

# La Poutinière

**Maison fonctionnant sans installation de chauffage et à énergie très positive**



## Dossier technique

**Olivier SIDLER**

*Courriel : [olivier.sidler@posteo.net](mailto:olivier.sidler@posteo.net)*

**Avril 2025 (V2)**

## Table des matières

1 – Pourquoi une maison sans chauffage ?	p. 3
2 - Cahier des charges de la Poutinière	p. 5
3 - Processus de conception d'une maison sans chauffage	p. 6
4 - Conception et caractéristiques de la Poutinière	p. 9
4 - 1 La question délicate des fondations	p. 9
4 - 2 Caractéristiques de l'enveloppe et des matériaux	p.10
4-2-1 Choix des matériaux de structure et de remplissage	p.10
4-2-2 Caractéristiques des différentes parois	p.13
4-2-3 Les surfaces vitrées	p.15
4-2-4 Le traitement des ponts thermiques	p.15
4 - 3 Inertie thermique complémentaire et confort d'été	p.17
4 - 4 L'étanchéité à l'air – Le test	p.20
4 - 5 La ventilation	p.22
4 - 6 La production d'eau chaude sanitaire	p.25
4 - 7 La cuisson	p.28
4 - 8 L'éclairage	p.28
4 - 9 La production d'électricité photovoltaïque	p.28
4 - 10 L'aménagement intérieur	p.29
4 – 11 L'infiltration des eaux pluviales des surfaces imperméabilisées	p.30
5 - Suivi instrumenté	p.32
6 - Consommations et bilans prévisionnels énergie et environnement	p.33
6 - 1 Consommation d'électricité	p.33
6 - 2 Premier bilan environnemental	p.34
7 - Les coûts	p.35
8 - Choix des locataires	p.37
Annexe 1 : Plans	p.38
Annexe 2 : Photos	p.41
Annexe 3 : Quantités et masses de tous les composants mis en œuvre	p.42

## 1 – Pourquoi une maison sans chauffage ?

Qui n'a pesté lorsque sa chaudière est tombée en panne en plein hiver, ou quand il fallait payer une facture de combustible exorbitante ? Qui ne s'est interrogé devant les coûts de plus en plus élevés des installations de chauffage pourtant de plus en plus petites avec la pénétration de réglementations de plus en plus contraignantes ? Et qui n'a été pris d'une certaine panique lorsque la guerre en Ukraine a éclaté et que la question de se passer du gaz russe s'est posée ?

Mais qui n'a entendu parler du déséquilibre de la balance commerciale nationale « à cause » de l'importation de produits gaziers et pétroliers nécessaires au chauffage des habitations et qui ne s'est ému face aux dizaines de milliards nécessaires pour importer ces ressources non renouvelables d'une part, et à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre, donc du changement climatique, d'autre part ?

Alors forcément, le concepteur se demande un jour si on ne pourrait pas pousser encore un peu plus loin le niveau « d'isolation » du logement afin de faire en sorte que, grâce aux apports gratuits de toute nature, il ne soit plus besoin de chauffage.

Ainsi naît l'idée d'un logement ou d'une maison sans installation de chauffage. Dès le début des années 2010, alors qu'il nous fallait de nouveaux locaux, on s'est posé la question à ENERTECH, notre bureau d'études spécialiste d'énergétique du bâtiment. On a voulu construire un bâtiment sans l'affubler d'une installation de chauffage, en se disant avec clairvoyance qu'il valait mieux qu'on essaie ce concept ambitieux sur nous plutôt que sur un client qui n'hésiterait pas à nous conduire devant un tribunal en cas de problème, ce qui n'était quand même pas une hypothèse à éliminer....

Les bureaux d'ENERTECH sont occupés depuis le mois d'août 2016 et le fonctionnement réel du bâtiment a dépassé nos espérances : il consomme encore moins que ce que nous avons imaginé et sa toiture solaire (panneaux photovoltaïques) produit 7 fois plus d'électricité que ce que le bâtiment consomme, et effectivement on peut se passer d'une installation de chauffage bien que dans les périodes les plus froides et nuageuses de l'hiver il soit nécessaire de recourir à un très faible appoint électrique de chauffage (2,2 kWh/m<sup>2</sup>/an) désormais assuré par des lampes infrarouges destinées à l'élevage de poussins placées au-dessus de chaque personne ! Mais la grande force de ce bâtiment de bureaux c'est d'une part le travail très soigneux de réduction des besoins de chauffage, le soin maniaque pour l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, mais également le travail de réduction de toutes les consommations d'électricité. Les serveurs consommaient très peu : celui gérant les emails n'absorbait que 6 W, le serveur général 23 W. L'éclairage avait été optimisé dans chaque bureau et la puissance installée était inférieure à 2 W/m<sup>2</sup> mettant plutôt l'accent sur la « tâche » lumineuse du plan de travail (réglable à volonté en fonction des besoins de chacun), conduisant à une consommation annuelle de 0,64 kWh/m<sup>2</sup>. Le système de ventilation double flux décentralisé avait permis de supprimer tous les réseaux et de pouvoir utiliser la ventilation « à la carte » divisant par 20 les consommations les plus faibles observées jusque là (0,21 kWh/m<sup>2</sup>/an ont été obtenus). L'ensemble des consommations des usages spécifiques de l'électricité ne représentent que 3,68 kWh/m<sup>2</sup>/an, si bien qu'avec le besoin insignifiant mais résiduel de chauffage la consommation annuelle d'électricité est de 5,9 kWh/m<sup>2</sup>/an. Faire seulement un bâtiment sans chauffage n'aurait pas été suffisamment démonstratif. Il fallait aussi maîtriser l'ensemble des consommations d'énergie du bâtiment et même s'intéresser à l'énergie grise....



Façade Sud des locaux d'ENERTECH  
(les carrés blancs sont les prises et rejets  
d'air de la ventilation double flux  
décentralisée par bureau)

Le principe était donc validé pour un bâtiment tertiaire. Mais il fallait encore le valider pour une maison d'habitation. C'est le projet de **la Poutinière**.

Mais nous voulions aller au bout de notre démarche. Car il existe déjà des logements sans installation de chauffage. Mais en les examinant de près il y a la plupart du temps un biais caché. Ça peut être une très importante consommation d'électricité de jour comme de nuit (et toute cette consommation finit en chaleur assurant ainsi le chauffage). On voulait donc une maison qui consomme très peu d'électricité. Ça peut être aussi une maison avec un renouvellement d'air aléatoire, voire inexistant, ce qui constitue effectivement une très importante économie d'énergie (au détriment de la santé). On voulait donc un débit de renouvellement d'air permanent, constant et élevé (avec un contrôle par mesure des taux de CO2). Ça peut aussi être à travers la présence d'un petit poêle à bois. Ça peut encore être de n'avoir que 16°C de température ambiante.... Pour que l'expérience soit parfaitement neutre, il ne fallait pas que nous soyons les habitants de cette maison mais plutôt que celle-ci soit mise en location et que les occupants n'aient pas manifesté jusque là un intérêt particulier pour les questions énergétiques. Nous voulions, au risque de nous planter (et de dire pourquoi nous nous étions plantés), réaliser une maison offrant des conditions de confort acceptables par tout un chacun, saine, avec une consommation globale (tous usages) réellement très faible. Et pour être honnêtes avec nous-mêmes il fallait que tout cela soit très précisément mesuré sur une longue période. La mesure reste le vrai juge de paix.

Enfin, on peut se demander pourquoi s'attacher à la réalisation d'une maison neuve et pas d'une rénovation. Pour deux raisons. La première est que depuis plus de 20 ans nous avons beaucoup travaillé sur la rénovation. Il paraît très difficile en rénovation d'arriver à supprimer totalement la consommation de chauffage. Mais nous avons aussi déjà réussi à atteindre des consommations de 20 kWh/m<sup>2</sup>/an. C'était une priorité, nous l'avons réalisée, et il n'est ni nécessaire ni vraisemblablement possible d'aller économiquement plus loin. La seconde raison trouve sa justification dans la dernière version de la Directive Européenne Bâtiment. Elle exige de tous les Etats Membres qu'en 2050 l'intégralité de leurs parcs de bâtiments soit « zéro émission nette ». Pour cela il faut que les bâtiments aient de très faibles consommations d'énergie (sur les 5 usages traités par le DPE) et que cette énergie soit produite localement par des énergies renouvelables. Cela semble encore impossible à beaucoup. Nous avons aussi voulu relever ce défi là qui se résume donc à faire des bâtiments réellement à énergie positive, non pas sur 5 usages, mais sur la totalité des usages.

## 2 – Cahier des charges de la Poutinière

L'objet principal de la Poutinière est de valider, pour le secteur résidentiel, la faisabilité de maisons sans installation de chauffage déjà acquise dans le secteur tertiaire de bureaux, et qui produisent plus d'énergie qu'elles en consomment.

Quels sont les problèmes qu'on a cherchés à résoudre ? Voici notre cahier des charges :

1 – Les bâtiments sont devenus beaucoup trop compliqués, il faut les simplifier. Car la complexité offre une apparence de confort supplémentaire, mais elle coûte très cher et rend le bâtiment beaucoup moins fiable et source de nombreuses pannes. La complexité recourt à beaucoup de technologies, mais celles-ci ont souvent de très gros besoins en matières premières de plus en plus rares, et leur fabrication consomme énormément d'énergie. Il faut donc que la maison soit ce qu'on appelle « low tech » et utilise le moins possible de techniques sophistiquées.

2 – Dans les constructions neuves, le chauffage consomme de moins en moins d'énergie, mais il nécessite une installation la plupart du temps assez lourde et relativement coûteuse. Il génère aussi des coûts d'abonnement et de maintenance qui reviennent cher, et il est l'objet de pannes. Pour l'utilisateur ce serait donc idéal si on arrivait à supprimer totalement l'installation de chauffage. Cela lui coûterait beaucoup moins cher et lui éviterait la crainte d'une panne ou d'un changement de chaudière en plein hiver.

3 – Mais il est possible de ne pas avoir de chauffage et de se chauffer grâce à une consommation excessive d'électricité (hormis les usages de lavage/séchage, toutes les consommations d'électricité finissent en chaleur dans un logement). Alors il faut aussi réduire le plus possible les consommations des usages spécifiques de l'électricité, bureautique, éclairage, ventilateurs, etc.

4 – En 2007, le Grenelle de l'Environnement avait fixé comme objectif à la réglementation thermique et environnementale qui devait être en vigueur à partir de 2020 d'imposer que les bâtiments neufs soient tous à énergie positive. Ça ne s'est pas fait, mais c'est une évidence que la maison à construire devra être à énergie positive, et ce sur l'ensemble des usages sans exception (pas seulement les 5 usages réglementaires comme beaucoup de bâtiments BEPOS). Ce faisant elle sera par avance déjà conforme à la Directive Européenne Bâtiment (Directive 2024/1275) parue en avril 2024 qui impose qu'en 2050 tous les parcs de bâtiments (résidentiel et tertiaire) soit « zéro émission net », ce qui suppose une très faible consommation d'énergie et une production locale (par énergie renouvelable) de cette consommation. A cette fin, la maison sera équipée d'une toiture photovoltaïque.

5 – Lorsqu'on arrive à ce niveau d'exigences, il est important d'être cohérent. Or atteindre un très faible niveau de consommation d'énergie pendant l'exploitation d'un bâtiment ne suffit pas. Il faut en effet travailler sur « l'énergie grise ». C'est l'énergie nécessaire à la fabrication, la mise en œuvre et l'élimination des matériaux en fin de vie. Dans un bâtiment très faible consommateur, l'énergie grise peut représenter plusieurs décennies de la consommation : ça devient l'objectif principal ! La maison devra donc chercher à utiliser le plus possible de matériaux à faible contenu énergétique. Il s'agit en général de matériaux « biosourcés » (donc issus de la nature) ou de matériaux recyclés.

