxage, la maniabilité du mélange a été mesurée à l'aide d'un essai d'étalement. L'étalement obtenu (82 cm) est légèrement supérieur à la valeur visée (75 cm). La résistance à la compression du béton, mesurée conformément aux exigences de la norme ACNOR A23.2, est égale à 82 MPa ce qui est légèrement supérieur à la valeur visée (80 MPa). Mentionnons enfin que le béton produit était très homogène sans ségrégation ou ressuage ce qui assure la durabilité de la surface.

Le béton fut mis en place tout simplement en versant le béton dans le coffrage sans aucun autre moyen de consolidation (figure 3.27). Les coffrages étaient préalablement huilés afin de prévenir l'adhérence entre le béton et la paroi du coffrage et ainsi faciliter l'opération de décoffrage. Une fois le coffrage rempli, celui-ci fut conservé 7 jours à la température de la pièce (environ 20°C) avant le décoffrage de la poutre. Un total de quatre poutres furent fabriquées : une pour réaliser l'essai de flexion et les trois autres pour mettre à l'essai une section de plancher en grandeur réelle. La figure 3.28 montre les poutres après décoffrage. On constate la grande qualité de la surface de béton qui est exempte de vides de surface

ou autres défauts courants. Nous avons cependant observé des fissures dans l'axe longitudinal des poutrelles dans le voisinage des armatures en bambou (figure 3.29). La fissuration observée est vraisemblablement due au fait que les lanières de bambou ont subi un certain gonflement après avoir absorbé une partie de l'eau de gâchage et que ce gonflement des armatures a provoqué l'éclatement du béton de recouvrement. Il en ressort que, malgré nos efforts, l'imperméabilisation des lanières de bambou n'était probablement pas suffisante. L'application d'une seconde, voir d'une troisième couche d'hydrofuge aurait sans doute permis de corriger la situation. Un produit plus efficace pourrait également être identifié pour des expérimentations ultérieures et permettrait de mieux garantir la durabilité à long terme des poutres.



Figure 3.26 : Malaxage du béton (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)

Afin de mesurer la résistance à la flexion des poutres, l'une d'elles fut soumise à un essai de flexion 4 points (figure 3.30). Cet essai est similaire à celui utilisé par Ghavami (1995) pour mesurer la résistance de poutres de béton armées de bambou. Dans cet essai, une charge est appliquée aux tiers de la portée de la poutre. Le moment fléchissant est maximal et uniforme sur tout le tiers central de la poutre. La résistance à la flexion de la poutre ( $M_r$ ) est alors donné par la relation suivante :





Figure 3.27 : Coulée du béton dans le coffrage (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)



Figure 3.28 : Poutres décoffrées (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2004)



Figure 3.29 : Fissuration des poutres (Photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)

$$M_r = M_{\max} = \frac{P}{2} \times \frac{L}{3} = \frac{PL}{6} \quad (30)$$

où P représente la charge de rupture et L la portée de la poutre. Dans notre essai, la portée de la poutre était égale à 3 m et nous avons mesuré une charge de rupture de 10 kN. Dans ces conditions, la résistance mesurée de la poutre à la flexion est égale à :

$$M_r = M_{\max} = \frac{PL}{6} = \frac{10 \text{ kN} \times 3 \text{ m}}{6} = 5 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (31)$$

On remarquera que cette valeur est supérieure à la résistance prise en compte dans les calculs structuraux ( $M_r = 4,35 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ) (voir équation (20)). Cela confirme l'efficacité structurale de la poutre. On remarquera également que, de toute évidence, la fissuration que nous avons observé à la surface des poutres (figure 3.29) n'a pas eu d'effet significatif sur la résistance mécanique de la poutre. Après la rupture de la poutre, on a aussi constaté les lanières de bambou avaient conservé une très bonne adhérence au béton et qu'aucun arrachement de bambou n'a été observé (figure 3.31). En effet, après la rupture les armatures de bambou ont conservé leur position d'origine et elles ont donc parfaitement joué leur rôle structural. Nous en concluons

que cela démontre l'efficacité du bambou à agir comme armature dans le béton à tout le moins pour les conditions dans lesquelles nous les avons utilisés.

