Une expérience pédagogique et de recherche sur le « bois cordé » aux Grands Ateliers

Rémy Mouterde*, Michel Paulin*, Laurent Arnaud, Jean-Claude Morel****

**Laboratoire d'Analyse des Formes, ENSA Lyon*
3, rue Maurice Audin,
69512 Vaulx en Velin Cedex

***Université de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, (CNRS, URA 1652), rue M. Audin, 69 518 Vaulx-en-Velin cedex, France*

remy.mouterde@lyon.archi.fr
michel.paulin@lyon.archi.fr
laurent.arnaud@entpe.fr
jean-claude.morel@entpe.fr

RESUME : *La technique du « bois cordé » pratiquée par des auto constructeurs n'a jusqu'à présent fait l'objet d'aucune étude. Un enseignement de construction de l'école d'architecture de Lyon essaye depuis 3ans de contribuer à l'effort de recherche et développement concernant les technologies alternatives requises par l'approche « développement durable » de la construction. L'expérimentation mise en œuvre aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau et à l'ENTPE autour se présente ainsi comme une recherche inscrite dans un cadre pédagogique et est menée de manière scientifique.*

ABSTRACT : *A construction course of the school of architecture of Lyon has been contributing the past three years to the research and development effort regarding alternative technologies called upon by the sustainable development approach in the building industry. Yet the "cord wood" technique implemented by self sufficient constructors has never been addressed scientifically. The experiments on the subject conducted at the Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau in collaboration with the ENTPE is presented as a research activity embedded in a pedagogical framework and is yielding its first scientific results.*

MOTS CLES

agrégat organique – bois – bois cordé chaux – composite – effet de serre – énergie grise – expérimentation maçonnerie – matériau renouvelable – mécanique – mortier – retrait du bois

KEYWORDS : *composite (material) – cordwood – experimentation – greenhouse effect – grey energy – lime – masonry – mechanics – mortar – organic aggregate – renewable material – shrinkage (of wood) – wood*

Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau regroupent plusieurs établissements d'enseignement supérieur et de recherche. Ils sont une véritable opportunité pour ses membres de croiser différentes approches culturelles et de développer de nouvelles approches de la construction.

Dans ce contexte, pour élargir le champ de préoccupation habituel des élèves architectes vis-à-vis des matériaux et des techniques constructives, L'ENSAL aidée par l'ENTPE, propose depuis trois ans à des étudiants de son cycle master, de participer à une expérimentation sur le bois cordé. Celle-ci se présente comme une véritable recherche inscrite dans un cadre pédagogique.

1. Une réponse temporaire à la question de l'effet de serre

La mise en marche du processus de réchauffement climatique d'une part, l'insuffisance programmée des ressources en énergie fossile d'autre part, n'inquiètent plus seulement les spécialistes de l'environnement. La prise de conscience de ces phénomènes se généralise, mais des comportements plus respectueux de l'environnement, limitant en particulier le rejet massif de gaz carbonique, sont difficiles à acquérir et nécessiteront sans doute le passage d'une ou plusieurs générations. Pour sa croissance, un arbre absorbe le gaz carbonique atmosphérique par photosynthèse et ne le restitue à l'atmosphère que lors de sa combustion ou de sa putréfaction. Toute construction en bois permet ainsi de stocker du carbone sur de longues années et peut s'envisager comme une réponse temporaire à l'augmentation de l'effet de serre. Elle favorise, de plus, l'utilisation d'un matériau naturellement renouvelable.

La tendance industrielle de cette filière privilégie l'utilisation de dérivés du bois incluant de plus en plus de valeur ajoutée mais réduisant du même coup la masse de carbone fixée. A l'inverse, on peut tendre à majorer cette masse tout en simplifiant autant que possible le cycle de transformation du bois et l'énergie grise associée. Des auto-constructeurs canadiens ont ainsi mis au point la technique dite du bois cordé[1]. Elle consiste à édifier des murs à partir de simples bûches de bois de chauffage maçonnées au mortier.