6 – Mais il est toujours risqué de n'avoir qu'un seul indicateur pour s'orienter, en l'occurrence l'énergie ! On doit aussi considérer la qualité sanitaire des logements. Beaucoup de matériaux de construction libèrent des polluants parfois dangereux comme les phtalates (perturbateurs endocriniens) ou des composés organiques volatiles (comme le formaldéhyde). Une réflexion et des solutions devront aussi être apportées sur cet aspect qui concerne à nouveau le choix des matériaux mais aussi la qualité de l'air. Ce qui suppose un système de ventilation efficace, offrant un débit permanent élevé (car les émissions polluantes des matériaux sont permanentes).

7 – L'expérience déjà acquise depuis de nombreuses années montre que les bâtiments très peu déperditifs car très bien isolés, se comporte comme des bouteilles thermos. Ce qui est très bien en hiver mais peut devenir dangereux en été où tout apport de chaleur dans la thermos, quelle que soit sa nature, ne peut plus ressortir et peut conduire à des surchauffes et à un déficit de confort d'été : on est dans le Sud. Ici tout le monde climatisé. La maison devra apporter le confort d'été sans climatisation.

8 – Enfin : il est important de démontrer qu'une maison de ce type, si elle existe, ne doit pas présenter de surcoût important par rapport à une maison ordinaire.

La construction de la maison a commencé peu après le début de la guerre en Ukraine. Il a donc paru amusant et presque logique de la baptiser « La Poutinière ». Car finalement c'est un peu grâce au maître du Kremlin que la nécessité de s'affranchir de la dépendance aux énergies fossiles s'est avérée inévitable et urgente, plus particulièrement et en priorité à celles venant de Russie....

### 3 – Processus de conception d'une maison sans chauffage

La conception commence toujours, et avant toute chose, par un travail avec l'architecte. En l'occurrence Pierre Traversier (qui a déjà été l'architecte des bureaux d'Enertech) et Anne Grimaud



de Charmes sur Rhône en Ardèche qui ont toujours su s'adapter aux contraintes locales des Architectes des Bâtiments de France.... Mais ce travail avec l'architecte se structure en deux temps. Dans un premier temps on définit ensemble les grandes orientations que doit respecter le projet. On crayonne, on gribouille, on acte les points les plus importants et à partir de cela l'architecte fait un premier dessin.

Ce premier dessin va, dans un second temps, faire l'objet d'une évaluation énergétique. Pour cela on réalisera une simulation énergétique dynamique.

Suivons donc le déroulement chronologique des opérations.

Dans un premier temps, le fil conducteur du travail avec l'architecte consiste à réduire le plus possible les déperditions thermiques et à maximiser les apports gratuits, donc essentiellement les apports solaires. Tout cela ne peut se faire qu'en bonne intelligence avec l'architecte :

- **On positionnera d'abord la maison sur le terrain** de manière à ce qu'elle bénéficie le plus possible d'apports solaires, notamment si la parcelle plein Sud qui jouxte la notre est un jour construite et présente un masque, mais aussi pour faire en sorte que le terrain puisse être valorisé à d'autres fins (potager, massifs floraux, aires de jeux, etc).
- **La façade principale sera orientée plein sud.**
- Même si cela bride d'une certaine façon l'expression architecturale **il est important que le bâtiment ait une certaine compacité.** D'abord parce que c'est le meilleur moyen de limiter la quantité de surfaces déperditives, mais aussi parce que cela coûte moins cher. La maison est un cube, ce qui est relativement pauvre architecturalement, il faut en convenir, mais l'important n'est-il finalement pas que ce soit l'intérieur qui soit le plus chaleureux, le plus accueillant ? Les gens ne vivent pas devant leur logement mais à l'intérieur ! Et puis le but est de démontrer que cette construction est d'un coût raisonnable ! Tout doit être fait pour optimiser la dépense...
- Il faut ensuite **traiter ensemble la question des ouvertures.** On va essayer de ne pas ouvrir au nord car cette façade ne voit jamais le soleil en hiver. On vitrera ce dont on a vraiment besoin en façade est. Car elle reçoit le soleil du matin qui sera en général bénéfique, sauf en été. Bien que symétrique par rapport à la trajectoire du soleil, la façade ouest ne pourra pas être traitée de la même manière que la façade est à cause des risques très importants de surchauffes en été. Car en fin de journée, quand le soleil d'été atteint la façade ouest, la température extérieure élevée a déjà eu tendance à faire grimper la température intérieure et tout apport solaire serait alors catastrophique pour le confort. On vitrera donc le moins possible la façade ouest.
- **Supprimer le plus possible de ponts thermiques.** Quand les parois sont toutes très bien isolées, les ponts thermiques peuvent devenir l'une des principales sources de déperditions. Ils sont partout : abouts de dalle, éléments de structure, pas de porte, tableaux et appuis de fenêtres, etc. Ce travail peut être commencé avec l'architecte et continuera avec la réalisation des carnets de détails.

Ceci va permettre à l'architecte de faire une première esquisse. Dans un second temps, cette esquisse doit maintenant faire l'objet d'une évaluation énergétique par simulation thermique dynamique. Il s'agit d'une modélisation permettant, à partir d'un très grand nombre d'informations, de calculer « l'état thermique » du bâtiment au pas de temps de l'heure pendant une année complète. Pour chaque heure de l'année on pourra ainsi connaître les températures dans les différentes zones ainsi que les flux énergétiques, donc finalement les consommations. C'est un travail assez lourd qu'on ne fait en général pas pour une maison individuelle et qu'on réserve plutôt à des bâtiments d'une certaine importance. Mais s'agissant d'une maison d'un type très particulier

cherchant à se passer totalement d'installation de chauffage, il était nécessaire de procéder ainsi. Car les résultats de la simulation vont être extrêmement précieux. Ils vont permettre de préciser et d'affiner les principaux éléments du premier dessin architectural. Ainsi pourra-t-on :

- Vérifier **comment évolue la température intérieure durant les mois d'hiver** et voir si on est bien en situation de pouvoir se passer d'une installation de chauffage. A défaut il faudra renforcer le niveau d'isolation (nature et épaisseur des matériaux isolants) et/ou améliorer les apports gratuits, essentiellement les apports solaires par augmentation de la taille des menuiseries extérieures ou modification des caractéristiques des vitrages (facteur solaire, etc). Il faudra bien sûr assurer un renouvellement d'air suffisant (on a besoin de 0,6 vol/h en continu) et s'assurer que les dispositions prises permettent la récupération de chaleur sur l'air extrait, l'efficacité de cette récupération faisant partie des paramètres ajustables en fonction des matériels existants sur le marché.
- **Modifier les dimensions des menuiseries extérieures** pour faire en sorte que les apports solaires soient suffisants en hiver si le niveau de température intérieure est insuffisant.
- **Vérifier comment évolue la température intérieure en été** afin de voir si elle ne dépasse pas la valeur de 28°C pendant plus de 40 h. Pour atteindre cet objectif, tout en respectant les contraintes de l'hiver, on peut à nouveau jouer sur la surface des menuiseries extérieures, sur l'occultation du rayonnement solaire au moyen de BSO (Brise Soleil Orientable), mais aussi sur l'inertie thermique du bâtiment. L'inertie thermique est constituée essentiellement par les parties massives intérieures à l'enveloppe isolante, qui vont agir comme un amortisseur des variations de température : dans un bâtiment muni d'une forte inertie la température varie peu en été comme en hiver. Pour l'hiver c'est une garantie de bonne gestion des apports de chaleur de toute nature. Et en été cela va éviter des montées en température insupportables. La chaleur sera accumulée dans les masses. Mais attention, comme on le verra plus loin, la nuit il faudra remettre à l'extérieur cette chaleur accumulée durant la journée.

Il se peut aussi que, pour maintenir le confort d'été on soit obligé de réduire le niveau d'isolation qu'on a prévu jusque là, ce qui n'est possible que si on est toujours en situation de se passer d'installation de chauffage.

- On peut également, dans le cas de cette maison, voir **quel est l'impact du nombre de personnes** qui l'occupent. Car chaque personne est une source de chaleur, certes faible, mais qui peut contribuer significativement à l'équilibre thermique d'une maison dont les besoins sont très faibles.

Dans la pratique on fait, à partir de la « version de base » de la simulation dynamique obtenue à partir du premier dessin de l'architecte, des « variantes » dans lesquelles on fait évoluer tous les paramètres intéressants. On peut alors rediscuter avec l'architecte pour voir avec lui quelles sont les variantes qu'il peut accepter et qui peuvent satisfaire en même temps le projet énergétique. Après ce travail de simulation dynamique on sait précisément quelles sont les différentes modifications qu'il faut apporter au projet pour qu'il atteigne les objectifs que l'on s'est fixés, sachant qu'hormis la taille des menuiseries extérieures, le dessin architectural n'est en principe pas modifié, ce qui est le cas si avant de démarrer son travail l'architecte a pu s'entendre avec l'énergéticien sur les grandes options à respecter (compacité, orientation, etc).



Cette manière de concevoir est la plus satisfaisante et c'est elle qui conduit à obtenir des résultats par suivi de mesure les plus proches des consommations estimées.

Disons d'emblée que la simulation dynamique montre qu'on n'arrive jamais à une consommation de chauffage nulle. Elle est de l'ordre de 100 kWh/an (1 kWh/m<sup>2</sup>/an), c'est à dire moins qu'un réfrigérateur performant... On est donc bien là où on voulait arriver... D'autant plus que l'utilisateur peut ponctuellement accepter 18,5°C, ou même 18°C la nuit, pour éviter de chauffer.

## 4 – Conception et caractéristiques techniques de la Poutinière

### 4 – 1 La question délicate des fondations

Les fondations d'une maison sont généralement en béton armé. Elles dépendent de la nature du sol et des charges qu'elles doivent supporter (poids de la maison et charges additionnelles réglementaires : charges des planchers, et charges climatiques (neige et vent)).

A ce stade on se trouve confronté à la très mauvaise habitude des bureaux d'étude en général qui ont, chevillée au corps, l'angoisse de l'insuffisance des résultats et qui « plombent » leurs calculs à tous les niveaux d'arrondis et de coefficients de sécurité conduisant *in fine* à un surdimensionnement grotesque et totalement inutile des ouvrages (phénomène largement observé chez les thermiciens qui ont toujours des chaudières *a minima* deux fois trop puissantes). Il s'agit là d'une approche générant un gaspillage de matières premières parfaitement injustifié. Il fallait donc que notre projet ne recourt à aucun surdimensionnement. Car ces premières études conduisaient à des fondations de château-fort pour cette construction plutôt légère.... Une aberration.

Tout a donc été repris, depuis les calculs de descente de charges aux capacités du sol (l'étude de sol doit être interprétée convenablement, sans considérer que tous les terrains sont des sables mouvants !), pour conduire à une cure de jouvence ayant fait singulièrement maigrir les fondations. Elles paraissaient plus compatibles avec l'objet du projet.

Mais une fondation en béton armé reste une solution « perturbante » sur le plan environnemental : fort contenu énergétique et fortes émissions de gaz à effet de serre (GES) à la fois à cause de la présence d'acier et de ciment. Nous avons donc étudié une solution alternative : ancrer la maison sur 20 pieux métalliques de 2,5m « vissés » en terre. C'est la société canadienne Technopieux qui propose cette solution. Les premiers bilans ont paru très intéressants. La solution par pieux conduisait à 2 fois moins d'énergie grise que la solution béton armé, à 3,3 fois moins d'émissions de carbone, 8 fois moins de béton mais 152 kg d'acier de plus.