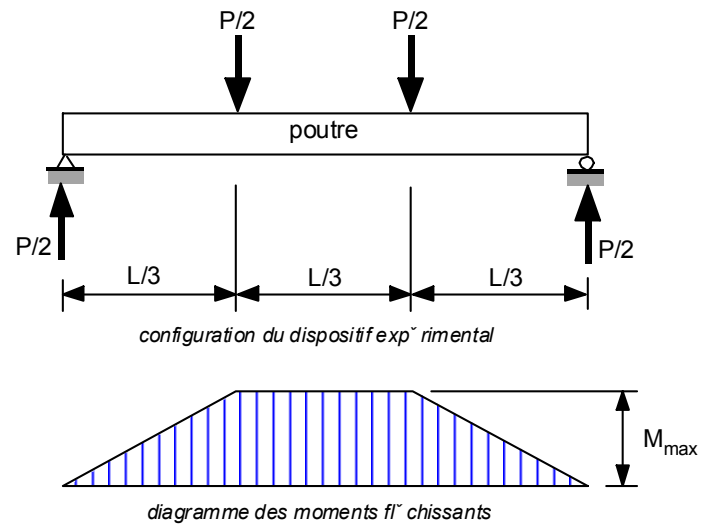


Figure 3.30 : Essai de flexion 4 points



Figure 3.31 : Adhérence entre les armatures le béton suite au test de flexion (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)

### 3.9 Mise à l'épreuve du système constructif de plancher

Pour confirmer l'efficacité du système structural proposé, nous avons construit une section de plancher en grandeur réelle (figure 3.32) (Blackburn, 2006). Cette section de plancher est constituée de 3 poutrelles et 10 dalles de béton léger (figure 3.32). La mise sous charge du plancher fut obtenue par l'empilement progressif des sacs de ciment (40 kg) uniformément répartis sur toute la surface du plancher (figure 3.33). Selon le Code National du Bâtiment du Canada (CNB), la surcharge maximale de plancher est estimée à  $190 \text{ kg/m}^2$  pour des immeubles résidentielles. La charge maximale que devrait supporter notre section de plancher est donc égale à :

$$P_{\max} = 190 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \times 3 \text{ m} \times 1,615 \text{ m} = 920 \text{ kg} \quad (31)$$



Figure 3.32 : Construction d'une section de plancher en grandeur réelle (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)



Figure 3.33 : Empilement de sacs de sable jusqu'à la charge totale admissible (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)

Nous avons empilé 24 sacs de ciment sur la section de plancher ce qui correspond à une charge de 960 kg (24 x 40 kg) ce qui est supérieur à la surcharge imposée par les normes canadiennes. Le plancher a parfaitement supporté cette charge sans aucun dommage apparent. À l'aide d'un extensomètre, nous avons mesuré la flèche au centre du plancher qui était égale à 9 mm pour la charge maximale. Cette valeur est bien inférieure à flèche maximale autorisée par le Code National du Bâtiment du Canada qui est égale à 12,5 mm ( $\Delta_{\max} = L/240 = 3000 \text{ mm} / 240 = 12,5 \text{ mm}$ ). Par mesure de sécurité, nous n'avons cependant pas augmenté la charge du plancher jusqu'au point de rupture. Toutefois, les résultats obtenus lors de l'essai de flexion 4 points sur une poutrelle et lors de l'essai de chargement sur une section de plancher en grandeur réelle nous permettent de conclure que le système de plancher proposé constitue une alternative fiable et sécuritaire du point de vue structural.

Le design et le dimensionnement de la poutre et de la dalle se sont avérés adéquats dans l'ensemble, puisque les éléments ont satisfait aux exigences structurales désirées. Nous avons toutefois remarqué que le profil très délicat de la poutre a, dans

certains cas, été responsable de l'apparition de fissures dans l'aile supérieure de la poutre lors de sa manipulation. Cette fragilité n'a cependant pas eu de conséquences néfastes pour la résistance car, sous l'application des charges externes, l'aile supérieure de la poutre est sollicitée en compression ce qui a pour effet de refermer toutes les fissures. On pourrait cependant prévenir cette fissuration en ajoutant une ou deux petites tiges d'armatures dans l'aile supérieure ou en ajoutant des fibres végétales au béton.

De plus, la géométrie orthogonale de la poutre (en forme de T) a rendu l'étape du décoffrage délicate, puisque certaines parties du coffrage sont demeurées coincées entre la tête et la base de la poutre suite au gonflement du bois de coffrage. Cette difficulté fut corrigée par l'ajout d'un *plexiglass* à l'intérieur du coffrage et en modifiant légèrement certains angles de la poutre pour permettre un décoffrage plus aisé (figure 3.34).

