



HAL
open science

Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois

Pierre Pimienta, Jacques Chandellier, Marcel Rubaud, Francis Dutruel, Hervé Nicole

► To cite this version:

Pierre Pimienta, Jacques Chandellier, Marcel Rubaud, Francis Dutruel, Hervé Nicole. Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. Cahiers du CSTB, 1994, Livraison 306 (Cahier 2703), 45 p. hal-04554052

HAL Id: hal-04554052

<https://cstb.hal.science/hal-04554052v1>

Submitted on 22 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

livraison 346
janvier-février 1994
cahier 2703

**CAHIERS
DU CSTB**

Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois

Pierre Pimienta, Jacques Chandellier, Marcel Rubaud (CSTB)
Francis Dutruel (CERIB), Hervé Nicole (CTBA)



Avertissement

La présente étude est le fruit d'une collaboration étroite entre trois centres de recherche (CERIB, CSTB et CTBA) à laquelle ont été associées deux sociétés industrielles (A93 Constructique et IBS). Ces deux entreprises ont contribué, grâce à leur expérience industrielle, à l'élaboration du chapitre 6. La rédaction des différents chapitres de l'étude a été répartie entre les différents centres techniques, chacun pour la partie entrant dans son champ de compétence, bien que cette rédaction décentralisée ait comme conséquence certaines redites entre chapitres. A l'inverse, la lecture de chaque chapitre constitue un tout cohérent qui peut, en tant que tel, donner au lecteur une vision générale du sujet abordé dans le chapitre.

Des renseignements complémentaires sont disponibles au CSTB auprès de Pierre Pimienta.

Nous remercions l'entreprise Béton Bois Système (EI) dont la double activité de traitement du bois et de fabrication des produits en béton de bois a permis de fournir un très grand nombre d'informations.

En couverture :

Granulats de bois destinés à la fabrication de bétons de bois (procédé DURISOL).

Réalisation en maçonnerie de blocs de béton de bois : maisons individuelles.

Maçonnerie en cours de montage.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle de cet ouvrage faite sans le consentement du CSTB est illicite. Elle constitue une contrefaçon au sens de la loi du 11 mars 1957.

© CSTB 1994

Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois

Pierre PIMIENTA, Jacques CHANDELLIER, Marcel RUBAUD, ingénieurs au CSTB
Francis DUTRUEL (CERIB), Hervé NICOLE (CTBA)

Introduction	4	3 Traitement des granulats de bois	17
1 Présentation générale de la filière béton de bois	5	3,1 Introduction	17
1,1 Les sociétés de la filière	5	3,2 Essences disponibles et utilisables	17
1,2 Le volume de réalisation de la filière	5	3,21 Cartographie du massif forestier français	17
1,3 Les recherches dans la filière	6	3,22 Déchets disponibles	17
1,4 La position du secteur bois dans la filière	6	3,3 Traitements physiques	18
2 Description générale du matériau, des produits et des procédés	7	3,31 Définition	18
2,1 Définitions	7	3,32 Traitements et stabilisations connus	18
2,11 Matériau béton de bois	7	3,33 Autres traitements	18
2,12 Stabilisation du béton de bois	7	3,4 Traitements thermiques	18
2,13 Produit	7	3,41 Torrification	18
2,14 Procédé	7	3,42 Autohydrolyse	19
2,15 Ouvrage	7	3,5 Traitements chimiques	19
2,2 Principales caractéristiques physiques, techniques et économiques du matériau : intérêts et inconvénients	8	3,51 Traitement sur les liaisons O-H	19
2,201 Généralités	8	3,52 Autres traitements	19
2,202 Résistance mécanique	9	3,6 Critères de choix pour évaluer les performances minimales des granulats de bois	19
2,203 Masse volumique	9	3,61 Reprise d'eau en milieu gazeux	19
2,204 Isolation thermique	9	3,62 Reprise d'eau en milieu liquide	19
2,205 Fabrication et capacité d'usinage	9	3,63 Solution test liant-ciment sur le bois	20
2,206 Acoustique	10	3,64 Espèce, essence, densité	20
2,207 Comportement vis à vis de l'incendie	10	3,65 Autres	20
2,208 Capacité de recevoir des fixations mécaniques («Clouabilité»)	11	3,7 Voies d'avenir : traitements des granulats	20
2,209 Variations dimensionnelles	12	3,71 Traitements d'interface	20
2,210 Coût	12	3,72 Aspect économique	20
2,3 Principaux produits et procédés identifiés	12	3,73 Association aux actions de recherche sur le ciment	20
2,31 Introduction	12		
2,32 Différents granulats recensés	13		
2,33 Ouvrages extérieurs	14		
2,34 Ouvrages intérieurs	15		
2,35 Ouvrages divers	16		

(suite du sommaire au verso)

4 Les composites ciment-bois	21	5,205 Conception des moules	33
4,1 La matrice cimentaire	21	5,206 Mise en place du béton (remplissage – vibration – compactage)	33
4,11 Les constituants du ciment	21	5,207 Manutention des produits frais	33
4,12 Les différentes catégories de ciment	21	5,208 Durcissement des produits	33
4,13 Les composés du clinker	21	5,209 Manutention et palettisation des produits jeunes	35
4,14 Hydratation du ciment	22	5,210 Cure et stockage des produits	35
4,15 Prise et durcissement des ciments	22	5,211 Usinage	35
4,16 Propriétés physiques et mécaniques des ciments	22		
4,2 Liaison granulats de bois-matrice	23	6 Nouvelles applications des bétons de bois (composites ciment-bois)	36
4,21 Liaison granulats-ciment	23	6,1 Présentation de la démarche adoptée	36
4,22 Cas particulier bois-ciment	24	6,2 Types de produits réalisables en béton de bois	37
4,3 Modification du comportement du ciment par le bois	24	6,201 Écrans anti-bruit absorbants	37
4,31 Action des retardateurs en général	24	6,202 Constructions en kit	39
4,32 Les composés extraits du bois	24	6,203 Plots et cales	39
4,33 Effet retardateur des composés extraits du bois	25	6,204 Constructions légères	39
4,4 Voies d'avenir au niveau de la matrice	25	6,205 Blocs	39
4,41 Performances et limites des composites actuels	25	6,206 Mobilier extérieur	39
4,42 Modification des matrices Portland	27	6,207 Sols sportifs	40
4,43 Autres matrices minérales	28	6,208 Chape de réhabilitation	40
		6,209 Petits éléments de murs de soutènement	40
		6,210 Éléments de cave à vin	40
		6,211 Bardages – vêtements	40
		6,212 Panneaux éléments de mur (panneaux)	40
		6,213 Plancher support de couverture	40
		6,214 Entrevous ou hourdis	41
		6,215 Précadres	41
5 Fabrication des bétons de granulats de bois	30	Conclusion	42
5,1 Généralités	30	Annexe	
5,2 Spécificités à prendre en compte dans la fabrication des bétons de granulats de bois	30	Cartes des forêts françaises	43
5,201 Choix des matières premières	30		
5,202 Choix des compositions des bétons	32		
5,203 Préparation des bétons	33		
5,204 Transports des béton frais	33		

RÉSUMÉ

Ce rapport dresse un état des lieux de la technique «béton de bois» en France, afin de cerner les problèmes de toute nature que rencontre cette filière et d'identifier les voies d'avenir susceptibles d'être empruntées. Les entreprises et industries qui fabriquent du béton de bois, matériau composite composé essentiellement de bois aggloméré dans une matrice cimentaire, sont en général de petites sociétés, quelques-unes étant des filiales de grands groupes. Leur nombre est actuellement de l'ordre de 20 et leur production de l'ordre de quelques dizaines de milliers de m³/an. La fabrication des granulats et des produits à base de béton de bois sont encore trop faibles et largement inférieurs à la moyenne des investissements du secteur bâtiment. Ces divers points font l'objet du chapitre 1.

Le chapitre 2 décrit le matériau et les produits et procédés recensés en France. Le béton de bois est un béton léger (sa masse volumique varie de 600 à 1 200 kg/m³). Il possède la plupart des caractéristiques de cette famille de matériau telles que son pouvoir d'isolation thermique ou sa facilité d'usinage. Sept types de granulats ont été recensés. Les produits les plus fabriqués sont les blocs de maçonnerie, les murs anti-bruit, les panneaux éléments de mur ou de toiture, les bardages pour les ouvrages extérieurs, les chapes de réhabilitation, les entrevous et les hourdis-caissons, les éléments de cave pour les ouvrages intérieurs.

Le chapitre 3, ainsi que les deux chapitres suivants, est essentiellement basé sur des recherches bibliographiques. Après une brève description du matériau bois et de l'état des forêts françaises, il recense les différents types de traitement du bois généralement pratiqués et les critères de choix permettant d'évaluer les performances minimales des granulats de bois.

Le chapitre 4 décrit de manière succincte la chimie des ciments et leurs propriétés physiques et mécaniques. Il expose ensuite l'état des connaissances sur la liaison granulats de bois-ciment et les réactions chimiques entraînées par la présence du bois au sein de la matrice cimentaire et, enfin, trace les différentes voies d'avenir à envisager afin de résoudre les obstacles au développement de la filière.

Le chapitre 5 expose les grandes étapes autour desquelles est organisée la fabrication des produits à base de béton de bois. Sur le plan général, on peut estimer qu'il n'existe pas de problèmes spécifiques à l'utilisation de granulats de bois. Il est nécessaire cependant de prendre un certain nombre de précautions. Ce sont les différences à prendre en compte par rapport aux bétons de granulats courants traditionnels et les questions qui n'ont pas de réponses techniques satisfaisantes à ce jour qui sont examinées.

Grâce à un travail de groupe s'inspirant de l'analyse de la valeur, un recensement aussi exhaustif que possible a été réalisé afin de déterminer les nouvelles applications les plus prometteuses des Composites Ciment-Bois (CCB). Les valeurs-cibles suivantes ont été retenues : masse volumique comprise entre 600 et 900 kg/m³, résistance mécanique comprise entre 3,5 et 4 MPa et variations dimensionnelles entre états extrêmes inférieures au mm/m. Un premier travail a permis de dresser une liste de 75 applications possibles susceptibles de mettre en œuvre le CCB. Après traitement, quinze familles ont été retenues, l'intérêt de l'utilisation des CCB est détaillé pour chacune d'elles. Ceci fait l'objet du chapitre 6.

Les atouts non négligeables du béton de bois sont :

- la facilité d'usinage favorisant les techniques de montage à sec ;
- la légèreté entraînant la proposition de nouveaux produits permettant des gains de productivité sur chantier ;
- la clouabilité et la vissabilité ;
- l'isolation thermique associée à des résistances mécaniques satisfaisantes ;
- l'inertie thermique contribuant au confort thermique ;
- l'absorption acoustique.

Cependant, il subsiste des obstacles à l'élargissement des applications et au développement de cette filière :

- le traitement satisfaisant des granulats (et en particulier la stabilité chimique et la teneur en eau qui doit être constante) ;
- la régularité et la maîtrise des réactions d'hydratation des liants hydrauliques et donc une meilleure connaissance des réactions à l'interface bois-ciment ;
- la diminution très sensible des variations dimensionnelles des bétons de bois qui ne devraient pas devoir dépasser le mm/m.

On peut toutefois signaler que des recherches en cours en France viennent d'aboutir à des progrès sensibles dans ces domaines (des brevets ont été déposés) mais qu'ils demandent à être validés par une expérimentation complète en laboratoire.

Mots-clés : béton de bois, béton léger, matériau composite, granulats, produits de construction, isolation thermique, absorption acoustique, variations dimensionnelles.

SUMMARY

This report draws up an inventory of the "wood concrete" technique in France in an effort to cover all the problems encountered in this sector and to identify the directions that may be taken in the future. The enterprises and industries which manufacture wood concrete, a composite material made up essentially of wood particles in a cement matrix are usually small companies; a few of them are subsidiaries of large groups. Presently they number about 20, and their production is of the order of some tens of thousands of square meters per year. Manufacture of the particles and basic concrete products are generally carried out by separate enterprises. Research efforts are still very restrained and investments are considerably less than the average in the building sector. These various points are covered in Chapter 1.

Chapter 2 describes the materials, products and processes known in France. Wood concrete is a light concrete (its apparent mass per unit volume varies between 600 and 1,200 kg/m³). It possesses most of the characteristics of this family of materials such as their thermal insulation power and workability. Seven types of particles have been counted. The products manufactured most frequently are masonry blocks, sound-proof walls, wall and roof panel elements, cladding for exterior works, rehab slabs, hollow floor blocks and caisson blocks, and basement storage units for interior work.

Chapter 3, as well as the two chapters which follow, is mainly based on bibliographical research. After a brief description of the wood used and the status of French forests, it lists the different types of wood processing in general use and the selection criteria used to evaluate the minimum performances of wood particles.

Chapter 4 briefly describes the chemistry of cements and their physical and mechanical characteristics. It then sets forth what is known about the bonding of wood particles with cement and the chemical reactions resulting from the presence of wood within the cement matrix. It then traces the different future directions which may be envisioned in order to resolve the obstacles to this sector's development.

Chapter 5 describes the major stages around which the manufacture of wood concrete products is organized. In general, it can be said that no manufacturing problems specific to the use of wood particles exist. However, it is necessary to take a certain number of precautions. These are the differences to be taken into account with respect to the traditional concrete aggregates in current use. The questions are examined which until now do not have satisfactory technical solutions.

Thanks to group work inspired by value analysis, an exhaustive review was carried out in order to determine the most promising new applications of wood cement composites (CCB). The following target values were selected: a density of between 600 and 900 kg/m³, mechanical resistance falling between 3.5 and 4 MPa, and dimensional variations between extreme interior conditions to the mm/m. The initial work carried out made it possible to draw up a list of 75 possible applications for the use of CCB. After processing, 15 families were selected, and the advantages of using CCB were detailed for each of them. This became the subject of Chapter 6.

The considerable advantages of wood concrete are:

- its ability to be worked easily favoring dry assembly techniques,
 - lightness, encouraging the proposal of new products resulting in productivity gains on the worksite,
 - its capability of being nailed and screwed,
 - thermal insulation associated with satisfactory mechanical strength,
 - thermal inertia contributing to thermal comfort,
 - acoustical power of absorption.
- However, certain obstacles to the expansion of applications and development of this sector still exist. These include:
- satisfactory processing of particles (in particular, maintaining chemical stability and a constant water content),
 - regularity and control of the hydration reaction of the hydraulic binders used, and consequently a better knowledge of reactions at the wood cement interface,
 - a very considerable lessening of dimensional variations of wood concretes which should not be allowed to exceed the mm/m.

Nevertheless, it should be noted that although research now under way in France has made considerable progress in these fields - patents have been applied for - the work must be validated by complete laboratory experimentation.

Key words: wood concrete, lightweight concrete, composite materials, aggregates, construction products, thermal insulation, acoustical absorption, dimensional variations.

RESUMEN

En este informe se precisa el estado actual de la técnica «hormigón de madera» en Francia, con objeto de delimitar los problemas de todo género con que se tropieza en este sector y, asimismo, identificar las soluciones futuras que pueden tener aplicación para su solución. Las empresas e industrias que fabrican hormigón de madera, material compuesto formado principalmente por madera aglomerada en una matriz de cemento, son, por lo general, pequeñas sociedades, algunas de las cuales son filiales de grandes grupos. Su número se eleva actualmente a unas veiente y su producción de algunas decenas de miles de m³/año. La fabricación de áridos y productos a base de hormigón de madera se efectúan generalmente por parte de empresa distintas. Los esfuerzos de investigación son aún demasiado reducidos y ampliamente inferiores al promedio de las inversiones del sector de la edificación. Estos diversos puntos son objeto del capítulo 1.

En el capítulo 2 se describe el material y los productos y procedimientos inventariados en Francia. El hormigón de madera es un hormigón ligero cuyo peso específico oscila entre 600 y 1 200 kg/m³, que posee la mayor parte de las características de esta familia de material, como, por ejemplo, su capacidad de aislamiento térmico y su facilidad de mecanización. Se han inventariado siete tipos de áridos. Los productos que más se fabrican son los bloques de mampostería, los muros contra el ruido, los paneles de elementos de muros o de cubiertas, los cerramientos para las estructuras exteriores, las capas de rehabilitación, las bovedillas y bloques huecos, y, asimismo, los elementos para sótanos para las estructuras interiores.

El capítulo 3, así como los dos capítulos siguientes, tratan concretamente de las investigaciones bibliográficas. Tras una breve descripción del material hormigón de madera y del estado de los bosques franceses, se describen los diversos tipos de tratamiento de la madera generalmente aplicados y los criterios de opción que permiten valorar las prestaciones mínimas de los áridos de madera.

En el capítulo 4 se describe compendiadamente la química de los cementos y sus propiedades físicas y mecánicas. A continuación, se expone el estado de los conocimientos acerca del enlace entre granulados de madera-cemento y las reacciones químicas que se derivan de la presencia de la madera en el interior de la matriz de cemento y, finalmente, se vislumbran las distintas soluciones futuras con objeto de resolver los obstáculos que se oponen al desarrollo proceso presentado.

En el capítulo 5 se exponen las principales etapas en torno de las cuales se organiza la fabricación de productos a base de hormigón de madera. Por lo general, se piensa que no existen problemas de fabricación específicos para la utilización de áridos corrientes tradicionales, así como los problemas que, hasta la fecha, no han tenido respuestas técnicas satisfactorias.

Mediante un trabajo de grupo se ha inspirado en el análisis del valor, se ha llevado a cabo un inventario lo más completo posible para determinar las nuevas aplicaciones más prometedoras de los compuestos cemento-madera (CCM). Se han adoptado los valores faro siguientes : peso específico que oscile entre 600 y 900 kg/m³, resistencia mecánica entre 3,5 y 4 MPa y variaciones dimensionales posibles que pueden implementar el material CCM. Tras procesamiento, se han seleccionado quince familias y el interés de la utilización del material CCM se especifica para cada una de ellas. Todo ello es objeto del capítulo 6.

Las ventajas nada insignificantes del hormigón de madera son :

- la facilidad de mecanización que es propicia las técnicas de montaje en seco ;
 - el peso reducido, que da lugar a la propuesta de nuevos productos y que permite conseguir ganancias de productivas en obra ;
 - la facilidad de introducir clavos y tornillos ;
 - el aislamiento térmico, completado por resistencias mecánicas satisfactorias ;
 - la inercia térmica, que contribuye al confort térmico;
 - la absorción acústica.
- No obstante, siguen subsistiendo dificultades para ampliar las aplicaciones, así como para el desarrollo del empleo de los CCM :
- el tratamiento satisfactorio de los áridos (y, fundamentalmente, la estabilidad química y las concentración en agua, que debe ser constante) ;
 - la regularidad y el control de las reacciones de hidratación de los aglomerantes hidráulicos y, por consiguiente, un conocimiento más amplio de las reacciones en la interface madera-cemento ;
 - la disminución muy apreciable de las variaciones dimensionales de los hormigones de madera, que no deberían ser superiores a un mm/m.

De todos modos, cabe señalar que las investigaciones que se están desarrollando en Francia han tenido como resultado progresos apreciables en estos ámbitos (ya se han registrado varias patentes) pero que, para su validación práctica, deberán ser objeto de una experimentación completa en laboratorio.

Términos clave : hormigón de madera, hormigón ligero, material compuesto, árido, productos de construcción, aislamiento térmico, absorción acústica, variaciones dimensionales.

Introduction

Les techniques de construction à base de produits en béton de bois sont relativement anciennes. Les premières codifications techniques de cette filière remontent en effet à la fin des années cinquante. Les années soixante ont vu se réaliser un grand nombre d'ouvrages en béton de bois, principalement des murs extérieurs en petits éléments de maçonnerie, tant en France qu'à l'étranger, en Suisse notamment, d'où était originaire le procédé le plus connu «Durisol ». A l'heure actuelle l'Autriche et le Canada font respectivement partie des pays pour lesquels le marché des éléments de maçonnerie et des écrans anti-bruit en béton de bois sont les plus importants. Rappelons que, outre les caractéristiques intéressantes que présente ce matériau (chapitre 2), le béton de bois répond au souci de plus en plus important des pays développés pour la préservation de l'environnement. En effet :

- le bois est une matière première renouvelable,
- le béton de bois permet de valoriser des déchets de bois, en particulier ceux de certaines essences non utilisables pour la fabrication du papier.

Rappelons également que le bois possède une «valeur d'es-time» importante auprès du grand public. L'axe marketing des années quatre-vingt-dix (cocooning, retour au naturel, ...) devrait être plutôt favorable au bois [1] (1).

Force est toutefois de constater qu'à ce jour la diffusion de ces techniques est assez confidentielle en France. Plusieurs raisons objectives expliquent ce phénomène : la croissance des exigences thermiques, l'évolution des produits associés tels que les enduits, l'apparition des nouvelles techniques concurrentes dans la famille des bétons légers, plus récemment les techniques d'isolation par l'extérieur, ... Toutes ces techniques ont amoindri progressivement la part de marché en proposant des alternatives efficaces aux différents arguments mis en avant par les bétons de bois.

On a périodiquement assisté à un renouveau de ces techniques, mais rarement d'ampleur notable. Ces nouvelles tentatives successives de promotion de la filière «béton de bois» lui ont donné un caractère officiel qui, hélas, ne s'est pas toujours trouvé fondé sur des bases techniques solides.

Les questions qui se posent sont les suivantes : quel est le bilan global des techniques de construction à base de produits en béton de bois ? quelles sont les perspectives de développement de la filière de construction en produits en béton de bois ?

C'est à ces deux questions que le présent rapport, établi conjointement par le CERIB, le CSTB et le CTBA sur demande du PCA (Plan Construction et Architecture), va tenter de répondre.

Il s'agit donc d'une sorte d'«état des lieux» de la technique «béton de bois» qui doit permettre de cerner les problèmes de toute nature que rencontre cette filière et d'identifier les voies d'avenir susceptibles d'être empruntées ; ce rapport n'a pas vocation à donner les solutions techniques et économiques aux difficultés rencontrées.

Un certain nombre de caractéristiques intéressantes ont été mises en avant par les personnes chargées de la commercialisation des produits en béton de bois. Elles découlent toutes de la légèreté du produit : isolation thermique, inertie thermique, augmentation de productivité sur chantier ... On présente au chapitre 2 l'ensemble de ces caractéristiques en essayant de dégager le vrai du faux, l'objectif du subjectif.

A ces caractéristiques doivent être rajoutées celles ayant trait à l'utilisation de certaines matières premières issues de productions non valorisées (voir, à ce sujet, le chapitre 3 relatif aux «aspects bois» de ces techniques). Les caractéristiques relatives la fabrication du produit, son usinage par exemple, sont traitées au chapitre 5.

Mais, en règle générale, l'attention n'a pas été portée sur certains phénomènes pouvant prendre des proportions particulièrement gênantes : des difficultés dans la fabrication proprement dite telles que l'irrégularité des temps de prise des bétons, point qui sera abordé en détail aux chapitres 4 et 5, des problèmes de durabilité des enduits extérieurs vraisemblablement non adaptés à un support dont la principale caractéristique est de posséder, dans bien des cas, des variations dimensionnelles non négligeables (voir chapitre 2).

Le problème fondamental est bien de proposer un produit permettant de satisfaire l'adéquation «performances des produits exigences pour les ouvrages». Certains défauts rédhibitoires pour un usage bien déterminé peuvent s'avérer acceptables pour un autre usage : par exemple, des variations dimensionnelles importantes sont inacceptables pour des maçonneries de blocs enduites selon les techniques les plus courantes, mais ne gênent en aucune façon la réalisation de petits éléments de murs anti-bruit.

Dans cette optique, le chapitre 2 fait la synthèse des procédés connus sur le marché, qu'ils soient ou non en cours d'exploitation.

Le chapitre 6, rédigé après plusieurs séances d'analyse de la valeur ayant eu lieu entre les différents partenaires associés à cette réflexion, fait une synthèse analogue sur les produits actuels et futurs susceptibles d'être réalisés. Il permet ainsi d'aborder avec plus de précision :

- l'ensemble des valorisations potentielles des caractéristiques des bétons de bois auxquelles parfois n'a encore été consacré aucun effort ;
- enfin, les chances de succès de tel ou tel développement technique ou commercial envisagé.

1. Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie *in fine*.

1

Présentation générale de la filière béton de bois

1,1 Les sociétés de la filière

Les entreprises et industries du secteur des produits en béton de bois sont en général de petites sociétés (IBS ou Fixolite par exemple) ou des artisans (Ascheri SA, ...). Certains grands groupes ont parfois des activités dans les bétons de bois (Ciments Lafarge, Entreprise Industrielle), mais toujours par l'intermédiaire soit de petites sociétés (Béton Léger du Midi dans CL), soit d'activités marginales au sein de certaines de leurs filiales (certaines usines de béton prêt à l'emploi pour Ciment Lafarge et le Département Béton Bois à Guéret pour EI).

Notons l'existence d'une société d'ingénierie ayant pour objet la recherche, le développement et la commercialisation de produits à base de béton de bois : A 93 Constructique.

D'une façon générale, toutes les sociétés de la filière ont rencontré des difficultés, celles-ci ayant parfois entraîné leur disparition du fait d'une taille d'entreprise souvent inférieure à la taille critique qui aurait permis à la société de faire face aux conséquences des problèmes techniques rencontrés.

Le cas de la Société DURISOL en Suisse qui a récemment fermé ses portes semble toutefois différent et résulter d'une décision politique, la filière de production du béton de bois n'étant pas assez rémunératrice.

Ces sociétés produisent les granulats de bois et/ou les produits en béton de bois. Dans ce dernier cas, il s'agit toujours de préfabricants de produits en béton classique qui cherchent à diversifier leur production en offrant aux consommateurs des produits de substitution.

Deux entreprises ont adopté la filière intégrée (production des granulats et des produits en béton de bois) : l'Entreprise Industrielle à Guéret et Fixolite en Belgique.

Les contacts pris dans le cours de l'étude ont permis de constater que si le nombre de société réellement engagées dans la filière de production de produits de construction en béton de bois était relativement faible, de l'ordre d'une dizaine, le nombre de sociétés qui ont produit ou qui souhaitent produire est considérablement plus grand, supérieur à 30.

Les nombreuses demandes de renseignement qui parviennent en particulier au CERIB et dans une moindre mesure au CSTB attestent de l'intérêt suscité par cette filière de construction.

1,2 Le volume de réalisation de la filière

Il est difficile de chiffrer avec exactitude le volume des réalisations en béton de bois et ce, pour plusieurs raisons : absence de suivi de la part de certains producteurs, multipli-

cité des produits (depuis le panneau de hauteur d'étage jusqu'au plot de palette) rendant acrobatique une estimation globale, évolution très rapide des sociétés (création, faillite), ...

Néanmoins, sur les bases données par les deux principaux producteurs de granulats en bois Agresta qui, d'ailleurs, ont depuis lors abandonné le procédé, on peut estimer que la production de ce procédé a été en 1988 de 25 000 m³ de granulats, ce qui permettrait de fabriquer plus de 30 000 m³ de béton de bois, et que cette production de granulats serait retombée à 17 000 m³ (soit plus de 20 000 m³ de béton) en 1990.

La Société Française d'Agrégats Stabilisés annonce de son côté avoir commercialisé en 1989 une quantité de granulats permettant de réaliser 60 000 m³ de béton, soit près de 25 % du marché français du béton léger prêt à l'emploi (estimation de Lafarge Béton Granulats).

A ces estimations, certes contradictoires, il faut rajouter une autre fabrication importante en volume : la Société EI à Guéret qui fabrique le béton de bois de la variante Durisol [1].

Pour définir la taille du marché des produits en béton de bois, nous avons adopté comme unité l'équivalent-m² ; toutes les quantités de produits en béton de bois produites ou vendues ont été ramenées à des quantités équivalentes de produits de façades (mur plein de 20 cm d'épaisseur) et, de ce fait, ont été exprimées en m².

Ainsi, d'après les informations qui ont pu être recueillies, on peut estimer raisonnablement que les réalisations françaises actuelles représentent, sur une année, un ordre de grandeur de 50 000 m². Cette estimation est sans doute pessimiste, certaines informations faisant état d'une production totale en équivalent m² de l'ordre de 100 000 m².

Pour situer les ordres de grandeur, cette valeur est comparable à la production d'une unité de fabrication de vêture en Composite Ciment-Verre ; elle est également comparable au volume de production d'une unité de fabrication de blocs en béton traditionnel qui fonctionnerait pendant trois mois.