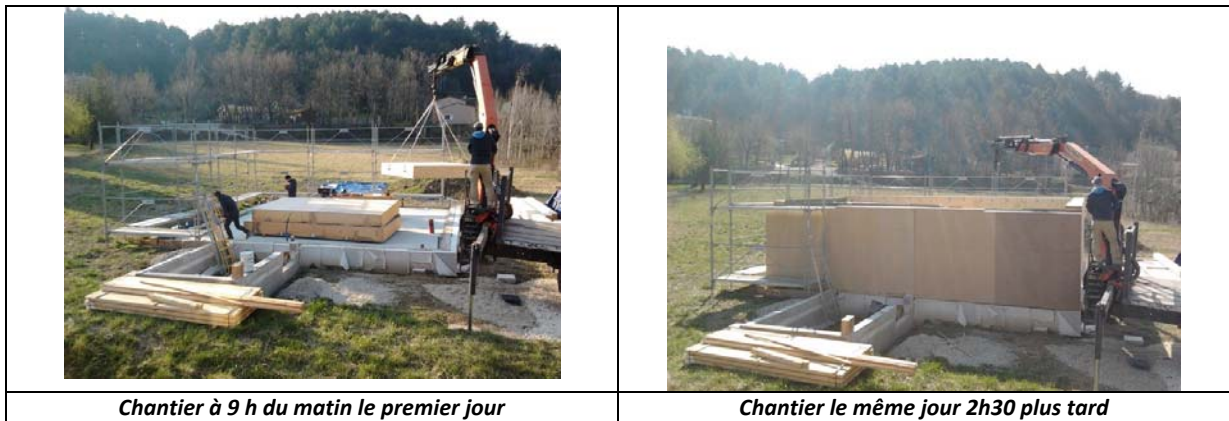
Il était toutefois nécessaire de s'inquiéter de la durée de vie des aciers en terre. Trente ans selon le fabricant. Alors que la maison doit être conçue pour 100 ans. La solution proposée par Technopieux pour atteindre une telle durée de vie consistait à utiliser une protection par courant imposé. On obtenait cela au moyen d'un redresseur qui alimentait à très faible tension la structure métallique des pieux. Mais en comparant énergie et émissions de GES sur les périodes de construction et d'exploitation des solutions béton armé et pieux, nous avons eu une drôle de surprise. Car, certes, le courant consommé par le redresseur est faible (38 W) mais après 100 ans, la solution par pieux aura consommé 10 fois plus d'énergie primaire grise et émis deux fois plus de GES que la solution avec du béton armé !

C'est donc finalement une solution classique de fondation en béton armé qui a été adoptée, malgré son coût environnemental, et en l'absence, pour le moment, d'alternative plus performante.

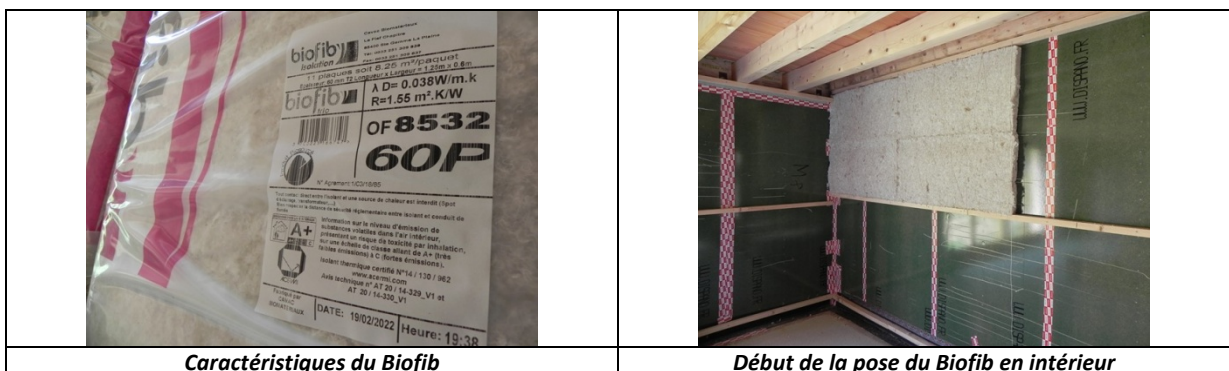
## 4 – 2 Caractéristiques de l'enveloppe et des matériaux

### 4.2.1 Choix des matériaux de structure et de remplissage

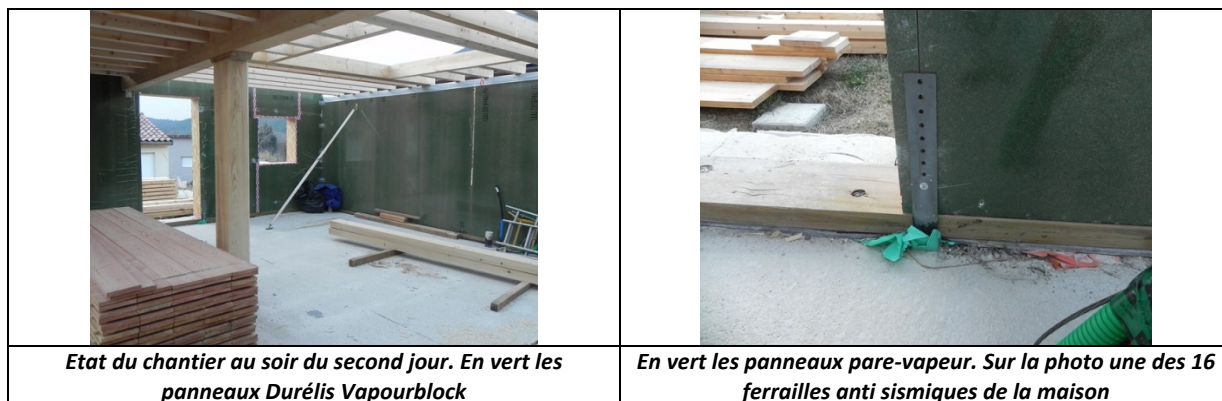
La maison est faite en bottes de paille placées à l'intérieur de caissons en bois préfabriqués en atelier puis grutés sur le chantier. Ils offrent la structure (en résineux) et le contreventement (panneaux de medium MDF et panneaux Durélis). La paille vient d'une exploitation située à moins de 10 km. Choisir la paille c'est permettre à la maison de ne pas être émettrice de CO2 mais au contraire d'être capable de stocker dans ce matériau (tout comme le bois) de très grandes quantités de CO2.



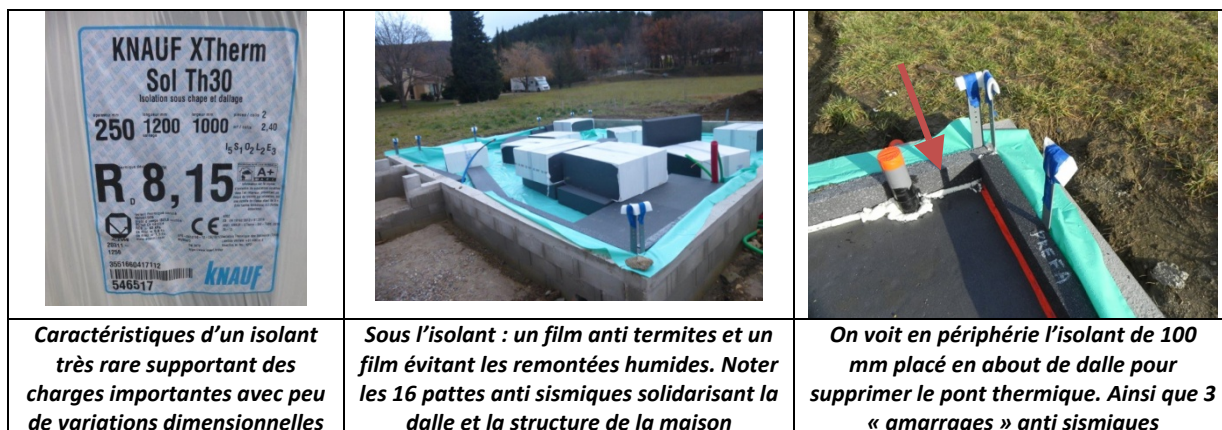
L'isolation est renforcée par 60 mm de Biofib (mélange coton/lin/chanvre) et 40 mm de paille de riz de Camargue côté intérieur. Finition par panneau de 12 mm de Fermacell recouvert d'un enduit de terre. Au rez de chaussée l'isolation comporte encore à l'extérieur 60 mm de fibre de bois haute densité servant de support à un enduit perméable à la chaux. Cet isolant supplémentaire n'existe pas à l'étage car le revêtement extérieur est constitué par un bardage en douglas. Tous ces matériaux sont biosourcés et stockent également du CO2.



Sur leur face intérieure les caissons sont fermés par un panneau Durélis qui est un pare-vapeur. C'est une erreur, probablement sans conséquence dans le cas d'espèce, mais il aurait été préférable d'utiliser un panneau ou un film frein vapeur susceptible de laisser éventuellement passer la vapeur dans les deux sens (inversion de sens que l'on peut théoriquement rencontrer en été lorsque la température intérieure de la maison est inférieure à la température extérieure).



Le plancher bas est constitué d'une dalle flottante en béton reposant sur 250 mm d'un polystyrène quasiment incompressible (d'où ce choix contestable mais incontournable) puisque c'est lui qui doit pouvoir supporter le poids de la dalle et de toutes ses charges (c'est-à-dire 150 kg/m<sup>2</sup>). En périphérie de cette dalle on a placé 100 mm de polystyrène destiné à supprimer le pont thermique d'about de dalle avec les murs extérieurs. Cette paroi sur terre plein est la seule faite de matériaux conventionnels (béton et polystyrène) mais c'étaient les seuls matériaux existants satisfaisant aux contraintes constructives.... C'est, côté matériaux, le point faible de cette maison car le béton armé traditionnel est un fort émetteur de gaz à effet de serre. L'utilisation de béton bas carbone est encore très confidentielle et difficile sur de très petits chantiers comme celui-ci.



Les murs de soubassement, en général enterrés, ont été très fortement isolés par 188 mm d'un polystyrène expansé (Knauf Perimaxx) profilé pour permettre le drainage :



*Isolation des soubassements par 188 mm de polystyrène expansé*

Les combles perdus sont isolés par 500 mm de ouate de cellulose soufflée. Il s'agit de papier recyclé. C'est un isolant qui a énormément d'avantage. D'abord c'est un matériau issu du recyclage d'un déchet (les vieux papiers) et les rongeurs le détestent car lorsqu'ils circulent dans l'isolant le matériau se referme derrière eux à l'inverse du polystyrène ou de la laine de verre qui créent des canaux de circulation. Il est beaucoup moins cher que toutes les solutions traditionnelles en matériaux fibreux. Lui aussi va constituer un stockage de carbone.

Les planchers intermédiaires sont presque ordinaires puisqu'ils sont entièrement en bois. Mais ils contiennent une importante quantité de briques de terre crue destinée à augmenter l'inertie de la maison. En effet les constructions en bois sont en général de type « léger » et ont peu d'inertie. Elles sont donc souvent soumises à des variations importantes de température incompatibles avec le confort et la gestion énergétique nécessaires dans cette maison. Au total 10 tonnes de briques ont été placées dans le plancher haut du rez de chaussée (photo de droite) et 5 tonnes dans le plancher haut de l'étage.



Enfin, tout le cloisonnement intérieur est en bois. Il s'agit d'un ensemble comprenant 60 mm de Biofib, qui est un des meilleurs atténuateurs acoustiques, encapsulé dans deux parois de lambris.



