

Projet : LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage

Tâche 5 : high-experience
Sous-tâche 5.1 : Étude des contraintes techniques

Etude réalisée par ENERTECH avec le soutien de l'ADEME, dans le cadre de son appel à projet recherche « vers les bâtiments responsables à l'horizon 2020 »



Coordination technique ADEME:
Romuald CAUMONT
romuald.caumont@ademe.fr
01 47 65 21 49

Version	Rédigé par	Relu par	Date
1	BR	OG StM	09/07/2020

Table des matières

1	Rappel des principes de conception du bâtiment	3
1.1	<i>Objectifs de conception.....</i>	3
1.2	<i>Enveloppe.....</i>	3
1.3	<i>Parois intérieures</i>	4
2	Analyse détaillée des contraintes techniques	6
2.1	<i>Apports d'inertie</i>	6
2.1.1	<i>Planchers</i>	6
2.1.2	<i>Cloisons.....</i>	8
2.2	<i>Structure de la façade sud</i>	11
2.3	<i>Respect des normes sismiques.....</i>	13
2.3.1	<i>Description du problème et solution adoptée</i>	13
2.3.2	<i>Autres solutions possibles</i>	16
3	Synthèse	18

1 Rappel des principes de conception du bâtiment

1.1 Objectifs de conception

Le fil conducteur de la conception du bâtiment LowCal est de réduire la consommation d'énergie du bâtiment nécessaire à sa fabrication (énergie grise) et son utilisation pour tous les usages. Le premier objectif est réalisé principalement par le choix des matériaux et d'entreprises locales. Le second nécessite d'agir sur l'ensemble des postes et particulièrement de réduire au maximum les besoins de chauffage tout en assurant un confort d'été satisfaisant sans recourir à un système actif de climatisation. Un objectif supplémentaire était de construire ce bâtiment à coût maîtrisé ce qui a été possible grâce à d'importantes économies sur les systèmes : absence de chauffage fixe et choix du *Low Tech* (c'est-à-dire des systèmes simples, par opposition à *Hi Tech*).

1.2 Enveloppe

L'enveloppe doit être très performante pour minimiser les besoins de chauffage l'hiver tout en permettant d'obtenir un confort d'été sans système actif de climatisation. Les principes utilisés sont : maximisation des résistances thermiques des parois opaques et des vitrages, minimisation des ponts thermiques, orientation du bâtiment et différenciation des façades avec une grande surface vitrée au sud pour maximiser les apports solaires l'hiver. Le tout avec une bonne étanchéité à l'air afin que le maximum du renouvellement d'air se fasse au travers des récupérateurs de chaleur. Pour minimiser l'énergie grise, le système constructif utilisé est ossature bois avec isolation par bottes de paille.

