

Introduction au matériau bois dans la construction

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Hélène HORSIN MOLINARO - Jade LÉPINE - Xavier JOURDAIN

Édité le
14/02/2022

école —————
normale —————
supérieure —————
paris—saclay —————

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Jade Lépine, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

Le bois est un matériau utilisé de longue date, son étude continue tellement ses formes sont diverses. Qu'est-ce que le bois ? La forme première du bois est l'arbre, un être vivant, chaque morceau de bois, au même titre que l'arbre dont il est issu, est donc unique. Les usages du bois sont très variés : production d'énergie, chauffage, ameublement, construction de bateau ou de bâtiment, d'une manière générale le bois permet à l'humain d'exprimer sa créativité.



Figure 1 : Construction CLT (Cross Laminated Timber ou bois lamellé-croisé),
source Christophe Launeau Architecte

Cette ressource, après un retour sur l'utilisation du bois dans les constructions au cours des siècles, présente la filière construction bois en France et son impact environnemental puis introduit la construction en CLT, bois lamellé-croisé.

1 – Petit retour historique

1.1 - Les constructions préhistoriques

Très tôt dans l'histoire de l'humanité, le bois a été utilisé pour la construction en tant que matériau premier. Les premiers habitats sont construits au paléolithique¹ ; comme le montre les figures 2, 3 et 4, ce sont des huttes ou des tentes constituées de bois et recouvertes de branchages, végétaux ou peaux permettant d'être abrité des intempéries et de la faune [1].

¹ Le paléolithique commence avec l'apparition des premiers outils (-3,3 millions d'années) et s'achève avec la fin de la première glaciation (≈ 10000 ans av. J.-C.). Les humains de cette époque sont majoritairement nomades et vivent de la chasse et de la cueillette.



Figure 2 : Reconstitution d'une hutte paléolithique de Terra Amata (site des Alpes-Maritimes daté d'environ 380 000 av. J.-C., source [2])



Figure 3 : Dessin d'une tente, résultat de fouilles en Seine-et-Marne (10 000 ans av. J.-C.), source [3]



Figure 4 : Reconstitution d'une hutte en bois, os, roseaux et peaux en Irlande (7 000 ans av. J.-C.), source [4]

Au néolithique², le début de l'agriculture et de l'élevage entraîne la sédentarisation des peuples. Progressivement, la construction de l'habitat s'adapte pour devenir plus durable, le système poteaux-poutres est inventé. L'ossature de ce qui devient une maison est faite avec des poutres en bois enfoncées dans le sol, cet encastrement permet d'obtenir une plus grande stabilité que de simples appuis. Le toit peut être en chaume ou en branchage et les parois sont faits en terre, torchis (boue et paille), pierres ou branchages.



Figure 5 : Reconstitution d'un habitat du début du néolithique en Allemagne, source [5]



Figure 6 : Reconstitution d'un habitat des premiers agriculteurs en Irlande (4 000 ans av. J.-C.), source [6]

² Le néolithique commence au IX^e siècle av J.-C. au Proche-Orient, atteint la Grèce au VII^e siècle av J.-C., et s'achève avec la diffusion de la métallurgie du bronze (3 000 av J.-C.). Il est marqué par des mutations techniques (outillage en pierre polie, poterie, tissage, habitat) et sociales (groupes humains sédentaires).



Figure 7 : Restes d'une maison du site de Skara Brae en Écosse (3 000 av. J.-C.), source [7]



Figure 8 : Reconstitution maison sur pilotis (3 000 av. J.-C.) au lac de Chalain (Jura) d'après un site de la lagune de Cotonou au Bénin, source [8]

1.2 - Les constructions de l'Antiquité³

Les traces laissées par les poteaux dans le sol permettent d'extrapoler les constructions. Figure 9 se trouvent les traces laissées par une maison gauloise de grande taille (20 m par 12,5 m) dans l'Oise datée du III^e et II^e siècle avant J.-C. et figure 10 une reconstitution de maison du I^{er} siècle avant J.-C.



Figure 9 : Site de fouilles d'une maison gauloise dans l'Oise (III^e et II^e siècle av. J.-C.), source [9]



Figure 10 : Reconstitution d'une maison gauloise, avec grenier sur pilotis (50 av. J.-C.), source [10]

Dans son traité d'architecture *De architectura*, Vitruve⁴ décrit des habitations constituées de rondins de bois empilés horizontalement pour réaliser les murs, les lacunes pouvant être comblées avec des copeaux et de la boue [11]. On trouve de premières traces de maison en rondins vers 2 500 avant J.-C. en Finlande [12], ce type d'habitation est resté traditionnel dans le nord de l'Europe (figure 11). Le principe de construction du néolithique avec ossature bois et murs en torchis évolue progressivement en se perfectionnant notamment sur la stabilité de la structure et la complexité des formes architecturales. La technique de construction de mur à pan de bois (ou à colombages) est appelée l'*opus craticium* à l'époque romaine (figure 12).

³ L'antiquité commence avec l'invention de l'écriture (environ 3 300 av. J.-C.) et se termine à la chute de l'Empire Romain d'Occident en 476.

⁴ Marcus Vitruvius Pollio, dit Vitruve, architecte romain (90 av. J.-C. - 20 av. J.-C.)



Figure 11 : Grenier en rondins empilés, construit au Moyen-Âge (1193) en Norvège, source [13]

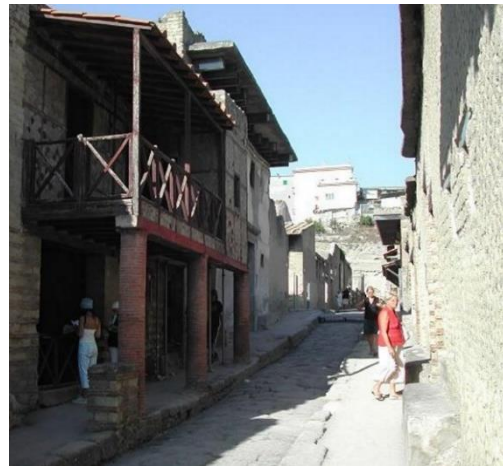


Figure 12 : Maison en opus craticum à Herculaneum (ville détruite par l'éruption du Vésuve en l'an 79), source [14]

1.3 - Les constructions du Moyen-Âge⁵ et de la Renaissance⁶

Les maisons à colombages de l'époque médiévale (figure 13) sont les directes descendantes de la technique *opus craticum*. Elles sont composées de poutres pour l'armature et de hourdage pour remplir les murs. Les charpentes visibles de ces maisons permettent de mettre la structure en lumière. Les murs à pan de bois sont composés de sablières⁷ hautes et basses, de poteaux de décharges⁸ et de tournisses⁹. Nombre de ces maisons dans toute la France et en Europe sont encore habitées actuellement.



Figure 13 : Maison d'Adam et Ève (1491) à Angers, Maine-et-Loire, source [15]



Figure 14 : Maison d'Albrecht Dürer (1420) à Nuremberg, Allemagne, source [16]

⁵ Le Moyen-Âge commence à la suite de la chute de l'Empire Romain d'Occident (V^e siècle) et se termine par la Renaissance à la fin de la guerre de Cent ans (1453)

⁶ La renaissance est la période de transition entre le Moyen-Âge et l'époque moderne (XVI^e siècle)

⁷ Sablières : poutres horizontales appuyée sur les murs qui délimitent les étages et reprend les charges des plancher et des charges verticales transmises par les poteaux de décharge

⁸ Poteaux de décharge : poteaux obliques transmettant les charges verticales

⁹ Tournisses : poteaux verticaux reliant sablières aux décharges



Figure 15 : Rue des trois églises à Riquewihr (XV^e), Alsace, source [17]



Figure 16 : Maison natale de Shakespeare (XVI^e) à Stratford-upon-Avon, Angleterre, source [18]

L'histoire de la construction bois est très complexe et propre à chaque pays, il n'est donc pas aisé d'en faire un panorama simple et exhaustif. Rien qu'en France il est possible de distinguer différentes architectures bois en fonction des régions. Prenons également l'exemple de l'empire chinois, celui-ci est doté d'une architecture très différente de l'architecture européenne et nous pourrions longuement étudier les méthodes de construction des pagodes qui sont aussi très riches ; le paragraphe 2 de la ressource « *Constructions parasismiques : quelques solutions traditionnelles* » [19] s'intéresse aux *dougongs*, supports en bois réalisés par emboîtement servant à fixer les structures bois des toits sur les piliers.