*Cloisonnement sur la cage d'escalier*

La porte du logement est de marque Bieber (fabricant français). Elle est en bois avec une âme isolante.  $U_d = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

#### 4.2.2 Caractéristiques des différentes parois

Les tableaux suivants fournissent pour chaque type de paroi, les différentes couches de matériaux qui la composent et leurs caractéristiques physiques :

<b>A MURS EXTERIEURS</b>				
N°	Eléments (de l'extérieur vers l'intérieur)	Epaisseur [mm]	Conductivité thermique [W/mK]	Résistance thermique [m²K/W]
<b>Soubassement</b>				
1	Polystyrène expansé Knauf Perimaxx	188	0,033	6,05
2	Bloc béton aggloméré	200		p.m.
<b>RdC</b>				
1	Enduit sur isolant (pour mémoire)			
2	Fibre de bois Pavawall de Pavatex	60		1,35
3	Panneau de médium MDF	10	0,039	0,26
4	Paille locale (moins de 10 km)	370	0,058	6,38
5	Panneau Durélis Vapourblock	13	0,14	0,09
6	Biofib Trio	60	0,04	1,55
7	Paille de riz	40	0,039	1,03
8	Fermacell	12,5	0,33	0,04
<b>Etage</b>				
1	Bardage Douglas naturel	21	0,13	0,16
2	Lame d'air	27		
3	Panneau de médium MDF	10	0,039	0,26
4	Paille locale (moins de 10 km)	370	0,058	6,38
5	Panneau Durélis Vapourblock	12	0,14	0,09
6	Biofib Trio	60	0,04	1,55
7	Paille de riz	40	0,039	1,03
8	Fermacell	12,5	0,33	0,04

<b>B DALLE BASSE SUR TERRE PLEIN</b>				
N°	Eléments (du bas vers le haut)	Epaisseur [mm]	Conductivité thermique [W/mK]	Résistance thermique [m²K/W]
1	PSE Knauf Xtherm Sol Th30	250	0,03	8,15
2	Béton désolidarisée sur les bords extérieurs avec PSE Knauf Xtherm ultra 32 mur de 100 mm (R=3,1 m²K/W) :	150	2	0,08
3	Chape	80	2	0,04
4	Carrelage terre cuite	8		
<b>C PLANCHER HAUT SOUS COMBLES PERDUS</b>				
N°	Eléments (du bas vers le haut)	Epaisseur [mm]	Conductivité thermique [W/mK]	Résistance thermique [m²K/W]
1	Planche Douglas	23	0,13	0,18
2	Panneau de protection MDF	6	0,039	0,15
3	Briques terre crue	72	0,75	0,10
4	Ouate de cellulose soufflée	500	0,04	12,50
<b>D PLANCHERS INTERMEDIAIRES</b>				
N°	Eléments (du bas vers le haut)	Epaisseur [mm]	Conductivité thermique [W/mK]	Résistance thermique [m²K/W]
1	Planche Douglas	23	0,13	0,18
2	Briques terre crue	125	0,75	0,17
3	Lame d'air	10		
4	Plancher mélèze	20	0,14	0,14
<b>E CLOISONS INTERIEURES</b>				
N°	Eléments	Epaisseur [mm]	Conductivité thermique [W/mK]	Résistance thermique [m²K/W]
1	Lambris sapin	12	0,13	
2	Biofib Trio	60		1,55
3	Lambris sapin	12	0,13	

### 4.2.3 Les surfaces vitrées

Le bilan des surfaces vitrées, après optimisation par simulation dynamique, sont les suivantes :

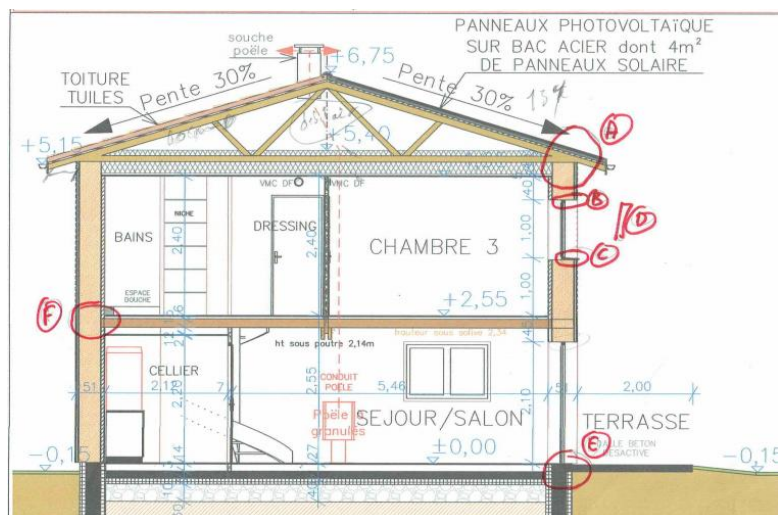
Pièces	Shab	Fenêtre 1		Fenêtre 2		Fenêtre 3		Sv	Sv/Shab
		L	H	L	H	L	H		
Cuisine	9	1,5	1					1,50	16,7%
Séjour	37,38	1,5	1	4	2,1	0	0	9,90	26,5%
Dégagement	3,82	0,2	1					0,20	5,2%
Salle d'eau	5,96	0,8	0,8					0,64	10,7%
Placard	0,86							0,00	0,0%
<b>Total RdC</b>	<b>57,02</b>							<b>12,24</b>	<b>21,5%</b>
Dégagement	3,17							0,00	0,0%
Chambre 1	11,03	1,6	1,25					2,00	18,1%
Chambre 2	14,11	2,3	1,25					2,88	20,4%
Chambre 3	14,17	2,3	1,25					2,88	20,3%
Dressing	4,45	0	0					0,00	0,0%
Salle de Bains	5,96	0,8	0,8					0,64	10,7%
<b>Total R+1</b>	<b>52,89</b>							<b>8,39</b>	<b>15,9%</b>
<b>Total général</b>	<b>109,91</b>							<b>20,63</b>	<b>18,8%</b>

Le taux de surface vitrée global est de 18,8% ce qui est finalement peu mais a été dicté par la recherche de meilleures conditions de confort en été. Il est de 21,5% au rez de chaussée. A noter que les surfaces habitables sont celles connues au stade initial du projet. Elles sont un peu moins élevées dans le projet final.

Les menuiseries extérieures sont de marque Bieber (fabricant français). Elles sont en bois avec triple vitrage à revêtement peu émissif, lames d'argon et warm edge. Le classement à l'étanchéité à l'air est A4 pour toutes les menuiseries.

### 4.2.4 Le traitement des ponts thermiques

Comme indiqué précédemment, quand les parois sont très isolées, le poids des ponts thermiques dans le bilan devient très important. Il convient de trouver une solution pour minimiser (car on ne peut jamais les supprimer) chacun d'eux. Les principaux ponts figurent sur ce schéma :



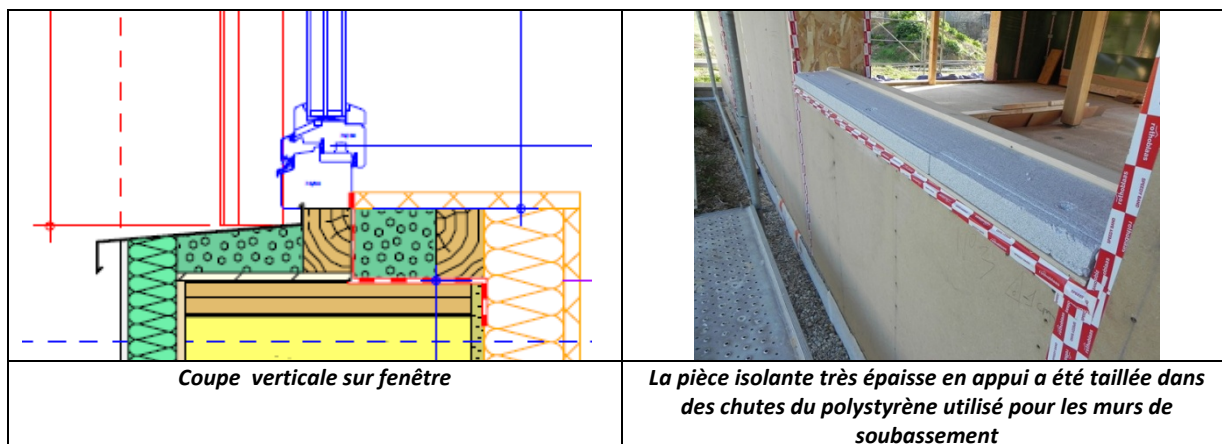
Emplacement des principaux ponts thermiques

- Type A : jonction mur extérieur/Plancher bas des combles

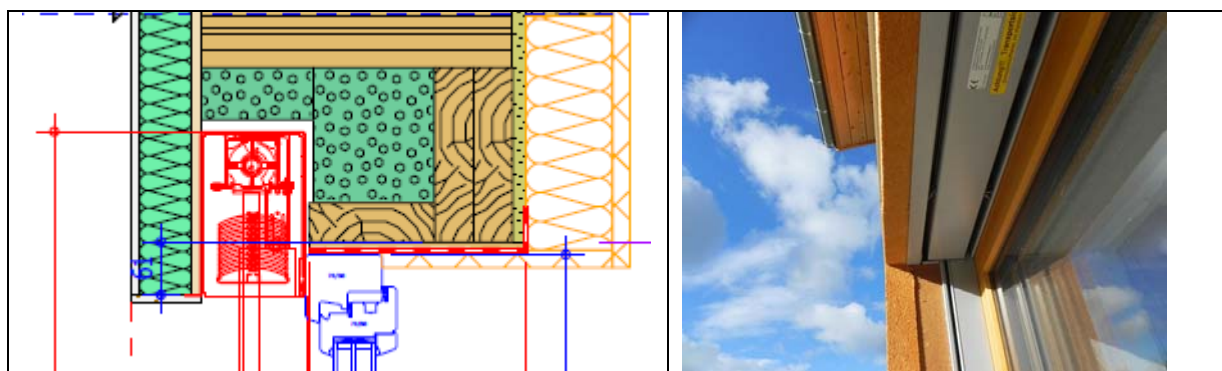
Traitement : par chevauchement de l'isolant en combles sur l'isolant mural intérieur et le caisson en paille.

- Type B, C et D : jonction menuiseries extérieures/mur extérieur (linteau, retours latéraux en tableau, appui)

Traitement : toutes les parties dormantes des menuiseries ont été isolées à l'intérieur comme à l'extérieur grâce à l'isolation des appuis, des linteaux et des tableaux des fenêtres, supprimant ainsi presque tous les ponts thermiques :



La réduction du pont thermique est un peu plus difficile au droit des coffres de BSO (brise soleil) :



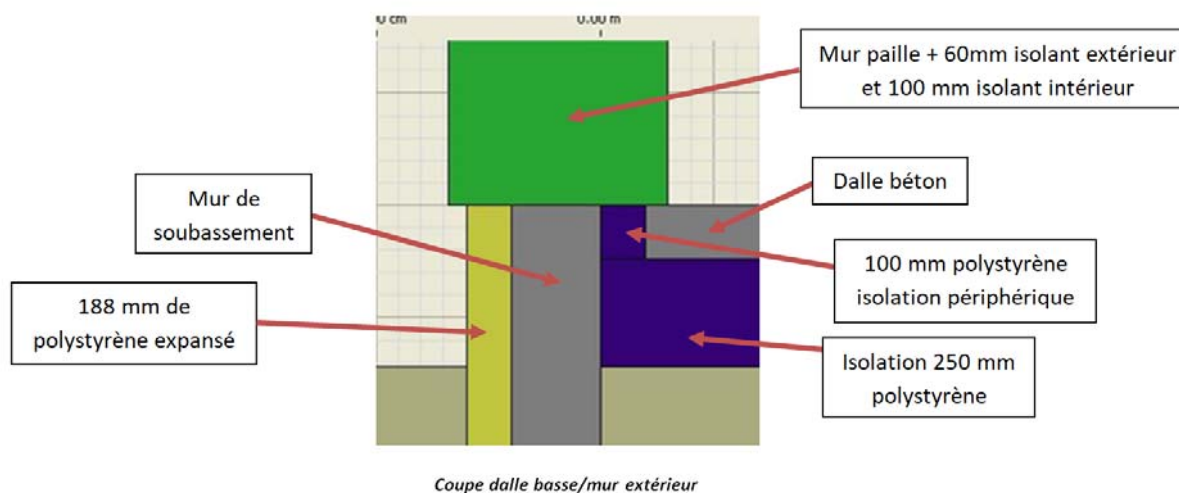
Les retours tableau sont également traités :





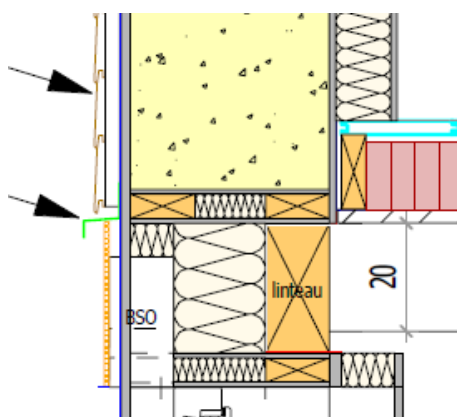
➤ Type E : jonction mur extérieur/dalle basse

Traitement : il a consisté à placer un isolant en totalité sur la surface extérieure du mur en établissant une continuité entre l'isolant du soubassement (qui descend jusqu'à la semelle de fondation) et les différentes couches isolantes du mur.