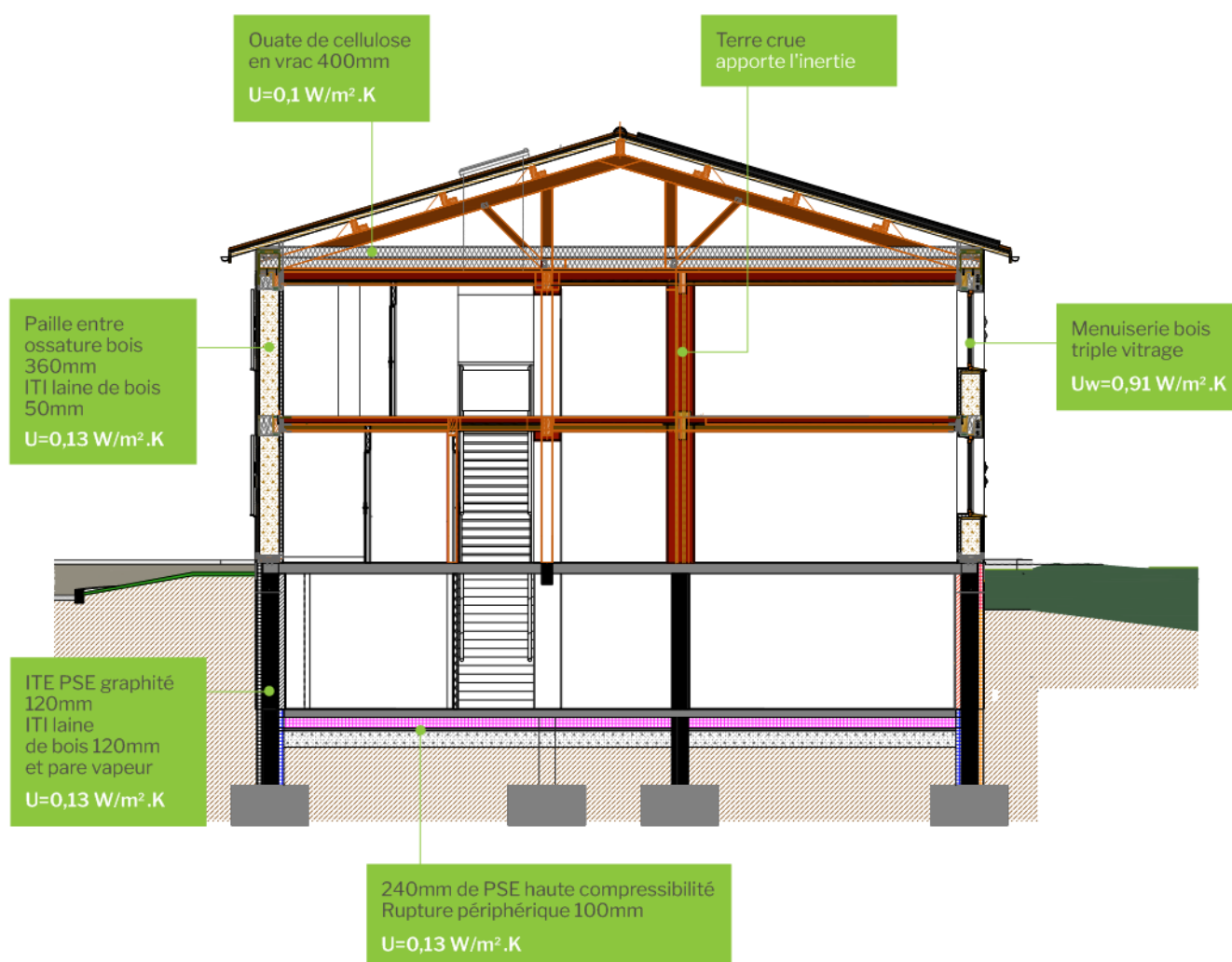


Fig. 1.1 : Coefficients de transmission thermique des parois

Les murs extérieurs sont en caissons bois préfabriqués, comportant une isolation en bottes de paille (origine nord-Drôme) avec un complément intérieur de 5 cm de laine de bois. 40 cm de ouate de cellulose en vrac a été soufflée dans les combles perdus.



Préfabrication en atelier des caissons bois- paille Chantier : grutage d'un panneau préfabriqué

Fig. 1.2 : Fabrication et montage des caissons

Les menuiseries extérieures sont en bois (fabriquées en Allemagne) et disposent de triple vitrage à haut facteur solaire. La surface totale de menuiserie représente 17 % de la surface utile dont 44 % sur la façade sud. Au sud, elles sont équipées de brise-soleils orientables (BSO) et sur les autres façades de volets en bois, coulissants ou battants traditionnels.

1.3 Parois intérieures

Du fait du mode constructif, les parois extérieures sont à faible inertie. Or, une inertie importante est nécessaire pour assurer un bon confort d'été sans système actif. Elle est également importante pour limiter les variations de températures l'hiver, ce qui permet de récupérer le maximum d'apports solaires les journées ensoleillées sans augmentation majeure de la température. Elle permet aussi de limiter les baisses de température lors de périodes hivernales faiblement, voire pas, ensoleillées.

Cette inertie est apportée par les planchers et plafonds ainsi que certaines cloisons intérieures.

Au rez-de-jardin (niveau semi-enterré), du béton a été utilisé avec isolation mixte ITE+ITI. À partir du rez-de-chaussée, toute l'inertie est apportée par une centaine de tonnes de terre crue sous deux formes différentes : 70 tonnes de briques d'argile crue dans les planchers, récupérées car considérées comme déchets et 35 tonnes de briques, fabriquées localement avec la terre excavée du terrain, pour l'habillage des murs intérieurs.



Chantier : remplissage en brique d'argile du plancher bois



Croix de Saint André



Chantier : réalisation du mur en briques de terre crue issue du terrain,

*monté autour des croix de Saint
André*



Fig. 1.3 : Fabrication des briques de terre crue

Des croix de saint André en bois massif au RDC et au R+1 assurent la résistance aux séismes (refends centraux du bâtiment).

2 Analyse détaillée des contraintes techniques

L'objectif de cette étude est de restituer un retour d'expérience de ce qui a été fait sur LowCal, mais aussi de ce qui a été envisagé et non retenu, d'analyser la conjugaison des différentes contraintes et le champ des solutions qui auraient été envisageables avec leurs avantages et leurs inconvénients.

2.1 Apports d'inertie

La comparaison des différentes solutions (mode constructif et matériaux utilisés) est à faire selon plusieurs critères :

- apport réel effectif d'inertie thermique au bâtiment ;
- faible énergie grise et bas carbone de la solution (y compris matériaux déchets) ;
- coût accessible et facilité de mise en œuvre ;
- intégration des réseaux ;
- comportement acoustique
- réagencement possible des pièces (déplacement ou suppression de cloisons).

L'inertie peut être localisée dans les dalles horizontales (planchers et plafonds) et / ou dans les parois verticales (cloisons intérieures). Les murs périphériques ayant toutes une isolation intérieure (en plus d'une isolation extérieure ou répartie), elles ne sont pas mobilisables pour apporter de l'inertie.

2.1.1 Planchers

Les besoins importants d'inertie dans les bâtiments à ossature bois se traduisent souvent par la mise en œuvre de dalles béton. Ici nous nous concentrons sur les matériaux pouvant être intégrés dans les planchers bois avec une optique de minimisation de l'énergie grise. La prise en compte de l'ensemble des critères énoncés en début de partie 2.1 oblige à accepter quelques compromis car l'ensemble de ces critères ne peuvent pas être optimaux simultanément. Il faut d'ailleurs noter que certaines solutions évoquées n'ont pas été retenues car elles recouraient forcément à l'auto-construction et n'étaient donc pas généralisables à d'autres opérations. Après un rapide descriptif du type de matériaux utilisables, nous retracerons l'historique de la démarche adoptée sur LowCal, des réflexions préliminaires à la réalisation en passant par les expérimentations. Puis nous évoquerons une solution différente mise en œuvre sur un autre bâtiment à ossature bois isolation paille. Pour finir, nous nous attarderons sur le couple de contrainte inertie à faible énergie grise *versus* isolation acoustique.