Au cours des siècles, les religions tiennent une place centrale dans les sociétés. Ainsi, l'étude des lieux de culte s'avère un biais intéressant pour comprendre les grandes avancées architecturales. En Norvège, les Vikings, pour pratiquer leur nouvelle religion, s'inspirant des techniques de l'ouest et du sud de l'Europe, construisent des églises impressionnantes exclusivement en bois nommées *stavkirke* ou « églises en bois debout » (figures 17 et 18). La plupart de ces églises ont été construites au XII^e siècle dans différentes zones d'Europe, cependant les 28 ouvrages encore debout sont tous implantés en Norvège. La singularité de ces églises tient à leur structure : la charpente est appuyée par des poteaux reposant sur des fondations en bois, les bas-côtés sont composés d'une structure primaire (poteaux d'angle) et remplis en planches verticales [20] [21].

Les deux églises d'Urnes (figure 17) et de Heddal (figure 18) sont respectivement la plus ancienne église (inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO) et la plus grande église sauvegardées. Ces monuments témoignent de la résistance des monuments en bois au fil du temps et des intempéries. En effet, ces deux églises ont plus de 700 ans. On peut noter l'envergure, pour un ouvrage en bois, de l'église de Heddal.



Figure 17 : Stavkirke d'Urnes (XII^e siècle), Norvège, source [20]



Figure 18 : Stavkirke de Heddal (XIII^e siècle), Norvège, source [21]

En 1550, l'architecte français Philibert de L'orme invente la charpente à bois court qui consiste à claveter des planches courtes les unes avec les autres afin d'obtenir des voutes à taille modulable (figure 19). Il s'inspire pour mettre au point cette technique des modèles d'arcs en pierre et des charpentes de bateau. Cette technique permet de pallier les pénuries de longues pièces de bois et de franchir des portées très importantes. Ce procédé aboutira ensuite à l'invention du bois lamellé-collé qui a révolutionné la construction bois.

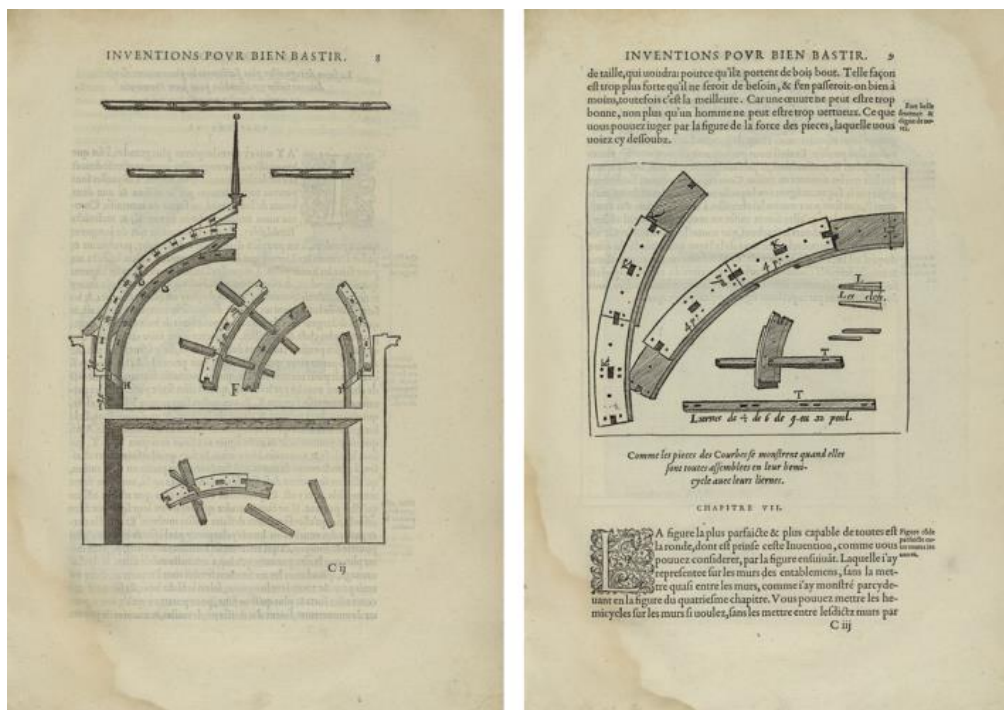


Figure 19 : Extraits du traité Philibert de L'orme « Les Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz » datant de 1561, premier traité d'architecture rédigé en français, source [22]

1.4 - La construction depuis la révolution industrielle¹⁰

Jusqu'au XIX^e siècle, le matériau bois était courant dans les constructions. Le début de l'ère industrielle marque l'utilisation du bois pour produire de l'énergie en grande quantité. Les guerres

¹⁰ La révolution industrielle est le début du basculement de la société agraire et artisanale vers une société industrielle et commerciale. Elle est datée de la fin XVII^e ou du début XIX^e selon les pays.

de 1870-71 puis 1914-18 ont vu une utilisation massive du bois pour les ouvrages de soutènement ainsi qu'une destruction importante des ressources par l'évolution des armes. Les reconstructions seront donc majoritairement faites en parpaings ou brique. Depuis le début du XIXe siècle, le développement de la production de l'acier modifie les techniques de constructions limitées jusqu'à aux matériaux travaillant en compression comme la brique ou la pierre, ou pouvant être mis en forme puis installé sans procédé trop énergivore comme le bois.

Cependant, en 1906, le maître charpentier allemand Otto Hetzer¹¹ dépose un brevet pour l'assemblage de lames de bois avec de la colle à la caséine¹² afin de réaliser des arcs cintrés et bouleverse ainsi la conception de l'architecture en bois. L'intérêt de ce procédé est la fabrication de pièces de grandes dimensions et l'amélioration des propriétés mécaniques du bois, en effet le lamellé-collé résiste à des charges bien plus importantes que le bois massif notamment en traction et en compression. Cette amélioration vient du fait que les défauts du bois peuvent être triés et les différentes essences de bois sont positionnées en fonction de leurs propriétés [23].



Figure 20 : Exemple de poutre actuelle en lamellé-collé, source lesmatériaux.fr

La diffusion de la technique du bois lamellé-collé est accélérée grâce aux expositions universelles. Dès 1910, à l'exposition universelle de Bruxelles, Hetzer construit les hangars des dirigeables Zeppelin d'une portée de 43 mètres. En 1931, lors de l'Exposition coloniale internationale de Paris, la Belgique construit des pavillons avec une charpente en lamellé-collé dont la surface couvre près de 10 000 m². Citons encore l'Exposition universelle de Bruxelles, en 1958 où l'on observe de nombreux pavillons entièrement en bois qui permettent de donner de la visibilité à la construction bois et donc d'en faire sa promotion internationalement. La figure 21 montre un de ces pavillons particulièrement remarquable avec une demi-coupole de 1390 m² [24].



Figure 21 : Photo d'un des pavillons de l'Exposition universelle de Bruxelles en 1958 avec sa demi-coupole de 1390 m² en lamellé-collé, © Guide Officiel Exposition Universelle de Bruxelles 1958, source [24]

¹¹ Karl Friedrich Otto Hetzer (1846-1911)

¹² Colle fabriquée à base de lait

Les machines numériques permettent désormais d'automatiser le processus de fabrication pour des réalisations en grande quantité d'éléments de grande portée et surtout avec une fiabilité mécanique sans précédent. La charpente du gymnase à Roissy-en-Brie (figure 22) n'est qu'un exemple parmi les nombreuses constructions existantes qui démontre les capacités du lamellé-collé en portée comme en formes complexes.