➤ Type F : jonction plancher intermédiaire/mur extérieur

Traitement : suivant coupe ci-dessous



#### 4 – 3 Inertie thermique complémentaire et confort d'été

Il a déjà été évoqué précédemment la nécessité de donner un peu d'inertie à une maison en matériaux plutôt « légers » (par comparaison au béton, aux briques pleines ou aux pierres). Le principal objectif est d'améliorer le confort d'été. Celui-ci est fixé un peu empiriquement (car chaque individu a son opinion sur les conditions de ce qui est confortable) en imposant que la température intérieure d'air ne dépasse pas 28°C pendant plus de 40h entre le 1<sup>er</sup> juin et le 30 septembre.

L'inertie n'est évidemment pas la seule condition pour qu'un logement soit confortable en été. Le comportement de l'utilisateur est majeur. Il peut se résumer au respect des actions suivantes :

- Fermer et positionner tous les brise-soleil orientables dès 8 h du matin. On dosera la quantité de lumière que l'on accepte dans le logement, sachant que le minimum sera toujours le mieux.
- Maintenir parfaitement fermées toutes les portes et fenêtres de l'habitation car il fait en journée la plupart du temps plus chaud dehors que dedans.
- Ouvrir en grand les fenêtres durant la nuit afin d'évacuer toute la chaleur qui a été emmagasinée durant la journée dans les structures (et surtout les briques de terre crue).
- Réduire le plus possible l'utilisation des appareils électroménagers car toute leur consommation d'électricité finit en chaleur et ne peut plus sortir dans cette maison thermos.
- Ne jamais arrêter la ventilation double flux (ce qui est de toute façon interdit réglementairement) car elle rafraîchit l'air extérieur avant de l'introduire dans le logement en cours de journée. Si la nuit on ouvre les fenêtres en grand comme recommandé précédemment il n'est pas pour autant souhaitable (ni réglementaire) d'arrêter la VMC.

L'inertie va agir comme un amortisseur des variations de température en stockant la chaleur excessive la journée, ce qui évitera effectivement les surchauffes. Ceci est rendu possible parce que les matériaux d'inertie sont des matériaux lourds dont la capacité thermique est élevée : il faut beaucoup d'énergie pour élever leur température d'un degré. Mais il est essentiel que durant la nuit cette chaleur soit rejetée à l'extérieur. Sinon, il fera un peu plus chaud chaque jour....

Bien que les résultats de simulation suivant n'aient pas été obtenus avec les caractéristiques définitives de la maison et des masses de briques (l'enveloppe est encore plus isolée que dans le projet et il y a plus de briques dans le plancher intermédiaire), il est intéressant d'examiner comment l'inertie peut modifier les conditions de confort.

Les courbes qui suivent représentent les fréquences cumulées des températures pour les mois d'été (du 1er juin au 30 septembre). La représentation en fréquences cumulées consiste à classer les températures observées n'importe quand au cours de la période d'étude, de la plus élevée à la plus faible. La taille de l'échelle en abscisse correspond donc à la durée totale de la période d'étude. Cette représentation permet de visualiser facilement la part du temps total d'observation (en abscisse) pendant lequel la température dépasse une valeur donnée, lue en ordonnée.

Les premières simulations, sans aucune inertie supplémentaire, conduisaient à des niveaux de températures estivales inacceptables :

Pièces	Nombre heures où T>28°C	% du temps où T>28°C
Séjour	919	32%
Chambre 1	1 438	50%
Chambre 2	1 042	36%
Chambre 3	1 041	36%

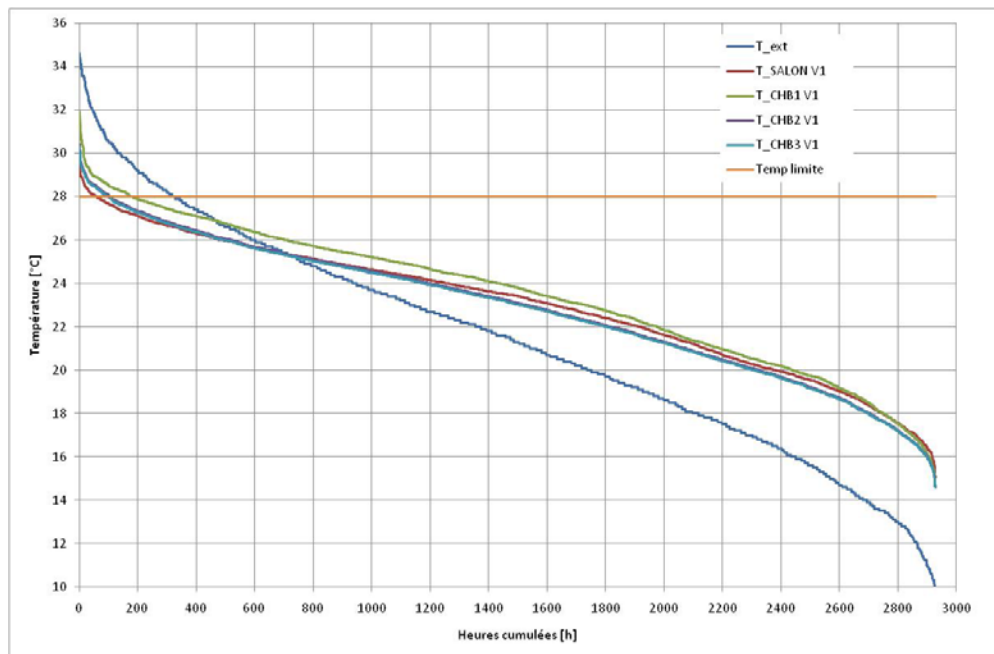
***Nombre d'heures où la température dépasse 28°C en l'absence d'inertie (du 1/6 au 30/9)***

On est très loin du critère de 40h au-dessus de 28°C. Il est à noter que pendant cette période la température extérieure dépasse 28°C pendant seulement 317 h (soit 11% du temps).

Trois cas d'étude, avec ajout d'inertie variable, sont traités dans ce qui suit.

- Cas 1 (**V1**) Seul le plancher intermédiaire bénéficie de briques de terre crue d'une hauteur de 6 cm.
- Cas 2 (**V 12**) Seul le plancher intermédiaire bénéficie de briques de terre crue d'une hauteur de 15 cm.
- Cas 3 (**V 13**) : le plancher intermédiaire bénéficie de briques de terre crue d'une hauteur de 9cm, et le plancher haut du R+1 de briques d'une hauteur de 6cm.

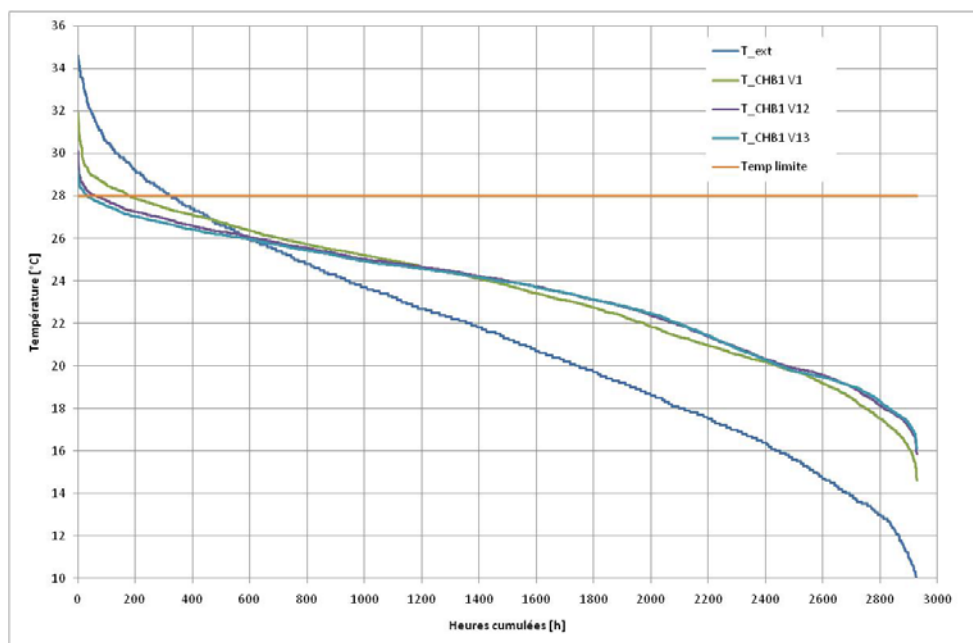
Dans tous les cas on suppose que les fenêtres sont ouvertes la nuit et que le taux de ventilation naturelle est alors de 3 vol/h.



*Courbes des fréquences cumulées des températures des 4 pièces de vie – Cas 1 (6 cm de terre crue dans le plancher intermédiaire)*

La présence de 6 cm de terre crue dans le plancher intermédiaire (soit un peu plus de 5 tonnes) améliore déjà considérablement la situation, mais pas suffisamment : le temps de dépassement du critère de 40°C est de 58 h pour le séjour, 100 h pour les chambres 2 et 3 et 179 h pour la chambre 3.

Le graphique ci-dessous compare cette première version avec celles des cas 2 et 3 dans le cas particulier de la chambre 1 qui est la plus critique.



*Courbes des fréquences cumulées des températures de la chambre 1 pour les 3 cas d'inertie*

L'apport d'une augmentation de l'inertie est patent pour le confort d'été de la chambre 1 : le nombre d'heures où  $T > 28^{\circ}\text{C}$  passe de 179 h à 62 h dans le cas 2 et à 33 h dans le cas 3. Il est intéressant d'observer que la masse de briques mise en jeu dans les cas 2 et 3 est identique, mais dans ce dernier cas la surface d'échange de chaleur est plus grande entre l'air ambiant et la masse (3 surfaces d'étage de plancher contre 2 dans le cas 2) ce qui permet une bien meilleure efficacité des briques. Ceci est d'ailleurs une constante que l'on retrouve dans toutes les constructions : beaucoup de masse de matériaux inertes ne suffit pas et il est très souvent préférable de disposer d'une masse moindre mais d'une beaucoup plus grande surface d'échange de chaleur.

Dans le cas 3, le temps pendant lequel  $T > 28^{\circ}\text{C}$  dans le séjour n'est plus que de 5 h. Il est, comme on l'a vu, de 33 h pour la chambre 1, de 3 h pour la chambre 2 et de 1h pour la chambre 3.

Au cours du chantier ces ajouts ont encore été renforcés puisqu'il y a finalement 12 cm (et pas 9) dans le plancher intermédiaire (soit 10 tonnes) et 6 cm comme prévu dans le plancher haut de l'étage (soit 5 tonnes).

Toutes les briques hyper sèches ont été achetées dans l'Oise à la briqueterie de Wulf (5 Anc. Rte de Paris, 60000 Allonne).

#### **4-4 L'étanchéité à l'air – Le test**




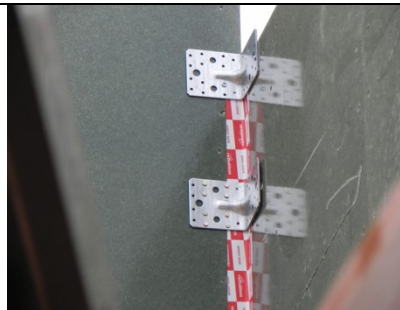

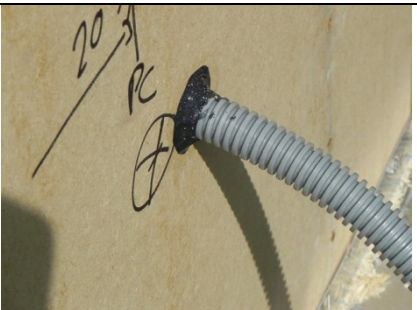
On sait aujourd'hui qu'il est impossible d'avoir un logement à très faible consommation, pas plus qu'un logement confortable, sans un traitement approfondi et très rigoureux de l'étanchéité à l'air. Ce n'est pas un problème complexe, mais cela exige d'être méticuleux et rigoureux. Toute jonction de composants, toute traversée de la paroi extérieure par un tuyau ou un fourreau, doit faire l'objet d'une étanchéité, soit au moyen d'adhésif à longue durée de vie (plusieurs centaines de mètres pour un logement), soit au moyen de pièces spéciales désormais présentes sur le marché. Mais on se rappellera qu'avant toute chose, l'étanchéité à l'air c'est d'abord un bon dessin, une bonne conception des assemblages. Car l'étanchéité à l'air c'est d'abord une bonne conception. Walter Unterrainer, architecte Autrichien du Vorarlberg, avait déclaré il y a quelques années dans

une conférence à Grenoble « Chez nous en Autriche, le joint au pistolet commence là où l'intelligence s'arrête ». Sans commentaire....