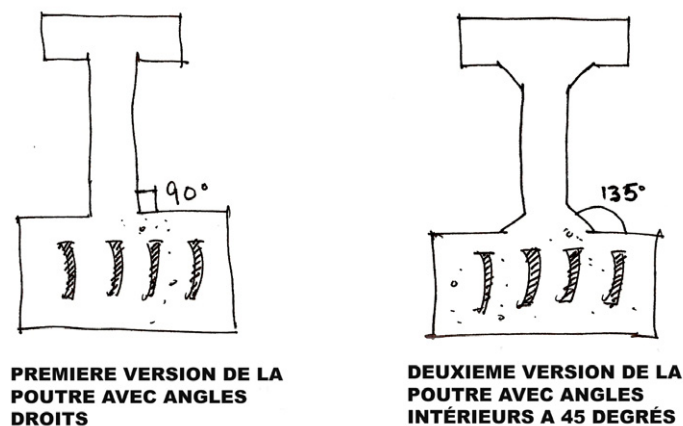


Figure 3.34 : Modifications apportées à la poutre (photo par Jonathan Boucher et Dany Blackburn, 2005)

## Conclusion



De façon générale, le système de plancher préfabriqué a bien répondu à nos attentes, tant au niveau des résultats expérimentaux, que pour sa mise en œuvre. Nous constatons que nos objectifs élaborés au début du projet, ont tous été confirmés, ce qui nous incite à croire que le système de plancher préfabriqué serait certes une alternative intéressante pour l'habitat urbain de Hanoi. Certaines améliorations pourraient néanmoins être apportées au système de plancher. On pourrait, par exemple, améliorer l'imperméabilisation des armatures de bambou pour prévenir la fissuration résultant du gonflement du bambou à l'humidité. On pourrait aussi perfectionner le coffrage et limiter la fissuration de l'aile supérieure de la poutre en y ajoutant de petites tiges de bambou ou en incorporant des fibres végétales au mélange de béton.

Le poids du plancher est un autre aspect important de ce projet. Le poids de la poutre (24 kg/m) est inférieur à la limite de 100 kg pour une poutre de 4 m que nous nous étions fixé au départ. Il était donc facile pour deux ouvriers de manipuler ces poutres à deux personnes sans l'utilisation de machinerie spécialisée. Les poutres dont la géométrie contribue à réduire la hauteur du plancher permettent de diminuer le poids global du bâtiment et par le fait même de limiter le phénomène de tassement différentiel des fondations observé à Hanoi. À titre d'exemple, le tableau 6 compare le poids au mètre carré du nouveau système proposé avec celui d'un plancher conventionnel. On réalise que système préfabriqué représente une économie de poids d'au moins 40% par rapport à un plancher conventionnel ce qui est considérable.

La mise en œuvre des poutres préfabriquées du système s'est avérée rapide et efficace. Toutes les pièces ont pu être fabriquées dans un délai raisonnable avec un minimum d'outils et d'équipement contribuant ainsi à réduire la durée d'un chantier. Les coûts et la durée de la fabrication des planchers serait ainsi diminué. En effet, les 3 à 4 jours nécessaires au séchage des dalles de béton conventionnelles ne seraient plus requis. Pour une maison de 5 étages dont la durée moyenne de chantier est de 6 mois, cela représente une économie de temps de 2 à 3 semaines. Ainsi, 4 poutres de béton armé de bambou ont

été fabriquées avec un niveau de qualité satisfaisant. Il est cependant peu probable que les coffrages utilisés puissent permettre la fabrication de plusieurs autres poutres. En effet, il s'est avéré que le bois de coffrage absorbait une quantité importante d'eau causant ainsi sa dégradation et compliquant l'étape du décoffrage. Des éléments en polystyrène expansé et un contreplaqué enduit d'une couche spéciale sont maintenant disponibles pour remplacer le contreplaqué ordinaire et peuvent être réemployés une centaine de fois. Cette solution pourrait donc être envisageable dans le contexte vietnamien afin de garantir la rentabilité et l'efficacité de toute opération de préfabrication.