Figure 22 : Charpente en lamellé-collé du gymnase à Roissy-en-Brie, source [25]

2 – Approche environnementale de la construction bois aujourd'hui

Le secteur du bâtiment et de la construction est aujourd'hui confronté aux grands défis environnementaux. Le secteur du bâtiment consomme 36% de l'énergie finale mondiale et émet 39% des gaz à effet de serre liés à l'énergie dans le monde. Une étude parue dans la revue *Annual Review of Environment and Resources* en 2020 [26] estime que le carbone incorporé dans les matériaux de construction pourrait consommer jusqu'à la moitié du budget carbone restant à $1,5^{\circ}\text{C}^{13}$ [27]. La neutralité carbone du secteur du bâtiment est un levier sur lequel agir afin d'atteindre les objectifs climatiques. Diminuer les besoins en énergie aussi bien à la construction que lors de la vie du bâtiment, et stocker le carbone dans les matériaux de construction sont deux angles d'amélioration.

La neutralité carbone du bâtiment à l'horizon 2050 entraîne une réduction des émissions des gaz à effet de serre qui correspond à une réduction par 6 des émissions par rapport à l'année 1990. Actuellement en France, l'empreinte carbone¹⁴ par habitant est de l'ordre de 11,5 tonnes/an équivalent CO_2^{15} (figure 23). Pour cadrer avec la Stratégie Nationale Bas carbone (SNBC), l'empreinte carbone devrait à l'horizon 2050 être ramenée à 2 tonnes/an/habitant équivalent CO_2 [28].

Ainsi depuis le 1^{er} janvier 2021, les demandes de permis de construire déposées en France pour les logements neufs devront satisfaire à un plafond maximal d'émissions de gaz à effet de serre par mètre carré, en incluant à la fois la phase de construction et celle d'utilisation sur une durée conventionnelle de 50 ans. Actuellement, le total de la construction seule dépasse $700 \text{ kg éqCO}_2/\text{m}^2$

¹³ Le budget carbone, ou encore quota d'émissions, représente la limite supérieure d'émissions de CO_2 qui permettrait de rester en dessous d'une augmentation de température moyenne mondiale, ici $1,5^{\circ}\text{C}$.

¹⁴ L'empreinte carbone est différente des émissions nationales, celles-ci prennent en compte toutes les émissions de GES générées sur le territoire français. L'empreinte carbone correspond aux émissions nationales corrigées des émissions induites hors du territoire par des produits importés et des émissions territoriales associées à des produits exportés. Le tout est ramené au nombre d'habitants.

¹⁵ . Chaque gaz dit à effet de serre (CO_2 , H_2O , CH_4 , N_2O , ...) est caractérisé par un pouvoir de réchauffement global (ou PRG). Le PRG est calculé sur un siècle et pour une quantité donnée du gaz, il est exprimé en valeur relative par rapport au CO_2 .

pour les logements (un peu plus en collectif qu'en individuel). Le total des émissions de GES admissible, de la construction à l'utilisation du bâtiment incluse, doit descendre par paliers au fil des années. En 2030, il ne faudrait pas dépasser environ 400 kg eqCO_2/m^2 pour les maisons et environ 500 kg eqCO_2/m^2 pour le logement collectif pour obtenir le droit de construire. Cette inflexion très forte imprimée au secteur du bâtiment va entraîner des modifications des techniques constructives [46].

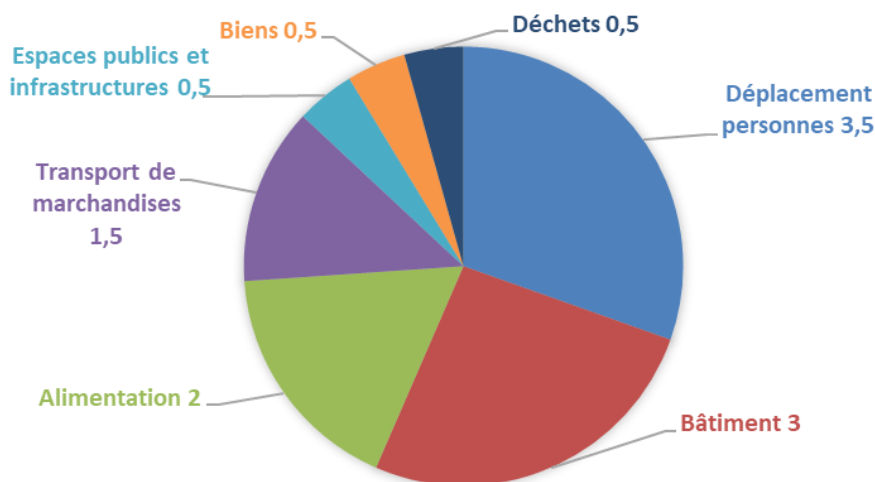


Figure 23 : Empreinte carbone par habitant et par an en tonnes équivalent CO_2 , source BBKA [29]

L'impact carbone d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie (construction - exploitation- fin de vie) se joue principalement à sa construction. Les émissions de GES sont principalement dues aux produits de construction et aux équipements, en particulier par l'extraction des matières premières, de leur transport et de leur production.

Superstructure et maçonnerie	28%
Fondations et infrastructures	16%
Façades et menuiseries extérieures	13%
Chauffage, ventilation, refroidissement, eau chaude sanitaire	10%
Revêtements des sols, murs et plafonds	9%
Réseaux d'énergie (courant fort)	8%
Voirie, réseaux divers et aménagements extérieurs de la parcelle	5%
Cloisonnements, doublage, menuiseries intérieurs	4%
Couverture, étanchéité, charpente	2%
Installation sanitaire	1%
Réseaux de communication (courant faible)	1%
....	

Tableau 1 : Part de l'empreinte carbone par lot de construction neuve, source BBKA [29]

L'objectif de cette approche est de comprendre la place que le matériau bois peut prendre en France pour limiter la crise climatique. Le facteur que nous étudierons spécifiquement est celui des émissions CO_2 .

2.1 - État de la filière construction bois en France

En France métropolitaine, la superficie forestière est en croissance depuis la deuxième moitié du XIX^e siècle : en 1840, elle occupait 8,9 millions d'hectares, en 2018, c'était 16,8 millions d'hectares. 31 % du territoire métropolitain est couvert de forêt (contre environ 26 % en 1990),

c'est l'occupation du sol la plus importante après l'agriculture. Le bois récolté chaque année représente seulement 60 % de l'accroissement de la forêt [30].

En 2019, 17 millions d'hectares de forêt occupent la France métropolitaine auxquels on ajoute les 8 millions d'hectares des Départements d'Outre-Mer. Cela a représenté 39 millions de mètres cube de bois récoltés pour être commercialisés [31].