Peu de données techniques existent actuellement sur ce procédé[2]. Il s'agit donc ici de faire le point sur l'état du savoir disponible sur cette technologie balbutiante, de tester les solutions pratiquées et d'élaborer des développements viables pour ce

1 Autrement dit : bois de chauffage vendu à la corde, mesure ancienne valant à peu près 4 stères ou 4 m^3.

2 Peu d'articles ou de références existent sur la question

matériau à fort potentiel environnemental : propriétés physiques, conditions d'application, adaptation des mises en œuvre...

2. Méthodologie

L'expérimentation menée aux Grands ateliers se poursuit à trois échelles complémentaires : le calibrage sur éprouvettes des propriétés intrinsèques des matériaux composants ; l'exploration du potentiel géométrique, mécanique et technologique des assemblages de ces composants sur des fragments d'ouvrages à une taille significative du comportement global ; le test des capacités architectoniques et spatiales du procédé constructif sur des fragments d'édifices de dimensions représentatives au regard de l'habitabilité. Ces trois échelles ont été abordées avec un esprit aussi ouvert que possible et sans s'enfermer dans les recettes actuellement admises pour le bois cordé. Il restera à réaliser, le moment venu, un bâtiment expérimental complet. Ainsi, à l'échelle de l'éprouvette, on a quantifié le comportement de bois d'essences variées, secs ou humides ; de même des mortiers à granulats minéraux ou organiques de diverses compositions. L'échelle intermédiaire a mis en évidence les effets comparés des appareillages de bûches, avec ou sans mortier, du taux d'enrobage par le liant, des phénomènes de ressuyage et de reprise d'eau, des effets de l'écorçage, etc. Quant à la plus grande échelle, elle a été l'occasion de vérifier l'ouvrabilité de divers procédés de mise en œuvre, la validité de système de franchissement linéaires (des arcs) ou surfaciques (des coques), ainsi que d'explorer des dispositifs de compensation des variations dimensionnelles entre gros et second œuvre, sans omettre la tenue aux intempéries dans la durée.

Depuis trois ans, un cadre pluridisciplinaire, tel que celui offert par les Grands ateliers, s'est avéré idéal pour mener de telles expérimentations. La confrontation des cultures et des générations a été exploitée autant pour renouveler les *a priori* de la construction en bois cordé que pour accréditer les données qui la concerne. Concrètement, les problématiques et les protocoles de recherche sont élaborés conjointement par les enseignants-chercheurs de l'ENSAL et de l'ENTPE. Dans le cadre d'un enseignement optionnel de master, les étudiants architectes sont chargés de générer des solutions, le plus souvent non conventionnelles, aux questions ainsi posées et de les mettre en œuvre avec l'aide des techniciens. Le laboratoire *Géomatériaux* de l'ENTPE assure les tests et les mesures nécessaires. Les Grands ateliers mettent à disposition les techniciens, les matériaux, le matériel de fabrication et – dans une certaine mesure - l'espace de stockage et d'observation.

3. Premiers acquis

3.1. La compréhension d'un matériau global

La démarche que nous mettons en œuvre, ne consiste pas à étudier un procédé existant décrit par quelques auto-constructeurs, mais à élaborer de façon moderne un matériau composite adaptés aux critères multiperformanciels (résistance mécanique, propriétés thermiques, économie..) attendus dans une construction contemporaine. Pour cela il nous a paru indispensable de comprendre le comportement individuel de chacun des constituants et de dégager les qualités intrinsèques de chaque matériau constitutif, pour ensuite discriminer les observations faites sur le matériau composite. Par exemple, qu'observe-t-on sur un échantillon de bois cordé soumis à la compression, les propriétés du mortier ou les propriétés du bois lorsque les bûches entrent en contact ? Dès lors, seulement, il sera possible d'associer les différents composant dans une formulation globale adaptée aux performances souhaitées. Pour ce faire, différents types d'éprouvettes ont été imaginés.