Tableau 5 : Comparaison du poids des deux systèmes de plancher

| Systèmes de plancher  | Poids estimé (kg)  |
|---|--|
| <p>Système conventionnel</p>  | <p>Épaisseur de la dalle : au moins 10 cm</p> <p>Masse volumique du béton : 2400 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Poids pour 1m<sup>2</sup> de surface de plancher :<br/><b>Au moins 240 kg</b></p>                       |
| <p>Système préfabriqué</p>   | <p>Masse volumique du béton léger : 600 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Masse volumique du béton auto-plaçant : 2400 kg/m<sup>3</sup></p> <p>Poids pour 1 m<sup>2</sup> de surface de plancher :<br/><b>93.75 kg</b></p> |



Il est facile de croire que la préfabrication du système proposé s'adapterait bien à la réalité vietnamienne. Les éléments préfabriqués pourraient être réalisés par de petits ateliers locaux qui approvisionneraient les chantiers. Les planchers ne seraient donc plus réalisés sur place ce qui diminuerait les risques d'accidents et par conséquent favoriserait un niveau de sécurité accru sur les chantiers. Cette mentalité commerciale est d'ailleurs déjà implantée dans la ville de Hanoi pour d'autres matériaux, tels la brique, le bambou, le bois et l'acier. Il est très réaliste de croire que l'implantation de cette nouvelle technologie pourrait s'intégrer harmonieusement dans le fonctionnement des chantiers qui est familier auprès des acteurs de la construction.

De plus, l'utilisation d'armatures en bambou, comme substitut à l'acier, serait certainement une solution profitable au bien-être de la communauté et tout à fait rentable au point de vue économique. La nouvelle industrie de préfabrication locale pourrait notamment aider à revitaliser la transformation artisanale du bambou et à augmenter le revenu d'hommes et de femmes sans emploi. La littérature recensée propose en effet une transformation manuelle des tiges de bambou en fines lanières qui serviraient d'armatures, tâche pouvant être facilement exécutée par une main-d'œuvre non-spécialisée. La préfabrication complète du système pourrait également s'effectuer de la même façon.

De plus, l'utilisation du bambou comme matériau de construction est une alternative intéressante pour le Vietnam, car elle limite l'utilisation de matériaux polluants, énergivores et non-renouvelables. Toutefois, cette abondante ressource demeure très peu exploitée pour l'instant. La création d'éventuelles plantations de bambou ou une gestion plus serrée de l'exploitation des ressources actuelles sont nécessaires afin d'assurer une exploitation contrôlée, une protection des milieux naturels et une reforestation du territoire.

Finalement, dans le but d'assurer la pérennité et la viabilité de cette technologie, il est indispensable qu'elle soit prise en charge par un organisme local. Par exemple, celle-ci pourrait être confiée à l'Institut Vietnamien de Recherche sur le Bâtiment à Hanoi, afin de diffuser, de développer et de commercialiser la technologie des bétons armés de bambou.

# Bibliographie

## 1. Bambou et construction

BALAGURU, Perumalsamy, SHAH, Surendra (1985), *Alternative reinforcing materials for less developed countries*, International Journal for Development Technology, Vol. 3, pages 87-105

FOUDJET, A., FOMO, J., (1995), *Une nouvelle méthode d'accroissement de l'adhérence entre une armature en matière végétale et le béton (effet de confinement) : cas de l'armature de rotin dans le béton de nodule latériques*, Materials and Structures, Vol. 28, pages 554-557

INBAR, Bamboo, People and the Environment, Proceedings of the Vth International Bamboo Workshop, Bali, Indonesia, June 1995, Nations Unies, *L'Utilisation du bambou et des roseaux dans la construction*, Département des Affaires Économiques et Sociales, New York, 1972

LIESE, Walter, (1992), The structure of bamboo in relation to its properties and utilization, *Proceedings of the International Symposium of Industrial Use of Bamboo*, Beijing, Chine, page 95-100

MUCHTADI, R., ADAWIYAH, R., (2001), Bamboo Shoot Drying Technology, *Proceedings of the Vth International Bamboo Congress, Ubud, Bali, Indonésie*, page 117-119

NATIONS UNIES, 1972, *L'utilisation du bambou dans la construction*, Département des affaires économiques et sociales, New York, page 63

JANSEN, Jules J.A., *Mechanical properties of bamboo*, Forestry sciences, : Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991

MCKEE Neil, 1987, *Le Bambou, plante miraculeuse*, Division des communications, Centre de recherches pour le développement international (C.R.D.I.), Ottawa