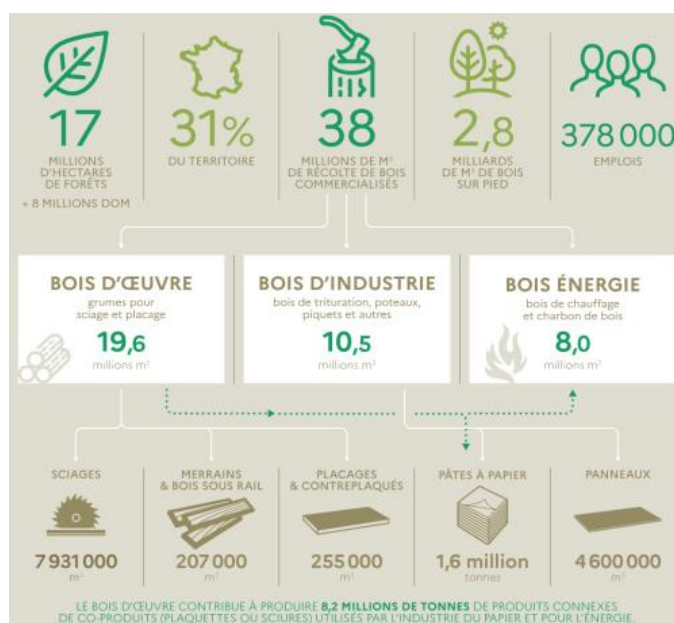


Figure 24 : Quelques chiffres de la filière forêt-bois en 2019, source [31]

En 2018, la filière bois-forêt représentait 1,1% du PIB de la France, elle portait 392 700 emplois indirects et 62 000 emplois directs ce qui représentait 1,4% de la population active et 12,4% des emplois industriels français [32]. Des nombreux débouchés en produits finis de la filière bois-forêt, intéressons-nous à la filière construction bois qui est définie dans l'Enquête nationale de la construction bois, CODIFAB 2019 par [33] :

La construction bois désigne toutes les techniques constructives à base de bois permettant de réaliser un bâtiment neuf (résidentiel et non résidentiel) : celles-ci sont l'ossature bois, le système poteau-poutre, les panneaux massifs contrecollés ou contrecloués, le colombage traditionnel et le bois massif empilé.

En 2018, les entreprises de la construction bois représentaient 3% du chiffre d'affaire national Bâtiment et 2,6% des effectifs salariés du Bâtiment France. La construction bois de logements collectifs avait progressé de 19,4%, l'activité d'extensions-surélévation en bois de 9,1% et la construction de maisons individuelles bois de 20%. Selon les régions de France l'activité dédiée à la construction bois n'a pas le même dynamisme. Ce sont par exemple le Grand-Est et Auvergne-Rhône-Alpes qui comprennent le plus d'entreprises du secteur, et la Bourgogne-Franche-Comté qui présente une part de 63% de la construction bois dans le chiffre d'affaire total de la région (figure 25) [33]. La figure 26 permet de constater qu'il n'y pas réellement de corrélation entre le boisement des départements et le chiffre d'affaire des constructions bois. Notons que le taux moyen de boisement de la France métropolitaine de 31% cache des différences importantes entre les départements : Calvados, Deux-Sèvres, Loire-Atlantique, Manche, Mayenne, Nord, Pas-de-Calais et Vendée présentent moins de 10% de surface boisée alors que Alpes-de-Haute-Provence, Alpes-Maritimes, Corse du sud, Landes et Var ont des taux de boisement supérieur à 60% [34].

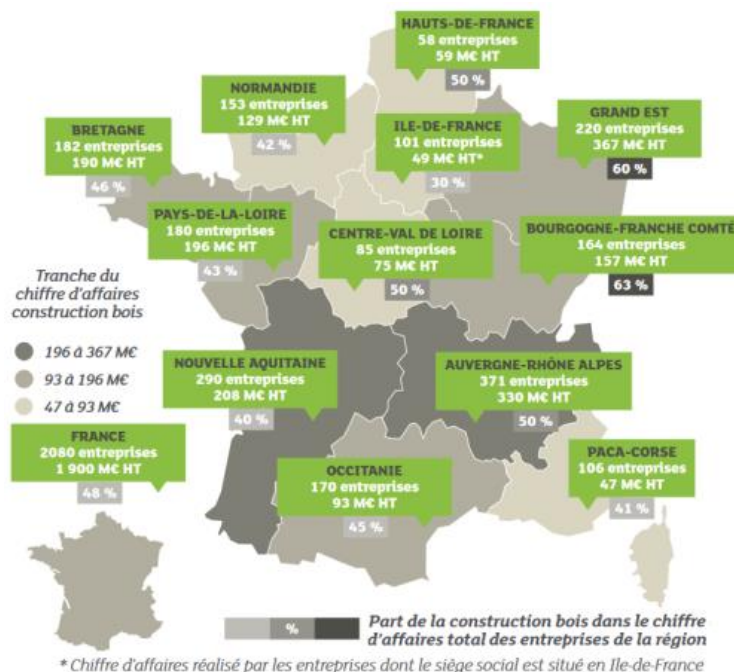


Figure 25 : L'activité construction bois par région en 2018, source [33]

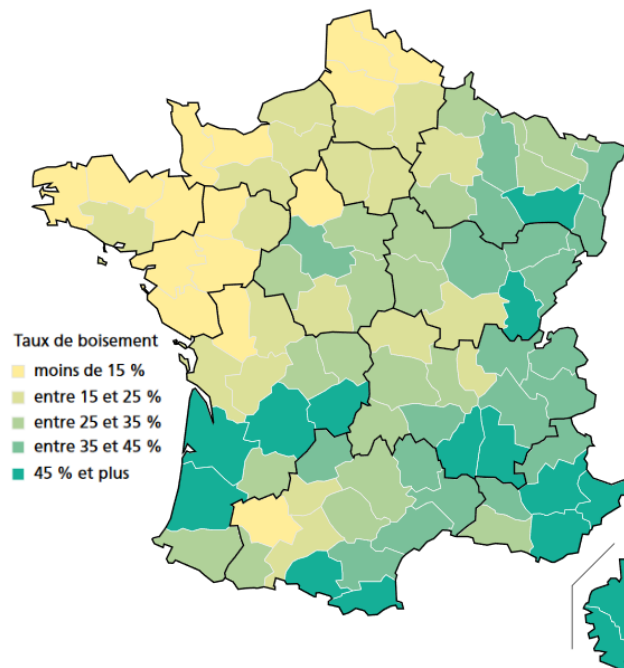


Figure 26 : Taux de boisement des départements métropolitains en 2018, source [34]

2.2 - Avantages environnementaux du matériau bois dans la construction

Le bois est un matériau très singulier, il comporte donc dans la construction des propriétés très différentes des autres matériaux classiques (acier, béton) qui lui permette de se démarquer sous plusieurs aspects. Nous allons ici nous intéresser particulièrement à son impact environnemental cependant il est possible de lister ses principaux avantages en construction : bonnes performances thermiques, acoustiques et sismiques, facilité et rapidité de mise en œuvre sur les chantiers, créativité architecturale...

De plus, le comportement du bois est bien connu au cours d'un incendie : le charbon qui se crée à la périphérie du bois constitue une isolation naturelle, il ne dégage pas non plus de gaz toxique et la durée de conservation de ses propriétés est ainsi contrôlée permettant l'évacuation d'un bâtiment par exemple. Les pompiers repèrent l'avancée d'un incendie grâce au craquement du bois, qui est un indicateur précieux. En revanche, le bois n'est pas un matériau 100% recyclable mais son taux de recyclage et de valorisation énergétique atteignait 75% en 2015 [35]. En effet, le bois après avoir été bâtiment, peut être recyclé en palette ou en pâte à papier, puis peut être transformé en granulés ou plaquettes et utilisé en vue de produire de l'énergie (il relâche alors le CO₂, mais évite de prélever des matières premières énergétiques fossiles).

Les forêts, et notamment les sols forestiers, constituent, après les océans, le deuxième plus grand puits de carbone de la planète. Les forêts absorbent et stockent du CO₂, participant activement à la réduction des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère. Les arbres utilisés en construction continuent de stocker le CO₂ le temps de la vie du bâtiment. En effet, le CO₂ stocké dans le bois des arbres n'est rejeté que lorsque le bois se décompose ou lorsqu'il est brûlé. Ainsi le CO₂ stocké dans le bois pour la construction n'est, à moyenne échelle de temps, pas redistribué. Sur le cycle de vie d'un bois de construction, dans un premier temps l'arbre a un rôle de séquestration du CO₂ par le mécanisme de la photosynthèse, puis un rôle de stockage lors de l'exploitation des arbres pour la construction, et enfin un rôle de substitution si son recyclage se transforme en énergie en évitant le recours aux énergies fossiles [36].