Tout d'abord, pour avoir de l'inertie mobilisable, il est nécessaire d'utiliser des matériaux compacts tels que terre crue (argileuse), terre cuite (briques ou carrelages) ou pierres. La capacité thermique massique est toujours environ égale à 900 J/kg/°C (soit 0,25 Wh/kg/°C). Par contre, la masse volumique est différente selon les matériaux, ce qui fait donc changer la capacité thermique volumique. L'utilisation de granulats, graviers ou déchets de béton concassé n'est pas possible. En effet, il y a nécessairement du vide quelle que soit la taille du granulats (environ un tiers de vide), ce qui empêche l'accès à la masse. Il faut nécessairement des matériaux massifs. De plus, il est préférable de ne pas mélanger des filières humides (tels que le béton coulé sur place) avec une filière sèche (tels que l'ossature bois avec isolation paille en caisson).

Pour le LowCal, il a été envisagé de récupérer du béton, des dalles de béton ou des bordures de trottoirs, mais ces matériaux ont le défaut d'avoir une énergie grise importante. L'intégration de la réalisation du remplissage massique au phasage du chantier s'avère être également un casse-tête. Ainsi, si en termes de phasage, on attend la toiture, la mise en œuvre peut s'effectuer au sec, mais la grue n'est

plus utilisable. Cela impose d'utiliser un élévateur (mais limite de hauteur atteignable) ou un tapis-roulant monte-charge adapté au matériau.

Le choix initial envisagé par Enertech pour la réalisation des planchers inertiels est le système solives et caissons remplis de terre. Ce système répondait aux contraintes de facilité de mise en œuvre (économique) et de planning (phasage du chantier). Un caisson prototype a été réalisé (cf. figure 2.1). Deux semaines après sa réalisation, un problème important a été détecté : l'humidité de la terre ne s'évacue pas et risque de dégrader le caisson (présence d'humidité et de moisissures sur le bois observées). Il est donc indispensable de faire sécher préalablement la terre. Cela a posé alors la question des moyens à mettre en œuvre (serre sur une grande surface ? étuve ?), de l'anticipation (si le séchage doit se faire l'été) et de l'énergie grise associée.



Caisson le 02/12/2015 avant sa fermeture



Ouverture du caisson le 16/12/2015, après 14 jours de stockage

Fig. 2.1 : Caisson prototype du remplissage de terre des planchers

Il a été finalement acheté des briques de rebut en terre crue (considérées comme des déchets) avec un remplissage d'argile sèche en vrac pour remplir complètement les caissons, le tout au sein d'un film en polyéthylène. Pour la construction de LowCal, la mise en œuvre a nécessité deux jours à quatre personnes par plancher.

Pour information, sur la cité scolaire de St-Cirgues-en-Montagne (07), opération où Enertech a été maître d'œuvre, le système utilisé est Kerto® LVL (*Laminated Veneer Lumber*) et chape de ciment. Cette solution est meilleure sur le plan acoustique mais ne permet pas le passage des réseaux électriques.

En ce qui concerne la problématique acoustique, il faut reconnaître que la solution mise en œuvre initialement n'est pas réglementaire (on a depuis réalisé quelques travaux supplémentaires pour améliorer la situation). En effet, de base, un plancher bois est très mauvais acoustiquement contre les bruits d'impacts et contre les bruits aériens. Pour avoir un confort acoustique avec un plancher bois, il faut ajouter, à minima, un plafond suspendu en plaque de plâtre et une fibre mais cela bloque l'accès à l'inertie pour le plafond. Seule l'inertie du plancher reste alors accessible. Les avantages associés à la pose du plafond suspendu sont la facilité de passage des réseaux d'électricité, la simplification du choix de luminaires performants et peut-être également une amélioration de la qualité de l'air, le bois des plafonds étant un émetteur de COV (non cancérigènes). Il peut aussi s'avérer nécessaire de poser le linoléum sur une mousse acoustique pour atténuer les bruits d'impacts mais cela diminue l'accès à l'inertie du

plancher. Dans ce cas, il faut compter beaucoup moins sur la masse des planchers pour l'inertie et donc augmenter la quantité de cloisons inertielles. En effet, une masse à faible énergie grise est acoustiquement bonne dans les murs mais pas dans les planchers. Dans le cadre de la tâche 5.2, une étude sera réalisée pour évaluer l'accès à l'inertie dans un plancher acoustique à l'aide de simulations thermiques dynamiques.

Une autre possibilité est la réalisation d'une chape sèche acoustique également avec faux plafond. Cette chape sèche peut être constituée à base de plaques de fermacell ou de plaques de plâtre. Ces matériaux vont entraîner un impact carbone supplémentaire mais beaucoup moins important qu'une chape flottante à base de ciment (ci-dessous tableau de comparaison des impacts CO₂, issus des FDES plaque de plâtre et chape ciment sous la base INIES) :

Chape sèche	Type de FDES sous INIES	Impact carbone (kg CO ₂ / m ² de SdP)
Deux plaques de plâtre épaisseur 10 mm	FDES n°5951 par défaut (MDEGD) chape sèche de 25 mm	8,74
Chape ciment de 5 cm d'épaisseur	FDES n°6291 par défaut (MDEGD) de chape à base de ciment	30,9

Tout type de revêtement peut alors être envisagé : linoleum, parquet, carrelage. Cette chape sèche sera mise en œuvre avec un isolant fibreux en sous face de type laine minérale compressée ou fibre de bois, afin de limiter les bruits d'impacts du plancher ainsi constitué. Cependant, il faut noter qu'aucun réseau ne peut réglementairement passer dans l'isolant fibreux en sous-œuvre de la chape sèche. Cette technique chape sèche et plafond suspendu a l'inconvénient d'empêcher l'accès à l'inertie du plancher porteur si celui-ci est rempli de terre, car la chape sèche apporte peu d'inertie : 20 mm de plaque de plâtre avec une masse volumique de 800 kg/m³ soit 16 kg/m².