Vietnam Institute for Building Science and Technology, *Non-Conventional materials and technologies*, Construction Publishing House, Hanoi, 2002

WHITE, Anthony G., *Bamboo architecture; a selected bibliography*, Vance Bibliographies, Monticello, Illinois, 1990

YANG Yuming, XUE Jiru, (1998), *Bamboo resources and their utilization in China*, Southwest Forestry College, Kunming, Yunnan 650224, China

Pham Hoang Ho, (1994), *Flora of Vietnam*; Agricultural Publishing House, Hanoi  
 Ngo Thi Minh Duyen, (1998), *Bamboo resources in Vietnam*, Research Centre for Forest Tree Improvement, Forest Science Institute of Vietnam, Hanoi, Vietnam.

## 2. Béton armé de bambou

ABDURACHIM, Aim, FIRMANTI, Anita, (2001), The Use of Bamboo for Reinforcement in Light-frame Construction System, *Proceedings of the Vth International Bamboo Congress*, Ubud, Bali, Indonésie, page 54-61

GHAVAMI, Khosrow, (2001), Structural concrete elements reinforced with bambou, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Building and Housing Research Program, VOL. 2, NO.2 page 97-110

HIDALGO, Oscar, (2001), *Study of mechanical properties of bamboo and its use as concrete reinforcement: Problems and solutions*, Centre Inter-américain du Bambou, (CINBA), Bogota, Colombie

KAWAI Tadashi, KAMAMURA Masashi, KASAI Yoshio, (2000), *Properties of bonding, weathering, bending of beam of bamboo reinforced soil-cement concrete*, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 22, pages 451-464

RAJ, Vijay, (1991), *Treatise on utilization of bamboo as reinforcement in ferrocement*, Journal of Ferrocement, Vol. 21, No. 4, pages 371-382

SHUI, Lee Thang (1990), *Some properties of bamboo for consideration as ferrocement reinforcements*, Journal of Ferrocement, Vol. 20, No. 2, pages 149-157

SURJOKUSUMO, S., NUGROHO, N, (2001), A study on *Dendrocalamus asper* as Concrete Reinforcement, *Proceedings of the Vth International Bamboo Congress*, Ubud, Bali, Indonésie, page 51-54

## 3. Poutres de béton armé de bambou

FERREIRA, G., MORENO, A., BERALDO, A., (2001), *Reinforced concrete beam behavior*, Agribuilding 2001, Brésil, pages 331-337

GHAVAMI, K., (1995), *Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams*, Cement and Concrete Composites, Vol. 17, pages 281-288

KANKAM, Charles K., ODUM E., Brigitte (1999), *Structural behavior of babadua reinforced concrete beams*, Construction and Building Materials, Vol. 13, pages 187-193

#### **4. Marché de la construction vietnamienne**

SCHENK Hans & DUY LUAN Trinh, Shelter and living in Hanoi, Cultural publishing house, Hanoi, 2000

THE TRUNG, DOAN, (2003), Étude de la transformation des espaces extérieurs sur les parcelles d'habitation du quartier Bui Thi Xuan, à Hanoi, au Vietnam, École d'architecture, Université Laval

# **Annexe 1 : Les 20 Familles et 85 espèces de bambous présentes au Vietnam** -Pham Hoang Ho, (1994)

## **1. Arundiraria amabilis McClure**

Arundiraria baviensis Bal.  
Arundiraria brilletii A. Cam  
Arundiraria petelotri A. Cam  
Arundiraria pusilla A. Cher & Cam  
Arundiraria roveli H. de Lehaie  
Arundiraria sat Bal

## **2. Bambusa agrestis (Lour) Poiret**

Bambusa aurinuda McClure  
Bambusa balcon Roxb  
Bambusa bambos Voss  
Bambusa blumeana Schultes  
Bambusa disseimulator McClure  
Bambusa flexuosa Munro  
Bambusa gibba McClure  
Bambusa multiplex Raeusch  
Bambusa atra Lindl  
Bambusa longispiculata Gamble  
Bambusa nutans Wall  
Bambusa pallida Munro  
Bambusa pierreana E. G. Cam  
Bambusa procera A. Cheu. & A. Cam  
Bambusa sesquiflora (McClure) Chia & Fung  
Bambusa stenostachya Mackel  
Bambusa tulda Roxb.  
Bambusa tuldoides Munro  
Bambusa textilis McClure  
Bambusa variabilis Munro  
Bambusa ventricosa McClure  
Bambusa vulgaris Scharader ex Wendl  
Bambusa vulgaris var. aureo Variegata