La filière construction bois a également l'avantage d'être une filière dite sèche : la chaîne de transformation et de valorisation du bois dans la construction ne nécessite pas une grande consommation d'eau (contrairement l'industrie papetière également à base de bois [33]). De plus, les forêts ont un rôle important dans la captation de l'eau de pluie limitant ainsi l'érosion des sols, les crues et les glissements de terrain. À surface égale, une surface boisée absorbe six fois plus d'eau qu'une parcelle herbée. Les forêts participent également au filtrage de l'eau [37].



Figure 27 : Captation du CO₂ par les surfaces boisées, source [37]

Des constructions en bois plutôt qu'en béton permettraient de diminuer jusqu'à 60% l'empreinte carbone de la construction de logements collectifs, et jusqu'à 55% celles des constructions individuelles et des petits collectifs. Une étude réalisée par [38] propose des comparaisons chiffrées, les hypothèses et méthodes de calcul sont données dans l'étude. Ainsi un bâtiment collectif de 2 000 m² (soit 6 logements sur R+5) construit en ossature bois et CLT (bois lamellé-croisé, figure 1 et paragraphe 3) permettrait d'éviter l'émission de 370 tonnes de CO₂. Le calcul fait pour une maison individuelle de 100 m² donne une économie d'émission de 10 tonnes de CO₂.



Figure 28 : Ordres de grandeur de la construction d'un bâtiment collectif et d'une maison individuelle en ossature bois et CLT plutôt que béton, source [38]

L'origine des bois a des conséquences sur les calculs d'émission de gaz à effet de serre par le transport qui peut être nécessaire. En 2018, 43% des achats de bois de construction passait par un réseau de distribution (réseaux de négoce, coopératives), la part des achats auprès des scieries françaises représentait 40%, la part des scieries étrangères représentait à 17%. L'Allemagne reste le principal pays étranger fournisseur de bois en France, devançant très largement l'Autriche et la Suède. L'approvisionnement directement auprès des scieries se fait principalement par les entreprises de construction de plus de 20 salariés, les plus petites structures s'adressaient majoritairement aux réseaux de distribution. En 2018, 39% des entreprises indiquaient la volonté de leurs clients d'utiliser du bois français. La part de bois français acheté par les entreprises oscille

entre 50 et 60%. Les bois utilisés par les entreprises sont majoritairement certifiés, à hauteur de 94% dont 88% sont des bois PEFC¹⁶ et 12% sont FSC [33].

3 – Découvrir la construction en CLT (Cross-Laminated Timber ou bois lamellé-croisé)

En France, la part de construction de logements individuels et collectifs réalisée avec le matériau bois était à 6,3% en 2018 (figure 29) contre 5,9% en 2016. Lors de l'utilisation du matériau bois dans les constructions, l'ossature bois reste la technique constructive la plus utilisée, à 84 % dans la construction de maison individuelle, 83 % dans les bâtiments collectifs et 75 % dans les bâtiments tertiaires. Pour la construction de maison individuelle, le système poteaux poutres est utilisé à hauteur de 8 % et les panneaux massifs contrecollés ou contrecloués (incluant le CLT) pour 5 %. L'utilisation des panneaux massifs est en croissance (passé de 3 % à 5 % entre 2016 et 2018), de même pour la construction de bâtiments collectifs, l'utilisation de panneaux massifs est passé de 4 % à 10 % entre 2016 et 2018 [33]. La part de la construction CLT reste donc faible en France actuellement.

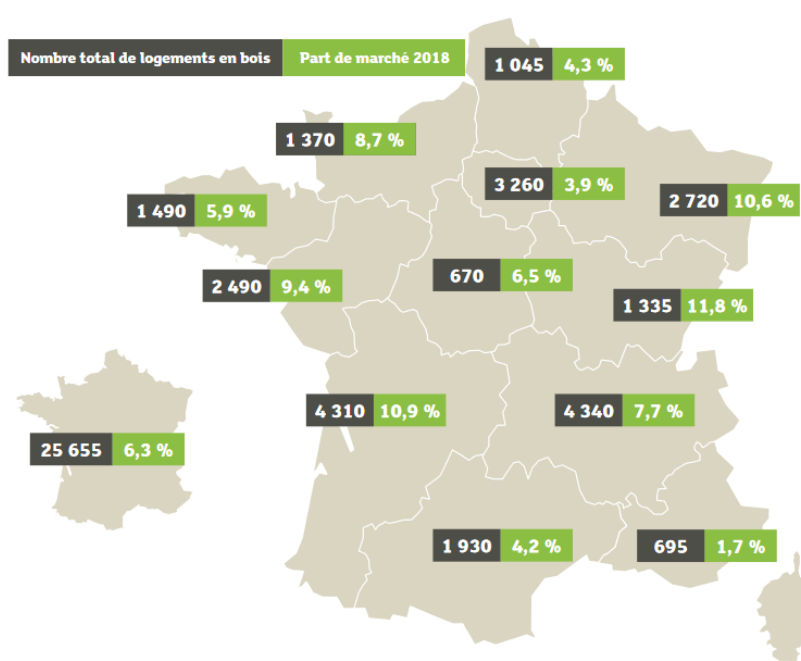


Figure 29 : Nombre de logements construits en bois par région et part de marché en France en 2018, source [33]

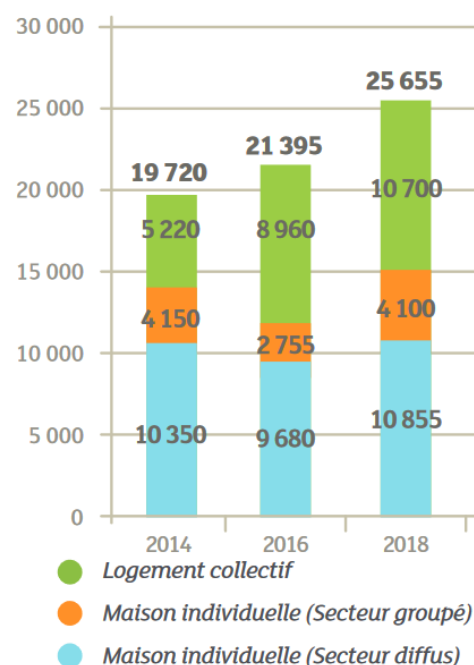


Figure 30 : Évolution du nombre de logements construits en bois en France (par marché) entre 2014 et 2018, source [33]

Le CLT est un panneau à usage structurelle qui est utilisé pour les murs, planchers ou toitures ; Il est constitué de lames de bois massif croisés perpendiculairement (figure 31), le nombre de plis est souvent de trois mais est adaptable en fonction des reprises de charges appliquées, l'épaisseur varie de 6 à 30 cm. Les dimensions courantes proposent des panneaux de 3,5 m de haut pour une longueur de 15 à 20 m fabriqués sur mesure avec les ouvertures nécessaires (fenêtre et portes). Actuellement, les constructions sont majoritairement des bâtiments de deux à quatre niveaux [39] [40].

¹⁶ PEFC : Programme de reconnaissance des certifications forestières (Pan European Forest Certification ou certification paneuropéenne des forêts)

FSC : Conseil de Soutien de la Forêt (Forest Stewardship Council)



Figure 31 : Panneaux CLT, source [39]

Inventée par l'ingénieur Pierre Gauthier en 1947, la technique est utilisée par Jean Prouvé¹⁷ en 1954 pour la construction des toitures, cloisons et portes sans huisserie de sa maison personnelle en seulement trois mois (figure 32). En 2014, Saint-Dié-des-Vosges voit la construction d'un immeuble de huit niveaux avec murs et planchers en CLT par l'architecte Antoine Pagnoux (figure 33) [40]. La résidence de deux bâtiments de huit et trois niveaux (26 logements de 76 et 90 m²) est hors d'eau et hors air en quatre semaines, et utilise 1 000 m³ de bois et 18 tonnes de connecteurs et accessoires en acier [41].