La porte d'entrée doit être munie d'un joint périphérique et l'ensemble des menuiseries extérieures doit bénéficier du classement A4 (classement AEV).

Les coffres des BSO ne sont pas en contact avec l'intérieur du logement comme pouvaient l'être les coffres de volets roulants. Ils sont motorisés et l'espace entre fourreau et câble électrique a été soigneusement colmaté si bien qu'il n'y a pratiquement plus aucune entrée d'air possible par ce biais. A noter que pour tous les fourreaux venant de l'extérieur (électricité, eau, téléphone, etc), l'espace entre le fourreau et les conduits ou conducteurs intérieurs a été très soigneusement mastiqué.

Quelques images pour montrer ce qui a été fait.

		
<p><i>Jonction entre eux des panneaux pare vapeur Vapourblock</i></p>	<p><i>Détail de la jonction du pare vapeur intérieur et du frein vapeur passant derrière le solivage avant de se retourner sur le plancher des combles</i></p>	<p><i>Habillage périphérie des menuiseries et jonction menuiseries/murs</i></p>
		
<p><i>L'adhésif d'étanchéité de la jonction de deux panneaux d'angle du pare vapeur doit passer sous les équerres de fixation</i></p>	<p><i>Jonction de la dalle et du mur extérieur</i></p>	<p><i>Etanchéité des passages de fourreau au travers de l'enveloppe extérieure</i></p>

Quand le clos et le couvert sont terminés, on peut procéder à un test d'étanchéité à l'air du logement. Pour cela on vérifie bien qu'il y a de l'eau dans les siphons divers (WC, lavabos, éviers, baignoires, douches, etc), et on neutralise tous les orifices fonctionnels de ventilation (dans cette maison ce sont toutes les bouches d'insufflation et d'extraction de la ventilation mécanique). On peut alors mettre la maison en dépression (ou en surpression) pour atteindre une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur. Pour cela on utilise une « porte soufflante ».

Il s'agit d'un équipement développé au début des années 80 à l'université de Berkeley, déjà intéressée à l'époque par la question des infiltrations d'air restée longtemps confidentielle, voire inconnue, en France. On remplace une des ouvertures du logement (en général la porte d'entrée) par une membrane imperméable soigneusement compressée dans le dormant de la porte afin de rendre

cette jonction le plus étanche possible. On place dans cette membrane un ventilateur calibré. Deux sondes de pression permettent de mesurer la pression à l'extérieur et à l'intérieur du logement. Les caractéristiques et la vitesse du ventilateur associées à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur permettent de déterminer le débit d'air.



*Porte soufflante*

Le test se fait en déterminant ce débit pour différentes valeurs de la différence de pression. La valeur retenue dans toute l'Europe est celle correspondant à un écart de pression de 50 Pa. On rapporte le débit de fuite observé pour cet écart de pression de 50 Pa au volume du logement. On obtient le fameux «  $n_{50}$  ». La valeur maximale de cet indice a été définie à l'origine par le label allemand Passivhaus et fixée à 0,6 vol/h.

Lors de notre test dans la maison, les seules infiltrations qui ont pu être détectées étaient toutes au niveau des gonds des fenêtres, là où le double joint d'étanchéité est le moins efficace. **La valeur mesurée de  $n_{50}$  a été de 0,45 vol/h.**

Pour en savoir plus sur l'étanchéité à l'air on pourra consulter la fiche technique de la MAF (Mutuelle des Architectes Français) :

<https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/2023/02/2012-10-Fiche-MAF-Etancheite-T16.pdf>

#### **4 – 5 La ventilation**

La charge de ventilation d'un logement, c'est-à-dire la quantité annuelle d'énergie nécessaire pour chauffer l'air neuf qu'on introduit dans le logement, est très importante. Elle vaut de l'ordre de 30 kWh/m<sup>2</sup>/an. Impossible de procéder de façon traditionnelle dans une maison qui veut se passer d'installation de chauffage. Sans compter qu'une ventilation traditionnelle par introduction d'air neuf au-dessus des fenêtres est très inconfortable, ce qui conduit les occupants à occluser les orifices. Mais dans une maison très étanche à l'air cette pratique serait dangereuse car il n'y aurait pratiquement plus d'arrivée d'air neuf, d'où des risques sanitaires.

Certains préconisent la ventilation naturelle, parce que c'est la solution la plus « low tech ». Certes. Mais souvent ils sont obligés d'associer un petit ventilateur à cette solution qui lui fait perdre son caractère low tech et a déjà un autre nom : c'est la ventilation mécanique simple flux... Cette solution est probablement la plus fausse bonne idée car :

- La ventilation naturelle est très fortement dépendante des conditions climatiques extérieures : vent, température, anticyclone, etc. Il en résulte que le débit dans la maison peut-être nul (les jours d'anticyclone) ou plusieurs fois supérieur aux besoins (les jours de vent fort). Il n'est pratiquement jamais au bon débit. Or la régularité de ce débit est une des conditions essentielles de la qualité intérieure de l'air, déterminée par l'émission de CO<sub>2</sub> des occupants (lorsqu'ils sont là) et surtout par l'émission continue de polluants émis par l'ameublement et les matériaux de la construction (composés organiques volatils comme le formaldéhyde émis par le bois). La qualité de l'air ne sera que rarement satisfaisante avec la ventilation naturelle...
- Si le débit de ventilation est respecté par la ventilation naturelle (c'est-à-dire environ 0,6 vol/h), alors la charge de chauffage sera considérable (de l'ordre de 30 kWh/m<sup>2</sup>/an) et la maison ne pourra jamais être à très faibles besoins, et encore moins capable de se passer d'une installation de chauffage.

Dans les faits, le débit d'air neuf de la ventilation naturelle est très réduit et inférieur à ce qu'il devrait être. Il s'ensuit un déficit de qualité de l'air...

La solution que l'on cherche est connue depuis longtemps : c'est la ventilation mécanique double flux. C'est elle que nous avons mise en place dans la maison. Le principe est simple : l'air neuf est soufflé mécaniquement dans les pièces principales (séjour et chambres) et l'air vicié est extrait dans les pièces humides (cuisine, salle de bains, WC), mais les flux d'air neuf et d'air vicié sont amenés dans un « caisson » à l'intérieur duquel se trouve un échangeur de chaleur permettant de céder à l'air neuf la chaleur de l'air vicié avant que celui-ci ne soit rejeté à l'extérieur.

Si le principe de la VMC double flux est simple, sa conception et sa mise en œuvre doivent être faites de façon très soignée. Les écueils rencontrés sont :

- Des réseaux mal conçus, longs, tortueux, de diamètres sous dimensionnés, conduisant à des débits par pièce non respectés et déséquilibrés,
- Un ensemble trop bruyant, que ce soit au soufflage et/ou à l'extraction dans les pièces,
- Une consommation électrique des ventilateurs trop importante dont l'origine peut être le matériel, le dimensionnement du réseau, sa géométrie, etc.

Les « clés » d'une installation réussie sont :

- Des conduits largement dimensionnés (vitesse d'air inférieure à 3 m/s, voire 2m/s) afin d'avoir de très faibles vitesses d'air ce qui garantit de faibles « pertes de charge », donc de faibles consommations électriques des ventilateurs, et un très grand confort acoustique.
- Une distribution à partir de boites de répartition plutôt qu'une distribution constituée d'un conduit central alimentant les différentes pièces.
- Une distribution en étoile à partir des boites de répartition privilégiant des longueurs de conduit sensiblement identiques pour chaque pièce desservie.
- Une architecture de réseau la plus simple et la plus équilibrée possible (éviter la bouche à l'extrémité d'une antenne beaucoup plus longue que toutes les autres et

qui imposera son niveau de perte de charge au caisson, donc à toute l'installation). Éviter les coudes et préférer les grandes courbures (pas toujours possible !).

- L'utilisation des conduits en matériaux de synthèse (et oui, malheureusement il n'y a pas encore de conduits en matériaux biosourcés !), parfaitement lisses à l'intérieur, parfaitement étanches aux jonctions grâce à des systèmes de raccordement avec joint. Les réseaux de conduits en acier galvanisé étaient peu étanches et compliqués à mettre en œuvre.
- L'utilisation d'un caisson (ensemble ventilateurs, filtres, échangeur) de qualité, si possible labellisé Passivhaus....et si possible français (il y en a d'aussi bons que ceux de marques étrangères, et moins chers).
- Dimensionner l'installation pour avoir un débit d'environ 0,6 volume/h, taux nécessaire pour garantir des teneurs maîtrisées en polluants divers.
- Prendre le parti que ce débit ne dépende pas des usages en cuisine et soit constant, ce qui suppose un débit fixe sur la bouche d'extraction en cuisine.

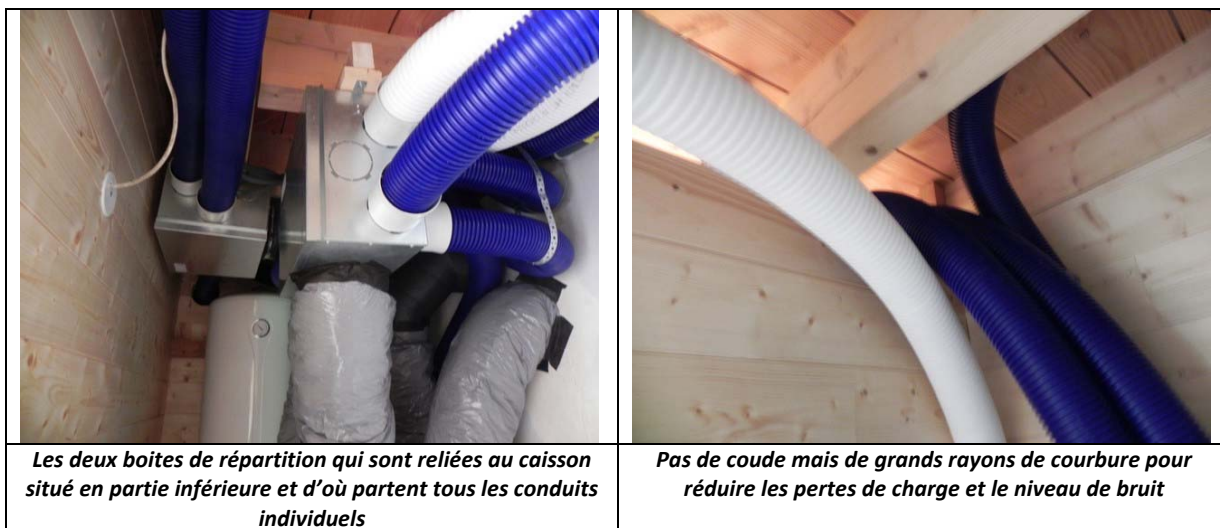
Cette dernière proposition pose la question de savoir comment tenir compte des besoins plus importants de ventilation au moment où on fait la cuisine. L'expérience montre que le basculement des débits au moment de la cuisson avec les dispositifs « à tirette » généralement utilisés ne fonctionnent pas de manière satisfaisante et compliquent singulièrement l'installation. Le « grand débit » est d'ailleurs en général insuffisant. Le parti a été pris ici d'offrir un débit élevé (300 ou 400 m<sup>3</sup>/h) mais pas à partir de la VMC double flux ce qui aurait été impossible. Il s'agit d'une hotte à recyclage munie d'un filtre à graisse et d'un filtre à charbon actif. Mais les filtres à charbon actif sont détériorés en quelques heures par le passage de vapeur d'eau.