## **3. Bonia tongkinensis (Bon)**

## **4. Cephalostachyum chevalieri A. Camus**

Cephalostachyum langbianense A. chev & A. Camus  
Cephalostachyum virgatum Kurz

## **5. Dendrocalamus asper (Schult) Back ex Heyne**

Dendrocalamus beechyana Keng  
Dendrocalamus brandisii (Munro) Kurz  
Dendrocalamus giganteus Munro

Dendrocalamus hamiltonii Nees & Arn  
 Dendrocalamus latiflorus Munro  
 Dendrocalamus longifimbriatus Gamble  
 Dendrocalamus membranaceus Munro  
 Dendrocalamus patellaris Gamble  
 Dendrocalamus poilanei A. Camus  
 Dendrocalamus sericeus Munro  
 Dendrocalamus sinuata (Gamble) Holu

**6. Dinochloa alata McClure**

Dinochloa maclellandii Kurz

**7. Gigantochloa atter (Hassk) Kurz**

Gigantochloa cochinchinensis A. Camus  
 Gigantochloa levis (Blanco) Merr.  
 Gigantochloa multicaulis Camus  
 Gigantochloa nigro-ciliata (Buse) Kurz  
 Gigantochloa pseudoarundinacea (Steud) Widjaja  
 Gigantochloa sp.

**8. Indosasa crassifolia McClure**

**9. Melocalamus compactiflorus Benth. & Hook.**

**10. Oxytenanthera albociliata Munro**

Oxytenanthera dinhensis G. Camus  
 Oxytenanthera hayatae A. Camus  
 Oxytenanthera hosseusii Pilger  
 Oxytenanthera parvifolia Brandis  
 Oxytenanthera poilanei A. Camus  
 Oxytenanthera stocksii Munro  
 Oxytenanthera tenuispiculata A. Camus

**11. Phyllostachys aurea Carr.**

Phyllostachys bambusoides Sieb. & Zucc.  
 Phyllostachys mitis Riviere  
 Phyllostachys nigra Munro  
 Phyllostachys puberula Munro  
 Phyllostachys pubescens Mazel

**12. Pseudostachyum polymorphum Munro (Now Schizostachyum)**

**13. Pseudoxytenanthera monadelpha (thun) Sod. & Ellis.**

**14. Racemobambos ciliata (A Camus) Chao & Renv.**

**15. Sasa humilis (Mif) Camus**

Sasa japonica Mark.

**16. Schizostachyum aciculare Gamble**

Schizostachyum blumei Nees  
 Schizostachyum brachycladum Kurz  
 Schizostachyum dullooa Majumdar  
 Schizostachyum chilianthum Kurz  
 Schizostachyum gracile Holttum  
 Schizostachyum hainanense Merrill  
 Schizostachyum kurzii Majumdar  
 Schizostachyum leviculme McClure  
 Schizostachyum zollingeri Steud.  
 Schizostachyum pseudolima McClure

**17. Sinarundinaria falcata Chao & Renv.**

Sinarundinaria floribunda Chao & Renv.  
 Sinarundinaria griffithiana Chao & Renv.  
 Sinarundinaria rolloana Chao & Renv.  
 Sinarundinaria schmidtiana Chao & Renv.

**18. Taeniostachyum dullooa Gamble Syn. Schizostachyum dullooa Manjumdar****19. Tetragonocalamus quadrangularis (Frenzi) Mak****20. Thyrsostachys siamensis Gamble Syn. T. regia Bennet****Espèces jugées endémiques :**

- 1) Arundinaria baviensis Bal
- 2) Arundinaria petelotii A. Cam
- 3) Arundinaria pusilla A. Chew & Cam.
- 4) Arundinaria sat Bal
- 5) Bonia tongkinensis
- 6) Bambusa pierreana
- 7) Bambusa procera
- 8) Gigantochloa cochichinensis
- 9) Gigantochloa multicaulis
- 10) Dendrocalamus poilanei
- 11) Cephalostachyum chevalieri
- 12) Cephalostachyum langbianense
- 13) Oxytenathera dinhensis
- 14) Oxytenathera poilanei

**Espèces jugées menacées:**

- 1) Chimonobambusa quadrangularis, 2) Phyllostachys nigra.
- 3) Phyllostachys bambusoides.