Figure 32 : Vues de la maison personnelle de Jean Prouvé (propriété de la ville de Nancy depuis 1990), source [42]



Figure 33 : Résidence Jules Ferry à Saint-Dié-des-Vosges et lors de sa construction, sources [43] [44]

¹⁷ Jean Prouvé (1901-1984), architecte et designer français

Exemple d'utilisation de panneaux CLT lors de la construction d'une maison individuelle

Nos remerciements vont à Christophe Launeau, architecte sur l'île de Noirmoutier, pour ses explications ainsi que les visuels de ses chantiers. Notons que les constructions réalisées sont adaptées à une architecture traditionnelle, les règles d'urbanisme obligent le bâtiment fini à une apparence extérieure identique à une maison maçonnée.

La figure 34 permet de suivre les différentes phases de construction.

1. Les fondations

Les fondations sont traditionnelles : semelle (figure 35a) en béton ferrailé, soubassement en blocs de béton manufacturé (figure 35b) et dalle béton coulée après la pose de toutes les gaines techniques et la pose des armatures (figure 35c).



(a) Semelle



(b) Soubassement



(c) Dalle

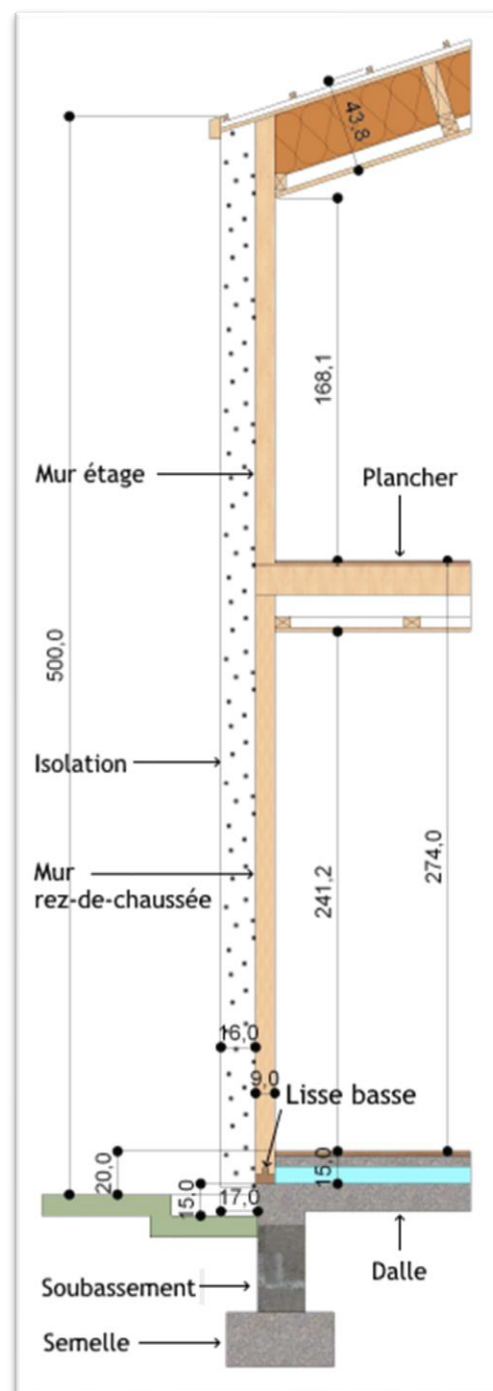


Figure 34 : Coupe type d'une construction [unité : cm], source C. Launeau

Figure 35 : Réalisation des fondations, source C. Launeau

2. Les murs du rez-de-chaussée

Une lisse basse en bois classe 4¹⁸ est fixée sur la dalle béton, un film anti termites et anti remontée capillaire est glissée entre la lisse et le béton (figure 36). On note sur la coupe figure 34, que la lisse, et donc le panneau, est à l'aplomb du soubassement, la reprise de charge verticale se fera donc bien par le soubassement. L'isolation se fera par l'extérieur et donnera l'impression d'un soubassement en retrait du mur.

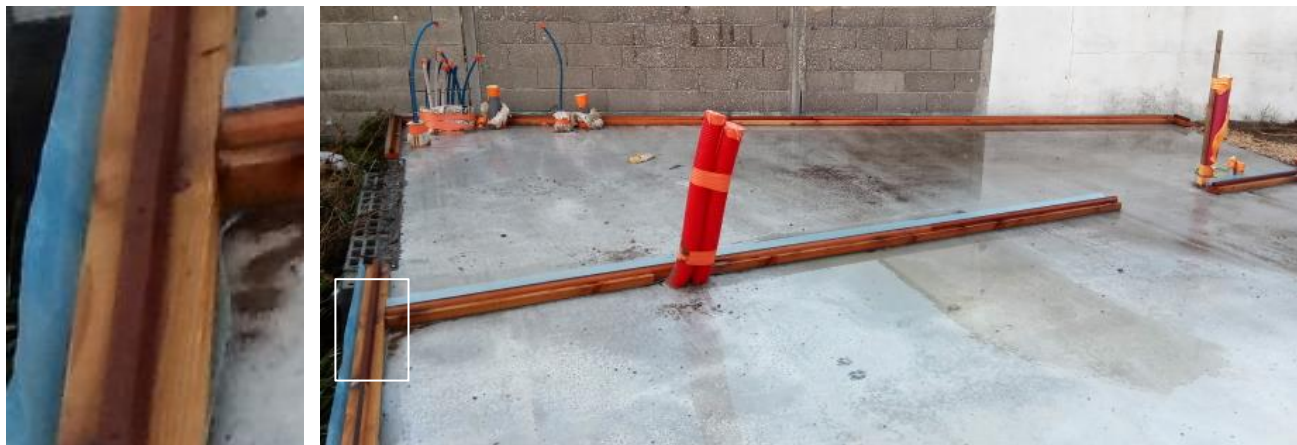


Figure 36 : Lisses fixées sur la dalle et détail du film intercalé, source C. Launeau

Les panneaux 3 plis, de 90 mm ou 100 mm d'épaisseur, sont emboîtés sur la lisse basse. Un panneau constitue un mur ou un refend¹⁹, les ouvertures nécessaires (portes, fenêtres) sont prédécoupées mais encore présentes au moment de la pose pour maintenir l'ensemble panneau sans points faibles (figure 37).



Figure 37 : Pose des panneaux avec les ouvertures prédécoupées, source C. Launeau

Pour la pose et avant fixation, les murs sont maintenus avec des étais provisoires (figure 38). La fixation des murs se fait par des pattes de fixation vissées dans les murs et la dalle (figures 38) et par le vissage des panneaux entre eux dans les angles ou les refends (figure 39). Un joint d'étanchéité à l'air est posé avant fixation des panneaux entre eux. Les réservations d'ouvertures peuvent être alors complètement détachées.

¹⁸ Les bois de classe 4 peuvent être en contact permanent avec de l'eau douce, ils sont stabilisés et imputrescibles.

¹⁹ Un refend est un mur porteur intérieur. Les murs sans autres indications sont extérieurs et porteurs.