3.2. Comportement individuel des constituants

3.2.1. Le bois

3.2.1.1. .Hygrométrie et séchage

Les bûches utilisées sont de cinq essences différentes : l'acacia (ou robinier), cerisier et châtaignier, d'une part, épicéa et hêtre, d'autre part. Les essences de feuillus n'ont pas été sélectionnées de manière intentionnelle, mais résultent d'une hétérogénéité propre aux offres de bois de chauffage disponibles sur la région lyonnaise. L'utilisation pour la réalisation du mortier d'un liant utilisant de l'eau risque de modifier fortement le degré d'humidité du matériau d'origine lors de la mise en œuvre. Pour éviter dans un premier temps les problèmes de retrait, nous avons choisi d'utiliser des bois dont le taux d'humidité est supérieur à 30%. Pour mesurer ce taux, l'emploi d'un humidimètre du commerce est inadapté et nous avons du mesurer l'humidité de chaque essence par dessiccation progressive dans un four. Cet essai est destructif. Pour une bûche située à l'intérieur d'une réalisation Il rend difficile le suivi régulier de ce taux et ne permet pas de suivre l'évolution de l'humidité des bois dans le temps. Parallèlement, des relevés géométriques sont fait sur les ouvrages réalisés pour en contrôler les évolutions géométriques

Les premiers résultats confirment évidemment que le bois sèche très lentement dans la maçonnerie[3]. Cela explique pourquoi les relevés géométriques faits sur les

3 Une bûche de châtaignier après 2 ans de séchage garde un taux d'humidité de 26% dans un bloc maçonné, alors que ce taux est passé à 17% par un séchage à l'air libre

premiers ouvrages n'ont montré aucune évolution entre 2005 et 2008, les bûches étant encore à une hygrométrie proche de 30%, le retrait attendu ne s'est pas produit[4].

3.2.1.2. . Résistance mécanique

Le bois est un matériau anisotrope. Dans ce procédé d'empilage, c'est le comportement transversal du bois qui se manifeste. Les performances mécaniques sont bien sûr liées à l'essence utilisée (la densité est en relation directe avec la résistance transversale). Elles sont fortement influencées par le taux d'humidité du bois. Les valeurs de résistance en compression transversale étant à peu publiées et l'humidité de nos bois étant à l'origine supérieure à 30%, nous avons refait des tests *ad hoc*. Pour chaque essence, trois essais ont été réalisés : un essai de compression axiale, un essai de compression transversale, et un essai de fendage (ou essai brésilien) pour évaluer la résistance en traction transversale d'une bûche entière lors d'un effort de compression perpendiculaire[5].

Figure 1. *Eprouvettes pour essais sur le matériau bois*

	contrainte de rupture compression axiale	contrainte de rupture compression transversale	contrainte de rupture traction transversale
	en Mpa	en Mpa	en Mpa
mini	Epicéa: 45	Epicea: 3,3	Epicea: 1,57
maxi	Cerisier: 59	Acaccia: 11,3	Acaccia: 1,84

4 De manière non prévue, un échantillon a été réalisé avec du tilleul de petite section très sec (inférieur à 30%), et avec un liant de chaux et sable. Le gonflement du bois dû à la reprise d'humidité, s'est traduit entre les deux sessions par un fort gonflement du coffrage et l'éclatement du mortier en partie supérieure.

5 Allegre Paul, Caractérisation mécanique du matériau « bois cordé », TFE juillet 2007

Figure 2. *Valeurs minimales des contraintes de rupture des bois testés*

3.2.2. Le mortier

Le choix de la composition du mortier s'avère déterminant pour conférer au matériau composite final les caractéristiques mécaniques et thermiques attendues, les propriétés du mortier découlant de la nature et du dosage des différents composants : liant, granulat et eau.

Trois types de liant ont été testés : une terre argileuse à fort pourcentage de latérite telle qu'utilisée par le laboratoire CRAterre, la chaux hydraulique NHL 3.5 (EN 459-1) et la chaux aérienne CL 90 S (EN 459-1)

Les mortiers à base de terre ont surtout été utilisés la première année de façon à recycler plus facilement les bûches, tout en évaluant le potentiel et la faisabilité des appareillages de maçonnerie. Ils n'ont pour l'instant pas donné lieu à des tests mécaniques.