Ce serait toutefois une erreur de ne juger que sur ce seul chiffre l'importance de la filière. En effet, les structures actuelles en place pour la promotion de ces techniques sont notoirement insuffisantes ; de même, les investissements en recherche qui auraient pour objet de résoudre certains des problèmes rencontrés à ce jour sont quasi inexistantes et, de ce fait, le volume de production n'a pas atteint les valeurs que l'on peut raisonnablement escompter.

Dans l'hypothèse où les problèmes techniques que l'on rencontre dans l'élaboration des produits et bétons de bois seraient résolus, il est certain que le volume de production s'en trouverait largement augmenté et il ne nous semble pas déraisonnable de parier sur un équivalent vingt fois plus fort à moyen et long terme, étant entendu qu'il recouvre des applications à la fois pour le bâtiment et pour le génie civil.

Ainsi, sous réserve de l'investissement nécessaire au développement de la technique, la filière béton de bois pourrait être comparée, en volume, à la filière béton cellulaire autoclavé, soit une valeur de l'ordre de 1 M m³/an.

1,3 Les recherches dans la filière

Comme déjà dit, les efforts de recherche dans la filière sont faibles ; on peut même admettre qu'ils ont été inexistantes, les progrès parfois enregistrés devant être mis sur le compte de l'acquis en production, avec toutes les conséquences néfastes qu'un tel type de développement peut générer sur l'image de marque de la technique en particulier.

Quelques équipes de recherche ont été identifiées ; l'une d'elle (ESSTIB - A93 Constructive) fonctionne sur crédits privés, les deux autres financées ou l'ayant été sur crédits publics sont soit en phase d'attente (INSA de Lyon), soit active sur des sujets connexes (École des Mines de St-Étienne).

Pour parler de la seule équipe actuellement active, les montants des investissements consacrés à la recherche ont été de 350 kF en 1988, 1 000 kF en 1989 et 800 kF en 1990. On remarquera que ces crédits de recherche n'ont été mis en jeu qu'à partir de l'année 1988, ce qui prouve que cette filière déjà ancienne n'en est encore techniquement qu'à son début.

Cette valeur est à comparer aux ratios habituels que l'on retient dans le secteur de la construction. On considère, en effet, que le secteur du bâtiment investit dans la recherche 1,5 % de son chiffre d'affaires : ce ratio, utilisable pour des activités déjà solidement établies, correspondrait, dans l'hypothèse évoquée au paragraphe précédent à un montant de l'ordre de 3 500 kF qui devrait être consacré à la recherche.

Un deuxième critère permettant de juger des actions de recherche est relatif au montant absolu de l'investissement : un montant de 2 000 à 3 000 kF paraît être le minimum en deçà duquel il n'est pas raisonnable d'attendre d'évolution majeure de la technique.

Rappelons que les efforts de recherche et de développement qui ont été consacrés au procédé Iseco ont été de l'ordre de 3 000 kF ; et de 2 800 kF pour la recherche et le développement consacrés à Iseco RTh 85. Encore faut-il retenir que, dans ce dernier cas, les problèmes ne résidaient que dans le dimensionnement et la conception du produit et non pas, comme c'est le cas des bétons de bois, dans le comportement intrinsèque du matériau constitutif des produits.

Ces comparaisons permettent de relativiser les choses ; on peut estimer que la recherche dans les techniques des bétons de bois a débuté sérieusement il y a trois ans avec des investissements de l'ordre de la moitié de ceux qu'ils devraient être pour espérer déboucher dans des délais raisonnables ; que les efforts actuellement consentis, a priori insuffisants pour une activité de développement d'une technique préexistante, semblent d'autant plus faibles pour une activité naissante.

Ces efforts étant soutenus presque exclusivement par une seule société, on comprend pourquoi des équipes ont été constituées pour rechercher des financements différents : propositions soumises à la CEE (programme FOREST) et dans un cadre national (programme Aliment 2002). Cependant, à ce jour, aucun projet n'a pu obtenir un financement de ce type.

1,4 La position du secteur bois dans la filière

A ce jour et de façon très générale, les sociétés du secteur bois ne semblent pas réellement concernées par la filière des bétons de bois. Deux raisons peuvent expliquer cette situation : d'une part, une certaine avancée du secteur bois en matière de valorisation des co-produits de l'industrie et, d'autre part, le fait que la valorisation de certaines forêts du type bois de taillis ne soit pas encore devenue une préoccupation majeure.

Mais ces considérations générales doivent être rapprochées du contexte global du secteur bois qui est traité par le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement dans le chapitre 3.

2

Description générale du matériau, des produits et procédés

2,1 Définitions

Il convient maintenant de définir avec plus de précision les différents termes employés dans la suite du rapport.

2,11 Matériau béton de bois

On peut définir les bétons de bois en se référant soit à leurs constituants, soit au process de fabrication utilisé.

Par «béton de bois», on entend un matériau composite à matrice cimentaire éventuellement adjuvantée et charges végétales de forme granulaire ; des charges minérales peuvent aussi entrer dans la composition des bétons de bois. Il s'agit donc de béton dans lequel les granulats minéraux auraient été partiellement remplacés par des granulats végétaux.

Ces granulats végétaux peuvent être de granularité comparable aux graviers, sables et fines ; dans ce dernier cas, il s'agit de sciure. Par contre, sont exclus du champs de l'étude les fibres végétales proprement dites et les éléments assimilables tels que les constituants du fibragglo qui confèrent aux produits des caractéristiques fondamentalement différentes.

Les mélanges définis ci-dessus peuvent être manufacturés de deux façons différentes : moulé et vibro-compacté ou coulé-pressé.

La première voie est la plus classique puisqu'elle est directement issue des fabrications de produits en béton traditionnel. Dans ce cas, le béton de bois est caractérisé uniquement par la nature de certaines charges ; c'est cette technique qui est l'objet de notre étude.

Le caractère marginal de la seconde (puisque'elle ne concerne que le procédé Viroc et les fibragglos) nous a amenés à l'exclure du champs de l'étude.

2,12 Stabilisation du béton de bois

Un béton de bois est dit «stabilisé» lorsque chacune de ses caractéristiques chimiques et physiques peut être considérée comme stable.

Outre une faible réactivité chimique face à l'environnement, on demande principalement à un béton de bois stabilisé d'avoir des variations dimensionnelles faibles en fonction des variations hygrothermiques auxquelles il est soumis.

Cette «stabilité» peut être améliorée par des traitements physiques ou chimiques qui peuvent être appliqués :

- aux granulats végétaux,
- à la matrice cimentaire ou au composite,
- enfin, au cours de la fabrication, par un process et une conception adaptés à ce type de bétons.

On voit donc qu'il y a plusieurs façons d'intervenir sur les bétons de bois. A ce jour, les efforts ont logiquement porté pour l'essentiel sur les traitements des granulats végétaux. Mais des résultats récents ont montré qu'une stabilisation des granulats n'entraînait pas forcément une stabilité satisfaisante du composite ; il convient donc d'adopter une démarche plus globale.

2,13 Produit

On désigne par produits toutes les fabrications en bétons de bois, qu'elles soient réalisées en usine (blocs, panneaux, pavés, ...) ou sur site (béton pour chape principalement).

Compte tenu de la définition des bétons de bois, on retrouve dans les produits la plupart des familles de production réalisées en béton traditionnel.

2,14 Procédé

Par procédé, on entend à la fois le produit en béton de bois et d'autre part certains des éléments accessoires indispensables à la mise en œuvre.

Par exemple, un procédé de maçonnerie peut être composé de blocs en béton de bois et de l'enduit extérieur associé ; pour être complet, un tel procédé devrait prévoir aussi le mortier de montage et l'enduit intérieur.

L'expérience montre que les procédés proposés sont rarement complets, ce qui explique d'ailleurs pour partie les difficultés rencontrées par les utilisateurs.

2,15 Ouvrage

Un ouvrage peut être caractérisé par les différentes fonctions qu'il doit remplir. Celles-ci sont détaillées au chapitre 6.

On connaît les six exigences essentielles énoncées dans la Directive Européenne 89/106 : résistance mécanique et stabilité, sécurité en cas d'incendie, hygiène, santé et environnement, sécurité d'utilisation, protection contre le bruit, économie d'énergie et isolation thermique.

Mais aux caractéristiques principales des produits, doivent être associées parfois des caractéristiques complémentaires indispensables pour que l'ouvrage puisse répondre aux exigences : c'est en particulier la caractéristique d' « aptitude à être revêtu » d'un mur en maçonnerie de blocs en béton de bois.

2,2 Principales caractéristiques physiques, techniques et économiques du matériau : intérêts et inconvénients

2,201 Généralités

Les bétons de bois appartiennent à la famille des bétons légers qui regroupe plusieurs types de produits. Une classification proposée par Lafarge Bétons Granulats est donnée dans la figure 1.

Les bétons mousse sont généralement adjuvants à l'aide de stabilisants et de fluidifiants.

On désigne par « valeur-cible » les valeurs des caractéristiques des bétons de bois qui ont été adoptées dans les programmes de recherche et développement présentés dans le cadre de la Communauté Européenne (Programme « Forest ») ainsi que dans le cadre national (Programme « Aliment 2002 »). Ces « valeurs-cible » sont :

- une masse volumique de 600 à 900 kg/m³,
- une résistance mécanique de 3,5 à 4 MPa,
- des variations dimensionnelles maximales de l'ordre de 1 mm/m.

En fait, la première difficulté technique réside dans le caractère simultané de ces trois exigences ; la deuxième difficulté est de résoudre ce problème technique dans un cadre financier réaliste, par la production d'un granulats de bois au coût de 180 à 350 F par m³.

Les principales caractéristiques quantifiables des bétons de bois actuellement sur le marché (résistance en compression, masse volumique apparente, variations dimensionnelles, réaction au feu, conductivité thermique, résistance en traction, module d'élasticité) sont résumées dans le tableau 1 ci-dessous.

En plus de ces caractéristiques, les bétons de bois présentent un certain nombre d'avantages plus difficilement quantifiables tels que :

- une bonne résistance au gel-dégel : dans un essai selon la norme NF B 10-513, des éprouvettes de béton de bois se sont bien comportées alors qu'un béton traditionnel ayant subi les mêmes cycles présentait une très large détérioration ;
- une absorption d'eau par capillarité plus faible que les briques ou blocs de terre cuite, ...

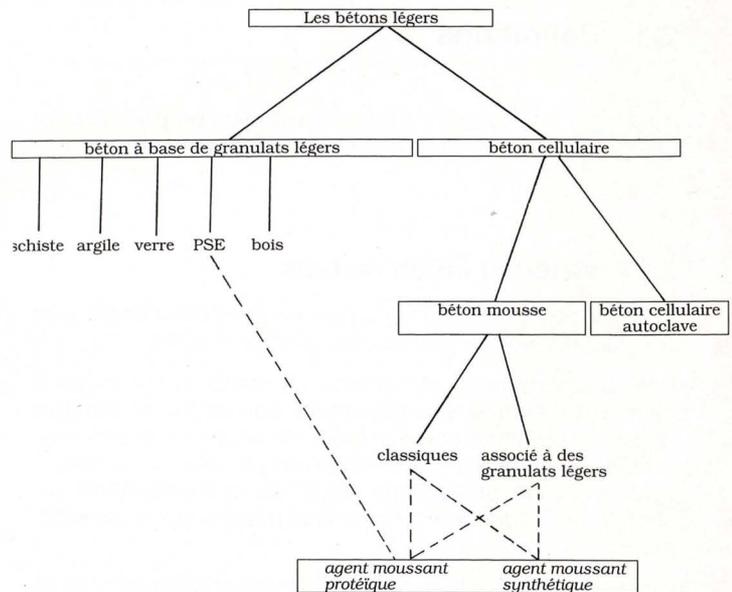


Figure 1 Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats

Tableau 1 Caractéristiques des bétons de bois

	Rc (MPa)	MVA (kg/m ³)	VD (mm/m)	Réaction au feu	k (W/m.°C)	Rt (MPa)	E (MPa)
Valeur-Cible Aliment 2002	3,5 - 4	600 - 900	< 1				
NF P 14-304	2,5 - 7	< 1700	< 0,45		ku > 0,16	0,5 - 1,16	
NF P 14-306	3 - 7	400 - 800	< 0,45				
Règle d'Agrément (1958)	> 0,65	> 450	L < 4 H < 12				
Agresta	2,5 - 4 2,5 - 4	500 - 700 600 - 800	4,5 1,37	M1	0,11 - 0,16	1,2 - 1,9	
mortier	2,2 7,8	730 1400	5,8 1				6500
Granuland	3,3	800 700	4,9		0,22 0,15		1630
Fixolite		480	7		0,11 ku = 0,14		1500
EI	0,67	650 710	4,7	M1	0,13		
Lithophore	> 1,3	950	< 0,9		ku = 0,27		

2,202 Résistance mécanique

A défaut de norme spécifique sur les bétons légers prêts à l'emploi, la résistance mécanique des bétons de bois peut être appréciée par comparaison avec la norme NF P 14-304 « Blocs en béton de granulats légers pour murs et cloisons ». Pour des blocs pleins, celle-ci prévoit trois classes de résistance à la compression : 3,5 - 4,5 et 7 MPa (pour le fractile de 0,05). Aucune valeur ne doit être inférieure à, respectivement, 2,8 - 3,6 et 5,6 MPa.

Ces valeurs de résistance sont relatives à des bétons de masse volumique inférieure à 1 700 kg/m³.

La résistance mécanique en compression des bétons de bois est, quelle que soit la masse volumique apparente, sensiblement plus faible que celle des bétons légers. Elle semble évoluer actuellement de 0,5 à 4 MPa pour des bétons de bois respectivement du type Durisol et Agresta.

Logiquement cette caractéristique est, comme pour les bétons classiques, une fonction croissante de la masse volumique ainsi que du dosage en ciment. Elle est, bien entendu, fonction du granulat (sa propre résistance et sa granularité), du dosage en liant.

Il est utile de noter que le comportement mécanique des bétons de bois est très différent de celui des bétons de granulats minéraux. Le rapport entre résistance à la compression et résistance à la traction est de l'ordre de 10 pour les bétons traditionnels : ce rapport est de l'ordre de 2 pour les bétons de bois.

La valeur-cible de 3,5 à 4 MPa semble correspondre actuellement à un maximum technique réalisable, si l'on veut de plus conserver les autres atouts des bétons de bois relatifs à une basse densité ; elle est en général largement suffisante pour assurer la fonction de portance lorsque celle-ci est requise pour l'ouvrage réalisé en béton de bois.

2,203 Masse volumique

Si les bétons légers ont une masse volumique inférieure à 1700 kg/m³, celle des bétons de bois oscille entre 450 et 1 000 kg/m³.

La valeur-cible de 600 à 900 kg/m³ correspond à ce qui est raisonnable, sachant qu'au-delà de 900 les performances d'isolation thermique diminuent considérablement et qu'en deçà de 600, d'une part la constance des caractéristiques est plus difficile à obtenir et, d'autre part, la résistance mécanique diminue nettement.

2,204 Isolation thermique

Toutes techniques confondues, la conductivité thermique des bétons de bois varie de 0,10 à 0,30 W/m.°C ; elle est annoncée à 0,16 dans le DTU « Règles Th-K 77 » pour une masse volumique comprise entre 450 et 650 kg/m³.

Elle est de ce fait comparable à celle des bétons caverneux ou semi-caverneux (article 3,234 du DTU « Règles Th-K »), à celle des bétons de granulats très légers (article 3,24) ou au béton cellulaire autoclavé (article 3,25).

Le plus grand flou existe toutefois sur cette caractéristique, provenant essentiellement du fait que, hormis la valeur du DTU ci-dessus, il n'est généralement pas précisé s'il s'agit de « λ_{utile} » ou de « λ_{sec} » ; les détenteurs de système se gardent bien de le préciser et, sur ce point, l'Avis Technique a apporté une grande clarification, souvent dans le sens contraire aux souhaits des producteurs.

On note en effet une grande modification de la valeur de k en fonction du taux d'humidité du composite ; celle-ci peut être fournie par la formule suivante :

$$\lambda_{\text{humide}} = \lambda_{\text{sec}} (1 + 0,025 \tau_m)$$

où τ_m est le taux d'humidité exprimé en masse pour les bétons de bois (pour les bétons à agrégats minéraux, ce taux est exprimé en volume) ; en l'absence de donnée plus précise, on prend $\tau_m = 10\%$; la correction par rapport au λ_{sec} est donc de + 25 %.

L'examen de la *figure 2* montre que les bétons de bois présentent une conductivité thermique intéressante sensiblement inférieure, à mva égale, au béton cellulaire autoclavé.

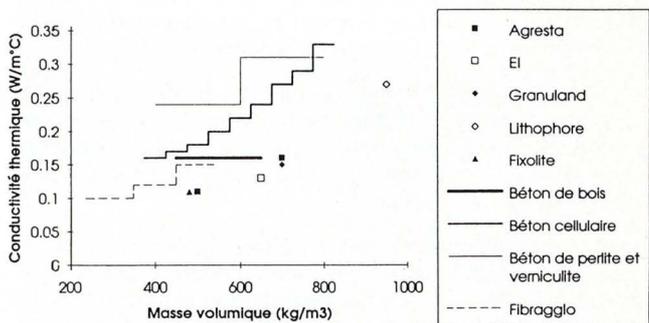


Figure 2 Conductivité thermique de différents bétons de bois comparée aux valeurs λ_{utile} annoncées dans le DTU « Règles Th-K 77 » pour divers bétons de granulats légers

Toutefois, il faut observer que le béton cellulaire autoclavé (BCA) est utilisé actuellement en 0,400 et 0,450 de densité, dès lors que des exigences thermiques sont en jeu, soit avec un Lu de 0,16 ; pour obtenir des performances thermiques équivalentes, la technique actuelle des béton de bois va demander un béton de 0,5 à 0,7 de densité qui ne présentera pas obligatoirement les mêmes caractéristiques de résistance et de régularité que le BCA.

Les bétons de bois présentent de plus l'intérêt de mobiliser une certaine inertie thermique favorable à l'obtention d'un niveau de confort d'été satisfaisant ; cette inertie est proportionnelle à la masse et, en conséquence, d'autant plus réduite que la masse volumique est faible et le pouvoir isolant élevé. Toutefois, les quelques habitations réalisées en béton de bois (maçonnerie, dans la plupart des cas) que nous avons pu visiter ont confirmé cet aspect très favorable du confort thermique délivré par ce matériau.

2,205 Fabrication et capacité d'usage

Ces deux points sont plus largement développés dans le chapitre 5 « Fabrication des bétons de granulats de bois ».

La fabrication des produits en béton de bois est en général identique à celle des bétons classiques, qu'ils soient à base de granulats courants ou légers. Les machines sont identiques, le process aussi ; la seule modification consiste à substituer partiellement des granulats végétaux aux granulats minéraux. Les temps de séjour dans les moules et machines sont comparables ; seul, le temps de séjour dans les chambres d'étuvage ou d'auto-étuvage peut être différent, en général plus long. Il en est de même pour le temps de stockage pour stabilisation sur parc.

Il y a, toutefois, dans cette comparaison deux différences importantes. La première est une conséquence des réactions chimiques qui se produisent au sein du composite et veut que le temps de prise du béton soit allongé de façon importante ; on a même observé, dans certains cas extrêmes, que cette prise ne se faisait pas. Il s'agit là du principal inconvénient de fabrication des bétons de bois qui a d'ailleurs entraîné l'échec de certains procédés, ce d'autant plus que la régularité du temps de prise entre différentes livraisons de granulats n'a pas été toujours assurée. Le chapitre 4 explique ce phénomène dans le détail.

La deuxième constitue actuellement un avantage indéniable : c'est la capacité de réaliser facilement des usinages après fabrication de produits. Prenons l'exemple des maçonneries. Le montage à sec des blocs de maçonnerie a toujours été une préoccupation des industriels ; il peut augmenter la productivité du chantier dans des proportions importantes mais requiert une grande précision dimensionnelle (peu compatible avec les performances des machines de production utilisées couramment en France) pour pouvoir empiler correctement les blocs et obtenir un ouvrage satisfaisant.

A ce jour, un seul procédé de bloc en béton de granulats courants a résolu le problème de façon satisfaisante : c'est le procédé Stepoc qui fait appel, après fabrication, au dépôt sur les blocs de petits tas de ciment qui sont ensuite calandrés par une machine spéciale.

Un procédé de maçonnerie en blocs de béton de ponce faisait appel à un fraisage des faces d'appui, mais le caractère abrasif de la ponce a considérablement gêné le procédé en augmentant fortement la consommation des têtes de fraisage. Cet inconvénient n'existe pas pour les bétons de bois. Il est toutefois remarquable qu'à ce jour aucun système n'ait fait appel à cette intéressante propriété des bétons de bois.

La facilité d'usinage peut aussi, mais à moindre degré, trouver un intérêt dans la réalisation d'assemblage sur chantier. Ce point a été avancé par quelques détenteurs de systèmes et résoud avantageusement la réalisation de certains points singuliers d'une construction qui, pour des procédés classiques, ne sont pas ou mal traités.

Il n'en demeure pas moins vrai que le meilleur moyen d'éviter sur chantier des hétérogénéités de réalisation consiste à respecter un calepinage précis intégrant le module du procédé.

2,206 Acoustique

Les performances acoustiques présentées par les bétons de bois se révèlent particulièrement intéressantes du point de vue de l'absorption caractérisée par le coefficient α_s Sabine.

La *figure 3* montre un spectre d'absorption caractéristique d'un béton de bois. On y remarque que le coefficient devient notable pour les fréquences supérieures à 400Hz.

Bien entendu, ce spectre peut être modifié en jouant sur l'épaisseur du matériau, sur la forme des produits : on peut ainsi arriver, avec un même béton, à un spectre tel que celui de la *figure 4* qui présente un meilleur comportement aux basses fréquences.

Quant aux caractéristiques d'affaiblissement acoustique, on peut considérer en première approximation que les bétons de bois suivent la loi de masse expérimentale.

La complémentarité de ces deux aspects du comportement acoustique font des bétons de bois un matériau très intéressant.

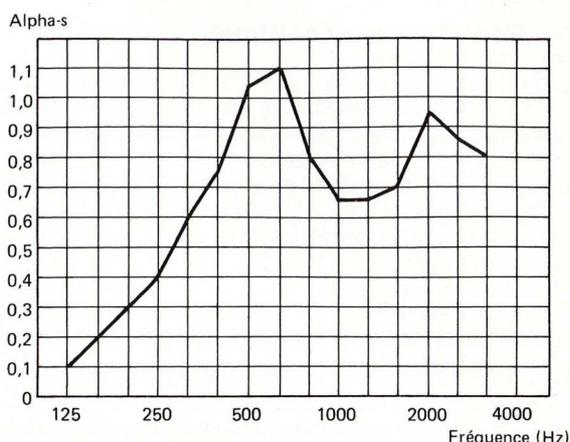


Figure 3 Courbe d'absorption acoustique d'un béton de bois

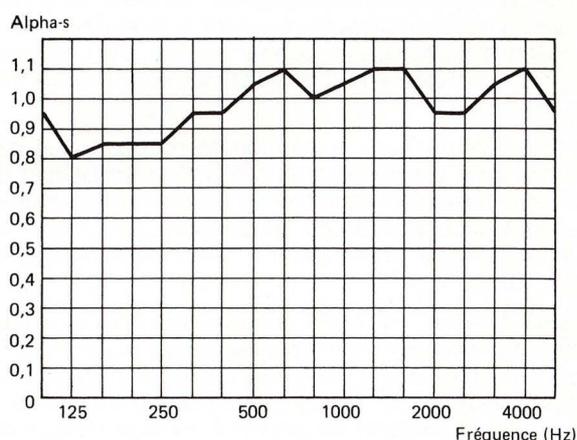


Figure 4 Courbe comparable à celle de la figure 3 obtenue après modification de la forme des éléments

2,207 Comportement vis-à-vis de l'incendie

Les bétons de bois sont généralement classés M1 pour la réaction au feu. Ce classement résulte de l'existence de matières végétales donc combustibles, mais difficilement mobilisables du fait de leur enrobage dans une matrice cimentaire. Dans le cas où la matrice devrait être modifiée par des quantités importantes d'ajouts organiques, ce classement pourrait être différent.

Pour la résistance au feu, les choses sont moins bien cernées.

La Société FIXOLITE a fait réaliser un essai de résistance au feu dans les laboratoires de l'Université de Gand. Un mur en blocs-coffrage montés à sec dans lesquels du béton a été coulé est mis en charge à raison de 392 kN par mètre linéaire puis essayé selon la norme belge NBN 713.020. Les observations et conclusions sont données dans le *tableau 2*.

Bien que ces résultats ne soient pas directement transposables en termes réglementaires français, ils dénotent un bon comportement des bétons de bois face à l'incendie.

A notre connaissance, il n'y a eu en France qu'un seul essai de résistance au feu d'ouvrage en béton de bois : à la demande de l'Entreprise Industrielle, un essai de plancher a été réalisé au CSTB et a fait l'objet du procès-verbal de classement 90.31256. De cet essai, il ressort qu'un plancher réalisé en hourdis caissons (EI), disposé en fond de coffrage d'un plancher béton, peut être classé comme degré de stabilité au feu et de coupe-feu 1h 30 pour des éléments de 60 cm x 60 cm et 3 ou 4 heures pour des éléments de 90 cm x 90 cm.

Tableau 2 Observations et commentaires sur un essai de résistance au feu d'un mur en blocs coffrage Fixolite

Temps en minutes	Observations
	En appliquant la charge totale, le mur se déforme vers le four (± 6 mm au point M) et l'enduit se fissure le long des bords verticaux du mur.
0	Début de l'essai.
30	L'enduit se fissure du côté du four.
66	Un dégagement faible de fumées et de vapeur d'eau apparaît dans la zone 1.
	Des taches d'humidité apparaissent dans les zones 2, 3, 4, 5, 6 et 7.
144	L'enduit se colore légèrement : l'emplacement des joints entre les blocs devient apparent du côté non exposé.
180	Un dégagement faible de fumées et de vapeur d'eau apparaît dans la zone 8. Une coloration brune apparaît dans les zones 8, 9 et 10.
270	L'augmentation maximale de la température mesurée sur le mur est de 74 °C.
360	L'augmentation de la température moyenne est de 60 °C.
	Arrêt de l'essai
Critères	Durée en minutes
Stabilité	> 360 (1)
Étanchéité aux flammes	> 360 (1)
Isolation thermique	> 360 (1)

2,208 Capacité de recevoir des fixations mécaniques («clouabilité») (voir photo 1)

L'aptitude des bétons de bois à recevoir un revêtement par fixation mécanique est assez peu utilisée. Seul à ce jour, le procédé Fixolite, émanation belge du procédé Durisol, a prévu ce cas.

Le dimensionnement du clouage est effectué conformément aux indications du *tableau 3* en bas de page.

Dans cette caractéristique, réside un avantage certain des techniques de construction à base de béton de bois.