En synthèse, il est compliqué de trouver une solution pour les planchers conciliant l'ensemble des critères : inertie, acoustique, faible énergie grise (ou faible contenu carbone) et facilité de passage des réseaux. Une amélioration de l'acoustique entraîne une détérioration de l'accès à l'inertie, nécessitant alors d'augmenter la part de cloisons lourdes, ce qui limite la modulabilité de l'agencement (cloisons non déplaçable).

2.1.2 Cloisons

On se place ici dans l'optique de murs non porteurs. Cela permet d'utiliser la terre crue (le matériau massique avec la plus faible énergie grise et en plus infiniment recyclable) sans ajouter les contraintes structurelles qui peuvent être problématiques car il s'agit d'un matériau non normalisé, donc difficilement accepté par les assurances.

On pourrait également envisager des maçonneries à base de bouteilles ou de bidons remplis d'eau, mais il faut garantir impérativement l'absence de fuite, y compris lors d'un percement de cloison. Nous ne conseillons donc pas cette piste pour l'inertie.

Les différentes techniques de murs en terre crue sont : adobe (briques moulées), briques extrudées, bauge (terre empilée), pisé (terre comprimée), torchis (garnissage de terre) et brique de terre comprimée (BTC).

La technique utilisée sur LowCal est l'adobe (brique de terre crue) avec la terre issue des excavations du chantier. La terre du terrain étant très argileuse, il a fallu ajouter un peu de sable et de la paille broyée pour éviter d'avoir trop de retrait et limiter les craquelures. Les briques sont en parement devant l'ossature bois (les croix de saint André en l'occurrence, cf. partie 2.3). Cette dernière est protégée par un

film plastique. Une des principales limites de cette solution est l'intensivité du travail manuel lors de la fabrication. Sur LowCal, 35 tonnes de briques ont été réalisées manuellement. Il est difficilement envisageable d'étendre cette technique à l'intégralité des cloisons. De plus, il faut pas mal de place à l'abri de la pluie et très ventilé pour le séchage des briques. Il est par contre possible d'acheter des briques de terre crue extrudée chez les fabricants de briques en terre cuite : elles sont retirées de la production avant cuisson. L'aspect sera plus homogène (produit industriel) et la terre non locale (sauf pour le mortier si la terre le permet) mais la mise en œuvre est plus simple (pas nécessaire de trouver un hangar de séchage ni d'artisan spécialisé dans la fabrication des briques).

La technique de construction en bauge n'est pas envisageable sur ce type de chantier à cause du long temps de séchage.

La principale contrainte technique des murs en pisé est leur largeur importante (minimum 20 cm¹). À capacité thermique identique, le pisé classique est beaucoup plus cher (580 à 800 €/m²) que le béton ou l'adobe. Une variante est la technique de pisé préfabriqué où les blocs sont fabriqués au sol dans des moules, puis le bloc est démoulé et positionné à la grue à son emplacement définitif. Cette technique a été utilisée par exemple à la maison de santé de Badonviller où les murs en pisé préfabriqués sont porteurs (figure 2.2).



Fig. 2.2 : Maison de santé de Badonviller – Crédit : agence mil lieux

Réaliser les murs en torchis est aussi une possibilité mais, comparativement aux briques de terre crue, l'inertie thermique sera moindre du fait de la proportion plus importante de paille et de bois pour l'armature. Le confort acoustique sera également moins bon. Le coût sera plus élevé car la pose de briques crues est plus rapide avec un bon maçon par rapport à la mise en œuvre d'un torchis².

Les cloisons auraient pu être en briques de terre comprimées (BTC). Cela aurait été, de notre point de vue, moins esthétique (produits d'aspect plus industriel car toutes pareilles) et cela n'aurait pas été la terre du terrain pour les briques. Un exemple de fournisseur est l'entreprise Akterre (www.akterre.com).

¹ Construire en terre crue, *Ulrich Röhlen et Christof Ziegert*, le moniteur.

² D'après Patrice Doat, Professeur à l'ENSAG, cofondateur du laboratoire CRAterre

Par contre, la terre du terrain aurait tout de même pu être utilisée comme constituant principal du mortier de terre pour maçonner les briques.

Une autre possibilité est d'enduire en terre locale des plaques de plâtre classiques. Cela a l'avantage de permettre une grande surface d'échange (toutes les cloisons). Par contre, les enduits, quels qu'ils soient, coûtent très cher à la mise en œuvre.