Les mortiers à base de chaux aérienne et/ou hydraulique ont donné lieu à des essais mécaniques à l'ENTPE. Pour chaque composition de mortier, des éprouvettes cylindriques standard de section 200 cm² et de hauteur 31cm ont été utilisées. Les mortiers à granulat minéral étant assez bien connus, il convenait de mesurer les propriétés des mortiers à granulat organique. On a choisi de produire une courbe granulométrique en utilisant de la sciure, des copeaux (type litière) et des plaquettes de déchiquetage. On y a associé le chanvre et on a également testé, en plus, l'aptitude d'un granulat minéral léger – la bille d'argile expansée – à s'associer au mélange.

L'utilisation de chaux aérienne, nécessitant une cure longue pour la prise du mortier a été rapidement reléguée, car notre organisation en semaines bloquées et le contexte particulier du fonctionnement des Grands Ateliers rendait son utilisation peu commode.

mortier	chaux	eau	granulats
30bis	1 NHL	0,75	2 sable
31bisA	1 NHL	1	0,75 sciure -1 copeaux
31 ter	1 NHL	1	1,5 sciure
34 A	1 NHL	1	1 sciure -1copeaux-1billes argile
35 A	1,5 NHL	1,25	0,75 sciure -1 copeaux
37	2 CA	2	1,5 sciure -2 chanvre

Figure 3. *Composition en volume des mortiers*

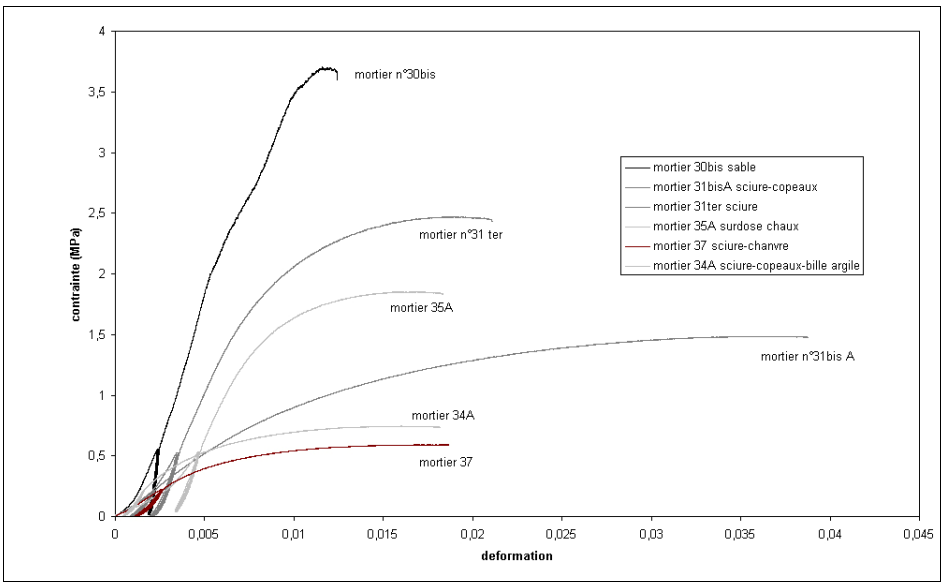

Figure 4.*Essais de compression simple des mortiers*

Les cycles charges décharge effectués lors des essais montrent clairement le caractère plastique de ces mortiers.

Le mortier à granulat minéral, très raide, donne les meilleures performances de rupture. A l'inverse le mortier à base de sciure et de chanvre a une faible contrainte de rupture, mais une très grande déformabilité. Ce sont les granulats les plus fins (sciure ou sable) qui permettent d'avoir les plus hautes caractéristique de résistance et de raideur. Par contre l'incorporation soit de copeaux, soit de billes d'argile permet d'obtenir un mortier souple mais aux performances de rupture limitées. L'augmentation du dosage en chaux améliore évidemment les performances.