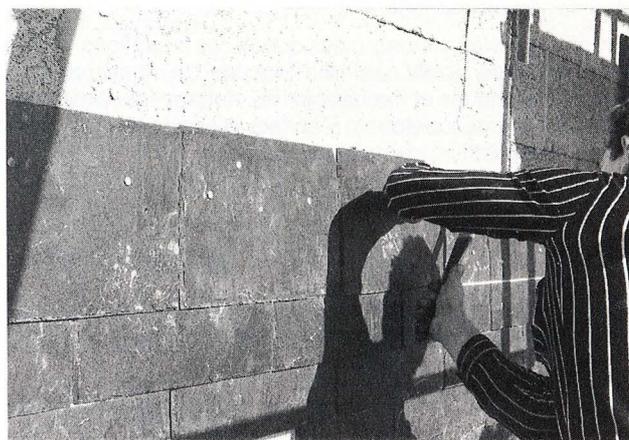


Photo 1 Pose d'écailles en ardoise pour bardage par clouage sur murs en béton de bois (Fixolite)

Tableau 3 Spécifications des fixations directes sur béton de bois

<p>Le poids maximal des éléments pouvant être fixés directement sur les blocs FIXOLITE est de 100 kg/m².</p> <p>La fixation est obtenue soit par clouage, soit par agrafage. Ces fixations doivent être protégées contre la corrosion conformément aux dispositions retenues pour la fixation mécanique d'éléments de couverture (DTU de la série 40).</p> <p>La méthode de détermination de la résistance admissible de la fixation est donnée dans l'annexe ci-après, à titre d'information.</p> <p>Connaissant la résistance admissible de la fixation (C), le nombre de fixations par élément (n) est donné par la formule :</p> $n > \frac{F}{c}$ <p>avec F = effort de dépression au vent extrême sur l'élément de bardage (surface totale de l'élément).</p>	<p><i>détermination de la résistance admissible des fixations d'éléments de bardage sur les blocs FIXOLITE</i></p> <p>a) On effectue 40 fixations dans les blocs FIXOLITE selon une profondeur correspondant à la profondeur réelle d'enfoncement en œuvre.</p> <p>b) On mesure, pour chacune de ces fixations, les valeurs :</p> <p>f_{1i} = charge maximale supportée par la fixation (effort axial).</p> <p>f_{1i} = charge correspondant à un déplacement axial de la fixation de 1 mm.</p> <p>c) On détermine ensuite les valeurs moyennes :</p> $\bar{F}_1 = \frac{\sum f_{1i}}{40} \text{ et } \bar{F}_r = \frac{\sum f_{ri}}{40}$ <p>et les écarts types :</p> $\bar{\sigma}_1 = \sqrt{\frac{\sum (f_{1i} - \bar{F}_1)^2}{39}}$ <p>et</p> $\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum (f_{ri} - \bar{F}_r)^2}{39}}$	<p>d) Les résistances caractéristiques des fixations sont données par :</p> $F_1 = \bar{F}_1 - 1,85 \sigma_1$ $F_r = \bar{F}_r - 1,85 \sigma_r$ <p>e) La résistance admissible (C) à prendre en compte dans les calculs est la valeur la plus faible entre :</p> $\frac{1,75 F_1}{S} \text{ et } \frac{F_1}{S}$ <p>où S (coefficient de sécurité) = 3.</p> <p>Ce coefficient de sécurité tient compte de la nature du mur FIXOLITE, de la possibilité d'amplification des efforts par le bras de levier entre le point de jonction mur-élément et le point de fixation et de la non prise en compte dans le calcul des recouvrements entre éléments.</p>
--	--	--

2,209 Variations dimensionnelles

Deux sortes de variations dimensionnelles existent : les premières, conséquence des réactions d'hydratation lors de la prise du liant de la matrice sont irréversibles et leur influence peut être limitée par le respect d'une période de stockage après fabrication telle que la part résiduelle après livraison soit faible. C'est généralement le cas dans les fabrications de blocs de maçonnerie en béton de bois pour lesquels le temps de stockage peut dépasser 4 à 6 semaines. Il faut voir dans cet aspect de la question un défaut qui ne semble pas trop rédhibitoire.

La seconde est relative aux variations d'ambiance hygrothermique : alternance de beau et mauvais temps. Ces variations sont réversibles et ne peuvent pas être diminuées par un quelconque artifice extérieur.

Comme pour les bétons classiques, ces variations dimensionnelles réversibles sont une fonction décroissante de la masse volumique, et croissante du dosage en ciment. La figure 5 résume quelques résultats d'essais de variations dimensionnelles.

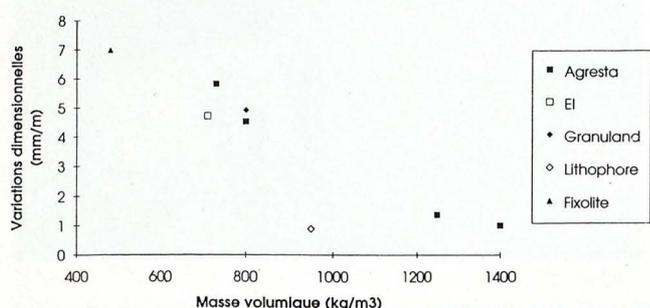


Figure 5 Variations dimensionnelles entre états conventionnels extrêmes de différents bétons de bois obtenues après immersion dans l'eau et séchage en étuve

Les normes relatives aux bétons légers ou cellulaire auxquelles on peut se référer précisent que l'amplitude de ces variations dimensionnelles entre états extrêmes (état sec - état humide par immersion dans l'eau) doit être plafonnée à 0,45 mm/m.

Les mesures effectuées sur les bétons de bois sont d'un autre ordre de grandeur : 5 mm/m, soit 10 fois plus. Encore faut-il souligner qu'il s'agit de valeurs moyennes ; certaines valeurs individuelles atteignent 10 mm/m.

Il semble que l'humidité intervienne dans le fluage du bois et peut-être, par voie de conséquence, dans le fluage du béton de bois ; elle pourrait modifier la cinétique du fluage du béton et serait elle-même sujette à variations en fonction du temps. Ainsi les valeurs indiquées qui résultent d'essais rapides doivent être considérées comme des valeurs instantanées.

Les effets de ces variations dimensionnelles n'apparaissent en fait réellement que lorsque l'on complète l'ouvrage par un revêtement adhérent (enduit par exemple), ou lorsque des ouvrages laissés apparents sont réalisés dans des dimensions importantes.

Pour limiter les conséquences de ces variations, l'on est conduit à limiter les surfaces monolithiques et à utiliser des revêtements adaptés : ce dernier point constitue, dans l'état actuel des connaissances, une faiblesse notoire des bétons de bois, car :

- les enduits traditionnels à base de chaux aérienne, mis en œuvre en plusieurs couches en respectant des délais d'application entre couches suffisants pour que les retraits et mises en place se fassent, sont devenus économiquement non compétitifs ;

- les enduits modernes (généralement monocouches) n'ont pas été conçus pour de tels supports ; les spécifications établies pour les monocouches applicables sur support en béton cellulaire ne semblent pas encore suffisantes pour assurer leur pérennité lorsqu'ils sont mis en œuvre sur béton de bois.

Dans l'état actuel des techniques les plus couramment utilisées, il est assez clair que les bétons de bois devrait être limités à la fabrication de produits destinés à la réalisation d'ouvrages sans revêtements adhérents.

De tels produits et ouvrages existent : le paragraphe 2,3 en fait une description.

Mais les efforts qui sont entrepris par certaines sociétés (voir paragraphe 1,3) visent à résoudre ce problème technique pour élargir le marché du béton de bois et lui permettre de se positionner sur des créneaux de la construction beaucoup plus conséquents (voir, à ce sujet, le chapitre 6).

2,210 Coût

Les informations recueillies sur ce sujet sont très éparpillées et leurs exploitations n'est pas aisée.

D'une part, les volumes produits sont faibles (pas d'effet de masse) et, d'autre part, les deux procédés les plus diffusés sont sur des filières différentes : Béton Bois Système fait partie de la filière intégrée, Agresta fait partie de l'autre filière.

Nous disposons toutefois de quelques ordres de grandeur des coûts qui fixent les idées :

- les bétons prêts à l'emploi fabriqués à partir de granulats Agresta sont évalués à 1 000 F le m³ (source Ciments Lafarge) ;
- le prix de revient d'une chape Agreslith est donné pour 120 à 150 F le m² en 10 cm d'épaisseur sur parquet conservé, soit un équivalent de 1 200 F à 1 500 F le m³, y compris la mise en œuvre (source Agresta) ;
- en fonction du dosage en ciment, le béton de la Société Entreprise Industrielle varie de 625 F à 745 F le m³ (source EI).

Il est à noter que le coût des béton de bois varie considérablement avec le granulats de bois utilisé, le dosage en ciment, les éventuels adjuvants dans la matrice cimentaire, ...

Il paraît plus réaliste de parler du coût des granulats de bois. Celui-ci dépend étroitement de plusieurs paramètres : la granularité, l'essence, le traitement appliqué, ...

Il est difficile de connaître ce coût dans la filière intégrée (EI). Par contre, on peut estimer le coût d'un granulats de bois (à partir de données Agresta) à près de 250 F le m³. Rappelons que, sur ce point, la valeur-cible relative à la production d'un granulats de bois est de 180 F à 350 F par m³.

La valeur-cible adoptée résulte de la volonté de mettre sur le marché un granulats végétal directement concurrentiel avec les granulats minéraux.

2,3 Principaux produits et procédés identifiés

2,31 Introduction

Lors de l'enquête que nous avons réalisée auprès des industriels, nous avons pu constater la grande diversité des produits qui sont ou ont été fabriqués en béton de bois. Certes, l'identité des processus de fabrication a conduit de nombreux

industriels à substituer directement les granulats végétaux aux granulats minéraux ; le succès de cette transposition directe a été pour le moins mitigé essentiellement du fait des caractéristiques particulières des bétons de bois qui n'ont pas toujours été adaptées aux exigences.

Pour la réalisation d'ouvrages extérieurs, les industriels ont proposé principalement :

- en annonçant des performances mécaniques et thermiques, des blocs porteurs de maçonnerie pleins ou creux et des blocs de coffrage avec ou sans isolant spécifique intégré dans le vide central : c'est le cas typique du procédé Durisol ;
- pour les mêmes raisons, des panneaux de hauteur d'étage ou éléments de bardage de grandes dimensions, avec ou sans enduit mis en œuvre en usine ;
- du fait des qualités acoustiques du matériau et en particulier son coefficient d'absorption Sabine, des éléments de murs anti-bruit colorés ou non dans la masse ;
- du fait de la légèreté alliée à l'isolation thermique, des panneaux de toitures.

Pour la réalisations d'ouvrages intérieurs, les industriels ont proposé principalement :

- des bétons prêts à l'emploi ou gâché sur chantier pour la réalisation de chapes de plancher utilisées principalement pour la réhabilitation, en concurrence directe avec tous les bétons légers,
- des dalles de plancher au même titre que des dalles en béton armé classiques, et pour la même raison de poids,
- des entrevous et hourdis-caissons en coffrage de plancher à haute performance acoustique,
- des boisseaux,
- des coffres divers, tels que coffre de volets-roulants.

Pour la réalisations d'ouvrages divers, les industriels ont proposé principalement :

- des éléments de cave,
- des plots à palettes et cales de blocage,
- des pavés autoblocants.

Compte tenu de la définition qui a été donnée aux bétons de bois, certains procédés ont été exclus du champ de l'étude. C'est le cas typique du fibragglo, matériau très courant mais dont les propriétés et les utilisations sont nettement différentes des bétons de bois.

Dans les paragraphes suivants, nous exposons les résultats d'une enquête menée auprès des principaux industriels fabricant ou ayant fabriqué des produits en béton de bois. Il s'agit souvent de productions ayant donné lieu à de nombreuses réalisations. Les renseignements techniques présentés peuvent parfois dans ce cas être extraits de documents officiels : compte rendu d'essais, Avis Technique, etc.

Nous présentons également des informations sur un grand nombre de systèmes dont la diffusion est restée confidentielle. Dans ce cas, nous précisons, dans la mesure du possible, les arguments mis en avant dans la promotion commerciale des produits. Les renseignements techniques fournis n'ayant pu être vérifiés, ils n'engagent en aucune façon les auteurs de ce rapport.

Des contacts entrepris avec les membres du réseau ENBRI (Européen Network of Building Research Institutes), il ressort que les bétons de bois tels que définis dans cette étude ne constituent pas un pôle d'intérêt manifeste pour les laboratoires étrangers.

2,32 Différents granulats recensés

Comme cela est décrit aux chapitres 3 et 4, la fabrication du béton de bois implique des réactions physico-chimiques complexes. Celles-ci entraînent pour le fabricant des difficultés qui concernent notamment la maîtrise des vitesses de prise et l'obtention de variations dimensionnelles des produits finis suffisamment faibles. Ces propriétés sont essentiellement liées à la qualité des granulats (choix du bois et traitement). Si certains fabricants ont bien intégré les exigences et spécificité de la production des granulats de bois, en particulier dans le cas des applications au secteur de la construction, cela n'a pas été toujours le cas. Des sinistres sont malheureusement à déplorer.

2,321 Agresta

L'Agresta est un granulats de bois obtenu à partir de déchets de bois traités thermiquement, puis imprégnés de chlorure de calcium puis de silicate de potassium (Brevet français n° 8102941). Il est actuellement commercialisé par la Société AGRESTA à St-Malo (35)

2,322 Lithophore

Le granulats de la Société LITHOPHORE à Canet-Plage (66) était constitué de liège torréfié produit en Espagne.

2,323 Granuland

Ce granulats est fabriqué par ASHERI SA à Morcenx (40) à partir de sciure traitée.

2,324 Silwood

Le traitement du granulats de bois mis au point par IBS à Chindrieux (73), le Silwood, consiste en l'enrobage des granulats par de la micro-silice dont le rôle serait de limiter les reprises d'eau lors de l'hydratation du ciment d'une part et de neutraliser les interactions chimiques entre le bois et le ciment qui sont à l'origine des effets inhibiteurs de prises, d'autre part. Ce procédé a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

2,325 Chènevotte

La Société CHÈNEVOTTE HABITAT produit le granulats Isochanvre et le commercialise en sacs de papier de 100 litres. Ce granulats existe en deux versions : Isochanvre Construction et Isochanvre Isolation. Ces granulats sont incorporés dans une matrice à base de chaux et mis en œuvre par banchage.

2,326 Canobiote

Vraisemblablement identique à l'Isochanvre, la Canobiote, fabriquée par la Société LA CHANVRIÈRE DE L'AUBE à Bar-sur-Aube (10) consiste en des morceaux plats et allongés de 2 x 12 mm obtenus par broyage et battage de la tige de chanvre. Il n'est pas prévu de traitement particulier de ces particules.

2,327 Braisor

Aucune information précise n'a pu être recueillie sur le granulats Braisor qui serait fabriqué en quantité tout à fait confidentielle par la Société LANGUEDOCIENNE DE BOIS ÉNERGIE près d'Alès (30).

2,33 Ouvrages extérieurs

2,331 Murs en maçonnerie (voir photo 2)

La plupart des industriels fabriquant des produits en béton de bois ont investi ce domaine en proposant soit des blocs creux, soit des blocs de coffrage. Généralement fabriqués à base de béton de copeaux ou plaquettes de bois, ces blocs ont également été réalisés à partir de béton de liège Lithophore et de mortier de sciure Granuland.

Les fabrications portent sur des blocs de coffrage avec ou sans insert d'isolant spécifique (laine minérale comprimée ou polystyrène expansé) montés à sec. La gamme des blocs comporte, outre les blocs courants, les blocs spéciaux permettant de réaliser les points singuliers d'une construction : blocs d'embrasure pour insertion des baies, blocs de chaînage et de linteau, blocs d'angle, demi-blocs courants. La gamme de certains industriels s'est trouvée, au cours des ans, légèrement simplifiée au profit d'un bloc « universel » permettant par découpe sur chantier de réaliser simplement les blocs spéciaux.

Les fonctions requises sont en général correctement remplies par les produits présentés, la principale étant, pour les blocs de coffrage, l'isolation thermique. On retiendra comme inconvénients majeurs :

- le délai de livraison des blocs compris entre 3 et 6 semaines suivant les fabricants, afin de limiter les variations dimensionnelles à la livraison ;
- les prescriptions de réalisation des enduits extérieurs relativement contraignantes. A noter que Béton Bois Système fournit une documentation précise sur la réalisation de murs en maçonnerie : contrairement à beaucoup de ses concurrents, cette société n'éluide pas le problème des enduits extérieurs.

2,332 Murs en panneaux (voir photo 3)

Il s'agit de panneaux constitués d'une âme de béton de bois, éventuellement armée, sur les surfaces de laquelle sont coulé deux plaques de béton ou de mortier classique ; il s'agit donc d'un panneau sandwich. Les dimensions sont de l'ordre de 1 m de large pour une longueur maximale d'environ 7 m. L'épaisseur des panneaux, fonction des dimensions en surface, varie de 140 à 250 mm. Les panneaux peuvent être montés soit horizontalement, soit verticalement. La réalisation des joints fait appel à des techniques classiques : garniture de joint et renforcement par bande de mousse ou cordon de mastic.

2,333 Murs anti-bruit (voir photo 4)

Les caractéristiques acoustiques des bétons de bois ont amené certains industriels à proposer des procédés de murs anti-bruit.

Les éléments de mur anti-bruit sont généralement constitués d'un voile de béton armé traditionnel assurant la résistance statique de l'élément, auquel est associée une épaisseur de 20 cm environ de béton de bois nervuré qui confère à l'élément ses performances acoustiques. Les éléments peuvent être des panneaux de grande longueur (environ 4 x 1,5 m) qui sont empilés entre des raidisseurs métalliques ou en béton avec interposition d'un joint afin d'assurer l'étanchéité entre les panneaux et d'absorber les éventuels petits défauts de surface.

Ces éléments peuvent également être des dalles d'environ 0,5 x 0,5 m qui peuvent être fixés mécaniquement sur parois existantes. Chez certains fabricants, la production de ces panneaux semble être largement automatisée. Ils sont généralement vendus peints ou teintés dans la masse.



Photo 2 Pose de mur de maçonnerie en blocs de béton de bois banché. Cette maçonnerie est confectionnée au pied du bâtiment puis montée à la grue pour mise en œuvre au niveau désiré

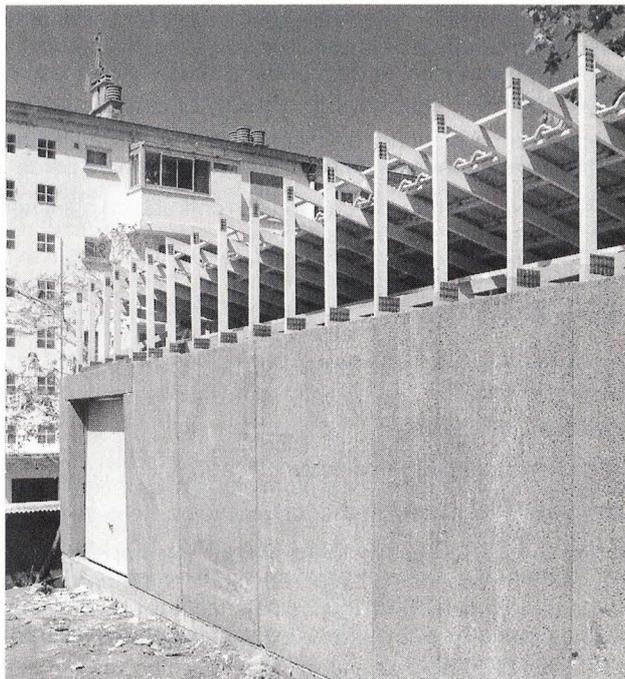


Photo 3 Façade de bâtiment en panneaux de béton de bois (Agresta)

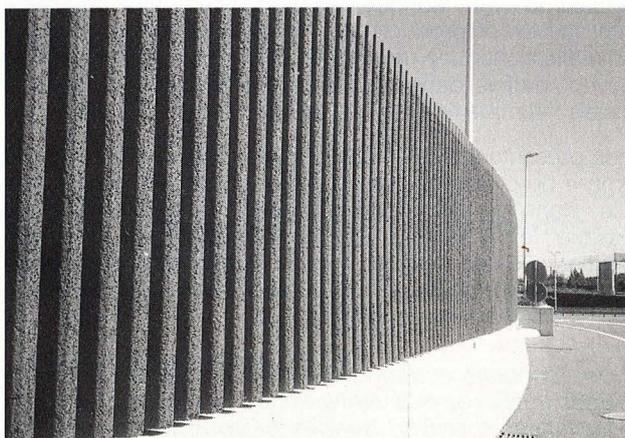


Photo 4 Écran anti-bruit en béton de bois à Neuchâtel en Suisse (IBS)

2,334 Bardages

Les dimensions des éléments de bardage sont généralement les suivantes : largeur : environ 50 cm, longueur : 2 - 4 m, épaisseur : 10 - 15 cm. L'âme en béton de bois est revêtue de béton fin côté extérieur et de mortier de ciment côté intérieur.

La mise en œuvre de ces éléments se fait généralement horizontalement. Un profil rainure et languette permet l'emboîtement des éléments, l'étanchéité à l'air étant apportée par un cordon de mousse, l'étanchéité à l'eau par un rejingot.

Il existe également des éléments de bardage isolants qui peuvent être assimilés à une vêtue. De dimensions 1,2 x 0,6 m, ces panneaux sont composés d'un bloc de PSE de 70 mm rainuré sur lequel a été coulé une couche de béton de bois de 15 mm d'épaisseur. La mise en œuvre de ces éléments est obtenue par vissage, clouage, collage ou en coffrage de murs en béton banché.

2,335 Panneaux de toiture

Les panneaux de toiture sont constitués par une âme en béton de bois sur laquelle est appliquée une couche de béton ou de mortier de 10 à 20 mm d'épaisseur selon l'épaisseur totale du panneau et la portée ; cette couche sert de support à un revêtement. Dans la zone tendue du panneau sont logées des armatures longitudinales enrobées de béton classique. Les épaisseurs des panneaux sont de 5 à 26 cm, la largeur standard de 50 cm, la portée maximale entre appui variant de 2 à 5,3 m.

2,336 Abris divers

Les niches à chien peuvent également être une application du béton de bois. Il est proposé des niches composées de panneaux de 45 mm d'épaisseur. Les fabricants font valoir leur caractère isolant et hydrofugé.

2,337 Habitations légères de loisirs (HLL)

Les réalisations d'habitations légères de loisirs en béton de bois ne semblent pas avoir été très nombreuses à ce jour.

2,34 Ouvrages intérieurs

2,341 Chapes pour réhabilitation

La légèreté, l'isolation thermique et des résistances mécaniques non négligeables constituent les principaux arguments techniques qui conduisent à utiliser les bétons légers pour réaliser des chapes intérieures dans les réhabilitations. On rappelle que la réhabilitation représente près de 85 % du marché des bétons légers.

Avec ces mêmes arguments, les fabricants de granulats végétaux proposent leurs produits aux entreprises. Néanmoins, les documentations techniques auxquelles se référer sont très peu nombreuses.

Les questions techniques liées à la réalisation de chapes en béton de bois sont les suivantes :

- la durée du séchage de la chape qui conditionne le délai de pose d'un revêtement ;
- l'ampleur des variations dimensionnelles résiduelles, sachant qu'une humidification partielle de la chape n'est pas exclue ;
- la résistance mécanique en particulier au poinçonnement lors de l'utilisation de revêtements souples ;
- la réalité de l'isolation thermique sur des ouvrages réalisés «in situ».

Cependant, les progrès réalisés dans la fabrication des granulats semblent apporter des solutions à ces problèmes.

2,342 Dalles de plancher

Constituées par une âme de béton de bois sur laquelle est appliquée une couche de mortier traditionnel, ces dalles de plancher peuvent être de grande largeur (2,5 m) pour une longueur maximale de 6 m. Leur épaisseur est comprise, en fonction des dimensions, entre 5 et 25 cm. Dans la zone tendue du panneau sont logées des armatures longitudinales enrobées de béton traditionnel.

Il existe également des dalles constituées de modules en polystyrène expansé de 1,2 x 0,6 m dans lesquels une réservation positionnée au centre du module permet de couler une poutrelle en béton armé. La sous-face de ces modules est recouverte d'une couche de béton de bois de 20 mm d'épaisseur qui serait clouable et vissable. L'accrochage de la couche de béton de bois dans la masse de PSE se fait par rainure et languette.

2,343 Entrevous et hourdis-caissons (voir photo 5)

Il s'agit d'une production relativement importante en volume. Les éléments sont disponibles en plusieurs dimensions : de 50 cm à 1 m de côté pour une hauteur allant de 20 à 60 cm. Le fond peut être ouvert ou fermé.

Le béton de bois peut également dans le cas de ces produits être associé au PSE. Disponibles avec ou sans languette, ces entrevous peuvent recevoir un plafond suspendu, l'accrochage est obtenu par clouage ou vissage.



Photo 5 Mise en place de hourdis-caissons (EI)

2,344 Éléments de cave

Les fabricants proposent des éléments de cave empilables.

L'incorporation du granulat de bois dans le béton vise plusieurs objectifs :

- stabilisation de la température ambiante (grâce à l'inertie thermique),
- régulation du degré d'humidité,
- absorption des vibrations.

2,345 Boisseaux

La conception des boisseaux à double isolation est la suivante :

- un boisseau interne en béton traditionnel de schiste assurant la tenue aux températures élevées (conforme à la norme NF) ;

- une enveloppe de laine de roche haute densité comme première isolation ;
- un boisseau extérieur en béton de bois alvéolé assurant une isolation supplémentaire, une solidité au transport et à la manutention, un bon accrochage des enduits ; les deux enveloppes intérieures et extérieures doivent être soutenues en partie basse.

2,346 Coffres divers : coffres de volets-roulants, ...

Les sociétés proposent, dans ce domaine, une palette de nombreux produits en béton de bois tels que tabourets pour compteurs d'eau, caveaux, box pour animaux, coffres de volets-roulants, ...

En ce qui concerne cette dernière famille de produit, l'adaptabilité souvent nécessaire sur chantier par sciage fait du béton de bois un matériau particulièrement bien adapté.

A un degré moindre, les coffres de volets roulants en béton de bois contribuent à l'isolation thermique et acoustique.

2,35 Ouvrages divers

2,351 Plots à palettes et cales de blocage

Les plots à palette et cales de blocage pour l'industrie, dont la production est actuellement arrêtée, étaient obtenus à partir de béton de bois comprimé par un laminoir en une feuille de grande dimension et d'épaisseur variable en fonction des besoins ; cette feuille était ensuite découpée aux dimensions requises. Les performances des bétons de bois n'ont jamais permis de mettre en valeur cette technique de production.

Les fabrications de plots de palettes réalisés par moulage sous presse ont également été arrêtées en France. Cette technique est actuellement utilisée en Italie avec du granulat Silwood.

2,352 Pavés

Les pavés en béton de bois fabriqués sur des presses à pavés classiques semblent pouvoir être concurrentiels sur le marché en raison des conditions de fabrication très proche de celles du produit traditionnel. Certains, fabriqués avec du granulat Silwood, ne nécessiteraient pas de prémouillage et permettraient des conditions de palettisation compatibles avec des installations de très grosse capacité de production.

2,353 Sols sportifs

Les fabricants proposent des terrains de tennis et des pistes de golf miniature.

Les terrains de tennis sont constitués d'une dalle en béton de bois recouverte de brique pilée afin d'obtenir un résultat similaire à un terrain de terre battue, d'une peinture similaire à celle qui est appliquée sur un béton poreux ou d'un revêtement synthétique. Les fabrications de terrains de tennis avec pavés autoblocants ont été arrêtées.

2,354 Récifs marins artificiels

Il s'agit de pyramides quadrangulaires tronquées en béton de bois de 1,4 tonne. L'intérieur des récifs est évidé et ouvert sur le milieu marin afin de laisser le libre passage à la faune. Ils ont une double mission : faire obstacle aux «arts traînants» interdits dans certaines zones et constituer des lieux de reproduction pour les poissons et crustacés. Un récif est en cours d'observation par une équipe d'Ifremer. Des tests ont prouvé le bon comportement à l'eau de mer du béton de bois.

3

Traitements des granulats de bois

3,1 Introduction

Le bois est composé d'éléments simples dans les proportions suivantes :

- carbone : 50 %
- oxygène : 43 %
- hydrogène : 6 %
- azote : 1 %.

Ses trois constituants principaux sont la cellulose, la lignine et les hémicelluloses. La proportion moyenne variant en fonction des espèces est la suivante :

- cellulose : 45 - 50 %
- hémicelluloses : 20 - 35 %
- lignine: 18 - 30 %.

La cellulose et les hémicelluloses donnent au bois son caractère hygroscopique.

De plus, le bois contient de nombreuses substances naturelles telles que les tanins ou extraits (chêne, châtaignier) et les résines (pins).

Les paramètres qui peuvent influencer la composition chimique du bois sont :

- l'origine géographique,
- l'âge,
- l'espèce.

Les traitements qu'aura subis l'arbre entre son abattage et son utilisation, la durée écoulée entre ces deux actions peuvent également influencer la composition chimique du matériau.

Les arbres indigènes se classent en deux groupes bien définis :

- les résineux dont les feuilles sont des aiguilles ou des écailles comme le sapin, l'épicéa, le douglas, les pins... Ce sont dans ces essences que l'on trouve des gommages ou résines ;
- les feuillus couverts de feuilles généralement caduques comme le chêne, le hêtre, le châtaignier. Ce sont dans certaines de ces essences que l'on trouve des substances naturelles comme les tanins.