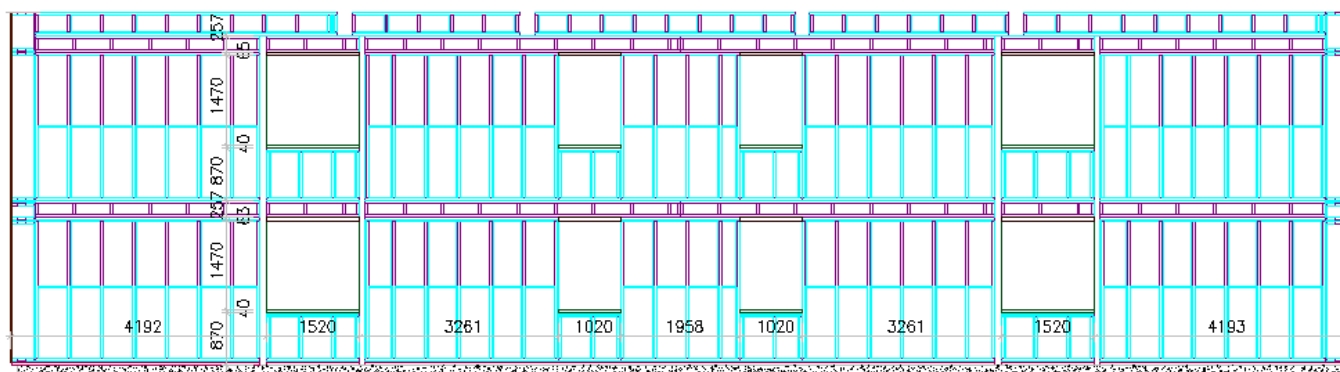
Ainsi la solution mise en œuvre par Izuba pour leurs nouveaux bureaux est l'association de plusieurs de ces techniques : enduits en terre pour les murs périphériques, murs intérieurs en torchis et un mur en briques de terre comprimée. Cela est moins lourd que la masse de plancher de LowCal (donc moins d'inertie), mais la surface d'échange est plus importante (et donc meilleur accès à cette inertie).

En synthèse, la meilleure solution d'un point de vue énergie grise et utilisation de matériaux locaux pour un bâtiment *low-cost* est l'adobe avec la terre du terrain (ce qui a été mis en œuvre sur LowCal). Cette solution artisanale est néanmoins possible dans une certaine limite de taille et avec un espace pour le séchage des briques pas trop distant du chantier. À défaut, le meilleur compromis est l'utilisation de briques extrudées, voire briques de terre comprimées (produits non locaux mais plus facilement extensibles dans le contexte actuel) avec utilisation de la terre locale pour le mortier.

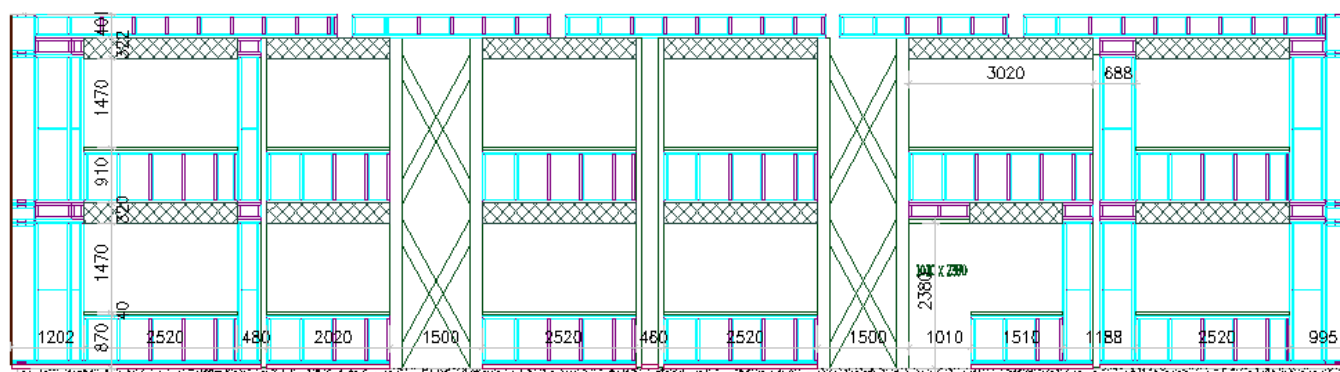
2.2 Structure de la façade sud

Les besoins d'apport solaire pour minimiser les besoins de chauffage impliquent un taux de vitrage très important sur la façade sud ce qui entraîne des contraintes structurelles, mais aussi des contraintes liées à l'implantation des autres éléments.

Les contraintes structurelles découlent des règles sismiques qui sont détaillées dans la partie suivante. Ainsi nous pouvons observer sur les plans EXE de Sud Est Charpente (figure 2.3) qu'il n'y a pas de croix de saint André sur la façade nord, alors qu'il a été nécessaire d'en mettre sur la façade sud.



FACADE NORD



FACADE SUD

Bureaux Enertech - Pont de Barret
Vue façades NORD et SUD

Fig. 2.3 : Plans EXE des façades nord et sud

Une autre contrainte, non structurelle, concerne la difficulté de réservation des gaines et bouches de ventilation dans une façade très vitrée et avec une large place neutralisée par les croix de saint André sur les surfaces opaques. La gaine de ventilation mesure 25 cm de diamètre et la bouche est un carré de 38 cm de côté. Quatre gaines par niveaux devant passer dans les croix de saint André (entourées en rouge sur la figure 2.4) sont concernées.