3.2.3. Le composite bois cordé

La taille des échantillons a fortement évolué au cours de ces trois années. Nous avions besoin, pour vérifier les conditions d'un volume élémentaire représentatif, d'un nombre suffisant d'hétérogénéités sans réduire la taille des bûches normalement utilisables sur un chantier. Le rapport hauteur largeur de l'échantillon, pouvant introduire des phénomènes de frettage, devait être fixé avec attention. Enfin il fallait prendre en compte les capacités du matériel d'essai disponible à l'ENTPE.

Chaque éprouvette est constituée par un empilage de trois blocs préfabriqués (60x30x40) assemblés sur banc d'essai par un mortier n° 30bis permettant d'obtenir

finalement une hauteur de 1m20. Deux éprouvettes ont été testées l'une (n°1) constituée de résineux liés par un mortier de type n° 30 bis, et l'autre (n°2) de feuillus liés par un mortier n° 31bis.

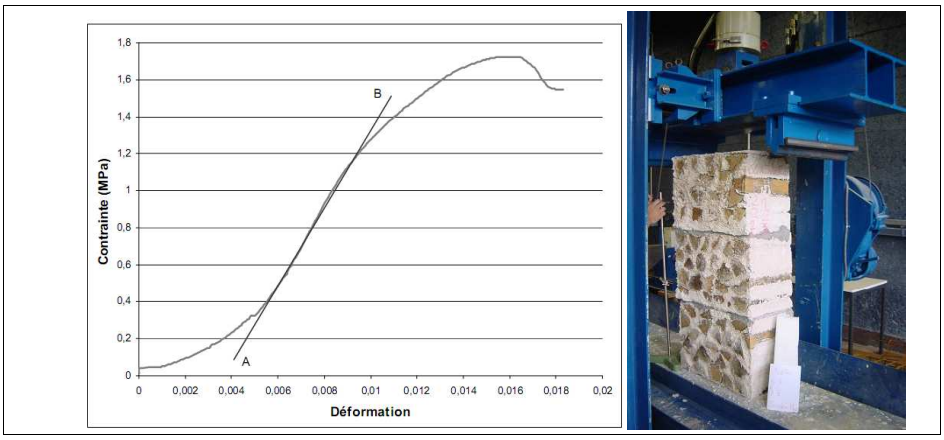

Figure 5. *Essai de compression d'un échantillon de bois cordé*

On constate que si ce type de bois cordé ne peut pas prétendre présenter des caractéristiques comparables à celles des matériaux courants mécaniquement performants, il peut cependant être considéré comme un matériau à résistance acceptable. Les contraintes de rupture relevées 0,9 MPa (n°1) et 1,7 MPa (n°2) laissent envisager - vu la largeur de ces maçonneries (de 0m40 à 0m50) - des possibilités de descente de charge tout à fait compatibles avec celles des constructions individuelles jusqu'à R+1. Le pisé de terre, par exemple, n'atteint généralement pas ces valeurs (0,1 à 0,3 Mpa).

Sur l'ensemble des blocs, on a pu observer le manque d'adhérence du liant aux bûches qui provoque des décollements du parement ou des fissurations latérales avec l'éjection des bûches externes. La rupture se produit avant d'atteindre la contrainte de rupture spécifique du mortier utilisé, mettant en évidence la faible cohésion de notre composite.

Le choix de la faible énergie grise mise en œuvre ne laisse pas envisager beaucoup de solution pour améliorer cette adhérence à l'échelle du matériau. C'est à une échelle supérieure à partir d'une réflexion sur l'appareillage des bûches entre elles que les progrès les plus importants sont à attendre. Il est en effet tout à fait envisageable en privilégiant des joints épais d'organiser la matrice de mortier pour lui donner à l'échelle macroscopique une géométrie qui la rende structurante. C'est

la réflexion qui a guidé la mise en œuvre dans notre expérimentation à l'échelle de petits ouvrages.