Dans ces conditions, le nombre et la complexité de ces paramètres peuvent être sources de difficultés lors de l'utilisation du bois dans des produits de composites comme le béton de bois.

Ce chapitre recouvre donc l'ensemble des traitements pouvant rendre le bois inerte et stable dimensionnellement vis-à-vis du béton et ainsi constituer un matériau composite suffisamment stable et apte à l'utilisation.

3,2 Essences disponibles et utilisables

3,21 Cartographie du massif forestier français

Quelques données économiques sur la forêt française paraissent importantes à la fois pour savoir où se trouvent les espèces utilisables et en quelle quantité.

L'ensemble sur pied de la surface totale de la forêt française est de 1 860 millions de mètres cubes pour l'année 1989, l'exploitation forestière est de 40 millions de m³ (pour un accroissement annuel moyen de la forêt française de 64 millions de m³).

Les essences utilisables pour le béton de bois les plus importantes en volume ont été répertoriées sur les 21 départements les plus boisés :

- pin maritime : 175 millions de m³
- hêtre : 140 millions de m³
- sapin : 130 millions de m³
- chêne-rouvre : 130 millions de m³
- chêne pédonculé : 120 millions de m³
- épicéa : 115 millions de m³
- pin sylvestre : 100 millions de m³.

Le volume des autres essences disponibles est inférieure à 40 millions de m³.

La cartographie établie concerne les cinq essences majeures, le chêne-rouvre et le chêne pédonculé qui peuvent, toutefois, être d'un emploi plus délicat lors de traitements ou d'applications ultérieures à cause des tanins qu'ils renferment.

Quelques remarques s'imposent :

- les trois départements les plus boisés sont dans l'ordre :
 - les Landes (73,4 M/m³ + 5 M/m³ de chênes),
 - la Gironde (53,1 M/m³ + 5 M/m³) et
 - les Vosges (50,4 M/m³ + 10 M/m³).
- le pin maritime est très localisé dans le sud-ouest ;
- les autres régions très boisées pour les essences choisies sont l'est de la France (Alsace-Lorraine) et Rhône-Alpes.

3,22 Sous-produits disponibles

Pour les 38,9 millions de m³ de la production forestière commercialisée en 1989, la répartition est la suivante :

- bois d'œuvre feuillus : 9,7 millions de m³
- bois d'œuvre résineux : 14 millions de m³
- bois d'industrie papetière : 12,5 millions de m³
- bois de feu commercialisé : 2,7 millions de m³.

La production des scieries en 1989 est de 10,5 millions de m³ en sciage feuillus (1/3) et résineux (2/3), et 5,7 millions de tonnes de produits connexes utilisables pour le béton de bois.

Ces produits connexes sont disponibles sous différentes formes : principalement sciure, déchet de déroulage, plaquettes écornées.

Le prix des sous-produits sont donnés au *tableau 4* ci-après.

Tableau 4

Essences	F/tonne	
	Scierie	Déroulage
Pin	153	120
Hêtre (plaquettes écornées)	147	120
Sapin-Épicéa	153	120
Divers feuillus	145	120

Si les prix de ces sous-produits paraissent élevés, ceci est dû au fait que la demande est très forte. En effet, ces déchets ont été pendant longtemps considérés avec peu d'intérêt par l'ensemble des professions du bois. Puis les différentes crises de l'énergie se succédant, toute matière première, même sous sa forme la moins noble, a été soucieuse de récupération et d'exploitation optimale d'où le regain d'intérêt pour ces produits connexes du bois.

Les principales utilisations sont faites à l'heure actuelle dans l'industrie papetière (même si les sous-produits demandent parfois une préparation particulière), dans l'industrie domestique (litière d'animaux par exemple). Ces sous-produits sont également consommés sous forme de combustible de chauffage.

Mais il existe une autre potentialité très importante sous forme de taillis ou de bois d'éclaircies. Il faut savoir en effet que la moitié de la forêt française se trouve être du taillis simple ou un mélange futaie-taillis et représente un volume de bois considérable.

Aujourd'hui, une grande partie des sous-produits de scierie est récupérée ou vendue, ce qui aura une incidence certaine sur l'aspect économique du produit «béton de bois». Par contre, les ressources forestières peu exploitées comme les taillis peuvent être source d'approvisionnement en bois bon marché pour le matériau composite.

3,3 Traitements physiques

3,31 Définition

Ces traitements d'interface ont pour but principal de limiter les transferts d'eau avec le milieu extérieur et sont accompagnés d'une imprégnation plus ou moins légère du bois.

En effet, les procédés rencontrés sont soit le gonflement du bois, soit son enrobage avec pénétration minimale des produits en surface pour éviter la libération de sucre (lors de la mise en présence du ciment hydraté) très néfaste à la prise du matériau [1] [2] [3].

3,32 Traitements et stabilisations connus

Les traitements physiques existants sont de plusieurs types :

a) une imprégnation à coeur qui permet de faire gonfler volontairement le bois tout en le laissant chimiquement identique. C'est un remplissage des vides cellulaires. Et pour cela, il est utilisé des techniques d'imprégnation vide-pression.

Il a été montré [4] que les échantillons traités à 44 % de polyéthylène glycol (PEG) diminuent le retrait d'un facteur 10 avec des résistances mécaniques inchangées. Des échantillons traités avec 15 à 20 % de PEG ont un retrait définitif de 0,1 % à 56 jours.

D'autre part, des traitements effectués au Japon [5] avec des huiles paraffines et résines montrent que celles-ci remplissent les cellules et les vides du bois empêchant la libération des sucres et autres substances défavorables au composite béton de bois, lors de la mise en présence du liant hydraulique.

Le séchage et les propriétés mécaniques du matériau ne semblent pas affectés ;

b) un enrobage superficiel qui permet d'isoler le matériau bois et de le rendre inerte vis-à-vis d'agents extérieurs.

Des études ont montré le caractère isolant des résines et paraffine [6], d'autres essais ont été effectués avec des hydrofuges de type stéarate d'aluminium.

Enfin, un autre traitement est la «minéralisation» des copeaux de bois (ou imprégnation minérale) avec une solution de chlorure de calcium, ou de pâte de chaux et d'une solution de silicate de soude [7]. En effet, une «minéralisation» idéale aurait un effet triple ; elle diminuerait la capacité d'absorption d'eau et l'hygroscopie du bois, elle augmenterait la dureté propre du granulats et jouerait un rôle ignifugeant.

D'autres systèmes d'imprégnation du bois ont été également mis au point, avec des sels tels que les chlorures de magnésium ou sulfates d'aluminium [26].

3,33 Autres traitements

Une stabilisation physique-mécanique concerne la géométrie et la taille des copeaux de bois [9]. Il a été montré qu'un échantillon long et fin donne de bons résultats au niveau de la stabilité dimensionnelle et du gonflement (40 % d'amélioration).

Il a été aussi mis au point [10] un traitement d'imprégnation (entre 15 et 30 %) par une solution de résine de pétrole suivi d'une compression du bois qui réduit le gonflement volumique de 30 %.

Enfin, des enrobages de particules de bois spécifiques existent à partir de verre soluble, bitume ou polyvinyle acétate [26].

3,4 Traitements thermiques

3,41 Torrification

La torrification consiste à chauffer par un gaz inerte le bois jusqu'à une température de 280 °C et à le maintenir à cette température suffisamment longtemps pour que la structure chimique soit modifiée.

La combustion des particules de bois ne se produit pas du fait de l'utilisation de gaz inerte [11].

Le départ d'eau du bois a lieu jusqu'à une température de 160 °C puis, jusqu'à 260 °C - 280 °C, le bois perd du gaz carbonique et une grande partie de l'acide acétique. Ce départ de produit correspond à la dégradation des hémicelluloses, constituants du bois les plus sensibles à la chaleur [12]. Lors du chauffage, la lignine ne se dégrade pas (seulement à partir de 300 °C).

Le bois torréfié se caractérise par une humidité très basse (3 % en atmosphère saturée) pour un procédé à 260 °C [13]. Le bois torréfié est plus fiable, faiblement hygroscopique et de couleur brune.

3,42 Autohydrolyse

L'autohydrolyse du bois permet de solubiliser une grande partie des hémicelluloses responsables du gonflement des bois. Ce traitement à chaud (160 °C) sous pression (pendant 15 heures) conduit à une amélioration de la stabilité dimensionnelle du bois [14]. Seule, la création de nouvelles liaisons entre les composants chimiques des parois cellulaires amène une forte réduction du gonflement. Les résultats obtenus montrent une amélioration de l'ordre de 40 à 60 %, mais aussi une diminution des propriétés mécaniques en flexion et cisaillement.

Un traitement qui a mis en évidence l'augmentation de stabilité dimensionnelle [8] est un traitement intermédiaire thermique-chimique. Il consiste en un chauffage entre 175 et 195 °C sous pression d'azote, et donne des réductions de gonflement de bois de 30 à 60 % suivant l'essence, l'humidité et le temps de séchage.

3,5 Traitements chimiques

3,51 Traitement sur les liaisons O-H

Un certain nombre de travaux concernant le remplacement des groupements hydroxyl (responsables de l'hygroscopicité du bois) par d'autres groupements chimiques plus hydrophobes ont été réalisés dans le monde.

Il a été utilisé l'oxyde de butylène qui diminue de 50 % le gonflement du bois et de 25 % l'absorption d'eau, et l'anhydride acétique qui diminue respectivement de 85 % et 50 % [15]. D'autres essais avec l'oxyde de butylène et de propylène ont montré que le gonflement tangentiel et le gain d'humidité étaient nettement diminués [16]. En y ajoutant des agents de réticulation en particulier avec une résine furanique, les améliorations peuvent aller de 25 à 100 %.

Une autre combinaison entre l'oxyde de propylène et un diisocyanate a été étudiée [17] avec des résultats significatifs pour les reprises d'eau et la stabilité dimensionnelle.

D'autres moyens ont été mis en œuvre pour bloquer chimiquement les groupes O-H, l'estérification par des anhydrides d'acide et en particulier l'acétylation. C'est l'emploi d'anhydride acétique en solution dans la pyridine [18] ou le xylène [7] qui réduit de 40 à 80 % l'eau absorbée et le gonflement des particules de bois. Beaucoup d'autres produits organiques ont été testés [19] pour modifier chimiquement le bois. En plus de ceux déjà cités, on peut signaler les formaldéhydes, les diméthyl sulfates, les acrylonitriles, les β propiolactones, les époxy qui diminuent fortement le gonflement du bois de 50 % à 80 % selon les cas.

Enfin, des traitements de surface, où les liaisons chimiques bois-produit sont moins fortes, sont également employés. Des agents ignifugeants comme le silicate de soude ou de potassium, des agents d'étanchéité comme le carbonate de baryum sont alors utilisés [20], ainsi que des oxyphosphates de magnésium [21].

3,52 Autres traitements

Il existe d'autres traitements chimiques envisageables : certains en utilisant des compromis de deux traitements, d'autres avec des produits destinés à d'autres applications.

Un premier traitement consiste généralement à traiter thermiquement puis chimiquement les particules afin de leur donner certaines propriétés (préservation, isolation). Les produits employés pour ce type de traitement sont des sulfates de sodium, chlorures de calcium, carbonate de chaux ou des agents tensioactifs comme les dérivés sulfonés [22].

Un autre traitement avec le trioxyde de chrome (le meilleur parmi les oxydes testés) donne de bons résultats à un test d'absorption d'eau en formant un complexe avec le bois [23]. D'autres essais avec des dérivés du chrome et du cuivre semblent donner aussi des garanties pour une meilleure stabilité dimensionnelle [24]. FEIST et le F.P. Laboratory ont beaucoup travaillé sur le sujet pour améliorer la durabilité des finitions.

3,6 Critères de choix pour évaluer les performances minimales des granulats de bois

3,61 Reprise d'eau en milieu gazeux

Les méthodes d'évaluation de la teneur en eau du bois sont nombreuses.

La reprise d'eau en milieu gazeux la plus utilisée, car facile à mettre en œuvre, est la méthode par pesée. On mesure les masses des échantillons à poids constant (anhydre ou dans une atmosphère humide connue) au début, puis on change d'humidité relative de l'air et on mesure de nouveau la masse des échantillons lorsqu'ils ont atteint l'équilibre.

Ainsi, par rapport à un témoin non traité, il est facile de mesurer l'efficacité des traitements.

Les différentes conditions opératoires restent fonction des méthodes utilisées et fourniront des renseignements sur les cinétiques de reprise d'eau.

3,62 Reprise d'eau en milieu liquide

De même que pour la reprise d'eau en milieu gazeux, on effectue les mêmes opérations pour le test d'immersion.

On place les échantillons dont l'humidité est parfaitement connue en immersion dans l'eau et on les laisse un temps T. La mesure de la reprise d'eau se fait par différence entre la masse finale et la masse initiale. On mesure toujours en parallèle un témoin non traité qui permet d'apprécier l'efficacité du traitement et les cinétiques de réaction.

Les méthodes (liquide et gazeux) ont déjà donné des résultats pour évaluer le pouvoir isolant du traitement [25]. Ainsi l'on constate que la reprise d'eau liquide est la plus faible pour du sapin imprégné de paraffine.

3,63 Solution test liant-ciment sur le bois

Ce test qualitatif est l'analyse d'une solution test liant-ciment mis en présence des granulats de bois.

Les granulats ayant subi un traitement physique ou chimique peuvent en effet avoir, lors de la mise en présence du liant hydraulique, des comportements inattendus avec migrations de produits ou réactions chimiques (sucres, extraits).

Il est donc nécessaire de mettre ces granulats modifiés en présence d'une solution test parfaitement identifiée (eau chaude-soude diluée) [27] et de la réanalyser après un certain temps d'immersion du bois.

3,64 Espèce, essence, densité

Les espèces et essences des bois sont des critères essentiels de choix. On sait que deux grandes familles se partagent la forêt française :

- les résineux qui, d'une façon générale, ne présentent pas de problème d'emploi particulier, l'excès de résine étant à prendre en compte ;
- les feuillus qui, pour certaines essences, posent des problèmes. En effet, les bois comme le chêne ou le châtaignier renferment des produits extraits à l'eau, appelés tanins, qui seraient très néfastes à la fabrication de béton de bois. Par contre, d'autres feuillus comme le hêtre peuvent être utilisés sans réserve.

La densité des essences semble de peu d'importance du fait de la petite taille des granulats même si des copeaux de forte densité sont plus difficiles à traiter en imprégnation.

En cas d'incertitude, une analyse microscopique peut déterminer l'essence.

3,65 Autres

Des tests mécaniques peuvent être envisagés sur des granulats traités et réagglomérés, ou sur du bois massif traité. Mais on n'est pas sûr de mesurer par compression, flexion ou résistance aux chocs l'effet du traitement uniquement (effets de la colle).

Il est possible aussi d'envisager, pour les reprises d'eau, des cycles d'immersion-séchage ou de changement d'ambiance.

Enfin, le critère de gonflement est important, mais les variations d'épaisseur sont difficilement mesurables pour des particules minces.

3,7 Voies d'avenir - Traitements de granulats

3,71 Traitements d'interface

Quel que soit le traitement envisagé, c'est une performance qui est visée non pas sur les granulats, mais sur le matériau composite. Une variation dimensionnelle entre états extrêmes de l'ordre de 1 millimètre par mètre est un premier but à atteindre pour le béton de bois.

Une équipe de recherche travaille sur le sujet à l'ESSTIB (École Supérieure des Sciences et Technologie des Industrie du Bois) en collaboration avec A93 et semblerait s'orienter vers un traitement d'imprégnation des granulats pour des raisons techniques et économiques.

3,72 Aspect économique

Il faut cependant tenir compte de tous les impératifs et en particulier des aspects économiques. Après avoir maîtrisé l'aspect technique de la stabilisation de granulats et de sa compatibilité avec le liant hydraulique, il faut s'assurer que cette fabrication de bois modifié est économiquement viable.

En effet, il faut utiliser une essence dite «propre» et commune, et un traitement technologiquement simple et d'un coût peu élevé.

3,73 Association aux actions de recherche sur le ciment

Il faut principalement maîtriser la phase traitement des granulats de bois et, ensuite, s'associer aux différentes actions de recherche sur le ciment, en tenant compte des produits présents ainsi que de ce que sera le matériau ciment dans un avenir plus ou moins proche.

Dans cette optique, des études conjointes entre les différents partenaires scientifiques sont à envisager et à promouvoir.

4

Les composites bois-ciment

4,1 La matrice cimentaire

Les ciments sont des liants hydrauliques, c'est-à-dire des poudres minérales capables en réagissant avec l'eau de former une pâte faisant prise et durcissant progressivement même à l'abri de l'air [1] [3] [6] [9].

4,11 Les constituants des ciments

Ce sont des constituants anhydres dont les propriétés peuvent être hydrauliques (capacité de former avec l'eau des composés stables), pouzzoloniques (faculté de réagir avec la chaux) ou physiques pour modifier certaines propriétés (maniabilité, compacité, ...).

Le clinker est le composé essentiel des ciments Portland. Il est issu de la cuisson de roches calcaires et argileuses.

Le laitier pour cimenterie est obtenu par refroidissement brusque d'une scorie provenant du traitement du minerai de fer. Il doit avoir des propriétés hydrauliques.

Les cendres volantes provenant de centrales thermiques sont issues de la combustion de la houille (propriétés pouzzoloniques) ou de lignite (propriétés hydrauliques).

Les pouzzolanes naturelles d'origine volcanique ont naturellement la capacité de réagir avec la chaux. Elles sont composées essentiellement de silice, alumine, oxyde de fer. Les pouzzolanes artificielles contiennent les mêmes constituants mais leur activité pouzzolonique est développée par un traitement thermique.

Les fillers sont obtenus par broyage fin de certaines roches naturelles (calcaire, basalte, kieselguhr, ...) ou artificielles (laitiers, cendres, ...). Ils agissent par leur granularité sur les propriétés physiques (maniabilité, capillarité, ...). Ils peuvent être inertes ou réactifs s'ils ont des propriétés hydrauliques ou pouzzoloniques.

Il peut être en outre ajouté en petites quantités aux constituants du sulfate de calcium (anhydrite, gypse, ...) comme régulateur de prise ou des agents de mouture pour faciliter le broyage.

4,12 Les différentes catégories de ciment

La norme NF P 15-301 définit les différentes catégories en fonction des pourcentages en constituants avant incorporation du sulfate de calcium.

Le ciment Portland artificiel (CPA) contient au moins 97 % de clinker et du filler.

Le ciment Portland composé (CPJ) contient au moins 65 % de clinker, le complément étant réalisé à l'aide d'un ou plusieurs des constituants indiqués précédemment.

Le ciment de haut fourneau (CHF) contient entre 60 et 75 % de laitier de cimenterie, le reste étant du clinker. Il peut contenir 3 % de filler.

Le ciment de laitier au clinker (CLK) est constitué de 80 % au moins de laitier, le complément étant assuré par du clinker. Le filler est permis dans la limite de 3 % des constituants.

La norme institue de plus pour ces catégories de ciment quatre classes en fonction de résistances en compression à 28 jours et de sous-classes selon la résistance à 2 jours. On définit ainsi des ciments de classe 35, de classe 45 et 45 R, de classe 55 et 55 R et de classes HP et HPR.

Un certain nombre d'autres caractéristiques sont garanties : vitesse de prise, retrait, expansion, teneurs en SO_3 , magnésium MgO et chlore.

Les ciments d'usage courant sont les ciments CPJ et CPA. D'autres ciments d'usages particuliers font également l'objet de normes : ciment de laitier à la chaux, ciment à maçonner, ciment alumineux, ciment portland.

4,13 Les composés du clinker

Le clinker est issu de la cuisson de roches calcaires et argileuses broyées et homogénéisées constituant le cru. Ce cru contient environ 80 % de calcaire sous forme de carbonate CaCO_3 et 20 % de roches argileuses apportant principalement de la silice SiO_2 , de l'alumine Al_2O_3 et de l'oxyde de fer Fe_2O_3 .

Le clinker, résultat de la cuisson, contient des aluminates et silicates de calcium :

55 % à 70 % de silicate tricalcique 3CaOSiO_2 noté C_3S

10 % à 25 % de silicate bicalcique 2CaOSiO_2 noté C_2S

0,5 % à 13 % d'aluminate tricalcique $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ noté C_3A

0 % à 8 % d'aluminoferrite tétracalcique $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ noté C_4AF

0,5 % à 2,2 % de chaux libre CaO noté C

Il peut contenir de faibles pourcentages d'alcalins (Na_2O , K_2O) ou de magnésium MgO.

Le C_3S est dénommé alite, le C_2S forme β bélite, le C_4AF est parfois appelé célite.

L'essentiel des propriétés hydrauliques est assuré par les composés synthétiques C_3S , C_2S et C_3A .

4,14 Hydratation du ciment

En présence d'eau, les composés anhydres du ciment s'hydratent par des réactions exothermiques. Les mécanismes d'hydratation sont complexes et ont fait l'objet de nombreux travaux.

De manière simplifiée, on peut dire que, dès l'introduction de l'eau dans un ciment Portland, les alcalins et le gypse passent en solution ainsi qu'une partie de la chaux libérée par un début d'hydratation des silicates. Une partie de l'aluminate C_3A réagit avec la chaux pour former un aluminat de calcium hydraté. Cette réaction est rapidement freinée puis stoppée par les ions sulfate SO_4^{2-} du gypse qui se combinent avec l'aluminat pour former de l'ettringite de formule $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$.

Ce composé forme sur les grains d'aluminat et d'aluminoferite une membrane semi perméable bloquant l'hydratation. Passé cette période dormante de 2 ou 3 heures, cette couche protectrice est rompue (pression osmotique élevée) et la réaction se poursuit par l'hydratation rapide de l'alite C_3S puis celle, plus lente, de la belite C_2S . Ces réactions d'hydratation des silicates peuvent être schématisées par les équations suivantes :



Après quelques heures, l'aluminat passé en solution donne par combinaisons avec l'ettringite déjà formée un monosulfate $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$.

L'hydratation de l'aluminat peut également conduire à un aluminat de calcium hydraté $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ($11 < n < 15$).

La phase ferritique conduit également à des aluminates hydratés.

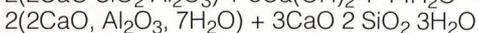
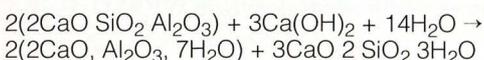
Le processus d'hydratation des silicates peut être décrit selon Michaelis par un recouvrement immédiat en présence d'eau, des grains anhydres par une couche d'hydrates primaires riches en chaux et imperméables. Après une période de stabilité, l'hydratation reprend et la formule des hydrates évolue vers des composés moins riches en chaux et perméables. La chaux hydratée (Portlandite) précipite et les hydrates occupent progressivement la place des anhydres.

L'hydratation des aluminates décrite par Le Châtelier consiste en une dissolution des anhydres pour former une solution sursaturée à partir de laquelle précipitent des hydrates, la réaction se poursuivant jusqu'à consommation complète des anhydres.

L'adjonction de constituants secondaires peut entraîner quelques modifications des processus d'hydratation.

Les matériaux pouzzolaniques naturels ou artificiels réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation des silicates du clinker : la silice et l'alumine réagissent pour former des aluminates et silicates hydratés.

Les laitiers, quant à eux, contiennent des composés hydrauliques «latents». Ils contiennent principalement de la géhlénite $2CaO \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$ et des silicates mono et dicalciques. La chaux d'hydratation du clinker réagit avec la géhlénite selon la réaction :



et les silicates de calcium donnent des silicates hydratés.

4,15 Prise et durcissement des ciments

Le mélange du ciment et de l'eau conduit à une pâte molle qui conserve sa plasticité pendant une durée variable selon la nature du liant. On constate ensuite une augmentation relativement rapide de la viscosité de la pâte avec une élévation de température : ceci correspond au début de la prise.

Après une nouvelle période de quelques heures, la pâte cesse d'être déformable et devient rigide. Ceci correspond à la fin de prise : sa détermination n'est que conventionnelle.

La croissance des résistances mécaniques se poursuit alors dans le temps : c'est la phase de durcissement.

Ces phénomènes observés correspondent à un certain nombre d'évolutions physico-chimiques du milieu :

a) dès la mise en contact des ciments avec l'eau, il y a réaction rapide pendant les premières minutes avec formation d'une solution sursaturée. Dans un ciment correctement retardé par le gypse, la cinétique de cette réaction est rapidement ralentie par formation d'une couche cristalline ou un gel de sulfaluminate sur les particules anhydres. Ceci est suivi d'une phase de réaction lente (période d'induction, période dormante) correspondant à la croissance de la couche protectrice et au développement lent des hydrates sous forme colloïdale dans la pâte. La fin de la période dormante correspond à la rupture de la couche semi perméable par la pression osmotique. Ceci conduit à une réaction rapide et la formation de cristaux et d'un réseau cristallin : le ciment perd sa plasticité (début de prise) et la structure cristalline se densifie. La fin de prise est déterminée de façon conventionnelle car elle ne correspond pas à un phénomène particulier ;

b) la phase suivante correspond au durcissement et peut se poursuivre sur des durées très longues : elle correspond à la formation de nouveaux cristaux et à la recristallisation de silicates hydratés avec remplissage des espaces disponibles dans la structure. Ceci conduit à un accroissement des résistances mécaniques.

Les ciments Portland ont des débuts de prise de l'ordre de 3 à 4 heures et des fins de prise de l'ordre de 6 heures.

La durée de prise dépend d'un certain nombre de facteurs. On peut citer la teneur en C_3A (régulée par l'addition de gypse), la finesse du ciment, la teneur en eau de gâchage, la température sans oublier les adjuvants retardateurs ou accélérateurs introduits lors de la préparation des mortiers et bétons.

4,16 Propriétés physiques et mécaniques des ciments

Les propriétés des ciments ne sont pas utilisées pour réaliser des pâtes pures mais pour préparer des mortiers et bétons.

Propriétés des bétons frais

Les propriétés du béton frais conditionnent les propriétés du matériau durci. Il en est ainsi des propriétés rhéologiques qui régissent l'ouvrabilité, c'est-à-dire l'aptitude du béton à remplir au mieux les moules en conservant son homogénéité.

Le béton frais peut être considéré comme un ensemble de grains répartis dans une pâte. Les propriétés rhéologiques dépendent des paramètres suivants : cohésion, frottement interne, viscosité.

L'ouvrabilité varie avec un grand nombre de facteurs : dosage en éléments fins (ciment) mais aussi en gros éléments, rapport eau sur ciments, teneur en air, température.

Elle peut être améliorée en agissant sur les éléments fins (ciment, ajout de minéraux fins) mais aussi en introduisant des adjuvants adaptés.

Retraits

On distingue différents types de retrait entraînés par différents phénomènes :

- le retrait de dessiccation interne provient de la diminution du volume absolu de la pâte lors de l'hydratation, le volume des hydrates formés étant plus faible que le volume absolu de la somme des anhydres et de l'eau ;
- le retrait hydraulique avant prise dû au départ partiel et rapide de l'eau de gâchage soit par évaporation, soit par absorption (coffrage, granulats absorbants) est parfois appelé retrait plastique;
- le retrait hydraulique après prise est dû au départ lent de l'eau en atmosphère sèche. Il dépend du ciment, du dosage. Il est d'autant plus élevé que l'atmosphère est sèche. Ce retrait hydraulique après prise est en partie réversible ;
- le retrait thermique occasionné par la dissipation lente de la chaleur libérée lors des réactions exothermiques d'hydratation. Cette chaleur libérée dès le début de la prise peut, du fait de la mauvaise conductibilité thermique du béton, entraîner des élévations de température notables (ouvrages en grande masse par exemple) avec des retraits et fissurations au refroidissement. Cette chaleur d'hydratation dépend des constituants minéralogiques, des ajouts de constituants secondaires, du dosage en ciment, ... On peut dire que 25 % de la chaleur est libérée à la prise et 50 % dans les premières 48 heures.

Déformations sous charge

Un élément en béton soumis à une charge subit une déformation instantanée, élastique, réversible puis une déformation lente en partie réversible : le fluage. Le fluage a lieu aussi bien en compression que pour d'autres sollicitations : flexion, traction. Il est influencé par les constituants du béton :

- nature et finesse du liant : les ciments fins ou à forte teneur en C_3S entraînant de faibles fluages,
- constituants secondaires (laitier, cendres),
- teneur en eau et en liant : plus le dosage en eau est élevé, plus fort est le fluage,
- nature, taille et répartition granulatoire des granulats.