Se pose alors la question de savoir s'il est normal d'avoir de grands volumes de vapeur d'eau lorsqu'on fait la cuisine ? Et bien non ! On a besoin d'assurer 100°C à l'eau, donc de fournir à la casserole juste l'énergie nécessaire pour atteindre 100°C. Or la plupart du temps l'énergie sous la casserole est beaucoup trop importante, ce qui conduit à un important gaspillage d'énergie et à la production de vapeur en abondance et de façon inutile puisque que cette vapeur va se condenser sur tous les points froids (ponts thermiques) de la maison où des moisissures vont se développer. L'utilisateur doit donc apprendre à cuisiner avec sobriété en abaissant l'apport d'énergie sous une cocotte minute (un simple léger bruissement de la soupape atteste qu'on est à la bonne pression donc à la bonne température) ou sous une casserole. Dès lors l'utilisation de la hotte à recyclage n'est même plus utile pour une casserole d'eau bouillante ! Elle ne servira finalement que pour les cuissons odorantes comme les grillades, et là le filtre à charbon actif sera parfaitement efficace.

Ce sont ces principes qui ont été mis en œuvre le mieux possible dans la maison. Le caisson choisi n'est pas un caisson de marque allemande. C'est un caisson de marque Aldès, fabricant lyonnais, de type Inspirair Top 300 Classic labellisé Passivhaus. Tous les accessoires de réseau ont été également pris chez Aldès.

L'installation est extrêmement peu consommatrice en électricité : on est sur une consommation annuelle d'environ 220 kWh/an, ce qui est très peu. Sur le plan acoustique on n'entend pas l'installation à moins d'approcher l'oreille des bouches. Le débit mesuré est de 165 m<sup>3</sup>/h (soit 0,62 volume/h).





#### **4 – 6 La production d'eau chaude sanitaire**

En l'absence d'une chaudière ou d'une pompe à chaleur, la production d'eau sanitaire ne peut être assurée que par des ballons électriques. Mais une maison à très faibles besoins en énergie doit améliorer les pratiques courantes. Pour réduire les consommations de la production d'eau chaude sanitaire il faut :

- Limiter les volumes d'eau coulant au robinet et pour cela on mettra en œuvre des limiteurs de débit calibrés et autorégulés. On pourra choisir un calibre de 3 ou 4 litres/minute pour les éviers et les lavabos.
- Préférer la robinetterie présentant un point dur dans la manœuvre de réglage du débit. Ce point dur permet d'avoir un débit un peu limité en deçà du point dur, et si l'opérateur efface celui-ci il a accès à un débit plus élevé (fixé par le limiteur de débit).
- Utiliser de la même manière des douchettes à économie d'eau. Un débit de 7 l/minute est un débit très largement suffisant.
- Réduire les pertes de distribution très importantes qui ont lieu à chaque fois qu'un utilisateur soutire de l'eau chaude. Pour parvenir à lui depuis le ballon, cette eau doit d'abord chasser l'eau froide qui est dans la tubulure, puis chauffer celle-ci et enfin emplir la tubulure d'eau chaude dont on pourra disposer au robinet. Selon la distance entre le point de puisage et le ballon, ce sont plusieurs litres, d'eau chaude au sortir du ballon, qui ont coulé sous forme d'eau froide au robinet. En pure perte. D'où deux actions importantes :
  - Placer les ballons immédiatement à proximité des lieux de puisage.
  - Soigneusement calorifuger les conduites allant du ballon au point de puisage.

- Remédier à l'aspect le plus critique des ballons électriques qui est leur insuffisance criante d'isolation, quoi que prétendent les constructeurs. Il faut donc, quelle que soit la qualité du ballon mis en place, renforcer l'isolation en rajoutant une épaisseur significative de calorifuge.
- Récupérer la chaleur des eaux grises sortant de la douche afin de préchauffer l'eau froide avant sa pénétration dans le ballon d'eau chaude desservant la douche.

C'est à partir de cet ensemble de réflexions qu'a été conçue et réalisée l'installation de plomberie. Plus précisément :

- Deux ballons électriques ont été mis en place, l'un sous l'évier (15 litres), l'autre au rez de chaussée sous la douche qui est à l'étage (80 litres).



- Les ballons ont reçu deux couches d'un isolant réflecteur multicouche 25 composants, les distributions ont été fortement calorifugées (Armaflex 19 mm partout).
- Les robinets mis en place comportent des limiteurs de débit moyennement efficaces mais qui n'ont pas été changés. Les débits mesurés sont les suivants :

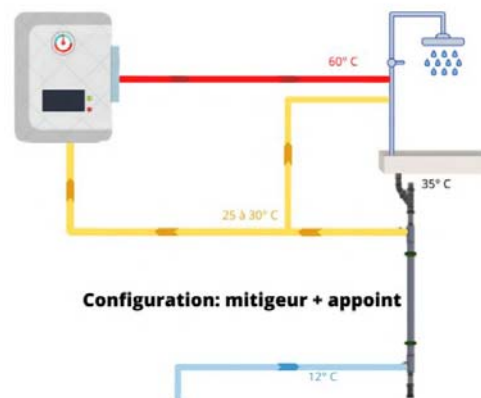
Point de puisage	Position robinet	EF/EC	Débit (l/min)
Evier	Pt débit	EF	4,70-4,75
	Gd débit	EF	8,10-8,20
	Pt débit	EC	4,2
	Gd débit	EC	7,6
Lavabo RdC	Débit unique	EF	5,4-5,5
		EC	5,5
Lavabo R+1	Débit unique	EF	5,0-5,2
		EC	4,8
Douche	Gd ouvert	EF	7,7

Ces débits ne sont pas exceptionnels si bien que s'il le fallait, on disposerait là d'une marge de progression en changeant les limiteurs de débit.

- Un échangeur de chaleur vertical permet la récupération de chaleur des eaux grises de la douche. Marque Evolsys, type Shower Pipe 2100.



L'eau froide sortant du récupérateur de chaleur est dirigée à la fois vers le ballon d'eau chaude et sert également au mitigeage de l'eau de la douche conformément au schéma suivant :



- Les puissances électriques des ballons ont été choisies pour être les plus faibles possibles parmi celles couramment présentes dans l'offre commerciale. Les deux ballons ont une puissance de 1200 W chacun.

A ce jour, après bientôt trois mois d'occupation du logement et de suivi de consommation plusieurs modifications seraient peut-être apportées aux choix précédents.

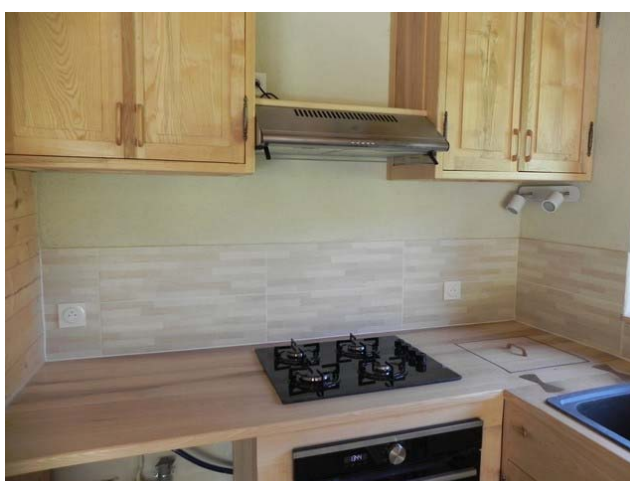
Les déperditions des ballons, même avec une isolation renforcée, restent le principal « fléau » des ballons de stockage. La famille en place semble plutôt faire attention à ses consommations d'eau, et le récupérateur de chaleur sur les eaux usées de la douche contribue aussi à la baisse des besoins, si bien que la consommation électrique d'entretien (maintien en température) des ballons représente plus de 45 % de la consommation totale des deux chauffe-eau. On en tire plusieurs leçons :

- Renforcer encore l'isolation complémentaire placée sur les ballons,
- Réduire le volume du ballon sous évier : 6 l suffirait largement,
- On peut se demander si, à condition que la distance entre salle de bains et cuisine soit courte, il ne serait pas préférable de n'avoir qu'un seul ballon, tant le poids des pertes est lourd.

- Il faut abaisser le plus possible la température des stockages. L'équilibre trouvé à ce jour est 50°C sur l'évier et 56°C sur les usages salle de bains.
- On note qu'un ballon de 80 litres avec récupérateur de chaleur sur les eaux grises de la douche semble suffire à une famille de 4 ou 5 personnes faisant attention à ses usages. C'est la famille qui règle la température dans le ballon en fonction de ses souhaits au moyen d'un dispositif de réglage précis qu'on a mis à sa disposition.

#### **4 – 7 La cuisson**

Les usages cuisson sont assurés par un four électrique dont la puissance ne dépasse pas 2 kW et auraient dû être complétés par des plaques à induction. Mais lorsque nous avons vu que la puissance appelée par ces plaques pouvait atteindre 10 kW, nous nous sommes dit que ce serait totalement incohérent, dans une maison visant à consommer peu et dans laquelle la puissance électrique de tous les usages électriques a été minimisée, d'utiliser un dispositif capable d'absorber 10 kW. Nous avons donc abandonné la solution des plaques à induction pour préférer une solution avec 4 feux alimentés par des bouteilles de propane de 13 kg placées à l'extérieur du logement.



*Les feux de cuisson, le four et la hotte à recyclage*

#### **4 – 8 L'éclairage**

Tous les foyers lumineux plafonniers et muraux livrés avec le bâtiment sont équipés de leds. Les occupants ont quelques lampes sur prises de courant probablement aussi équipées de leds.

#### **4 – 9 La production d'électricité photovoltaïque**

La maison est orientée plein sud. La toiture comporte un pan nord et un pan sud. Ce dernier équipé de bacs acier totalement recouverts de panneaux photovoltaïques.

L'ensemble est constitué de 27 panneaux Marque VOLTEC, modèle VSMS 330Wc pour une puissance crête totale de 8,91 kWc pour 45,5 m<sup>2</sup> de panneaux hors tout. Onduleur FRONIUS SYMO 8.2-3M dont le rendement est de 97,5%. Le rendement des panneaux est donné pour 19,6 %.



*La toiture sud est recouverte de 45,5 m<sup>2</sup> de panneaux photovoltaïques*

	<p><b><i>Onduleur dans le local technique</i></b></p> <p>Le choix de placer l'onduleur dans le local technique adjacent à la cuisine vise à récupérer en hiver la chaleur perdue par l'onduleur dont le rendement n'est « que » de 97,5 %. Sur la saison d'hiver cela conduit donc à un apport gratuit d'environ 100 kWh. Il faudra contrôler que l'apport de chaleur en été ne contribue pas significativement aux surchauffes.</p>
--	--

#### **4 – 10 L'aménagement intérieur**

Tout l'aménagement intérieur a été réalisé en bois, matériau de stockage du carbone et à faible énergie grise.

On a aussi adopté le principe de fournir le plus possible de placards et de penderies dans chaque pièce afin d'éviter aux locataires l'achat des meubles de rangement.

Le plan de travail en cuisine, et le plan des lavabos en salle de bains sont en frêne massif de 30 mm d'épaisseur. Placards de cuisine et de salle de bains également en frêne massif.

<p><b><i>Placard frêne sous évier</i></b></p>	<p><b><i>Le plan de travail en frêne massif</i></b></p>



#### 4 – 11 L'infiltration des eaux pluviales des surfaces imperméabilisées

La loi impose que les eaux pluviales des surfaces imperméabilisées (donc toutes les surfaces de toiture) soient réinjectées dans le sol via des puits d'infiltration. En principe il revient aux collectivités locales de fixer les règles de cette réglementation, mais j'avoue n'avoir rien trouvé....