3.3. Ouvrages expérimentaux réalisés

Une fois cernées les propriétés des matériaux, il s'agissait de mieux comprendre le comportement de la maçonnerie de bois et ce qui la distingue de celle de brique. En premier lieu les possibilités d'appareillage. La pratique consacrée n'utilise que la pose des bûches en parpaing, noyées dans un bain de mortier à plein lit ou en cordon le long des parements. On a mis en évidence les divers gains de cohésion et de résistance apportés par des appareillages croisés droits ou biais (ce dernier pouvant s'accommoder d'irrégularités de coupe des bûches). On a montré également qu'une mise ne œuvre par banchage donnait de bons résultats. Tous ces aménagements contribuent à envisager la réalisation de parois structurelles.

Figure 6. *Recherche d'appareillage à sec et réalisation d'un mur banché*

Même s'il est loisible d'intégrer des pièces de charpente - tels que linteaux et poutres - dans un ouvrage en bois cordé pour assurer les franchissements, on a vérifié qu'à l'instar d'autres maçonneries le simple assemblage de bûches permet la réalisation d'arcs, voire de voûtes. Le couvrement de baies s'effectue efficacement avec des arcs surbaissés diversement appareillés (on n'a pas réussi à réaliser des plates-bandes performantes).

Figure 7. *Essai de résistance d'un arc clavé*

On a réalisé, par ailleurs, des voûtes sur cintre surbaissées à l'aide d'une seule ou de deux couches de bûches assemblées à claire-voie, à bâtons rompus ou en biais d'une portée de 2 m, hourdées au mortier de sable et ciment. L'augmentation de cohésion apportée par un simple lardage de pointes a procuré aux ouvrages une résistance de type coque, n'imposant qu'une faible poussée sur les appuis, ce qui démontre encore les capacités structurelles du matériau.

Figure 8. *Voûte appareillée à bâtons rompus*

Enfin, une question cruciale réside dans la grande rétractabilité radiale des bois en cours de séchage. On peut estimer que la perte de hauteur d'un mur peut être de l'ordre de 10 cm sur un étage, ce qui pose d'épineux problèmes de liaison avec les baies ou les doublages rigides. Deux dispositifs de pose de baies avec coulisseaux ont été réalisés et sont actuellement en observation en extérieur, l'un en tableau, l'autre en application.

Figure 9. *Prototype pour test de compatibilité des retraits entre baies et mur*

4. Conclusions provisoires

4.1. Premiers enseignements de cette recherche

L'expérimentation, par sa nature, a dépassé le cadre propre de l'enseignement pour se positionner dans celui de la recherche-développement. L'expérience, malgré ses nombreuses faiblesses, paraît concluante. Les protocoles abordés s'ouvrent sur des perspectives de développement de nouvelles questions. Trois ans d'expérimentation nous ont aussi montré la pertinence de certaines de nos hypothèses.

— Le peu d'outillage et le faible niveau technique indispensable à la mise en œuvre de ce procédé : deux machines seulement ont été utilisées, une scie à ruban pour la mise en longueur des bûches et une malaxeur pour le gâchage du mortier. Tous les étudiants ayant participé aux sessions ont pu mener avec succès la réalisation d'un ouvrage sans connaissance technique initiale.

— L'utilisation d'un matériau brut sans transformation préalable : hors une mise à longueur et un fendage éventuel pour favoriser une mise en œuvre en lits réguliers, aucun usinage spécifique n'a été nécessaire.

— Les premières mesures sérieuses en laboratoire effectuées soit par l'intermédiaire d'un travail de fin d'étude[6], soit par la campagne d'essais de novembre 2007, ont confirmé que le bois cordé pouvait bien être un matériau structurel. La résistance moyenne à la compression obtenue (> 1,3 MPa) et la largeur des murs mis en œuvre (0m40) permet d'envisager des descentes de charges soit réparties soit ponctuelles tout à fait satisfaisantes pour une construction R +1, domaine de la construction individuelle.

— Ces premiers essais ont également montré l'apport indéniable de l'appareillage pour améliorer le comportement mécanique. L'utilisation de harpage d'angle était déjà connue, mais sa généralisation dans la partie courante jusque-là inexploitée. L'utilisation des techniques de banchage pourrait aussi exploiter le croisement des bûches à 30°.