Il peut être également influencé par le temps de chargement, l'âge du béton au moment de l'application de la sollicitation, les conditions de conservation et, bien sûr, le taux de chargement.

Un certain nombre de formules et d'abaques permettent de le calculer.

Résistances mécaniques

Le développement des résistances mécaniques du ciment est dû à l'hydratation. Les contributions des différents composants du ciment sont différents.

Les composés C_3A , C_4AF et C_3S s'hydratent rapidement et C_3S joue le rôle principal. L'hydratation du C_2S , plus lente, contribue ensuite à l'accroissement des résistances du ciment ayant fait sa prise.

La vitesse de durcissement et les résistances mécaniques atteintes sont conditionnées par divers facteurs : composition chimique et granulométrie du ciment, taux de gâchage, adjonction de produits chimiques mais aussi des conditions de mise en œuvre, de la température, des conditions de conservation. On peut admettre en première approximation que, pour les bétons courants, les résistances sont proportionnel-

les au dosage en ciment. Certaines formules de calcul ont été proposées et celles de Feret, par exemple, permettent d'estimer les résistances en compression et en traction.

Le dosage optimal en ciment varie avec la composition granulatoire du béton. Un certain nombre de méthodes de composition sont disponibles (Bolomey, Joisel, Faury, ...).

Les résistances mécaniques croissent en fonction du temps : on peut admettre qu'à 28 jours, 1 an, 10 ans on atteint 60 %, 80 % et 95 % des résistances finales. En fait, pour un béton en œuvre c'est-à-dire en conservation à l'air, la croissance des résistances cesse pratiquement après 90 jours, du fait des conditions défavorables à l'hydratation complète des constituants.

Les bétons courants ont des résistances à la compression de l'ordre de 25 à 30 MPa. L'adjonction d'adjuvants rendant possible la réduction de l'eau et celle de fumées de silice permettent d'atteindre des valeurs nettement supérieures. On distingue ainsi les bétons à hautes performances ou BHP (60 à 80 MPa) et les bétons très hautes performances BTHP (> 80 MPa).

Les bétons de granulats légers ont en général des performances nettement plus faibles que les bétons de granulats courants.

Les bétons sont en général performants en compression mais, comme la plupart des matériaux minéraux, ils sont très faibles en traction et flexion. Le rapport de la résistance en compression à la résistance en traction est de l'ordre de 10 environ.

Cette faiblesse a conduit à renforcer le matériau par des armatures métalliques (béton armé) ou des fibres (amiante-ciment, composites ciment verre).

Perméabilité et absorption

L'absorption qui est une mesure de l'espace poreux du matériau varie de 2 % (cas exceptionnel) à 20 % en masse pour un béton séché à 100 °C et immergé 48 heures dans l'eau.

La perméabilité (vitesse à laquelle un fluide peut traverser le matériau) dépend de nombreux facteurs mais, en général, elle croît lorsque le dosage en ciment décroît et le rapport eau-ciment croît.

Ces paramètres peuvent être influencés par l'adjonction d'adjuvants ou de matières pouzzolaniques et par les conditions de cure.

4,2 Liaison granulats de bois-matrice

4,21 Liaison granulats-ciment

Le développement des résistances du liant est déterminé par un ensemble complexe de phénomènes faisant intervenir la solubilité, la sursaturation, la formation et croissance de germes cristallins, la croissance importante de la surface spécifique des hydrates, l'établissement de contacts mécaniques ou de liaisons chimiques dans le réseau de cristaux. Diverses théories sont proposées pour expliquer l'action liante du ciment.

Certaines prennent en compte des forces de Van der Waals qui pourraient être importantes du fait des fortes surfaces spécifiques des hydrates. D'autres considèrent des liaisons entre particules de tobermorite avec formation de ponts O-Ca-O, de liaisons hydrogènes ou de liaisons siloxane O-Si-O. D'autres encore prennent en compte un aspect mécanique proposé par Le Châtelier, c'est-à-dire le développement d'un feutre de tobermorite qui, au fur et à mesure de la croissance cristalline, devient de plus en plus dense et se bloque mécaniquement en étant renforcé par des forces d'attraction interparticulaire et des liaisons chimiques.

Un autre facteur en relation avec la résistance du béton vient de la liaison granulats-ciment. Cette liaison peut provenir de causes purement mécaniques, c'est-à-dire de la rugosité de la surface du granulats. Elle peut également provenir d'interactions de surface purement physiques et, dans certains cas, d'interactions chimiques qui peuvent être favorables aussi bien que néfastes.

Avec des granulats inertes et lisses, la résistance au niveau de la liaison est plus faible que dans la partie cimentaire adjacente et que dans le granulats. Des réactions chimiques peuvent se produire entre la chaux et la silice des granulats. On peut avoir la croissance épitaxiale de cristaux à l'interface granulats-liant. Ceci peut se produire lorsque les réseaux cristallins du minéral du granulats et celui des hydrates formés sont similaires. Ceci a été constaté avec des granulats calcaires où l'on a observé une croissance épitaxiale d'hydroxyde de calcium au contact du granulats et supposé la formation d'une solution solide $\text{CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$.

Les laitiers de haut fourneau présentent également des phénomènes de réaction chimique avec le liant.

4,22 Cas particuliers de la liaison bois-ciment

La littérature est peu abondante sur la liaison ciment-granulats de bois. Le bois et le ciment sont probablement liés par des mécanismes physiques et chimiques. Le processus du blocage mécanique est probablement un mécanisme important dans le développement de la résistance. La pâte de ciment à l'état fluide peut pénétrer dans les fissures et certains pores de la surface rugueuse du granulats puis cristalliser et fixer le granulats à la pâte. Ce phénomène de pénétration du ciment dans les pores et canaux du bois a pu être observé en microscopie [10].

Un second mécanisme probable est un mécanisme chimique. L'hydratation du liant conduit à la formation de groupements hydroxyles liés à des atomes métalliques : Ca-OH, Si-OH, Al-OH. Le bois quant à lui contient des groupements hydroxyles C-OH soit phénoliques (lignine), soit alcooliques (cellulose) et des groupements carboxyliques :



Il peut donc se produire des liaisons hydrogènes et des ponts hydroxydes entre la matrice cimentaire et les granulats de bois. L'existence de ce type de liaison expliquerait, selon certains auteurs, l'évolution des performances mécaniques observées entre état sec et état humide sur des composites fibres de bois-ciment [2].

4,3 Modification du comportement du ciment par le bois

4,31 Action des retardateurs en général

En terme d'adjuvants, un retardateur est un composé dont « la fonction principale est d'augmenter le temps de début de prise et le temps de fin de prise dans le béton, coulis ou mortier » [9].

Le mode d'action des retardateurs est complexe et varie selon la nature du retardateur. Il peut agir directement dans la phase aqueuse en modifiant la solubilité et la cinétique de dissolution des anhydres du ciment. Il peut agir sur les grains de ciment en formant une enveloppe soit par réaction chimique avec la chaux, soit par adsorption. Le retard dépend alors de l'efficacité de la barrière créée, c'est-à-dire de son imperméabilité, de son épaisseur, du pH du milieu, ...

L'action des retardateurs est liée à la composition du ciment et plus principalement aux teneurs en C_3A , C_3S , alcalis et sulfates. Elle dépend également de la finesse du ciment, de la température, de la teneur en eau et de la concentration en retardateur. Dans des conditions contrôlées de retard, la réaction d'hydratation se poursuit lorsque le produit actif introduit volontairement est consommé.

Dans le cas des sucres, retardateurs efficaces, différentes théories sont proposées faisant appel à l'adsorption, la précipitation, la complexation, la nucléation [6] [7] [4].

Selon certains auteurs, les sucres s'adsorbent sur les ions Ca^{2+} de la surface du C_3S en hydratation et empoisonnent les sites de nucléation du CSH. Ceci a pu être vérifié pour le glucose par des mesures de potentiel zeta [13].

La théorie de la précipitation indique que l'addition de carbohydrates augmente la concentration en calcium, aluminium et fer [14]. Les sucres forment avec ces éléments des complexes organométalliques sur les grains de ciment et retardent l'hydratation. Dans le cas des carbohydrates non réducteurs à 5 carbones qui sont les meilleurs retardateurs, on suppose qu'un composé formé par fixation de calcium et groupement hydroxyle sur le cycle carboné empoisonne les germes de nucléation de Ca(OH)_2 et CSH, bien qu'on n'ait jamais pu mettre en évidence de complexe sucre-calcium ou silicate-sucre.

Divers mécanismes sont proposés pour l'inhibition de l'hydratation du C_3A : formation d'un complexe d'aluminate hydraté avec le composé organique ayant une structure hexagonale au lieu de la structure cubique de l'aluminate hydraté, accélération de la formation d'ettringite.

Il est à noter que certains sucres retardateurs à certains dosages peuvent accélérer la prise à d'autres teneurs mais avec des retards importants dans le développement des résistances.

Aucune théorie simple ne peut être appliquée à tous les sucres en présence de tous les constituants du ciment.

4,32 Les composés extraits du bois

Au contact du ciment et de l'eau, les composés solubles tels les sucres et composés phénoliques peuvent passer directement en solution, mais il est admis que le milieu fortement alcalin ($\text{pH} > 12$) développé par l'hydratation du ciment peut provoquer des réactions d'hydrolyse et entraîne certains composés (réactions de peeling). Ce type de réaction en milieu alcalin est utilisé dans certains des procédés papetiers de traitement du bois. Le milieu alcalin du ciment pourrait aussi hydrolyser des hémicelluloses.

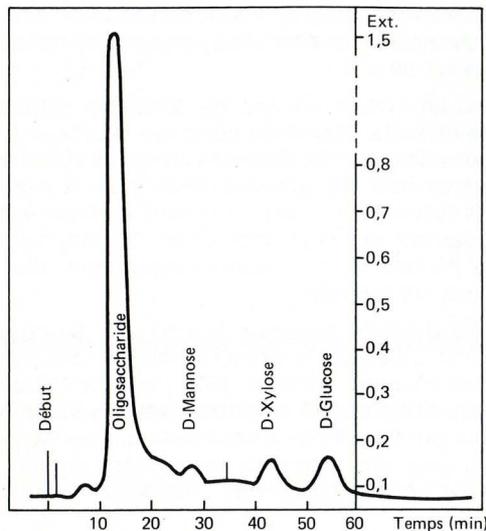


Figure 6 Chromatographie par échange d'ions de sucres provenant de pâte de ciment retardée par contact avec du bois de hêtre

D'après Simatupang [11]

Des travaux de laboratoire ont permis d'identifier certains des composés extractibles par l'eau ou le milieu alcalin du ciment (fig. 6). On peut citer : glucose, xylose, mannose, arabinose, fructose, saccharose et des polysaccharides (hémicelluloses) ainsi que certains produits de dégradation des sucres (acides sacchariniques) [11].

La plupart des travaux prennent en compte les sucres et les hémicelluloses hydrolysables. C'est ainsi que l'effet retardateur des feuillus plus important que celui des résineux est attribué à leur taux élevé en hémicelluloses hydrolysables.

4,33 Effet retardateur des composés extraits du bois

Une synthèse de l'effet retardateur des composés du bois a été présentée lors d'une conférence à l'Université d'Idaho en 1988 [18].

La cellulose de part son caractère cristallin ne réagit probablement pas avec le ciment. Par contre, les hémicelluloses non cristallines solubles à l'eau ou en milieu alcalin et les sucres simples réagissent probablement par des réactions de complexation avec les ions métalliques.

Les sucres simples tels que glucose, mannose, galactose ont des degrés d'inhibition de la réaction d'hydratation différents. Ces carbohydrates peuvent ralentir l'hydratation et la prise selon différents mécanismes : ils pourraient simplement pénétrer dans le réseau cristallin en diminuant la cristallinité et, par conséquent, les résistances. Une autre éventualité serait l'adsorption sur les grains de ciment, la complexation des ions métalliques et la formation de composés insolubles. Ceci diminuerait la cinétique de pénétration de l'eau dans les grains anhydres et ainsi la cinétique d'hydratation (des essais calorimétriques ont montré cette diminution de la vitesse d'hydratation).

Les carbohydrates réagissent probablement selon des réactions de «peeling» en milieu alcalin. Ces réactions abaissent le degré de polymérisation des hémicelluloses, augmentent la solubilité et forment des acides sacchariniques à bas poids moléculaires qui retardent l'hydratation et le durcissement du ciment.

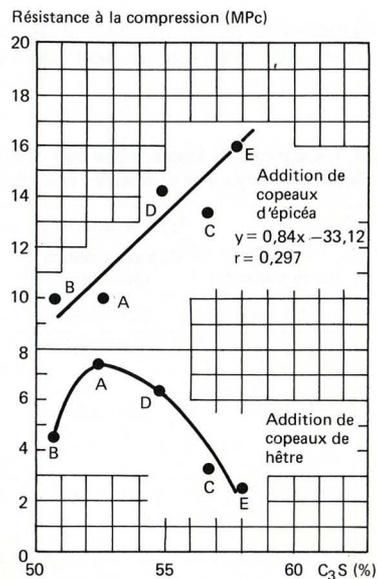


Figure 7 Relation entre la résistance en compression à 24 heures d'échantillons de particules de bois et de ciment et la teneur en C3S du ciment Portland

D'après Scharz et Simatupang [12]

L'alcalinité du ciment pourrait également neutraliser les groupements acides carboxyliques sur les hémicelluloses pour former des gluconates de calcium. Les groupements acétylés des hémicelluloses (dont les xylanes) pourraient conduire à la formation d'acétate de calcium. Ceci constitue une explication possible des problèmes d'incompatibilité des bois durs qui sont riches en xylanes acétylés. Les composés extractibles non polaires (terpènes, résines) peuvent inhiber les liaisons hydrogènes et, ainsi, les résistances du fait de leur caractère non polaire. Les corps gras peuvent être saponifiés en milieu alcalin et former des sels de calcium d'acides gras.

Les groupements hydroxyles phénoliques des tanins, lignine et composés phénoliques pourraient réagir avec l'hydroxyde de calcium et former des composés inhibiteurs (phénolates de calcium).

La diversité des possibilités présentées montrent la complexité des phénomènes et l'insuffisance des connaissances sur ces problèmes.

Il est à noter que les ciments Portland ne réagissent pas tous de la même façon à l'effet retardateur des bois : la classe de résistance, la rapidité du ciment intervient, mais aussi la composition minéralogique (fig. 7) [12].

4,4 Voies d'avenir au niveau de la matrice

4,41 Performances et limites des composites actuels

La plupart des composites bois-ciment actuels sont de panneaux de fibres ou de particules bois-ciment dont la fabrication se fait généralement sous pression en activant la prise. Peu de procédés de véritables bétons de bois à base de granulats ont été développés.

Pour des composites sous forme de panneaux, quelques valeurs indicatives de performance sont données dans le *tableau 5*.

Tableau 5 Densité, résistance à la flexion, résistance à la compression et conductivité thermique de trois types de composites bois-ciment

Performances	Type de panneau		
	Fibres (forte porosité)	Copeaux sciure (poreux)	Copeaux (compact)
Densité	0,4 - 0,6	0,5 - 0,8	1 - 1,4
Résistance flexion (MPa)	0,4 - 1,7	0,4 - 2,0	6 - 15
Résistance compression (MPa)	0,4 - 1,2	0,5 - 2,5	10 - 15
Conductivité thermique ($W.m^{-1}K^{-1}$)	0,09 - 0,14	0,10 - 0,20	0,19 - 0,26

Les caractéristiques de variations dimensionnelles pour ces panneaux se rapportent surtout à des variations d'épaisseur après immersion dans l'eau pendant 24 h. Les valeurs indiquées varient de 0,3 % à 2 %. Par contre, peu de données sont présentées sur les variations dimensionnelles en longueur. Certains obtiennent 0,3 % de variations en longueur entre 25 et 95 % d'humidité relative, d'autres indiquent simplement que les variations sont acceptables.

Pour les bétons de bois, les valeurs indiquées pour le béton Agreslith avec les granulats Agresta varient respectivement de 1,3 à 2,0 MPa en flexion, de 2,5 à 4 MPa en compression, de 550 à 700 kg/m³ en masse volumique pour des dosages en ciment entre 250 et 350 kg par m³ de granulats.

Ces matériaux composites bois-ciment présentent donc des performances mécaniques intéressantes pour des masses volumiques nettement diminuées par rapport à des bétons de granulats lourds.

Toutefois, un certain nombre de difficultés subsistent. La première difficulté rencontrée concerne la prise et le durcissement des ciments (*fig. 8*), ceci a conduit à sélectionner les essences de bois (*fig. 9*) et à n'utiliser pour le moment que certaines essences reconnues inactives sur l'hydratation et le développement des résistances. Ces composites nécessitent une période de cure assez longue pour atteindre les résistances nécessaires.

Une autre difficulté concerne le séchage du composite : l'absorption d'eau par le granulat entraîne des ajouts plus importants d'eau de gâchage. Une partie de cette eau non nécessaire à l'hydratation doit ensuite être évacuée dans des délais plus ou moins longs. Il semblerait que certains sinistres observés avec des bétons de bois utilisés en chape pourraient avoir comme cause des problèmes d'humidité résiduelle.

Enfin, la principale difficulté rencontrée est, semble-t-il, relative aux variations dimensionnelles que ce soit en retrait à la prise et au séchage ou en retrait-gonflement réversibles en fonction de l'humidité du milieu.

Les causes de ces variations dimensionnelles sont peu élucidées et peu publiées. Plusieurs études mettent en évidence l'influence des différents constituants du composite : la taille des granulats de bois, la nature du ciment, les ajouts divers, le dosage en ciment, mais aussi les conditions de fabrication des panneaux de particules.

Un certain nombre de travaux mettent en évidence le rôle de la matrice cimentaire : les variations dimensionnelles réversibles paraissent liées à la porosité du ciment (ceci est vérifié pour les bétons légers tels que béton gaz, béton mousse,

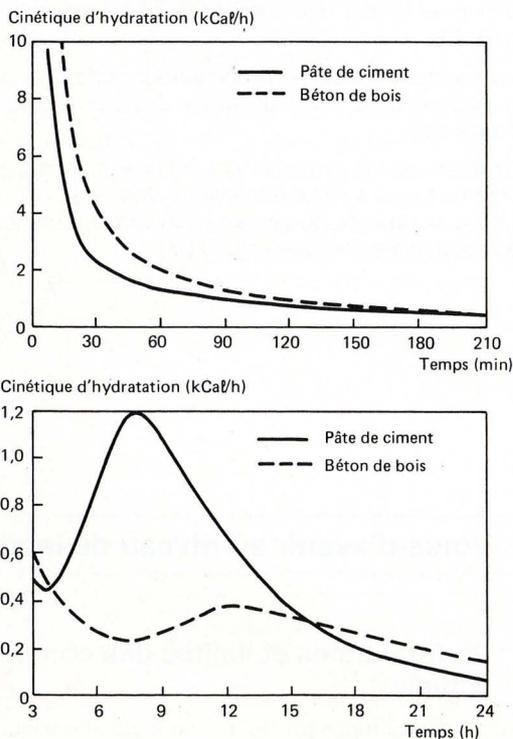


Figure 8 Cinétique d'hydratation d'un ciment et d'un mélange bois-ciment aux premières phases (A) et dans les phases de prise et durcissement (B)

D'après Hachmi et Campbell [18]

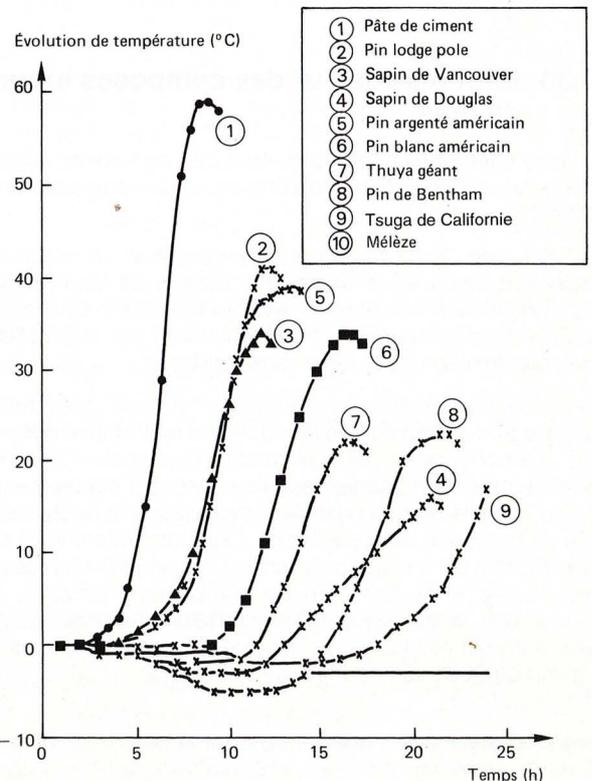


Figure 9 Effet d'un certain nombre de bois tendres sur l'hydratation d'un ciment Portland

D'après Moslemi [22]

béton de polystyrène). Cette porosité de la matrice est liée au rapport eau/ciment. Les granulats de bois pourraient jouer un rôle d'augmentation de la porosité et aussi de réservoir d'eau intervenant dans l'évolution de la pâte en cours d'hydratation.

Les granulats peuvent intervenir par leurs propriétés mécaniques. Les granulats lourds à fort module d'élasticité s'opposent aux variations dimensionnelles de la pâte de ciment alors que les granulats à faible module (bois, polystyrène) sont incapables de le faire.

4,42 Modification des matrices Portland

Modification par introduction de produits chimiques

Afin de contrebalancer les effets retardateurs des composés extraits des bois, certains produits chimiques connus pour accélérer la prise et le durcissement des ciments ont été utilisés (fig. 10). La plupart sont des sels d'acides minéraux ou organiques. Les plus souvent proposés sont les chlorures d'aluminium, calcium, magnésium, fer, étain [16]. Certains de ces sels sont présentés comme ayant une certaine efficacité qui peut varier avec les essences de bois. Ainsi le sulfate d'aluminium associé à de la chaux augmente la vitesse de prise en présence de sapin mais est inefficace avec le peuplier [5].

Il est connu de plus que certains de ces adjuvants accélérateurs peuvent accentuer les variations dimensionnelles de la matrice : c'est le cas en particulier du chlorure de calcium qui augmente le retrait.

Ces produits sont donc à utiliser avec précaution et il est probable que chaque couple bois-ciment sera à traiter comme un cas particulier.

Modification par ajout de charges inertes

L'introduction de sables ayant des caractéristiques mécaniques supérieures aux granulats légers peut entraîner des modifications du comportement au niveau des variations dimensionnelles. Un mortier ayant un squelette granulaire correct devrait mieux se comporter qu'une pâte pure de ciment.

Quelques essais d'ajouts de farine de quartz montrent une amélioration des propriétés du composite.

Il est probable que des modifications de ce type se feront au détriment de la masse volumique du composite qui doit rester l'un des avantages du bois-ciment.

Modification par ajout de composés pouzzolaniques

On peut penser que l'ajout de composés pouzzolaniques apporte un certain nombre d'avantages : augmenter les propriétés mécaniques, produire un liant moins sensible à l'empoisonnement par le bois, diminuer l'alcalinité du milieu (par réaction avec la chaux) et réduire ainsi l'extraction des substances inhibitrices, modifier la structure du liant pour agir sur le retrait et le gonflement.

Des essais dans ce sens [19] ont été effectués sur différents matériaux d'addition ou de remplacement : trass (roche volcanique), fumée de silice, laitier de haut fourneau, cendres de balle de riz. Si le laitier s'est montré sans effet, le trass a apporté quelques améliorations. La fumée de silice par contre permet des améliorations notables avec des bois jugés peu compatibles : la résistance en flexion de composite ciment-peuplier peut ainsi passer de 8 MPa à 15,5 MPa, mais en ajoutant 30 % de microsilice qui constituent un optimum. Ces

fumées de silice seraient la seule voie pour utiliser certains bois, mais les quantités nécessaires peuvent devenir rapidement élevées (50 %) si l'on veut obtenir des résultats.

Les fumées de silice permettent de limiter les variations dimensionnelles (fig. 11) : pour les variations d'épaisseur, en bonne corrélation avec les gains de résistances mécaniques on peut déterminer des concentrations optimales. Pour le retrait linéaire l'augmentation de la teneur en fumée le fait décroître continûment dans une gamme de concentration de 10 à 80 % d'ajout.

L'obtention d'améliorations notables nécessite l'utilisation de proportions importantes de fumée et ceci peut entraîner des coûts prohibitifs.

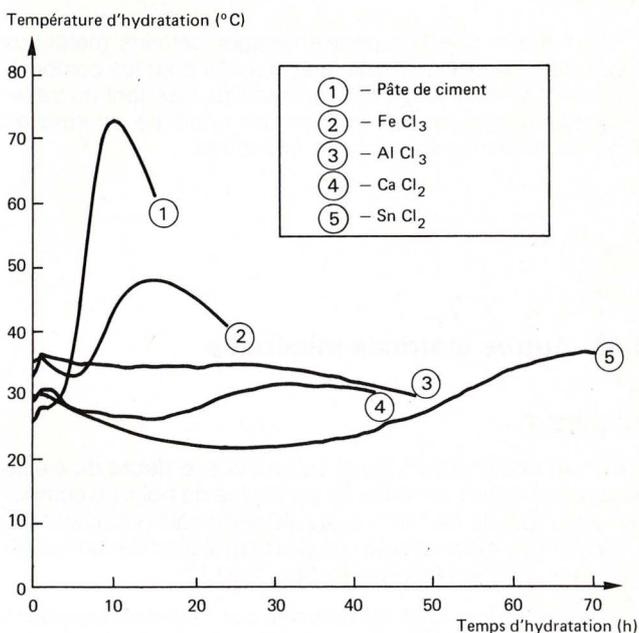


Figure 10 Comparaison des effets de 4 accélérateurs sur un mélange ciment-mélèze (dosage 2%)

D'après Zenghthian et Moslemi [16]

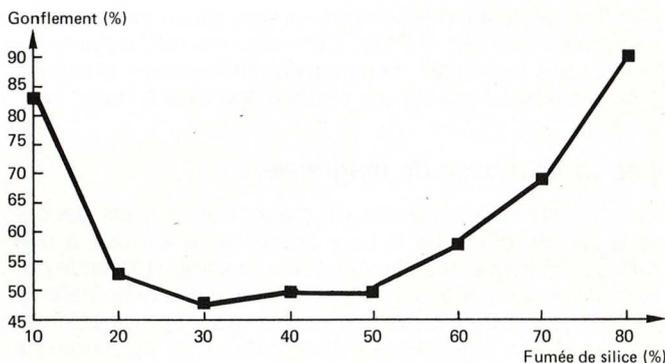


Figure 11 Effet de la fumée de silice sur le gonflement en épaisseur des panneaux de copeaux de mélèze

D'après Lange, Simatupang et Meubauer [19]

La cendre de balle de riz a également présenté une bonne efficacité mais à des teneurs plus faibles que les fumées de silice. Toutefois, il est notoire que les caractéristiques obtenues avec des ciments additionnés de cendres de balle de riz (qui contiennent plus de 90 % de silice) sont très dépendantes de la nature de cette pouzzolane et plus particulièrement des conditions de calcination : la calcination doit être complète (pureté) mais doit conduire à une silice amorphe (réactivité).

Il est signalé que l'ajout en quantités importantes de matières pouzzolaniques peut rendre prépondérant l'effet retardateur habituel de pouzzolanes dans le développement des résistances : la réaction des pouzzolanes avec la chaux est connue pour être lente. Afin de pallier cette difficulté, on peut penser à accélérer le processus d'hydratation par la chaleur : les essais effectués avec des teneurs de 40 à 50 % de fumées de silice ont été négatifs.

Des modifications de la matrice cimentaire sont donc possibles par l'introduction de pouzzolanes mais, étant donné les possibilités de variations de la réactivité de ces matériaux, on peut penser que chaque cas nécessite une étude de formulation précise avec une identification des matières premières minérales.

Il faut signaler que l'on peut envisager certains matériaux pouzzolaniques déjà utilisés avec succès pour les composites ciment-verre. Il s'agit des métakaolins résultant du traitement thermique de certaines argiles. Aucune information dans la littérature ne semble les concerner.