Figure 38 : Maintien des murs à l'aide d'étais (réservations d'ouvertures détachées) et détail des fixations des murs sur la dalle, source C. Launeau

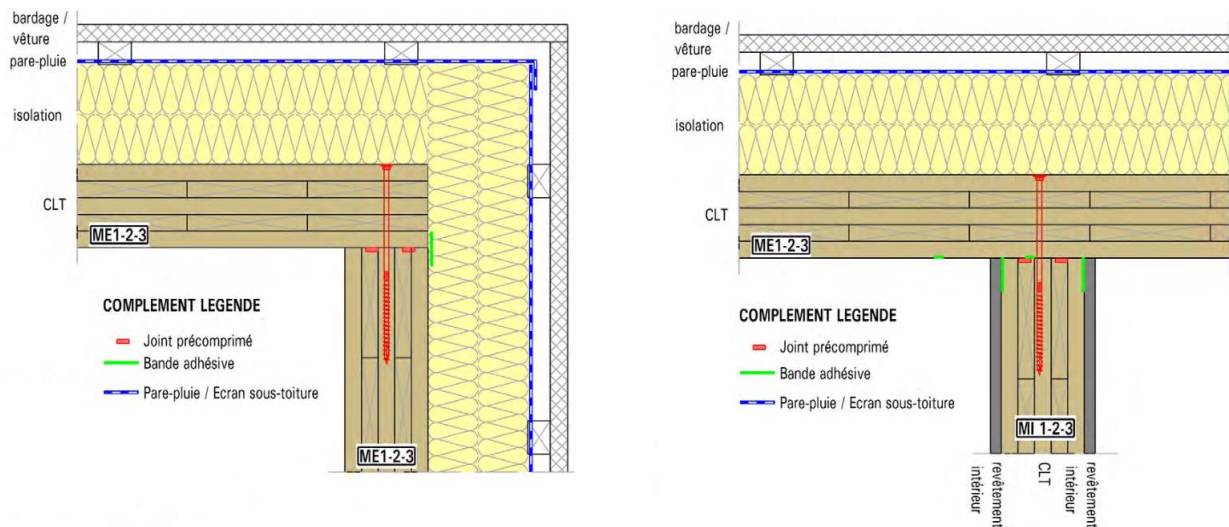


Figure 39 : Fixation des panneaux en angle et fixation des refends, source [45]

3. Le plancher et l'étage

Avant de monter un étage, un plancher est posé. Il est composé de panneaux 5 plis d'une épaisseur de 140 à 200 mm selon la portée. Le plancher se pose sur le haut des panneaux murs, il est vissé à travers dans les murs du rez-de-chaussée (figure 40).

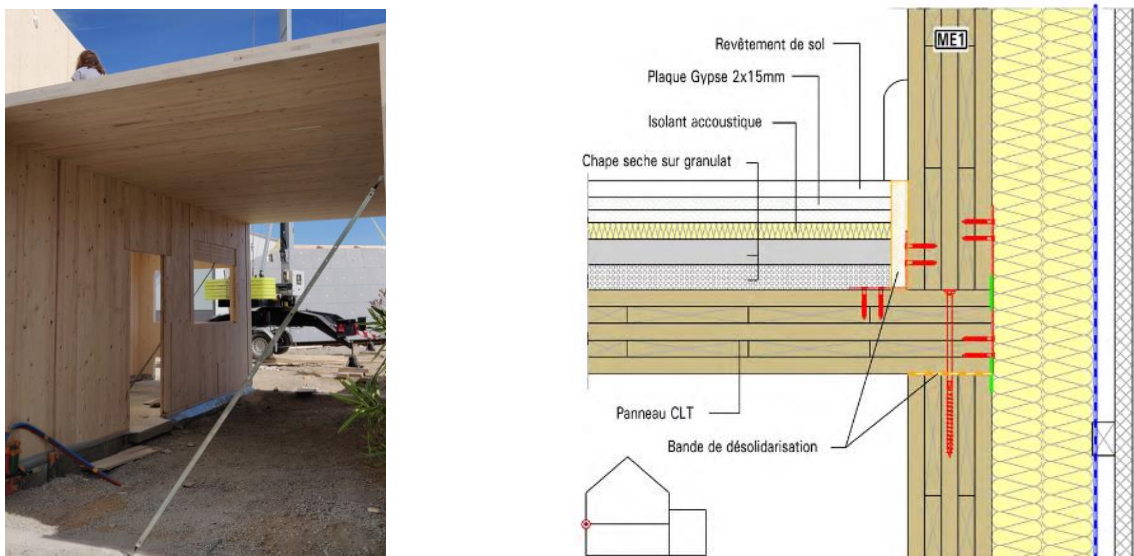


Figure 40 : Pose et fixation du plancher, source C. Launeau et [45]

Les panneaux de l'étage sont alors posés sur le plancher, maintenus avec les étais provisoires. Les panneaux sont ensuite fixés par des pattes entre le plancher et les murs à l'intérieur du bâtiment ou encore avec des plaques en extérieur (figure 41). Comme pour le rez-de-chaussée, les panneaux, après avoir reçu un joint d'étanchéité à l'air, sont fixés entre eux dans les angles (figure 39).



Figure 41 : Pose des murs de l'étage et fixations extérieures, source C. Launeau

4. Passages de gaines techniques et toiture

Pour les passages des gaines techniques, des rainurages sont réalisés en usine sur l'extérieur du panneau, un exemple est visible figure 41 sur la photo de droite. Les rainures, après le passage des gaines, sont refermées avec des baguettes, un exemple peut se voir figure 46 (bande de bois verticale plus claire). Les panneaux en intérieur peuvent ainsi être laissés bruts, peints ou vernis, ils ne nécessitent pas d'être doublés.

La toiture peut être en panneau comme pour un étage. Cependant dans l'exemple présenté ici, les contraintes architecturales liées à l'urbanisme local (hauteur totale des constructions) imposent une charpente traditionnelle pour optimiser l'épaisseur totale de la charpente et de l'isolation.

5. Pose des menuiseries

Portes et fenêtres sont posées lorsque « la boîte » est finie sans la couverture : murs, planchers de l'étage et charpente posés. L'isolation du bâtiment se fait par l'extérieur. Pour assurer l'isolation à l'eau et à l'air entre les panneaux et les menuiseries, un précadre en fibrociment est posé. Il reprend le champ des panneaux sur les côtés et le linteau (épaisseur des cloisons). En appui de fenêtre, le fibrociment posé plus bas que l'ouverture dans le panneau, dépasse du panneau de l'épaisseur de l'isolant, posé dans un second temps (figure 42).



Figure 42 : Pose d'un cadre en fibrociment dans les ouvertures, source C. Launeau

Les menuiseries sont posées en tunnel dans le précadre. Un cadre en fibrociment est ensuite posé en appui sur la menuiserie, il s'emboîte dans l'ouverture avec un joint en linteau et côtés pour l'étanchéité à l'air et à l'eau (figure 43). Ce cadre dépasse des panneaux de l'épaisseur de l'isolant. Figure 44 la fenêtre de droite est posée dans le précadre, la fenêtre de gauche est munie du cadre.



Figure 44 : Pose des menuiseries avec précadre et cadre en fibrociment, source C. Launeau

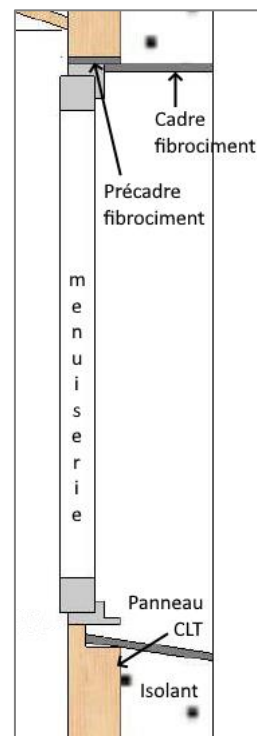


Figure 43 : Coupe d'une menuiserie, source C. Launeau

La couverture peut alors être posée. Une petite maison de plain-pied est ainsi hors eau hors air en trois jours seulement.

6. Isolation

L'isolant se pose sur l'extérieur du bâtiment, ce peut être du polystyrène, de la laine de roche haute densité, des panneaux fibre de bois haute densité. Un rail de départ en aluminium est fixé au pied du mur, il est posé sur la lisse basse et vient en recouvrement de la dalle béton (figure 45). Un espace de 15 cm entre le sol et l'isolant extérieur doit être aménagé (figure 34). Une trame polyester est posée remontant sur le bas de l'isolant (figure 46).



Figure 45 : Pose du rail supportant l'isolant



Figure 46 : Pose de l'isolant avec trame polyester
source C. Launeau



Figure 47 : Panneaux d'isolant vissés et collés sur le panneau et collés entre eux, source C. Launeau

7. Finition des murs extérieurs

Comme précisé au début de la présentation de cet exemple, la finition des bâtiments répond aux contraintes de l'urbanisme local. Ainsi le bâtiment fini a une apparence extérieure identique à une maison maçonnée.