— Le rôle majeur du mortier a été vérifié à plusieurs reprises soit lors d'essais mécaniques, soit lors d'observation du séchage de certains échantillons. L'incorporation de granulat d'origine organique lui conférant une certaine souplesse semble à privilégier.

Des difficultés sont également apparues et doivent être prises en compte dans notre réflexion :

— Nous privilégions une filière humide, à l'opposé de tout ce qui se développe actuellement dans la filière bâtiment. L'importante quantité d'eau, due à l'utilisation du bois vert et l'emploi d'un mortier gâché à l'eau, n'est évacuée que lentement. Nous n'avons pas pu évaluer les effets de l'humidité, soit en terme de ressenti, soit par croissance d'organisme parasites, dans les premiers ouvrages réalisés, du fait de leur taille modeste et de l'absence de confinement.

— La disposition transversale du bois dans les empilages peut favoriser de fortes variations dimensionnelles lors du séchage, mais aussi d'une saison à l'autre. Ces problèmes de retrait et de gonflement du bois réclament des dispositifs adaptatifs lors de l'incorporation d'éléments fixés à la maçonnerie. Des dispositifs s'inspirant de ceux utilisés dans la construction en fuste peuvent être mise en œuvre ; mais bien d'autres peuvent être mis au point.

6 ALLEGRE Paul, Caractérisation mécanique du matériau « bois cordé » TFE ENTPE Juillet 2007

4.2. Questions pendantes

Les travaux conduits à ce jour ont porté essentiellement sur les propriétés mécaniques du procédé. Mais bien des questions ont été effleurées ou différées. Au premier chef, il conviendra de quantifier le comportement thermique de ce genre de mur. Les données disponibles sont plutôt encourageantes en terme de conductivité aussi bien que d'inertie[7]. Encore faudrait-il mener une campagne de mesure selon un protocole établi. Les migrations d'humidité et la perméabilité à l'air semblent devoir être observées particulièrement et leur contrôle peut entraîner la préconisation de doublages. D'ailleurs, en tout état de cause, la question de la finition des parois se pose. Les effets plastiques obtenus par divers appareillages ne sont sans doute pas à négliger, au moins en extérieur, mais les défauts de planéité seront toujours moins admissibles à l'intérieur. Les divers mortiers expérimentés pour le hourdage n'ont pas une adhésivité suffisante pour être appliqués en enduit ; il faut donc élargir la recherche ou systématiser l'adjonction de doublage.

La durabilité de parois en bois cordé fait débat. En extérieur, la durée de conservation du bois de bout est réputée faible, alors qu'elle peut être très longue en intérieur. Les mouvements hydriques au sein de la paroi doivent donc être analysés, tout comme des procédés d'hydrofugation non polluants. Autre défaut du bois : sa réaction au feu. Bien qu'il s'agisse de bois « de chauffage », il semble que des bûches massives complètement enrobées soient finalement peu combustibles et difficilement inflammables. Mais on ne sait rien du comportement des mortiers organiques que nous avons utilisés. Tout cela est à vérifier.

Enfin, il conviendra d'élargir la recherche sur le champ d'application de ce procédé et de ses variantes. Actuellement cantonné à une fonction de clôture intérieure ou de remplissage d'ossature, il pourrait, comme on l'a montré, assumer des fonctions de descente des charges. Mais des essais concluants de franchissement courbes ont été faits et d'autres applications « non canoniques » restent envisageables.

5. Bibliographie

Allegre P., *Caractérisation mécanique du matériau « bois cordé »*, TFE ENTPE Juillet 2007

Francoeur J., *Le bois cordé, une solution à l'auto-construction,* ekopedia.fr

Oliva J.P, *L'isolation écologique*, éditions Terre vivante, Juin 2001

Tanguay F., *Petit guide de l'auto-construction*, Editions de Mortagne, 1983

---

[7] La résistance thermique des la paroi est donnée à 1,62 m^2.°C/W, selon J-P Oliva, L'isolation écologique, 2002