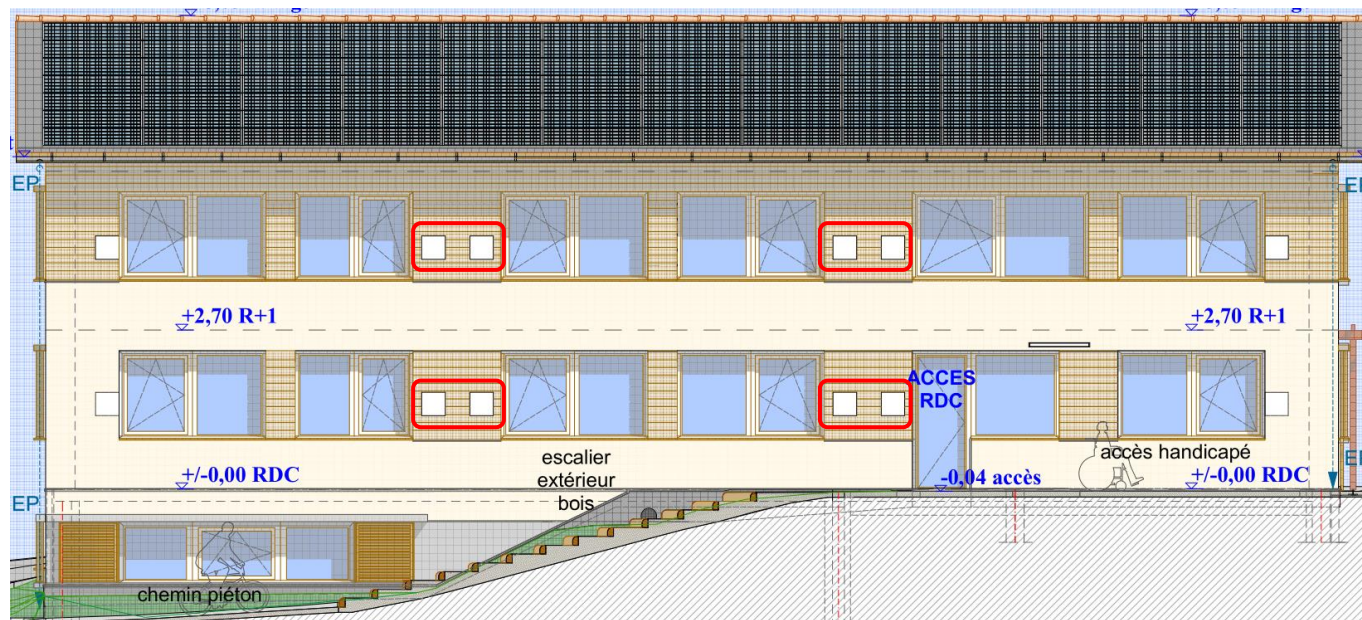


Fig. 2.4 : Gains de ventilations passant dans les croix de saint André (en rouge) façade sud

2.3 Respect des normes sismiques

2.3.1 Description du problème et solution adoptée

La résistance au séisme du bâtiment s'est avérée difficile à obtenir par le bureau d'études structure. De nombreux allers et retours entre l'architecte et le bureau d'études structure ont été nécessaires pour positionner les contreventements (croix de saint André) dans les façades et les murs de refend.

La contrainte sismique, définie dans le décret du 22 octobre 2010, dépend de l'emplacement géographique du bâtiment ainsi que de son usage (ici bâtiment à usage de bureau classé catégorie d'importance III). La commune de Pont-de-Barret est classée, comme une majeure partie de la Drôme (cf. figure 2.5), en zone de sismicité modérée (niveau 3) sur échelle allant de 1 (très faible) à 5 (forte).

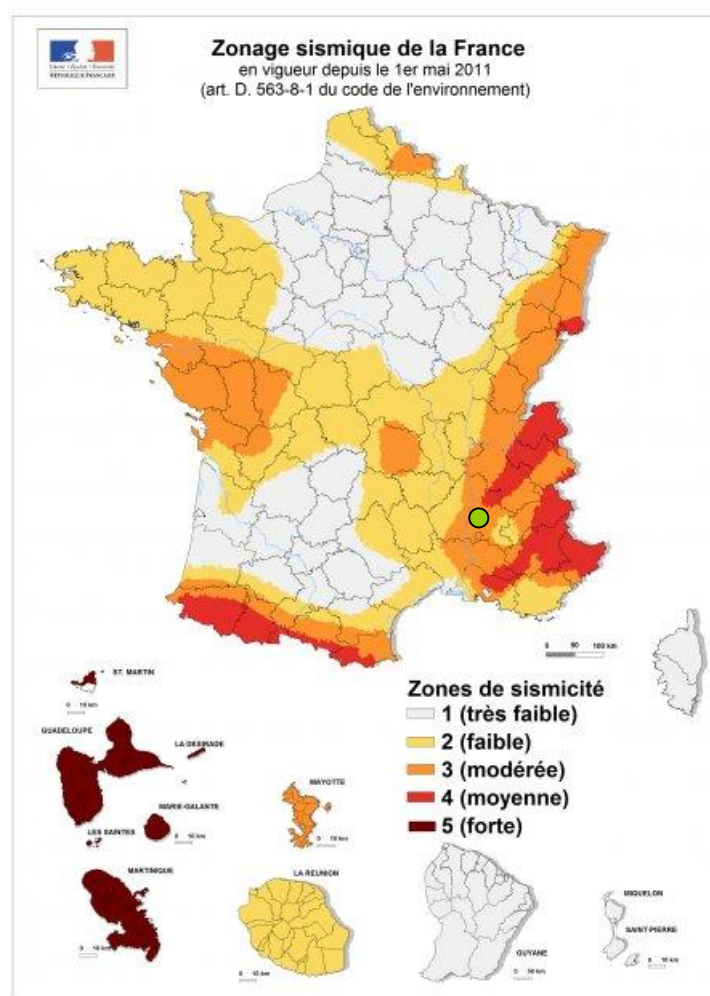


Fig. 2.5 : Zonage sismique du territoire français

La forme des croix de Saint-André permet qu'un des bois de la croix fonctionne en compression, pendant que l'autre bois fonctionne en traction. Elles évitent la déformation du bâtiment en permettant une « triangulation » de la structure porteuse en bois. Elles sont très visibles sur les plans de coupe (figure 2.6) et les photographies figures 2.7 à 2.9.