4,43 Autres matrices minérales

Le gypse

C'est l'un des premiers liants utilisés dès le début du siècle pour réaliser des panneaux de particules de bois. Le composant principal de ce liant est le sulfate de calcium dihydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, qui cristallise lors de l'hydratation de l'anhydrite CaSO_4 ou de l'hémihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$.

L'hydratation du gypse est retardée par certaines essences de bois. Les composés responsables de ce retard sont des tanins hydrolysables et des acides aminés. Les effets sont nettement plus faibles que pour les ciments Portland (tableau 6).

La liaison bois-plâtre peut également être affectée par les extraits. Ceci se ressent sur les performances mécaniques et s'expliquerait par des différences de taille de cristaux de gypse dans les couches de liant à l'interface du bois.

Le principal défaut des composites bois gypse est leur mauvais comportement à l'eau. Ceci est l'un des défauts du plâtre : ses propriétés mécaniques diminuent en présence d'humidité et il présente une certaine solubilité à l'eau.

Les liants à base de magnésie

Les ciments d'oxychlorures de magnésium ont été découverts par Sorel en 1867. Leur action liante est due à une réaction chimique entre la magnésie caustique (obtenue par calcination de carbonate de magnésium à des températures inférieures à 1 000 °C) et une solution aqueuse de chlorure de magnésium $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. Il se forme, selon les conditions de température et de composition, différents oxychlorures. Ces liants ont des propriétés mécaniques très élevées et peuvent lier aussi bien des granulats minéraux qu'organiques.

Tableau 6 Compatibilité du ciment magnésien du ciment Portland et du gypse avec des échantillons de certaines essences de bois ou extraits

D'après Simatupang, Lange, Kasim, Seddig.

Bois ou extrait	Temps relatif d'hydratation		
	Ciment magnésien	Ciment Portland	Gypse
Liant	100	100	100
Glucose	120	inhibé	120
Tanin 1 %	163	inhibé	124
Bois d'épicéa	135	135	135
Écorce d'épicéa	128	inhibé	196
Bois de hêtre	153	255	146
Bois de bouleau	175	255	162
Bois de chêne	150	150	208

D'autres sels que le chlorure peuvent être utilisés, en particulier le sulfate de magnésium heptahydrate $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. On obtient ainsi différents oxysulfates. Les ciments aux sulfates ont des propriétés voisines des ciments aux chlorures. Ils ont toutefois des résistances mécaniques un peu plus faibles, mais un comportement à l'eau amélioré.

Ces liants magnésiens ont été les premiers liants utilisés dans la fabrication de panneaux de particules bois. Leur compatibilité avec le bois est du même ordre que celle du gypse et leur prise peut être également retardée par les extraits phénoliques (voir tableau 6 ci-dessus).

Les liants magnésiens les plus fréquemment utilisés pour ces composites sont à base de sulfate du fait de leur meilleur comportement au feu (température de décomposition plus élevée, gaz dégagé moins toxique).

La prise de ces liants est généralement accélérée par la température dans les procédés de fabrication de composite.

Les performances obtenues sont influencées par la teneur en sel, mais aussi par la qualité de la magnésie caustique. Des magnésies adaptées à la réalisation de liants magnésiens pour sols industriels sont normalisées en Allemagne.

La magnésie caustique étant un produit relativement cher, un certain nombre d'essais [17] ont été effectués pour la remplacer partiellement par des minéraux moins onéreux : dolomie ou matériaux pouzzolaniques. Il est indiqué, par exemple, que la substitution de 50 % de magnésie par des cendres volantes ou du laitier n'altère pas de façon sensible les propriétés des panneaux de particules.

Le développement de panneaux liés à la magnésie est resté limité du fait de la sensibilité à l'eau des liants magnésiens qui réduit leur utilisation à des usages intérieurs. De plus, les techniques d'activation par la température utilisée pour la fabrication sont coûteuses en énergie.

Plus récemment [21], d'autres liants ont été développés à base de magnésie « cuite à mort », calcinée à haute température et de polyphosphate d'ammonium. Les temps de prise sont très courts (minutes) voire instantanés, mais peuvent être régulés par différents additifs.

Ces liants seraient insensibles aux extraits de bois et auraient un comportement à l'eau excellent.

Le coût probablement élevé des liants peut être abaissé par l'utilisation de dolomie calcinée et même de carbonate de magnésium.

Le procédé ECOCEM

Ce procédé récent développé en Finlande utilise comme liant du laitier de haut fourneau activé par des produits alcalins [20].

Le laitier de haut fourneau est un liant hydraulique latent qui a besoin d'être activé par des ions hydroxyles ou des sulfates. Des techniques d'activation au sulfate ont été développées en France en technique routière pour réaliser des graves laitiers. Dans le procédé ECOCEM, l'activation du laitier est réalisée à l'aide d'une solution de soude et de silicate de sodium.

Le procédé est rapide (pressage à chaud), peu coûteux (le laitier est un sous-produit), insensible à la qualité du bois et le produit aurait des performances identiques à celles des composites bois-ciment.

Un certain nombre de pistes dégagées pour les panneaux de fibres ou de particules de bois pourraient être adaptées aux bétons de bois en prenant en compte les variations dimensionnelles et aussi l'intérêt économique, le coût de certains liants pouvant être démesurés par rapport aux avantages escomptés.

5

Fabrication des bétons de granulats de bois

5,1 Généralités

Comme indiqué au chapitre 2, nous nous limiterons à l'examen du processus le plus répandu dans l'industrie du béton manufacturé à savoir le moulage par vibration et compression suivi d'un démoulage immédiat, tels qu'ils sont réalisés sur les presses vibrantes ou sur les tables vibrantes. Les autres processus qui font appel à un démoulage différé ou à une mise en place par coulage et pressage restent en effet tout à fait confidentiels.

Ce processus type comprend 11 grandes étapes (fig. 12) organisées selon le schéma ci-dessous :

- 1° choix des matières premières
- 2° choix des compositions des bétons
- 3° préparation des bétons
- 4° transport des bétons frais (éventuellement)
- 5° conception des moules
- 6° mise en place du béton (remplissage, vibration, compactage, démoulage)
- 7° manutention des produits frais
- 8° durcissement des produits
- 9° manutention et palettisation des produits jeunes
- 10° stockage sur parc
- 11° usinage (éventuel)

Sur un plan général, on peut estimer qu'il n'existe pas de problèmes de fabrication spécifiques à l'utilisation de granulats de bois dans la mesure où l'on arrive à maîtriser la qualité de fourniture des granulats eux-mêmes.

Il subsiste cependant un certain nombre de précautions qui exigent des adaptations particulières mais qui ne sont pas rédhibitoires en ce qui concerne le processus de fabrication proprement dit. Ces adaptations peuvent jouer par exemple

un rôle non négligeable sur les vitesses de prise, sur les vitesses de durcissement et sur les variations dimensionnelles des produits finis qui représentent les points faibles de ce type de béton.

Nous examinerons donc successivement les étapes essentielles de la fabrication en insistant sur les différences à prendre en compte par rapport aux bétons de granulats courants traditionnels et en faisant ressortir les questions qui n'ont pas de réponses techniques satisfaisantes à ce jour.

5,2 Spécificités à prendre en compte dans la fabrication des bétons de granulats de bois

5,201 Choix des matières premières

Choix des granulats

- En fonction des interactions physico-chimiques entre le bois et le ciment qui se traduisent par des retards, des altérations, voire des inhibitions des phénomènes d'hydratation du ciment, certaines essences non traitées ou certains mélanges d'essences mal maîtrisés semblent devoir être éliminés. C'est le cas de certains feuillus dans lesquels la présence ou la quantité de tanins, de sucres et, plus généralement, de composés hydrocarbonés et d'hémicellulose hydrolysable sont excessives.

Pour la même raison, la maîtrise du processus et, par suite, la qualité des produits finis exigent soit l'utilisation d'une essence unique bien identifiée, soit l'utilisation de mélange d'essences en proportion constante.

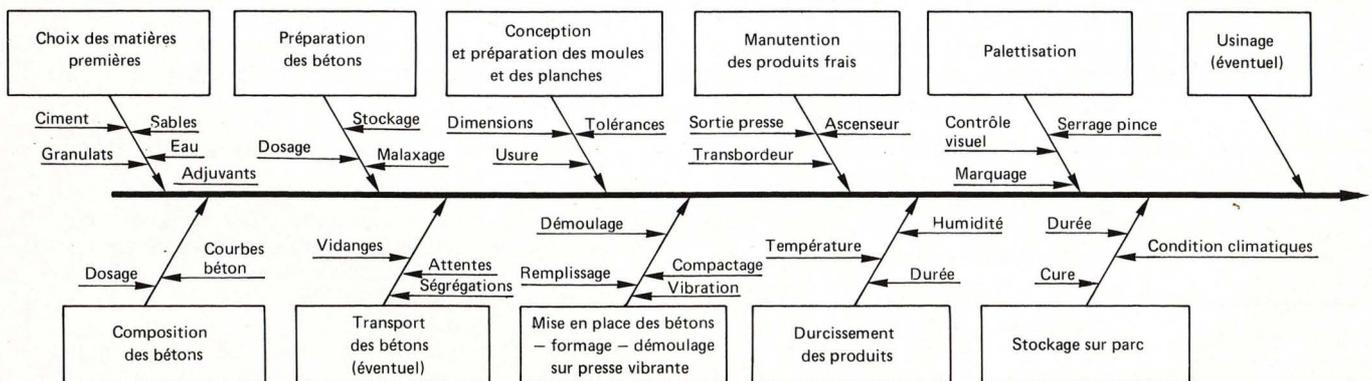


Figure 12 Étapes essentielles du processus de fabrication

Un traitement des granulats adéquat, à définir, est cependant susceptible de s'opposer, voire de limiter la diffusion de ces substances d'une part et de protéger le bois de l'agressivité du milieu alcalin correspondant à la phase cimentaire, d'autre part (1).

- D'autres essences ou quelquefois les mêmes présentent des problèmes d'instabilité chimique ou sont incompatibles avec un traitement comme par exemple une «minéralisation». Cela peut être le cas d'un bois trop tendre susceptible qui peut présenter des risques de putréfaction lors du stockage (des cas ont été rencontrés), en particulier lorsque la qualité du traitement du granulat n'est pas satisfaisante ou lorsque les conditions de stockage sont défavorables (quantités d'eau excessives liées à un stockage long exposé aux intempéries).
- La durée de la période située entre la date d'abattage de l'arbre et le début du traitement mécanique du bois semble jouer un rôle non négligeable sur la quantité de substances nuisibles aux réactions d'hydratation. Un délai minimal à garantir (par exemple de l'ordre de 6 mois) devrait donc être systématiquement imposé aux fournisseurs de granulats de bois.
- Les bois légers donnent des fibres plus longues que les bois denses pour lesquels les phénomènes d'absorption et de désorption d'eau sont plus rapides et donc plus faciles à maîtriser.

Dimensions et formes des granulats

Les influences de la forme et de la dimension des granulats de bois sur les caractéristiques mécaniques des bétons correspondants et sur leurs variations dimensionnelles sont encore mal cernées.

Il semble toutefois que :

- le retrait diminue avec la longueur des copeaux, sauf dans le cas où ces copeaux sont longs et minces et s'apparentent plutôt à des fibres végétales ;
- la quantité de fines maximales, liées notamment aux traitements mécaniques initiaux (écorchage et martelage), soit un des paramètres qui conditionnent les variations dimensionnelles ;
- un fuseau granulométrique étendu entraîne des risques de ségrégation lors du transport du béton frais éventuel : une granulométrie maximale de 20 mm semble une valeur optimale (à confirmer).

Conditionnement et stockage des granulats

Dans les processus de fabrication modernes, les dosages des différents constituants sont automatiques et le plus souvent de type **pondéraux**. De tels systèmes imposent l'utilisation de granulats présentant une teneur en eau relativement constante sous peine d'obtenir des formulations de mélange variables et aléatoires entraînant la fabrication de produits eux-mêmes de qualité variable.

Or, le bois est très hydrophile en particulier en l'absence de traitement et le reste même encore avec la majorité des traitements de granulats existant à ce jour.

1. Bien que la solution qui consiste à diminuer les reprises d'eau des granulats de bois et, par suite, à réduire les variations dimensionnelles des granulats n'entraîne pas obligatoirement la diminution des variations dimensionnelles du composite, il semble toujours souhaitable de limiter la quantité d'eau absorbable par les granulats pour la maîtrise du processus de fabrication. Nous avons vu que des solutions qui restent encore à optimiser ont notamment cette vocation (traitements physico-chimiques (comme l'enrobage type SILWOOD), traitements chimiques, utilisation d'ajouts, d'adjuvants, ...).

Cette quantité d'eau absorbable sous forme d'eau liquide, de vapeur d'eau ou de condensation est fonction :

- des essences utilisées,
- des traitements réalisés sur les granulats,
- de l'état hygrométrique du bois à sa livraison (un bois sec absorbe moins d'eau, la vitesse d'absorption croissant vers 15-18 %).

Il en résulte donc le plus souvent des quantités d'eau dans les granulats très variables qu'il faut absolument limiter pour maîtriser le processus, quantités d'eau intimement liées à la teneur en eau des granulats au moment de la livraison et surtout aux variations de l'environnement et notamment des précipitations (lorsqu'il n'y a pas de stockage des granulats à l'abri).

Les variations de la teneur en eau et, par suite, les variations de masse volumique susceptibles de se produire perturbent les lois de composition mais ont également d'autres conséquences :

- le foisonnement du béton de granulats de bois est lié à l'étendue du fuseau granulométrique et à la teneur en eau (il peut varier de 10 à 25 % environ).
Il peut donc en résulter des conditions de remplissage du moule variables et dans les cas extrêmes des hauteurs de caisse de moule insuffisantes ;
- la compressibilité de ce type de béton est également éminemment variable en fonction de la teneur en eau des granulats. Or, avec les machines européennes, le compactage est réalisé le plus souvent à hauteur constante.
On conçoit donc facilement qu'une compressibilité et un foisonnement variables entraînent des variations de masse volumique (le volume du moule étant constant) et des produits finis de caractéristiques mécaniques variables ;
- citons enfin, et ce n'est pas la moindre des conséquences, l'incidence des variations de la teneur en eau des granulats sur les variations dimensionnelles des produits finis qui deviennent, dans les cas défavorables, non contrôlables en intensité et en durée (les variations dimensionnelles d'un tel matériau s'étalent sur des périodes dépassant 180 jours).

En ce qui concerne le stockage proprement dit, il faut veiller aux interventions susceptibles d'entraîner des ségrégations importantes par exemple entre le haut et le bas des stocks en vrac, risques de ségrégation qui sont fonction du fuseau granulométrique (un fuseau trop large augmente les risques) et du temps de stockage. De telles ségrégations au niveau du stockage aboutissent inévitablement à des bétons hétérogènes.

Commentaires :

a) On rencontre actuellement deux types de granulats de bois :

- les granulats conditionnés en sacs ou livrés en vrac dont la teneur en eau est variable,
- les granulats conditionnés en sacs ou livrés en vrac dont le traitement thermique assure une teneur en eau non encore garantie à ce jour mais qui varie toutefois entre 10 et 15 %. Ce type de granulat (le SILWOOD par exemple) qui ne règle pas d'autres problèmes tels que les variations dimensionnelles a le mérite d'être fourni à «l'état sec» et semble donc compatible avec un processus industriel ;

b) compte tenu de l'ensemble des conséquences d'une variation excessive de la teneur en eau des granulats, il paraît essentiel pour l'avenir de cette filière que les fournisseurs de granulat de bois s'engagent à respecter un cahier des charges qui garantirait par exemple à l'utilisateur :

- la nature du bois fourni,
- la proportion relative des différentes essences (s'il y a),
- l'âge au moment du traitement,
- le fuseau granulométrique (pourcentage maximal de fines),
- la teneur en eau à la livraison.

Choix du ciment

• La nature du ciment utilisé par l'intermédiaire de sa surface spécifique, de sa vitesse de prise et de ses constituants hydratés formés semble, selon certains auteurs, un paramètre très important. Il y aurait une véritable compétition, au niveau du temps, entre le développement des réactions d'hydratation qui aboutissent au développement et à l'enchevêtrement de micro-cristaux correspondant au début de prise, et la libération et la diffusion des substances inhibitrices (extraits, sucres et solubilisation de l'hémicellulose en milieu alcalin), la vitesse de solubilisation étant elle-même fonction de paramètres tels que le pH et la température maximale d'hydratation.

Il y aurait donc intérêt à utiliser systématiquement un ciment à haute résistance initiale qui, par ailleurs, aboutirait à des performances mécaniques plus élevées.

La réalité ne semble malheureusement pas aussi simple, les lois correspondantes n'étant pas en effet toujours explicites et les résultats s'avérant variables selon les essences utilisées et selon les traitements thermiques éventuels.

- Si l'on s'attache aux résistances mécaniques des bétons de bois, on constate les mêmes anomalies :
 - ainsi, pour l'épicéa (fig. 13), la résistance du béton de bois augmente quasi linéairement avec la quantité de C_3S (silicate tricalcique hydraté) qui est le composé essentiel qui donne la résistance du ciment [1] ;
 - cette loi n'est plus du tout la même avec le hêtre qui présente un maximum pour une quantité de C_3S /ciment d'environ 53 %.

• Des essais mécaniques réalisés par l'INSA de Lyon montrent qu'un CPA55 donne de meilleures résistances mécaniques qu'un CPA45 et a fortiori qu'un CPJ45.

De même le rapport résistance à la compression/résistance à la flexion est modifié par la nature du ciment et les variations dimensionnelles sont liées au dosage en ciment.

Le rôle de la nature et de la classe du ciment (par l'intermédiaire des cinétiques de réaction et des vitesses de durcissement) sur les vitesses de diffusion des substances inhibitrices paraît donc un domaine riche d'enseignements qui, semble-t-il, mériterait un effort de recherche conséquent.

Choix des adjuvants et des colorants

- Les adjuvants utilisés le plus fréquemment sont les accélérateurs de prise et de durcissement afin de contrecarrer les retards de prise constatés. Nous reviendrons sur leur rôle dans le chapitre qui traite des conditions de durcissement.
- D'autres essais réalisés avec des hydrofuges destinés à réduire les tolérances dimensionnelles, avec des fluidifiants destinés à réduire les quantités d'eau nécessaires et des latex n'ont pas donné de résultats très probants.

L'utilisation de colorants minéraux (oxydes métalliques) ne posent aucune sujétions dans le domaine des pourcentages habituellement utilisés ($\leq 5\%$).

5,202 Choix des compositions des bétons

- Les formules de composition de béton sont très empiriques et proches des formules utilisées avec les granulats légers. Elles sont essentiellement liées aux applications envisagées et donc fonction des masses volumiques et des performances mécaniques recherchées.

Les masses volumiques qui correspondent à la majorité des produits se situent entre 600 et 900 kg/m^3 sachant que l'on trouve des masses volumiques inférieures à 600 kg/m^3 (cas des bétons de remplissage ou des chapes) et des masses volumiques supérieures pour des produits sollicités sur le plan mécanique et à l'usure (cas des pavés).

- En ce qui concerne le rapport ciment/granulat de bois, il semble que vis-à-vis des performances mécaniques, l'optimum se situe aux alentours de 2 [2] avec un minimum de l'ordre de 170 kg de granulats de bois par m^3 de béton (fig. 14).

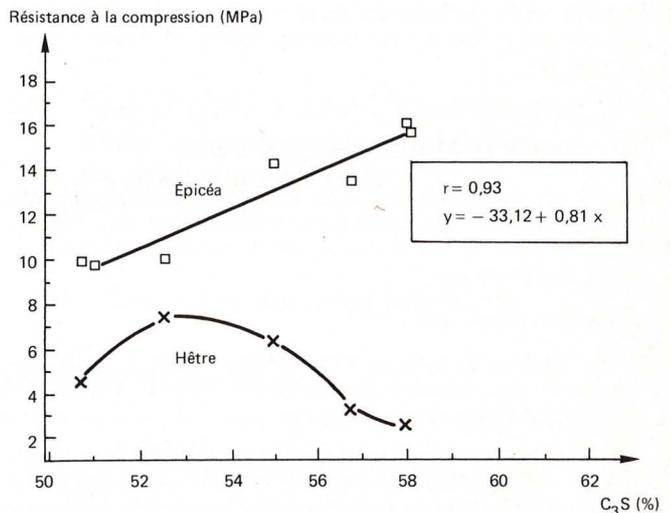


Figure 13 Influence du C_3S de quelques ciments sur la résistance à la compression (cas de l'épicéa et du hêtre)

D'après Maruli et al [1]

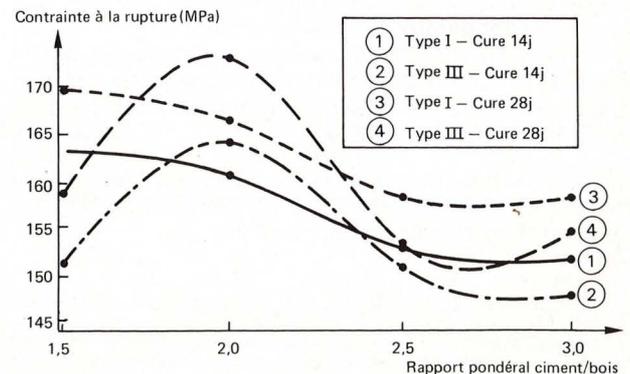


Figure 14 Influence du rapport ciment/granulat de bois sur le module de rupture

D'après Moslemi et Pfister [2]

• Composition moyenne des bétons :

- les dosages habituels en ciment se situent entre 300 et 350 kg de ciment CPA55 ou HPR par m³. La quantité de granulats de bois (à une teneur en eau souvent inconnue) varie de 700 à 1000 litres par m³ de béton en place ;
- la quantité d'eau ajoutée varie selon la teneur en eau des granulats de 150 à 220 litres ;
- selon les masses volumiques recherchées, on ajoute un filler (jusqu'à 300 kg/m³) ou un sable (jusqu'à 550 kg/m³) ;
- on retrouve enfin des adjuvants lorsqu'il y en a (jusqu'à 2 % du poids de ciment) et des colorants éventuels.

Une étude des lois de composition et des corrélations performances-composition semble tout à fait nécessaire compte tenu de l'état des connaissances dans ce domaine.

5,203 Préparation des bétons

Ordre d'introduction des constituants

Lorsque l'on utilise des granulats de bois qui ont subi un traitement qui ne limite pas notablement son hygroscopicité (ex : Agresta), il devient impératif de réaliser un prémouillage des granulats qui assure la reprise d'eau nécessaire pour les granulats sans nuire à l'hydratation des liants.

Dans cette hypothèse, l'ordre d'introduction des constituants est le suivant :

(granulats + eau de prémouillage) + ciment
+ charges éventuelles + eau complémentaire.

Pour les granulats qui ont subi un enrobage efficace (ex : Silwood), l'opération de prémouillage semble inutile, le malaxage des constituants étant réalisé à sec avant l'introduction de la quantité d'eau nécessaire qui reste toutefois supérieure à celle d'un béton traditionnel.

Malaxage

En particulier dans le cas d'un prémouillage important, on constate parfois la formation de boulettes lorsque le ciment est versé sur les granulats de bois humides. Cette remarque implique des précautions au niveau de l'introduction du ciment.

Le coefficient de frottement d'un béton de bois à l'intérieur d'un malaxeur est tel que, pour limiter les échauffements correspondants lors des rotations, il est nécessaire de limiter la charge dans le malaxeur d'environ 30 %.

Le temps de malaxage, selon l'efficacité du malaxeur et particulièrement dans le cas d'un prémouillage, est plus long qu'avec un béton traditionnel – jusqu'à deux fois plus long. Les malaxeurs à train valseur semblent les plus efficaces avec ce type de béton.

5,204 Transport des bétons frais

Si le transport de béton frais est relativement long entre la centrale et la machine de fabrication, il y a un risque de ségrégation d'autant plus grand que la quantité d'eau est grande et que le fuseau granulométrique est large.

5,205 Conception des moules

Les moules utilisés pour confection des produits en béton de bois ne présentent aucune spécificité (en dehors de la hauteur de caisse). Bien au contraire, on note une usure très limitée par rapport à celle que l'on observe avec des granulats silico-calcaires, siliceux, voire calcaires.

5,206 Mise en place du béton (remplissage – vibration – compactage) (voir photo 6)

Remplissage

il n'y a pas de problème spécifique lors du remplissage qui peut toutefois nécessiter, selon la composition, un nombre de coups de tiroir un peu plus important, une grille mobile facilitant l'émiettement et donc le remplissage et, en fonction du foisonnement comme nous l'avons déjà évoqué, une hauteur de béton dans le tiroir plus importante.

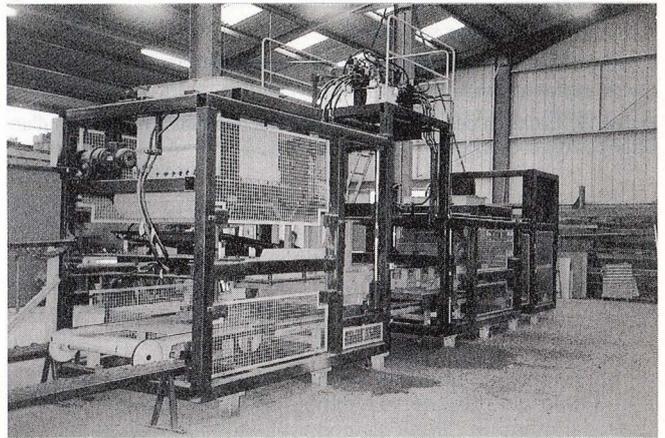


Photo 6 Machine destinée à la fabrication de hourdis-caissons (EI)

Vibration et compactage

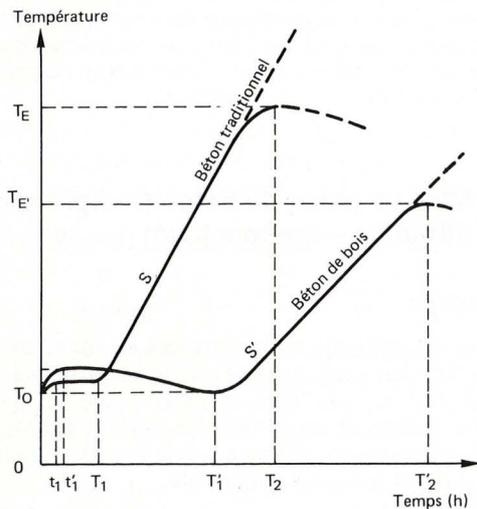
Ce type de béton n'est pas très sensible à la vibration (peut être un peu plus aux fréquences élevées) mais est très sensible à la compression. Dans cette optique, nous avons vu que la plasticité du béton de bois étant sensible au fuseau granulométrique et à l'hygrométrie, il importait, pour obtenir des produits de masse volumique et donc de résistance mécanique régulière, de figer ces paramètres, la pression appliquée par le pilon étant approximativement constante.

5,207 Manutention des produits frais

Comme pour les bétons traditionnels, il est nécessaire d'ajuster les accélérations produites par les mouvements des planches et des engins de manutention à la cohésion du béton à l'état frais.

5,208 Durcissement des produits

La cinétique des réactions d'hydratation d'un béton de bois est relativement différente de celle d'un béton traditionnel et est de plus variable en fonction des essences.



T_o , température ambiante
 T_E, T'_E , températures maximales observées
 $T_1 - t_1$ et $T'_1 - t'_1$, périodes dormantes
 T_2 et T'_2 , temps correspondant aux températures maximales
 S et S' , pentes maximales

Figure 15 Évolution des températures lors des réactions d'hydratation d'un béton de bois et d'un béton

D'après Moslemi et Lim [3]

Si l'on compare l'évolution des températures lors des réactions d'hydratation, on constate des courbes telles que sur la figure 15.

On constate facilement sur ces courbes que les substances extraites par les alcalis (différents extraits, sucres, hydrates de carbone, hémicelluloses solubles, ...) agissent :

- sur la durée de la période dormante avec baisse surprenante de température (à expliquer) en fonction du temps,
- sur la vitesse de montée en température,
- sur la chaleur d'hydratation maximale,
- sur le temps de prise.

On constate, en outre, sur la figure 16 que les phénomènes sont variables avec les essences, notamment en ce qui concerne la durée de prise qui varie dans l'exemple présent de 6 à 44 heures environ.