Tous les angles, saillants ou rentrants, sont renforcés avec des cornières polyester intégrées à l'enduit (figure 48). L'enduit se fait en quatre couches : deux couches d'enduit contenant une trame polyester entre elles qui renforce l'enduit et évite les fissures, puis deux couches de finition pour retrouver un enduit traditionnel (figure 49).



Figure 48 : Finition extérieure, à gauche seuls les angles sont renforcés, mur de droite les deux premières couches et la trame polyester sont posées et détail de ces couches et trame, source C. Launeau



Figure 49 : Bâtiment avec enduit fini, l'apparence est identique à une maison maçonnée visible à l'arrière à droite, source C. Launeau

Références :

- [1]: Matériaux et architecture durable, Nadia Hoyet, Dunod
- [2]: José-Manuel Benito – Travail personnel, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=548117>
- [3]: José-Manuel Benito – Own work, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=548158>
- [4]: David Hawgood, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13976927>
- [5]: Rauenstein – Self-photographed, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=479677>
- [6]: David Hawgood, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=13975557>
- [7]: John Burka, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=513393>
- [8]: <http://photos.lookatsciences.com/media/0a16ccc0-ea5e-4ff7-8f77-16ed9e8d98db-maison-neolithique-de-chalain>
- [9]: The original uploader was Agache at French Wikipedia. – Transferred from fr.wikipedia to Commons by Bloody-libu using CommonsHelper., CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19370833>
- [10]: <https://www.linternaute.com/savoir/magazine/1057114-le-parc-de-samara-visitez-un-village-prehistorique/1057123-maison-gauloise>
- [11]: Les dix livres d'architecture : De Architectura, de Vitruve, traduction C. Perrault, Éditions Errance
- [12]: Caractères des structures en bois dans l'histoire de l'architecture, Mathieu Sudres, avril 2018, <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01764848/document>
- [13]: Eaglestein – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4627240>
- [14]: Aldo Ardetti at it.wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5984947>
- [15]: Coyau / Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5020424>
- [16]: Daderot – Travail personnel, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63394090>

- [17]: Psu973 – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=21652292>
- [18]: Stuart Yeates [1] – <https://www.flickr.com/photos/stuartyeates/43979694/>, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1632413>
- [19]: Constructions parasismiques : quelques solutions traditionnelles, M. Warburton, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, décembre 2019, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/constructions-parasismiques-quelques-solutions-traditionnelles
- [20]: « Stavkirke » d’Urnes , UNESCO, <https://whc.unesco.org/fr/list/58/>
- [21]: (heddel) Micha L. Rieser, Attribution, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10977773>
- [22]: Nouvelles inventions pour bien bastir et à petits fraiz, trouvées n’agueres par Philibert de L’orme, Lyonnais, Architecte, Conseiller et Aulmonier ordinaire du feu Roy Henry, & Abbé de S. Eloy lez Noyon, 1561, <http://architectura.cesr.univ-tours.fr/Traite/Images/Masson643Index.asp>
- [23]: Manuel du bois lamellé - Volume 1, Claire Leloy, SNBL, 2018
- [24]: La place de la charpente de bois lamellée dans les expositions universelles et internationales depuis 1990, **Charles-Edouard Guilbert-Røed**, décembre 2017, OpenEdition Journals, publié décembre 2019, consulté mai 2021, <http://journals.openedition.org/lha/838>
- [25]: <http://www.belliardconstruction.com/reference/roissy-en-brie-gymnase-2/>
- [26]: Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector, D. Ürgе-Vorsatz, R. Khosla, R. Bernhardt, Y. Chieh Chan, D. Vérez, S. hu, L. F. Cabeza, *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-012420-045843>
- [27]: Pour un secteur mondial de la construction neutre ne carbone, Matthieu Combe, techniques de l’ingénieur, Octobre 2020, <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/pour-un-secteur-mondial-de-la-construction-neutre-en-carbone-85016/>
- [28]: Limiter son empreinte carbone dans le secteur de la construction, XPAIR, juin 2020, https://conseils.xpair.com/actualite_experts/limiter-empreinte-carbone-construction.htm
- [29]: Bâtiment Bas Carbone BBKA, <https://www.batimentbascarbone.org/>
- [30]: La filière Forêt-bois : un rôle économique majeur en France, France Bois Forêt, mai 2021, <https://franceboisforet.fr/2021/05/26/la-filiere-foret-bois-un-role-economique-majeur-en-france/>
- [31]: Infographie - La filière forêt-bois en France, Ministère de l’agriculture et de l’alimentation ; décembre 2020, <https://agriculture.gouv.fr/infographie-la-filiere-foret-bois-en-france>
- [32]: La filière forêt-bois française : une filière d’avenir, Fibois France, consulté en septembre 2021, <https://fibois-france.fr/chiffres-cles/>
- [33]: Enquête nationale de la construction bois, CODIFAB 2019, <https://www.codifab.fr/actions-collectives/bois/enquete-nationale-de-la-construction-bois-2019-activite-2018-2286>
- [34]: 1958-2018, 60 ans d’inventaire forestier, IGN, 2018, https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/181127_memento_2018_v4.pdf
- [35]: Évaluation du gisement de déchets bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie, Rapport d’étude FCBA pour l’ADEME, avril 2015, <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/evaluation-gisement-bois-201505-synthese.pdf>
- [36] : Giec : la gestion durable des forêts, un levier essentiel pour lutter contre le changement climatique, Office National des Forêts (ONF), août 2019, <https://www.onf.fr/onf/forets-et-changement-climatique/nos-articles/+/480::rapport-du-giec-quel-role-de-la-foret-face-au-rechauffement-climatique.html>

- [37] : La forêt, protectrice de l'environnement, ONF, consulté en septembre 2021, <https://www.onf.fr/onf/forets-et-espaces-naturels/+1f::comprendre-la-foret.html>
- [38]: Développer la construction bois en France pour améliorer l'indépendance énergétique, réduire les émissions de gaz à effet de serre et développer l'emploi, Carbone 4, consulté en septembre 2021, <https://www.carbone4.com/wp-content/uploads/2015/05/Note-de-communication-fili%C3%A8re-bois-vf.pdf>
- [39]: CLT France, consulté en septembre 2021, <http://clt-france.fr/>
- [40]: La CLT, la technique de construction des immeubles en bois, architecture bois consulté en octobre 2021, <https://www.architecturebois.fr/clt-immeubles-bois-construction/>
- [41]: Première tour passive R+7 de logements en bois, Le moniteur, mai 2014, <https://www.lemoniteur.fr/article/premiere-tour-passive-r-7-de-logements-en-bois.1939314>
- [42]: Jean Prouvé et sa maison sur les hauteurs de Nancy, Musée des Beaux-Arts de Nancy, consulté en octobre 2021, <https://musee-des-beaux-arts.nancy.fr/le-musee/maison-jean-prouve-2597.html>
- [43]: 26 logements 8 niveaux bois-paille passif, ASP architecture, consulté en octobre 2021, <https://asparchitecture.fr/projets/residences-j-ferry-8-niveaux-bois-paille-passif/>
- [44]: Résidence passive bois/paille Jules ferry, Construction 21 France, consulté en octobre 2021, <https://www.construction21.org/france/case-studies/h/residence-passive-boispaille-jules-ferry.html>
- [45]: Guide panneaux massifs bois contrecollés, Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, https://www.programmepacte.fr/sites/default/files/pdf/guide-rage-panneaux-massifs-bois-contrecolle-neuf-2014-12_0.pdf
- [46]: Logement neuf : la nouvelle réglementation environnementale révolutionne, Jean-Marc Jancovici, https://www.linkedin.com/posts/jean-marc-jancovici_logement-neuf-la-nouvelle-r%C3%A9glementation-activity-6882281092817186816-OmxO