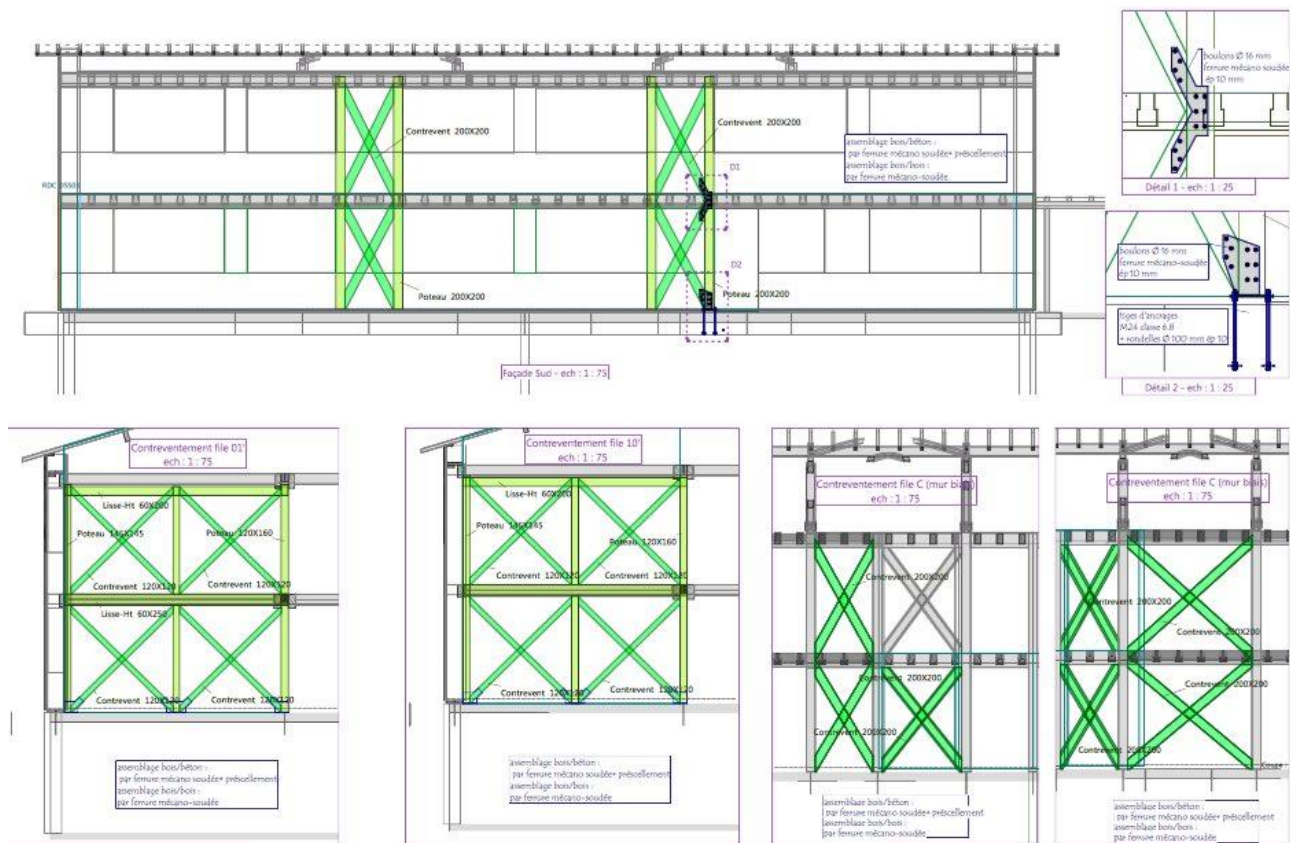


Fig. 2.6 : Plans de coupe mettant en évidence les croix de saint André





Fig. 2.7 : Photographies des croix de saint André du rez-de-chaussée



Fig. 2.8 : Photographies des croix de saint André du R+1

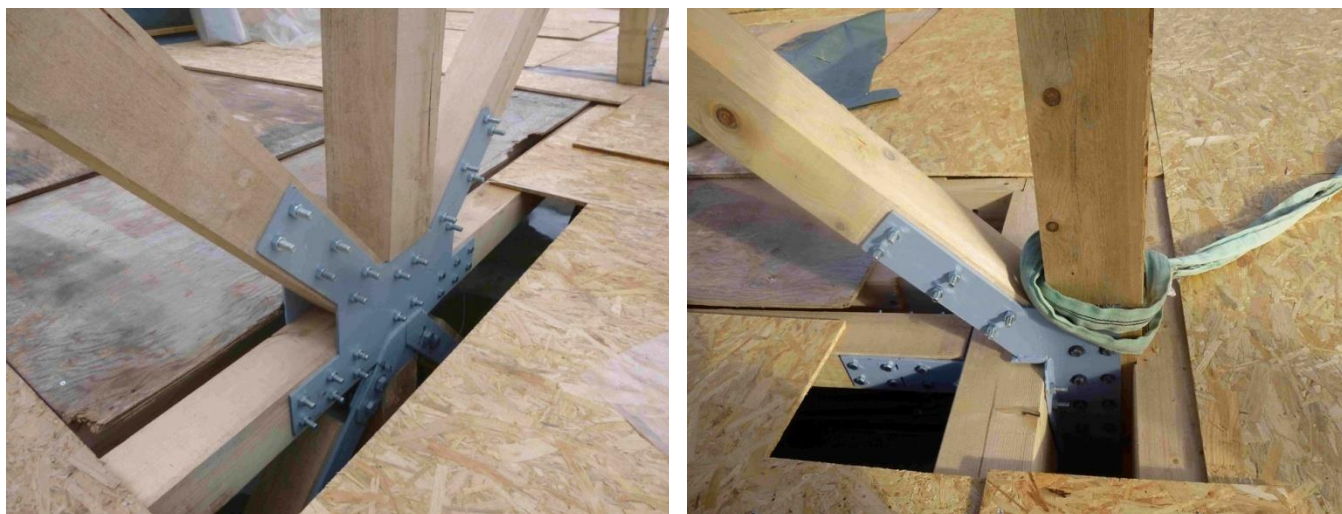


Fig. 2.9 : Photographies des liaisons aux planchers des croix de saint André

Les contreventements intérieurs au bâtiment sont majoritairement cachés par des murs de parement en briques de terre crue (qui participent à l'apport d'inertie, cf. 2.1.2) comme le montre la figure 2.10.



Fig. 2.10 : Parement en briques de terre crue des croix de saint André

Il y a aussi quelques croix de saint André derrière les plaques de plâtres, par exemple attenant au local visioconférence au rez-de-chaussée et au local reprographie au R+1.

2.3.2 Autres solutions possibles

Outre les croix de saint André mises en œuvre dans LowCal, d'autres solutions structurelles permettent d'assurer un respect des normes sismiques avec un plancher bois rempli de masse.

La solution la plus classique est d'utiliser des voiles béton. Cette solution a le grand avantage de faciliter les intégrations (réservation des sorties ventilation, portes le traversant, ...). Elle permet aussi à inertie équivalente d'être moins épaisse que le système croix de saint André et parement en brique. D'une manière générale, il est plus contraignant de construire en bois qu'en béton. Reformulé autrement :

construire en bois demande plus de détails et de finesse de conception, d'anticipation et d'interactions dans l'équipe de maîtrise d'œuvre (architecte et bureau d'études structure) dès les premières phases de conception, que construire en béton. L'architecte est moins libre, il y a plus de contraintes architecturales sur la disposition des pièces. Il n'est pas possible d'avoir des plateaux ouverts (*open-space*) partout et cela rend difficile de déplacer les cloisons. Alors qu'en béton, les cellules des sanitaires et des escaliers suffisent généralement pour la structure. Par contre, comme déjà indiqué en 2.1.1, il vaut mieux éviter de mélanger une filière humide avec des filières sèches et l'énergie grise du béton est beaucoup plus importante.