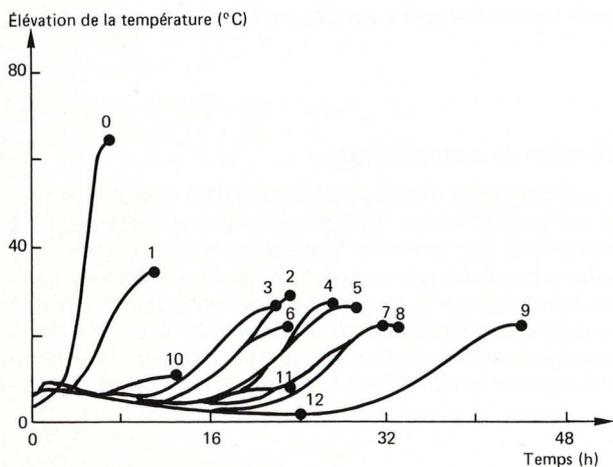
Pour quantifier cet effet inhibiteur, Moslemi et Lim [3] proposent un coefficient I qui traduit les évolutions différentes des chaleurs d'hydratation entre un béton traditionnel et un béton de bois :

$$I = 100 \times \frac{T'_2 - T_2}{T_2} \times \frac{T_E - T'_E}{T_E} \times \frac{S - S'}{S}$$

Influence du traitement des granulats

Un prétraitement à l'eau chaude distillée qui permet d'extraire une partie des substances inhibitrices semble modifier considérablement les paramètres des réactions d'hydratation (6 h d'extraction dans de l'eau distillée à 100 °C et 2 h de lavage de nouveau dans de l'eau distillée - 2 cycles).

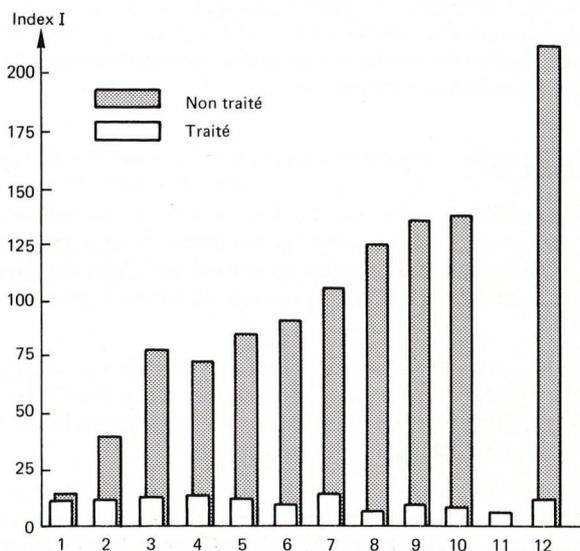
La figure 17 montre l'évolution du coefficient I défini précédemment pour des granulats traités et non traités [3].



1 - Chêne châtaignier	8 - Chêne rouge d'Amérique (Southern Red Oak)
2 - Chêne blanc	9 - Érable sauvage
3 - Chêne rouge d'Amérique (Water Oak)	10 - Tulipier d'Amérique
4 - Chêne rouge d'Amérique (Post Oak)	11 - Gommier d'Amérique
5 - Chêne des teinturiers	12 - Hickory véritable
6 - Tupélo noir	0 - Pâte de ciment
7 - Chêne écarlate	● - Élévation de température maximale

Figure 16 Influence des essences sur l'évolution des températures lors des réactions d'hydratation de divers béton de bois

D'après Moslemi et Lim [3]



1 - Chêne blanc d'Amérique	7 - Chêne des teinturiers
2 - Tulipier d'Amérique	8 - Gommier d'Amérique
3 - Chêne rouge d'Amérique (Water Oak)	9 - Chêne écarlate
4 - Chêne blanc	10 - Chêne rouge d'Amérique (Southern Red Oak)
5 - Chêne rouge d'Amérique (Post Oak)	11 - Hickory véritable
6 - Tupélo noir	12 - Érable rouge

Figure 17 Influence des essences sur le coefficient I pour divers bétons de bois

D'après Moslemi et Lim [3]

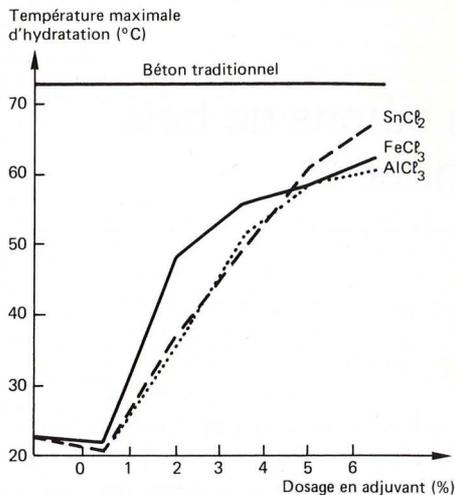


Figure 18 Influence de divers accélérateurs sur les températures maximales d'hydratation d'un béton de bois

D'après Zhengtian et Moslemi [4]

Influence des adjuvants accélérateurs

L'effet des substances inhibitrices sur l'hydratation du béton peut être réduit de façon significative par l'utilisation d'accélérateur [4]. Des essais portant essentiellement sur le bois de mélèze avec du SnCl₂, FeCl₃ et AlCl₃ montrent, lors des réactions d'hydratation, des températures maximales supérieures à 60 °C (pour 73 °C avec le béton traditionnel de référence) avec des dosages d'adjuvant de 5 à 6,5 % par rapport au poids de ciment (fig. 18). Le chlorure de calcium (CaCl₂) permet d'obtenir des températures pratiquement équivalente (59 °C en réduisant notablement le temps correspondant T₂).

Des essais complémentaires sur d'autres essences seraient vraisemblablement très instructifs pour comprendre et limiter ces réactions d'inhibition.

Les vitesses de prise et de durcissement (à regarder également de près) sont des paramètres qu'il est essentiel de maîtriser dans un processus industriel car ils peuvent entraîner dans le cas contraire des adaptations permanentes au niveau de la manutention des produits frais et des durées de durcissement et de stockage variables.

Nota :

nous avons vu que les vitesses de durcissement des bétons de bois sont intimement liées à la qualité du traitement des granulats. Il semblerait que, pour les bétons de granulats Silwood, les vitesses de durcissement observées soient proches de celle des bétons traditionnels.

5,209 Manutention et palettisation des produits jeunes

Compte tenu des vitesses de durcissement évoquées précédemment et du niveau de résistance de tels bétons, il est en général nécessaire soit d'adapter les contraintes liées aux pinces de manutention, soit de prolonger les durées de durcissement avant manutention et palettisation (une durée de 24 h semble être un minimum).

5,210 Cure et stockage des produits

Des précautions particulières selon la destination des produits doivent être prises pour limiter le retrait irréversible et pour livrer des produits présentant un retrait réversible potentiel le plus faible possible.

Dans cette optique, il semble nécessaire de :

- réaliser une cure afin d'éviter toute dessiccation compte tenu de la capacité d'absorption d'eau du bois, qui nuirait à la qualité des réactions d'hydratation ;
- prévoir un délai de stockage assez long à l'abri des précipitations jusqu'à obtenir un équilibre hygrothermique satisfaisant. Un délai minimal de 1 à 3 mois ne paraît pas excessif.

5,211 Usinage

La possibilité de réaliser sur un produit durci un usinage économique présente deux intérêts majeurs :

- réaliser des produits avec de faibles tolérances dimensionnelles qui permettent d'envisager des systèmes de construction assemblés par collage, voire montés à sec et par suite d'assurer des gains de productivité notables au niveau de la pose ;
- traiter facilement, au niveau du chantier (avec des outils rustiques), les points singuliers qui, par exemple au niveau d'une maçonnerie, sont très nombreux et qui finissent par avoir une incidence considérable sur le prix total de la construction.

Un béton de granulats de bois d'une masse volumique de 900 kg/m³ permet d'envisager un sciage aisé avec une scie ou avec une fraise au carbure de tungstène. Un tel usinage garantit des tolérances de quelques dixièmes de millimètres, compatibles avec le montage à sec et *a fortiori* avec un montage collé.

Comme pour tous les problèmes de coupe, il suffit d'optimiser, pour éviter les échauffements et les usures prématurées, la vitesse de coupe en fonction de l'outil, du matériau et du principe de lubrification.

De même, le sciage manuel, sur le chantier, de produits confectionnés avec un béton d'une telle masse volumique ne pose pas de difficultés si l'on utilise une scie égoïne avec des dents en carbure de tungstène.

Cette usinabilité constitue vraisemblablement un avantage spécifique très intéressant auquel il faut ajouter les possibilités de clouage et de vissage, avantages souvent peu valorisés sur le plan économique .

6

Nouvelles applications des bétons de bois (composites ciment-bois)

6,1 Présentation de la démarche adoptée

Afin d'effectuer un recensement aussi exhaustif que possible des nouvelles applications des Composites Ciment-Bois (CCB), il a été fait appel à des techniques de créativité et de travail en groupe s'inspirant de l'analyse de la valeur.

Contrairement à la démarche traditionnelle de l'analyse de la valeur, consistant à concevoir le produit le mieux adapté à un besoin donné, la démarche entreprise a eu pour objet de recenser les besoins que pourraient satisfaire au mieux des produits fabriqués dans un matériau donné.

Partant d'un matériau et non d'un besoin, on ne peut parler de fonctions, mais de caractéristiques fonctionnelles. Celles-ci ont donc fait l'objet d'une première réflexion qui a abouti à la liste donnée au tableau 7.

Une valeur cible de 1 mm/m a été retenue dans cette liste pour caractériser les variations dimensionnelles des composites ciment-bois. Les techniques de fabrication ne permettent pas à ce jour une telle maîtrise des variations dimensionnelles. Cependant, nous pouvons raisonnablement penser que les recherches en cours et à venir permettront d'atteindre ces performances. Le travail décrit ci-après a donc été basé sur les propriétés actuelles ou potentielles des CCB.

Une première séance de créativité a alors permis de dresser une liste d'environ soixante-quinze applications susceptibles de mettre en œuvre le CCB. A partir de cette liste a été constitué un premier tableau à double entrée croisant les caractéristiques fonctionnelles avec les matériaux auxquels peut se substituer le CCB.

Huit classes de matériaux ont été identifiées : béton de granulats courants, béton de granulats légers, béton cellulaire, bois, pierre, métal, matériau de synthèse (plastiques) et composites bois-résine. Les avantages ou les inconvénients que présente l'emploi du CCB à la place de chacun de ces matériaux ont été évalués pour chacune des caractéristiques fonctionnelles définies ci-dessus. Ainsi, l'avantage certain du CCB par rapport au béton de granulats courants concernant le poids ou par rapport au métal concernant la résistance à la corrosion, etc.

Pour chacune des applications identifiées précédemment, on a choisi le ou les matériaux visés par le CCB (ex : mobilier urbain en béton, mobilier urbain en bois).

La réalisation d'un tableau comportant une ligne par application et par matériau visé et une colonne par caractéristique fonctionnelle a permis de réaliser, pour l'ensemble des participants, un double classement des applications, par score moyen décroissant d'une part, et par moyenne des rangs croissants d'autre part. Les dix premiers produits du classe-

ment le moins dispersé ont alors été retenus et complétés selon les cas.

Après un traitement, quinze familles de produits ont été retenues et classées selon leur marché potentiel. Le tableau 8 présente ces quinze familles selon la caractéristique essentielle apportée par le CCB. Le tableau 9 recense les autres familles identifiées classées par caractéristique essentielle apportée par le CCB.

Enfin, les quinze premières familles identifiées comme étant potentiellement concernées par le béton de bois font l'objet d'un court développement destiné à préciser leur intérêt technico-économique.

Tableau 7 Caractéristiques fonctionnelles du matériau «CCB» relativement au béton traditionnel

Masse volumique	<ul style="list-style-type: none"> faible (450 kg/m³) - peut flotter adaptable (→ 1200 kg/m³) Cible : 450 à 900 kg/m³
Stabilité mécanique	<ul style="list-style-type: none"> résistance à la compression variations dimensionnelles matériau homogène et isotrope (bois) Cible : 20 à 40 bars Cible : 1 mm/m
Aptitude à la mise en œuvre (Matériau)	<ul style="list-style-type: none"> pompable, formable, usinable, sciable, sculptable
Aptitude à la mise en œuvre (Produit)	<ul style="list-style-type: none"> ductile, fissurable, clouable, vissable aptitude à constituer des composites multicouches aptitude à former des produits minces aptitude à être revêtu
Résistance aux agressions	<ul style="list-style-type: none"> feu : résiste à l'incendie chocs : résiste, absorbe les chocs mécaniques et thermiques gélivité parasites et champignons : imputrescible, inattaquable UV : insensible abrasion séismes (ductilité)
Hygrothermique	<ul style="list-style-type: none"> isolation, inertie thermique régulateur hygrothermique drainant (selon composition)
Acoustique	<ul style="list-style-type: none"> absorbant
Propriétés électromagnétiques	<ul style="list-style-type: none"> conductivité électrique, susceptibilité magnétique
Santé/ Environnement	<ul style="list-style-type: none"> matériau sain : pas d'émission de radon M.P. renouvelable valorisation de déchets co-produit forestier
Valeur d'estime	<ul style="list-style-type: none"> image du matériau «bois» aspects esthétiques variés
Durabilité	<ul style="list-style-type: none"> maintenabilité, entretien
Coût	<ul style="list-style-type: none"> objectif : 180 à 350 F/m³ de granulat

Tableau 8 Les 15 familles de produits retenues susceptibles de mettre en œuvre les composites ciment bois

Classement par intérêt décroissant	Famille de produits
1	Écrans anti-bruit absorbants
2	Constructions en kit
3	Plots et cales
4	Constructions légères
4	Blocs
4	Mobilier extérieur
4	Sols sportifs (ex : pavés)
8	Chape de réhabilitation
8	Petits éléments de mur de soutènement
10	Éléments de cave à vin
10	Bardage/Vêtire
12	Éléments de mur (panneaux)
13	Entrevous ou hourdis
13	Plancher support de couverture
15	Précadre

Tableau 9 Autres familles de produits identifiés susceptibles de mettre en œuvre les composites ciment-bois

Classement par caractéristique essentielle apportée par le CCB	Famille de produit	Autre caractéristique intéressante par ordre décroissant
Diminution du poids (P)	Chape de réhabilitation Précadre Éléments de mur (panneaux)	A, C AS, U A, C, AS, U, E
Assemblages à sec (AS) (clouabilité - vissabilité)	Constructions légères Constructions en kit Planches (CCB + fibres) Élément de plancher support de couverture Bardage/Vêtire Entrevous	U, P, A, C P, U, E U, P, A, C P, A, C P, A, C, U, E P, A, C
Usinabilité - sciabilité (U)	Blocs Cales, plots	P, A, C, A, S U, P
Confort (C) (hygrothermique, mécanique)	Sols sportifs (tennis, basket, ...) Éléments de cave à vin	E, A, U, S
Intégration dans l'environnement (E)	Mobilier extérieur Petits éléments mur soutènement	P, C, AS, U, S AS
Acoustique (A)	Élément anti-bruit absorbant	P, AS, U, E
Sécurité (S)		
Diminution du poids (P)	Habitat léger Boisseau (enveloppe extérieure) Matériau de remplissage léger Tuiles Galerie technique Touret de câble Voussoir Fosse septique Dalette (protection d'étanchéité) Forme de pente Silos Réservoirs Bouée, ponton, etc. Linteau Plot de fondation Récif artificiel	A, C, AS, U, E C, A AS

Tableau 9 (suite)

Classement par caractéristique essentielle apportée par le CCB	Famille de produit	Autre caractéristique intéressante par ordre décroissant
Assemblages à sec (AS) (clouabilité - vissabilité)	Bâti de machine Support bardage/vêtue Palette Emballages consignés (caisses) Coffre volet roulant Charpente Socles et lests Coffrage et moule perdu Escalier Blochet (inclusion clouable) Élément coupe-feu Traverses chemin de fer Alvéoles techniques	A, U P, U P, U P, U A, C P, U P U U
Usinabilité - sciabilité (U)	Massifs antivibratiles	AS
Confort (C) (hygrothermique, mécanique)	Pavés Plaque isolant thermique Route à faible trafic Planchers techn.informatiques	P, U, E AS
Intégration dans l'environnement (E)	Mur d'escalade Caniveau Clôture Corniche (pont, bâtiment) Dalles gazon Châssis de serre Borne, balise Coffrets (compteur, boîte à lettres)	AS, U P AS P
Acoustique (A)	Cloison de doublage	P, C, AS, U
Sécurité de l'utilisateur Sols d'aire de jeux Aménagements d'aires de jeux Séparateur de voies Glissière de sécurité Panneau routier	Sols d'aire de jeux Aménagement d'aire de jeux Séparateur de voies glissière de sécurité Panneau routier	C E, C P, AS AS, U
Autres	Grille à œufs Support culture hors sol Menuiserie de bâtiment Porte et volets Paroi anti-explosive Élément de cheminée en pierre Drain Flocage Garde-corps, main courante Fondation de chaussée	

6,2 Types de produits réalisables en composite ciment-bois

6,201 Écrans antibruit absorbants

Afin d'être absorbant acoustique, un matériau doit être poreux et posséder une bonne perméabilité à l'air. Le béton de bois est l'un des rares matériaux à l'aspect minéral répondant à cette exigence.

L'aspect minéral est une qualité pour les écrans anti-bruit car ils peuvent ainsi mieux s'intégrer dans un environnement urbain. Cette propriété fait, en effet, défaut à d'autres matériaux dont on pourrait envisager l'utilisation tels que les tôles métalliques perforées. Le béton de bois teinté dans la masse devient très esthétique. Il permet donc aux architectes une

grande souplesse dans la composition des couleurs et des formes.

Les écrans en béton de bois peuvent être préfabriqués avec du matériel courant destiné au béton classique. Sa bonne aptitude au moulage permet d'obtenir des surfaces fortement sculptées, les écrans plats n'absorbant les fréquences que de manière trop sélective.

Le béton de bois est autonettoyant et possède en outre une bonne résistance au gel-dégel.

Du point de vue économique, les écrans en béton de bois sont performants. Leur préfabrication sous forme monolithique permet une mise en œuvre simple des éléments. Sur le chantier linéaire qui avance rapidement, peu de manipulations et de corps de métiers sont nécessaires.

Ces écrans présentent donc des intérêts aussi bien techniques qu'économiques.

6,202 Constructions en kit

Le vocable général «constructions en kit» concerne ici plus particulièrement les systèmes constructifs correspondant aux bâtiments en général de volume limité, susceptibles d'être montés sans l'apport indispensable des professionnels du bâtiment.

Dans ce cadre, les composants en béton de bois permettent de :

- concevoir des assemblages à sec qui valorisent les qualités d'usinage sur le lieu de fabrication et les qualités de «clouabilité», de «vissabilité» et de «sciabilité» sur le chantier, propriétés qui facilitent l'utilisation de ces produits par les non-professionnels et qui entraînent des gains de productivité sur chantier ;
- contribuer aux économies d'énergie, au confort acoustique et thermique ;
- proposer des systèmes s'intégrant au mieux dans l'environnement.

6,203 Plots et cales

En service, les plots de palettes sont des éléments très sollicités au niveau des chocs et de la tenue des clous.

Les plots en composite ciment-bois ont, par rapport aux plots en bois, une bonne résistance aux chocs car ils sont moins sensibles au fendage et une plus grande homogénéité de la tenue des clous grâce à l'isotropie du matériau et à une moindre sensibilité à l'humidité.

Les plots de palettes en composite ciment-bois offrent plusieurs avantages lors de la fabrication des palettes, à savoir :

- pas de fendage ni de sens privilégié de clouage comme dans le bois grâce à son isotropie,
- amélioration de la productivité de fabrication des palettes par l'automatisation des tâches rendue possible grâce à l'homogénéité des plots et par un conditionnement adapté lors de leur fabrication, évitant ainsi la reprise et le triage.

La fabrication des cales et des plots en composite ciment-bois est réalisable sur toutes les machines fonctionnant par vibro-compaction, du type machines à fabriquer des blocs, réputées pour avoir des coûts de production assez bas. Cette technique de fabrication offre un avantage certain puisqu'elle permet de réaliser une grande variété de formes - arrondie, cylindrique, à évidement, etc. - à des coûts très compétitifs par rapport au bois qui doit recevoir un usinage adapté.

6,204 Constructions légères

Les constructions légères sont en général des constructions de faible volume et/ou provisoires, pouvant être éventuellement démontées et remontées.

Grâce à la légèreté du composite ciment-bois, on peut imaginer des systèmes constructifs constitués d'éléments porteurs de taille moyenne manipulables ou d'éléments de grand format pouvant être manipulés à l'aide de petits engins de levage.

L'assemblage de ces éléments peut être envisagé à sec, d'une part grâce à la possibilité de réaliser des emboîtements précis usinés et, d'autre part, en faisant appel à des fixations par clouage ou vissage autorisant leur démontage.

De plus, dans les cas d'habitations légères de loisir (HLL) pour lesquelles ce type de construction est particulièrement bien adapté, l'inertie thermique du béton procure un confort d'été intéressant.

6,205 Blocs

Le composite ciment-bois est un matériau qui assure un bon compromis entre résistance mécanique, poids et isolation thermique. Il permet d'envisager la conception de blocs porteurs, creux et isolant du type «isolation partielle répartie». Les procédés de construction qui tireront parti des qualités spécifiques du composite ciment-bois offriront un grand intérêt et ceci à trois niveaux :

- amélioration des conditions de travail et de productivité sur chantier : le poste main-d'œuvre sur chantier reste le seul gisement de productivité significatif et représente les 2/3 du prix du mur. Une diminution du temps de pose de l'ordre de 50 % peut être envisagée par la conjonction de trois avantages :
 - montage à sec rendu possible grâce à son usinabilité, permettant d'obtenir une précision dimensionnelle des produits,
 - conception de plus grands éléments grâce à sa légèreté, tout en restant plus léger que les produits traditionnels,
 - facilité d'adaptation des produits grâce à sa sciabilité, permettant notamment de traiter les points singuliers.

De plus, sa capacité à être vissable et clouable peut très bien faciliter la pose de bardages et vêtements ;

- contribution à l'isolation thermique et au confort de vie : grâce à un coefficient de conductivité thermique amélioré dû à la présence du bois, le mur en blocs de composite ciment-bois participe à l'isolation thermique globale de l'enveloppe du type «isolation répartie» et apporte une correction thermique au droit des planchers et refends. Cette participation, non négligeable, permet de repousser les limites de l'isolation thermique par l'intérieur. L'épaisseur de l'isolant est sensiblement réduite, ce qui entraîne un gain précieux de surface habitable. De plus, il améliore le confort de vie, notamment grâce à sa capacité de régulateur thermique ;
- conditions de fabrication : compte tenu de la masse volumique envisagée, les blocs sont facilement réalisables sur toutes les machines classiques, ce qui permet d'atteindre des coûts de production relativement bas et de placer le produit sur un marché concurrentiel.

6,206 Mobilier extérieur

Le terme «mobilier extérieur» rassemble ici tous les éléments de jardin public, d'aires de jeux ou mêmes des éléments particuliers tels les décorations et les utilitaires.

Le matériau à base de composite ciment-bois offre des avantages qui peuvent développer fortement ce type d'application.

D'abord, son poids plus faible est un facteur important : par exemple, pour des modules d'aires de jeu transportables.

De la même façon, la mise en œuvre aisée de ce matériau pour ce type d'emploi apporte un plus : ce composite est moulable comme du béton traditionnel et peut prendre les formes souhaitées contrairement aux grosses structures à base de bois ou de métal.

Il faut souligner aussi le côté «propre» de ce matériau comparativement à des matériaux de synthèse, des bois traités ou des métaux revêtus, à une époque où la défense de l'environnement devient primordiale.

Enfin, l'aspect esthétique et confortable peut aussi être mis en avant comme par exemple la disparition de la sensation du froid sur les bancs publics en béton.

6,207 Sols sportifs

Une des caractéristiques recherchées pour les sols sportifs (plus particulièrement ceux destinés à la pratique du tennis) est la capacité d'absorber l'énergie de choc résultant du contact entre le pied du joueur et le sol.

Le composite ciment-bois apparaît particulièrement adapté à ce type d'application car c'est un matériau qui permet d'obtenir des valeurs d'absorption d'énergie très proches de celles relevées sur la terre battue qui est la surface de référence en matière de sol de tennis concernant le confort de jeu.

Les problèmes de finition et de moyens de mise en œuvre sont encore à optimiser, mais ce domaine d'application mériterait d'être exploré du fait de la parfaite adéquation des caractéristiques du matériau au problème posé.

6,208 Chape de réhabilitation

Les principales caractéristiques des composites ciment-bois :

- légèreté,
- résistance,
- tenue au feu,
- propriétés acoustiques (plus particulièrement au bruit d'impact),
- isolant thermique,

sont bien adaptées pour la réalisation de chapes intérieures en réhabilitation. Ce domaine d'utilisation est d'ailleurs le plus important des béton légers en général (il absorbe 85 % de leur marché).

Par rapport aux autres produits, le composite ciment-bois, outre sa simplicité de mise en œuvre, présente l'avantage d'être performant pour les différents domaines recherchés.

6,209 Petits éléments de murs de soutènement

Ces éléments en béton de bois de formes très diverses permettent des soutènements de hauteur limitée jusqu'à 1,50 m environ.

Ces composants plus légers dont les tolérances de fabrication peuvent être rigoureuses après usinage, voire adaptées facilement sur chantier par sciage en cas de difficultés, entraînent des gains de productivité au montage.

L'intégration dans l'environnement et la compatibilité totale avec la végétation en font un produit qui devrait se développer.

6,210 Éléments de cave à vin

Ces éléments légers de conception modulaire, à l'esthétique élaborée, sont utilisés par les particuliers ou les professionnels du vin.

Le matériau béton de bois joue en particulier un rôle de régulateur thermohygrométrique par ses qualités intrinsèques en stabilisant la température et en limitant les variations du degré hygrométrique de la cave.

Son faible module de déformation permet, par ailleurs, d'absorber les vibrations éventuelles susceptibles de se transmettre par le sol, vibrations nuisibles à la bonne conservation des bouteilles.

6,211 Bardages – vêtements

Les éléments de bardages ou de vêtements en composite ciment-bois peuvent répondre à de nombreux besoins et utilisations, en cumulant bon nombre d'avantages : une grande facilité d'emploi due à leur caractère particulièrement usinable, clouable et vissable.

En effet, l'ensemble des besoins recouvre les éléments de faible surface jusqu'aux panneaux de grandes dimensions qui peuvent être tous fixés sans difficulté.

D'autre part, pour ce type d'application, ce matériau est un excellent isolant thermique et acoustique, limitant particulièrement les flux de chaleur et de bruit tout en restant ininflammable.

Enfin, ce composite allie également deux caractéristiques intéressantes : la légèreté par l'apport des granulats de bois et une bonne résistance aux chocs par la matrice cimentaire.

6,212 Panneaux éléments de mur

Les panneaux destinés à servir d'éléments de mur dans les bâtiments d'habitation, industriels, sportifs ou autres sont certainement une application intéressante du béton de bois.

Grâce à sa bonne résistance thermique, une épaisseur de 25 à 30 cm de béton de bois procure un niveau d'isolation suffisant (environ 1,5 - 2 m².K/W) et dispense donc de l'ajout d'un isolant complémentaire. Cette isolation répartie permet de tirer profit de l'inertie thermique des murs et procure une bonne régulation de la température, en été particulièrement.

De plus, le béton de bois brut non revêtu possède une bonne absorption acoustique. Cette qualité devrait être très appréciée, en particulier dans le cas des bâtiments bruyants tels que les ateliers de fabrication. Il est à noter que le béton de bois non revêtu devient très esthétique lorsqu'il est teint dans la masse.

Parmi les autres qualités de béton de bois qui intéressent cette application, citons également sa bonne résistance au feu, au gel-dégel et à l'eau, son pouvoir capillaire négligeable, sa capacité à être un régulateur d'humidité et son imputrescibilité.

A l'heure actuelle, les variations dimensionnelles du béton de bois impliquent l'utilisation d'enduits réalisés dans des conditions très particulières (voir paragraphe 2,331). Des variations dimensionnelles réversibles du béton de bois inférieures à 1 mm/m, telles que nous les avons fixées parmi les valeurs-cibles, permettront l'utilisation de certains enduits monocouches réputés souples très utilisés en France. Cependant, il faudra être attentif à ce que la diminution des variations dimensionnelles ne soit pas obtenue au détriment d'une réduction de la résistance thermique du matériau. Une attention particulière devra être apportée aux joints (une solution étant de les laisser apparents).