Une autre possibilité est d'utiliser, en lieu et place d'une structure bois poteaux-poutres, une structure à base de panneaux contreventant de type CLT (*Cross Laminated Timber*), type Kerto®, KLH® ou une filière française de CLT. Cette technique, plus chère, permet d'avoir le bois apparent possible à l'intérieur du bâtiment, mais une attention doit alors être apportée à la problématique de passage des réseaux. Cette technique permet surtout une souplesse architecturale, que n'apporte pas le système ossature bois poteaux-poutres, et tout comme ce dernier un montage rapide. L'apport d'inertie est envisageable via des chapes et des cloisons lourdes. Le traitement acoustique sera alors le même que pour un plancher classique. Il faut également noter que le CLT peut aisément être mixé avec du béton ou une structure bois classique.

On peut aussi envisager des contreventements en acier devant les fenêtres. Cette solution a été mise en œuvre sur la cité scolaire de St-Cirgues-en-Montagne (07), qui est également un bâtiment en ossature bois et isolation paille (figure 2.11).



Fig. 2.11 : Façade sud de la cité scolaire de St-Cirgues-en-Montagne

3 Synthèse

Solution envisageable	Principal avantage	Inconvénients
Planchers remplis avec de la terre locale séchée	Matériau local	Problématique du séchage à résoudre et difficulté de mise en œuvre. Acoustiquement compliqué
Planchers remplis avec des rebuts de briques de terre crue industrielle et argile sèche en vrac	Matériau « déchet », facile à mettre en œuvre	Impact du transport de la matière première. Acoustiquement compliqué. Disponibilité du déchet ?
Planchers en dalle béton	« Classique », savoir faire généralisé	Forte énergie grise et mélange de filière humide avec matière sèche
Planchers non inertiels et toutes les cloisons inertielles	Facilite le traitement acoustique du plancher	Largeur des cloisons plus importante. Très faible modulabilité.
Cloisons en briques de terre crue locale	Matériau local	Pas forcément possible sur tous les chantiers, nécessité de trouver un lieu pour le séchage et travail manuel difficile à massifier
Cloisons en briques de terre crue industrielle (extrudée voire comprimée)	Généralisable sans difficulté	Impact du transport de la matière première
Cloisons en pisé	Matériau local	Plus cher que cloisons en briques de terre crue
Cloisons en torchis	Matériau local	Moins d'inertie et plus cher que cloisons en briques de terre crue
Structure à base de panneaux contreventant de type CLT	Souplesse architecturale	Plus chère