6,213 Plancher support de couverture

Ce type de plancher est constitué de grandes plaques armées reposant sur une structure. La fabrication de ces grandes plaques en composite ciment-bois dans toute leur épaisseur offre plusieurs avantages :

- alléger la structure,
- assurer une régulation hygrothermique sous les combles du bâtiment améliorant le confort de vie et notamment le confort d'été,
- assurer une bonne protection contre le feu.

En outre, leur utilisation peut être particulièrement intéressante lorsque se posent des problèmes vis-à-vis du bruit, et notamment :

- lorsque le niveau sonore doit être abaissé pour améliorer les conditions de travail (tôlerie, garage, imprimerie, etc), grâce aux qualités d'absorption acoustique ;
- dans des locaux industriels devant répondre à la réglementation en matière de diffusion du bruit vis-à-vis de l'environnement résidentiel, grâce aux qualités d'isolation acoustique.

6,214 Entrevous ou hourdis

N'intervenant pas dans la tenue du bâtiment, mais assurant seulement une fonction de coffrage perdu, les entrevous - ou hourdis - peuvent être allégés grâce au composite ciment-bois tout en apportant les qualités mécaniques requises. Ils peuvent se présenter sous la forme d'éléments de coffrage manportables de plus grand format ou de caissons ouverts pour améliorer les capacités d'absorption du bruit. Aussi, d'autres propriétés particulières sont à considérer lorsque, notamment certaines fonctions complémentaires sont demandées, telles que :

- qualité d'isolation et d'absorption phonique,
- résistance et réaction au feu,
- qualité de régulation hygrothermique.

De plus, la pose de faux plafonds ou d'autres éléments sera facilitée par l'avantage qu'offre le composite ciment-bois qui est vissable ou clouable. Il trouvera des utilisations notamment dans les bâtiments publics tels que hôpitaux, écoles, salles de sport, piscines couvertes, halls, etc, et les bâtiments administratifs et industriels, hangars, etc.

6,215 Précadres

La diminution du poids est un grand avantage pour la mise en œuvre manuelle des produits, en particulier pour les éléments monolithes.

Pour les précadres de grand format, une conception par éléments constitutifs manportables est plus facilement envisageable grâce à la possibilité de réaliser des assemblages à sec par clouage ou vissage, et grâce à la possibilité d'adaptation par sciage.

Le précadre en composite ciment-bois peut également servir de coffrage pour le coulage du linteau et éventuellement des potelets de jambages.

Contrairement au précadre métallique, il sera possible d'enduire le précadre en composite ciment-bois du même type de revêtement que la façade. De même, ses propriétés isolantes permettront la réduction des ponts thermiques. Enfin, la fixation des menuiseries sera nettement facilitée par le vissage direct sans préperçage.

Conclusion

Diverses actions relativement récentes de promotion de la filière bois :

- mise en valeur du patrimoine forestier national et protection contre le feu de ce dernier (débroussaillage, ...),
- recherche de nouvelles utilisations des bois de taillis,
- utilisation des déchets de la filière,

ont entraîné de nombreuses propositions relatives à l'incorporation de granulats à base de bois dans les formules de béton en substitution à des granulats traditionnels. Ces propositions concernent des granulats de bois de formes diverses : bois défibrés ou déchiquetés, copeaux, sciure avec ou sans traitements spécifiques.

Ces utilisations ne sont pas nouvelles mais elles se sont souvent trouvées limitées à la fois par des difficultés au niveau du processus de fabrication et par les caractéristiques de certains produits qui ont parfois entraîné de sérieux litiges : c'est le cas, en particulier, de l'instabilité dimensionnelle de produits de bâtiment à base de liants hydrauliques qui peut atteindre jusqu'à 4 à 5 mm/m et pour lesquels se pose quasi systématiquement le problème de la durabilité du comportement des enduits.

La disponibilité de ces familles de granulats peu exploités et souvent mal connus en fait pourtant un produit d'autant plus séduisant que le coût annoncé apparaît compétitif si l'on fait abstraction des inconvénients évoqués ci-dessus.

Ces constatations mettaient en évidence la nécessité (afin d'éviter de nouvelles contre-références) de faire un état des lieux destiné :

- à préciser les connaissances techniques sur tous les aspects de cette question (différents traitements des granulats de bois, propriétés de l'interface bois-matrice cimentaire, caractéristiques essentielles des bétons de bois, ...),
- à faire émerger les voies de recherche les plus pertinentes pour résoudre les problèmes techniques identifiés,
- à inventorier les familles de produits potentielles les plus ajustées aux caractéristiques spécifiques de ce matériau.

Cette étude menée en collaboration étroite entre trois centres techniques (CERIB, CSTB, CTBA) auxquels se sont associés des producteurs de granulats répond à ces différentes questions.

Il en ressort notamment que, malgré les atouts non négligeables de ce matériau, à savoir :

- la facilité d'usinage favorisant les techniques de montage à sec sur chantier,
- la légèreté entraînant la proposition de nouveaux produits permettant des gains de productivité sur chantier,
- la «clouabilité» et la «vissabilité»,
- l'isolation thermique associée à des résistances mécaniques satisfaisantes,
- l'inertie thermique contribuant au confort thermique,
- l'absorption acoustique,

des obstacles à l'élargissement des applications et au développement de cette filière subsistent : des investigations plus poussées sont donc nécessaires.

Ces obstacles concernent notamment :

- le traitement satisfaisant des granulats (et en particulier la stabilité chimique et la teneur en eau qui doivent être constantes),
- la régularité et la maîtrise des réactions d'hydratation des liants hydrauliques et donc une meilleure connaissance des réactions à l'interface bois-ciment,
- la diminution très sensible des variations dimensionnelles des bétons de bois qui ne devraient pas devoir dépasser le mm/m.

On peut toutefois signaler que des recherches en cours en France viennent d'aboutir à des progrès sensibles dans ces domaines (des brevets ont été déposés) mais qui demandent à être validés par une expérimentation complète en laboratoire.

Enfin, une étude prospective propose, dans l'hypothèse où ces différents obstacles seraient levés, un inventaire des applications potentielles de ce matériau amélioré, étude que le groupe a réalisé en s'inspirant des techniques de l'analyse de la valeur.

Références

Introduction

- [1] COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN, «De la forêt à l'industrie, une stratégie pour le bois», rapport du groupe Stratégie industrielle «Bois» présidé par F. BLONDOT, La France, l'Europe X^e Plan 1989-1992, la Documentation française, juillet 1991.

Chapitre 1

- [1] *Cahiers du CSTB*, «Blocs en béton de copeaux de bois Durisol Herrenschmit», Décision 1094, n° 33 F9, 1958.

Chapitre 3

- [1] SUZUKI, Cement Gijutsu Nempo, Vol 13, p.160, 1969.
[2] MINAMI, Kenchiku Gijutsu n° 179, p.135, 1966.
[3] YOSHIMOTO, Mokuzai Kogyo, Vol 28, n° 7, p.6, 1973.
[4] BROKER SIMATUPANG, «Dimensionstabilisierung zementgebundener Holzwerkstoffe», *Holz als Roh* 32, p. 188-193, 1974.
[5] YAMAGISHI - KOMAZAWA - KASAI - NUNOMURA, «Fabrication de panneaux de bois-ciment utilisant un bois de mauvaise prise - Influence d'un prétraitement des particules de mélèze avec de l'huile et des produits chimiques», *J. Hokaido Forest Prod. Research Inst.*, Asahigaula, Japan, 7, 6, 10, 1980.
[6] YOUNGQUIST, KRZYSIK, ROWELL, «Dimensional stability of acetylated aspen flakeboard», *Wood and Fiber Science* 18 (1), p. 90-98, 1986.
[7] LÉVY, article FNB, B 19.
[8] FEIST, «Weathering Behavior of dimensionally stabilised wood treated by heating under pressure of Nitrogen Gas», *Wood and Fiber Science* 19 (2), p. 183-195, 1987.
[9] BADEJO, «Effect of flake geometry on properties of cement bonded particleboard from mixed tropical hardwoods», *Wood Science Technology* 22, p. 357-370, 1988.
[10] DARYANTO, «Étude des caractéristiques physico-mécaniques du bois imprégné et du bois densifié par imprégnation suivi d'une compression plastique», Thèse 3^e cycle, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1988.
[11] LECLERC de BUSSY, «Procédé et dispositif pour le grillage suivi de la torréfaction de fragments de bois humides», brevet d'invention n° 86 01969, 1987.
[12] DOAT, «Le bois torréfié», *Revue Bois et Forêt des tropiques* n° 208, (2) p. 57-67, 1985.
[13] BOURGOIS, GUYONNET, «Characterization and analysis of torrefied wood», *Wood Science Technology* 22, p. 143-145, 1989.
[14] BURMESTER, «Zur Dimensionstabilisierung Von Holz», *Holz als Roh* 33, p. 333-335, 1975.
[15] ROWELL, TILLMAN, ZHENGtian, «Dimensional stabilization of flakeboard by chemical modification», *Wood Science Technology* 20, p. 83-95, 1986.
[16] GUEVARA, MOSLEMI, «The effect of alkylene oxides furan resin and vinylpyrrolidinone on wood dimensional stability», *Wood Science Technology* 18, p. 225-240, 1984.
[17] GUEVARA, MOSLEMI, «Hygroexpansive and sportive behavior of wood modified with propylene oxide and oligomeric discocyanate», *Journal of Wood Chemistry and Technology* 3 (1), p. 95-114, 1983.
[18] TILMAN, SIMONSON, ROWELL, «Dimensional stability and resistance to biological degradation of wood products by a simplified acetylation procedure».
[19] ROWELL, «Chemical modification of wood», *Forest Products Abstracts*, Vol 6, No 12, 1983.
[20] BLENET, «Composition destinée notamment à la fabrication de panneaux, son procédé de fabrication et panneaux obtenus à l'aide de cette composition», brevet d'invention n° 1117 308, 1956.
[21] PASZNER-KLEMAREVSKI, «New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement», Department of Harvesting and Wood Science University of British Columbia, Vancouver.
[22] RAMIO, «Procédé pour la fabrication de granulés végétaux minéralisés», brevet d'invention n° 1283 272, 1962.
[23] KUBEL, PIZZI, «Protection of wood surfaces with metallic oxides», *Holzforschung* 33 (1), 1981.
[24] BLACK, MRAZ, «Inorganic surface treatments for weather resistant natural finishes», USA Forest Service Research Paper FPL 232, 1974.
[25] MOUGEL, BIEGALKE, BERTHIER, FRIMAT, ZOULALIAN, «Mise en œuvre de divers conditionnements du bois en vue d'une limitation des variations dimensionnelles des composites bois-ciment en présence d'eau liquide ou vapeur», Colloque ARBORA, mai 1990.
[26] WIENHAUS, «Influence des substances sur la prise du ciment», *Holztechnologie*, 20, (4), 1979.

- [27] MOSLEMI, GARCIA, HOFTRAND, «Effect of various treatments and additives on wood-portland cement-water systems», *Wood and fiber science*, 15 (2), p. 164-176, 1983.

Chapitre 4

- [1] AFNOR, norme NF P 15-301 «Liants hydrauliques - Définitions, classification et spécifications des ciments».
[2] COUTTS, KIGHTLY, «Bonding in wood fibre-cement composites», *J. of Materials Science* 19, p. 3355-3359, 1984.
[3] Centre d'Information de l'Industrie cimentière, Fiches techniques Cimbéton.
[4] DUNSTER, PARSONAGE, «A study of the effects of saccharide retarders on Portland Cement hydration using trimethylsilylation», *Advances in Cement Research*, Vol 1, n° 4, October 1988, p. 215-220.
[5] LANGE, SIMATUPANG, «Herstellung von Zement gebundenen Fichten-und Pappelspanplatten», *Holz als Roh-und Werkstoff* 43, p. 229-236, 1985.
[6] LEA, «The Chemistry of Cement and Concrete» (3^e Ed), Ed Arnold Publ. London, 1970.
[7] LUDWIG, URUTTA, «Zum Mechanismus der Wirkung von Saccharose auf das Erstarren und Erhärten von Zementen», *Zement, Kalk, Gips*, n° 8, 42, p. 431-436, 1989.
[8] MOSLEMI, «Inorganically bonded wood composites», *Chemtech* August, p. 504-510, 1988.
[9] PAPADAKIS, VENUAT, «Fabrication et utilisation des liants hydrauliques», 1966, (édité par auteurs).
[10] PARAMESWARAN, BROKER, SIMATUPANG, «Zur Mikrotechnologie mineralgebundener Holzwerkstoffe», *Holzforschung* Bd 31, Heft 6, 1977.
[11] SIMATUPANG, «Abbaureaktionen von Glucose, Cellobiose und Holz unter dem Einfluss von Portlandzementmörtel», *Holzforschung* 40, p. 149-155, 1986.
[12] SCHWARTZ, SIMATUPANG, «Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Portlandzement auf die Druck festigkeit von Versuchkörpern aus Zement und Fichten-oder Buchenspänen», *Holz als Roh-und Werkstoff*, 41, p. 65-69, 1983.
[13] SINGH, OJHA, «Effect of glucose on the hydration of Portland Cement», 7^e Congrès Intern. Chimie des Ciments, Paris, 1980.
[14] THOMAS, BIRCHALL, «The retarding action of sugars on cement hydration», *Cement and Concrete Research*, Vol 13, p. 830-842, 1983.
[15] VENUAT, «Adjuvants et Traitements», 1984, édité par auteur.
[16] ENGLISHIAN, MOSLEMI, Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood cement mixtures», *Forest Products Journal*, Vol 35, n° 7, p. 37-43, 1985.

Proceedings of the International Conference on fiber and particle boards bonded with Inorganic Binders, University of Idaho, October 24-26 (1988).

- [17] SIMATUPANG, LANGE, KASIM, SEDDIG, «Influence of wood species on the setting of cement and gypsum».
[18] HACHMI, CAMPBELL, «Wood cement chemical relationships».
[19] LANGE, SIMATUPANG, NEUBAUER, «Influence of latent hydraulic binders on the properties of wood cement composite».
[20] AHO, «Ecozem - The Raute system for the manufacture of cement bonded particle board».
[21] PASZNER, KLEMAREVSKI, «New developments in wood bonding with magnesium oxyphosphate cement».
[22] MOSLEMI, «Wood-cement panel products : coming of age»

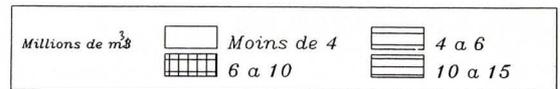
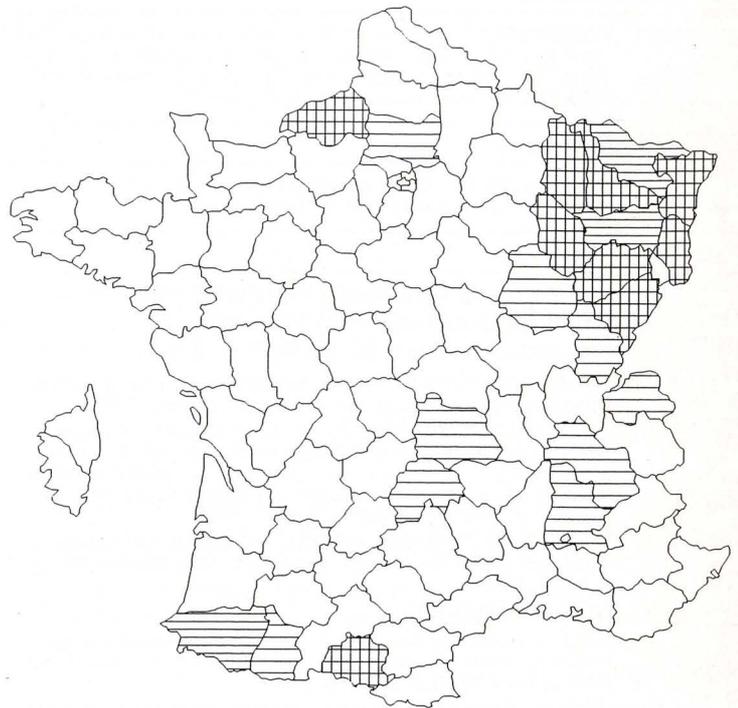
Chapitre 5

- [1] MARULI, SIMATUPANG, LAUGE, ANWARKASIM, SEDDIG, «Influence of wood species on the setting of cement and gypsum, Proceedings of the Int. Conf. on fiber and particle boards bonded with Inorganic Binders», University of Idaho, October 24-26, 1988.
[2] MOSLEMI, PFISTER, «The influence of cement/wood ratio and cement type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels», *Wood and Fiber Science*, 19(2), p. 165-175, 1987.
[3] MOSLEMI, LIM, «Compatibility of southern hardwoods with portland cement», *Forest Products Journal*, Vol. 34, No 7/8, p. 22-26, 1984.
[4] ZENGTIAN, MOSLEMI, «Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western forest larch wood cement water mixtures», *Forest Products Journal*, Vol. 85, No 7, p. 37-43, 1985.

HETRE

ANNEXE

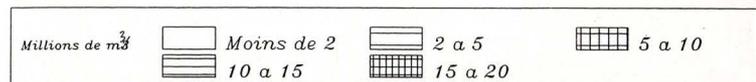
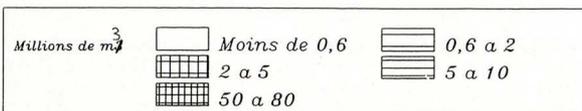
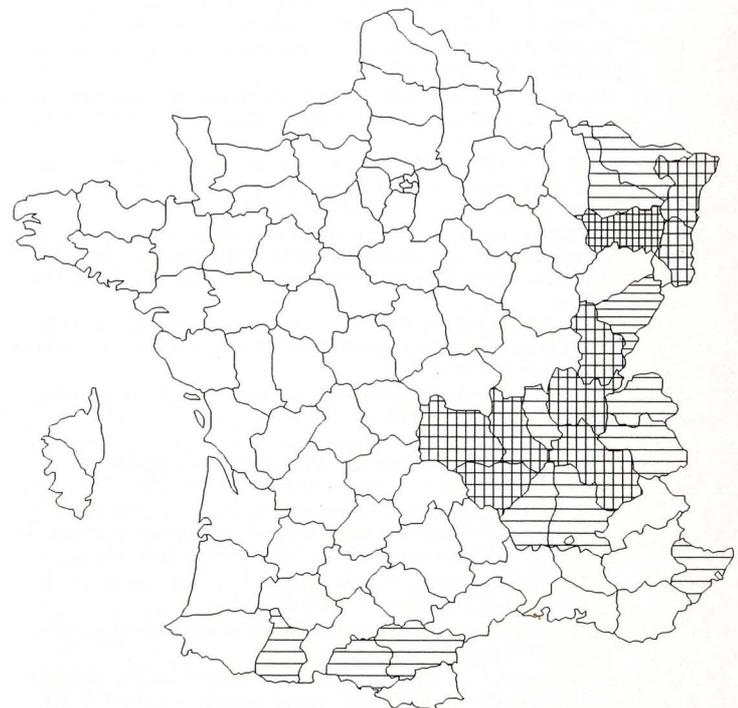
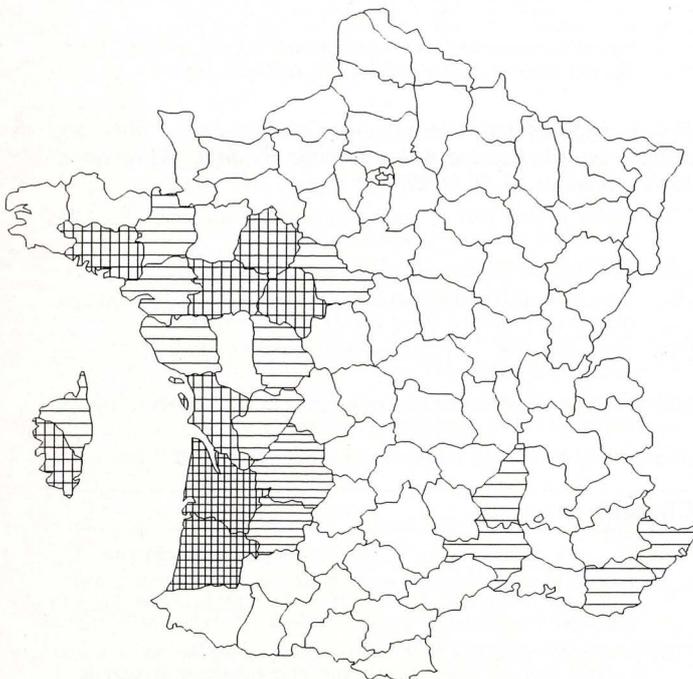
Cartes des forêts françaises



Source: IFN 91

PIN MARITIME

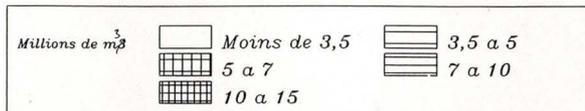
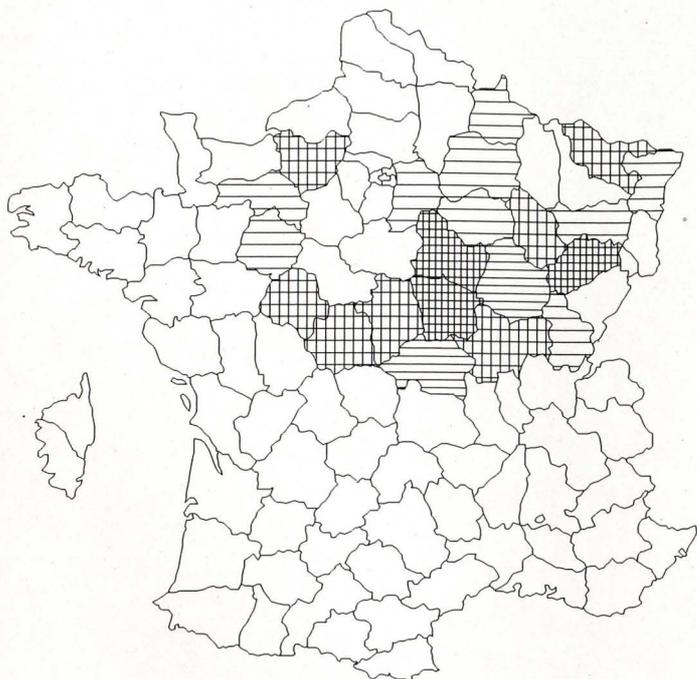
SAPIN PECTINE



Source: IFN 91

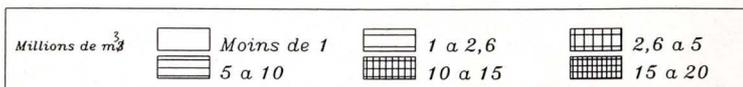
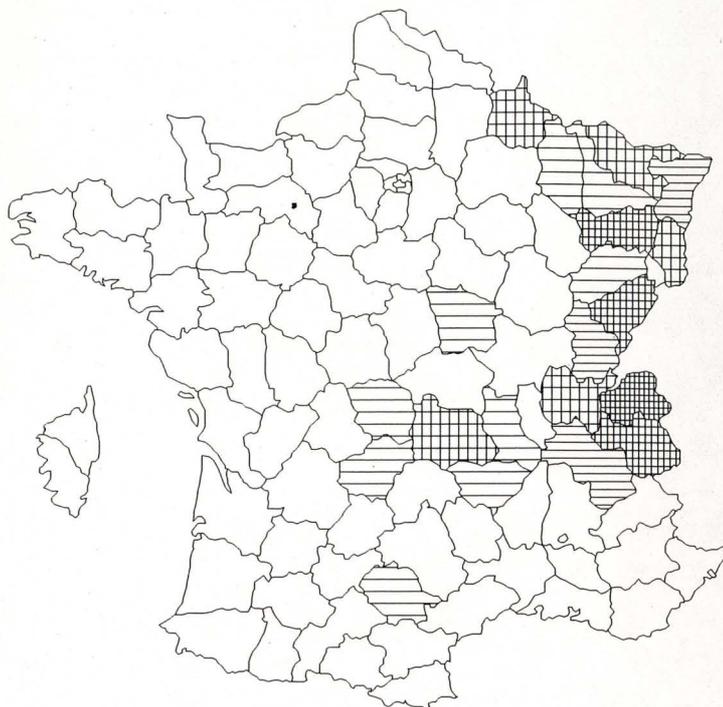
Source: IFN 91

CHENE ROUVRE



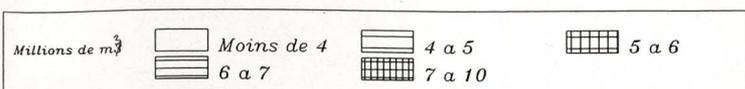
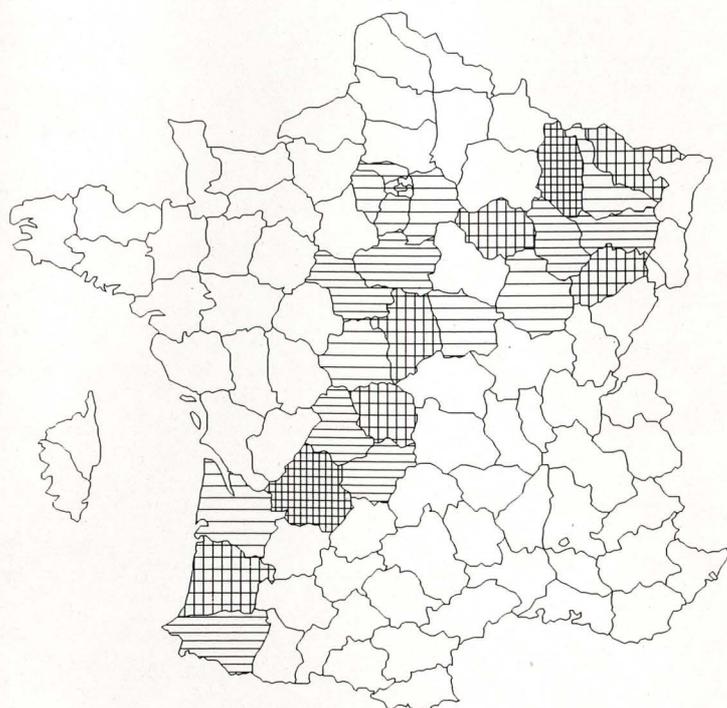
Source: IFN 91

EPICEA COMMUN



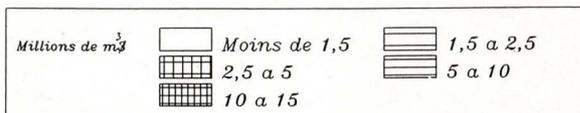
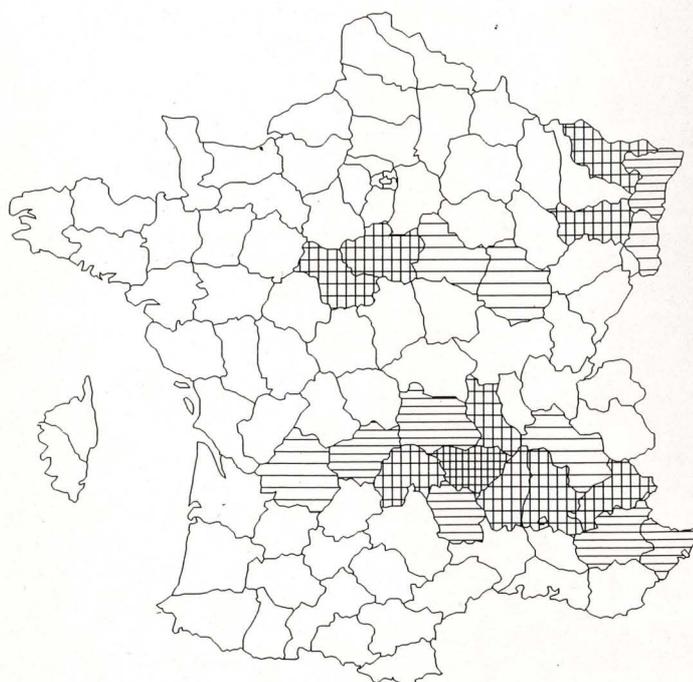
Source: IFN 91

CHENE PEDONCULE



Source: IFN 91

PIN SYLVESTRE



Source: IFN 91