J'avais dans l'esprit qu'il fallait pouvoir absorber une « pluie décennale », mais ainsi formulé ce terme ne veut absolument rien dire. Car à une fréquence (par exemple tous les dix ans) il faut associer une durée. On parlera donc d'une pluie décennale de 10 minutes, de 3h ou de 12h. Et c'est là que les choses peuvent devenir compliquées pour celui qui veut bien faire....

En étudiant la question je me suis aperçu qu'un certain Montana avait établi une formule fixant la hauteur d'eau d'une pluie en fonction de sa fréquence (quinquennale, décennale, etc), de sa durée et...de deux coefficients locaux dits coefficients de Montana. Et par chance j'ai trouvé ces coefficients pour Montélimar. Selon Montana la hauteur d'eau d'une pluie vaut :

$$H = a * D^{(1-b)} \quad [mm]$$

Où :

- D : fréquence de la pluie (en année)
- a et b : coefficient locaux dépendant de la durée de la pluie

Le tableau suivant fournit ces coefficients pour le site de Montélimar !

Durée	Fréquence [années]	"a"	"b"
	5	5,196	0,443
	10	6,215	0,422
6 à 30'	20	7,028	0,388
	30	7,397	0,363
	50	7,683	0,324
	100	8,012	0,27
	5	8,942	0,603
	10	11,299	0,593
30' à 3h	20	14,221	0,586
	30	16,293	0,582
	50	19,385	0,579
	100	24,442	0,575
	5	14,869	0,709
	10	23,273	0,743
3 à 48 h	20	37,534	0,785
	30	50,054	0,812
	50	72,765	0,848
	100	122,946	0,9

*Coefficients de Montana pour le site de Montélimar*

Ceci permet de déterminer les hauteurs de pluie dans les différentes configurations de fréquences et de durée de pluie :

Résultats :	Hauteur d'eau [mm] après une pluie de							Durée en
	6'	30'	3h	6h	12h	24h	48h	heures ou en
Fréquence [années]	6	30	180	360	720	1440	2880	minutes
5	14,1	34,5	67,4	82,4	100,9	123,4	151,0	
10	17,5	44,4	88,4	105,6	126,2	150,9	180,3	
20	21,0	56,3	114,6	133,1	154,4	179,3	208,1	
30	23,2	64,6	132,9	151,4	172,4	196,4	223,8	
50	25,8	76,6	160,2	178,0	197,8	219,8	244,2	
100	29,6	95,9	206,7	221,5	237,4	254,4	272,7	

Exemple : à Montélimar, la hauteur d'eau d'une pluie trentennale de 3h est de 132,9 mm, et celle d'une pluie trentennale de 12h de 172,4 mm.

La surface de toiture de la maison et de l'abri voiture étant de 134 m<sup>2</sup> on peut déterminer le volume utile de stockage en fonction des caractéristiques du tableau précédent :

Fréquence	6'	30'	3h	6h	12h	24h	48h
5	1,9	4,6	9,0	11,0	13,5	16,5	20,2
10	2,3	5,9	11,8	14,2	16,9	20,2	24,2
20	2,8	7,5	15,4	17,8	20,7	24,0	27,9
30	3,1	8,7	17,8	20,3	23,1	26,3	30,0
50	3,5	10,3	21,5	23,9	26,5	29,5	32,7
100	4,0	12,9	27,7	29,7	31,8	34,1	36,5

Je me suis fixé d'atteindre un volume utile de stockage de 12,5 m<sup>3</sup>, ce qui permet d'infiltrer par exemple la totalité des eaux d'une pluie décennale de 3h, ou d'une pluie centennale de 30'.

Techniquement, un puits d'infiltration n'est pas une citerne (dans laquelle il n'y aurait aucune infiltration). Dans une fosse assez large on place une ou plusieurs buses perforées et l'on remplit

l'espace entre le reste de la fosse et les buses avec du gros gravier. On estime que dans le volume de gravier ainsi constitué la porosité (donc le taux de « vide ») est de 40%. La longueur de la fosse mesure ici 3,9 m, sa largeur 2,2m et sa profondeur 3m. Il y a deux buses toute hauteur (3m) dont le diamètre intérieur est de 1,0m. On dispose finalement d'un volume que peut occuper l'eau de 4,7 m<sup>3</sup> dans les buses et de 7,8 m<sup>3</sup> entre les graviers, soit 12,5 m<sup>3</sup> au total.

## 5 – Le suivi instrumenté

Une expérience comme celle de la Poutinière n'a d'intérêt que si elle fait l'objet d'un suivi détaillé par mesure. La durée des campagnes de mesure a été fixée à 2 années. Toutes les mesures sans exception sont faites au pas de temps de dix minutes.

En conséquence on a essayé de suivre la plupart des paramètres importants :

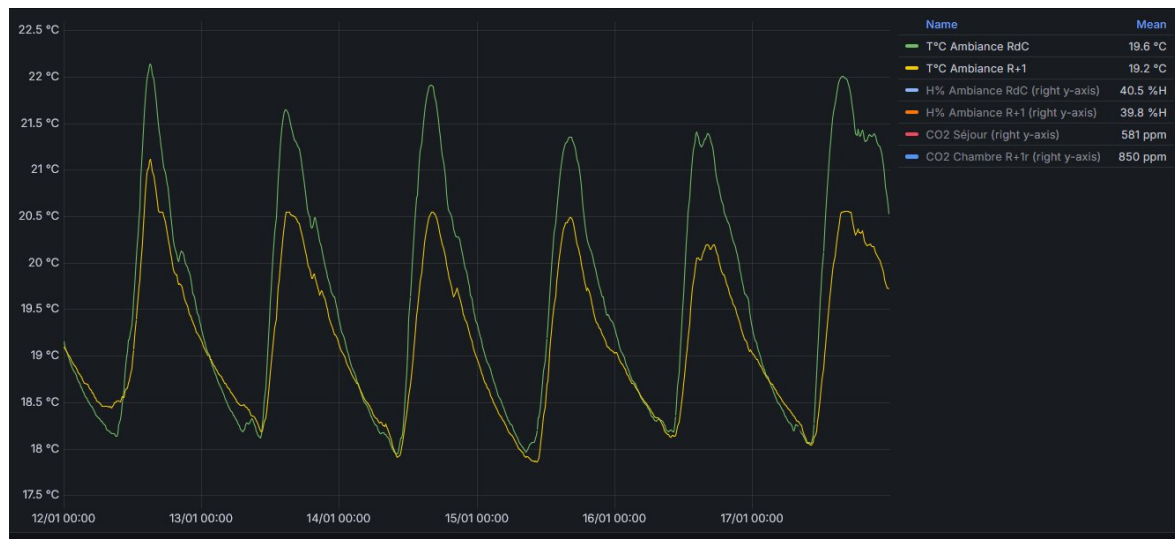
- Mesures des consommations électriques : 27 mesureurs ont été mis en place dans la maison, auxquels s'ajoute un comptage sur le PV. Tous les usages sont suivis.
- Un mesureur attaché à un petit convecteur électrique, au cas où les occupants éprouveraient le besoin d'un appoint thermique,
- Température, hygrométrie et concentration de CO2 sont suivies au rez de chaussée et à l'étage
- Températures entrée/sortie air neuf/air vicié de la ventilation double flux
- Centrale météo sur le bâtiment voisin des bureaux d'Enertech.
- Compteurs d'eau : au nombre de 8 ils permettent de suivre tous les flux dans la maison :

Nom	Emplacement	DN	Nature du comptage
C1	Alimentation générale	20	Totalité eau consommée
C2	Alimentation LV	15	Conso LV
C3	Alimentation EF sous évier	15	Conso EF évier
C4	Alimentaion chauffe-eau évier	15	Conso EC évier
C5	Alimentation pt eau extérieur	15	Conso arrosage extérieur
C6	Alimentation du LL	15	Conso LL
C7	Alimentation des 2 WC	15	Conso WC
C8	Alimentaion EC salles d'eau	15	Conso EC salles d'eau

Tous les compteurs d'eau sont munis d'émetteurs d'impulsions. Le poids de l'impulsion est de 1 litre.

L'ensemble des mesures est téléchargé toutes les 24h sur un serveur et un outil de visualisation permet un suivi graphique quotidien de tous ces paramètres.





**Exemple : Evolution de la température intérieure au RdC et à R+1 du 12 au 17 janvier 2025**

Le graphique précédent montre comment fonctionne la maison, sans aucun apport de chauffage d'appoint, pour des journées ensoleillées mais très froides. Sur les 6 jours d'observation, la température moyenne à l'entrée du caisson VMC a été de 2,6°C, avec des températures négatives (< -3°C) le matin. Au réveil la température descendait vers 5-6h du matin jusqu'à 18°C, ce qui n'avait pas d'incidence sur le confort puisque cela se produisait la nuit, puis elle remontait rapidement pour atteindre 21 à 22°C. Ces variations de température importantes au cours de la journée (mais qui restent agréables) sont une caractéristique d'une maison sans chauffage.

Il est à noter que sur les 80 premiers jours d'occupation (mi-décembre/début mars) la température moyenne au rez-de-chaussée (mesurée au pas de temps de 10') est de 20,2°C et celle de l'étage de 20,0°C. Certes on dépasse la valeur réglementaire de 19°C....mais c'est gratuit !

## 6 – Consommations et bilans prévisionnels énergie et environnement

### 6-1 Consommations d'électricité et bilan prévisionnel

Les locataires occupent les locaux depuis le 14 décembre 2024. Quand ils sont entrés dans le logement, sa température (en l'absence de toute occupation, donc de tout apport interne gratuit et d'absence de gestion de l'ouverture des BSO), et après une période de température extérieure autour de 0°C, était de 16,8°C. Il a fallu donc un petit appoint électrique pour placer le logement et ses masses au bon niveau de température.

Les 15 et 16 décembre la consommation a été de 18,7 kWh

Du 17 au 19 décembre elle a été de 8,9 kWh

Depuis le 20 décembre elle est nulle.

Soit au total 27,6 kWh essentiellement nécessaires pour la remise en température d'une maison inoccupée. Depuis, les occupants ont remis l'appoint dans un placard, ne le jugeant plus nécessaire. Pourtant les températures extérieures ont souvent été négatives depuis la mi-décembre...

Bien que le résultat doive être considéré avec de grandes précautions, il est toujours tentant, en partant d'une période réduite de trois mois, d'extrapoler à l'échelle de l'année afin de se rendre compte si l'ensemble évolue dans la bonne direction ou non....

La famille en place étant une famille reconstituée, sa taille est très variable d'un jour à l'autre pouvant aller jusqu'à 6 personnes lorsque tous les enfants sont là, mais fonctionnant en moyenne à 4 ou 5 personnes.

La famille dispose d'un équipement électroménager complet, à l'exception d'un sèche-linge.

Les consommations ont été observées dans la période du 14 décembre au 4 mars, soit sur 81 jours. La consommation de chauffage étant totalement inexistante, on a supposé que sur une année complète elle ne dépasserait pas 40 kWh....(soit moins que pour griller les tartines du matin). Sur cette base là, la structure des consommations annualisées est la suivante :

Usages	Consommations annualisées [kWh]	
Général	2 434	100,0%
ECS évier	384	15,8%
ECS SdB	595	24,4%
VMC DF	231	9,5%
Réfrigérométrie	205	8,4%
Four	166	6,8%
LV	115	4,7%
LL	84	3,4%
Eclairage	91	3,7%
Chauffage élec	40	1,6%
Usages s/PC	476	19,5%
Hotte de cuisine	2	0,1%
Compteurs divers	41	1,7%
BSO	3	0,1%

### ***Consommations d'électricité annualisées observées sur les 81 premiers jours d'occupation***

Il est probable que ce niveau annuel de consommation, bien que peu élevé, baisse car en allant vers les mois d'été on observe en général que les consommations d'eau chaude, des fours, de l'éclairage, baissent sensiblement.

La production photovoltaïque est en fonctionnement depuis le mois d'avril 2023 et l'on dispose donc déjà du bilan de production sur la première année : 13 200 kWh. Ce qui signifie que, en première approche, **la production d'électricité de cette maison sera d'environ 5 fois supérieure à sa consommation**. Elle est donc déjà très largement conforme aux obligations de la Directive Européenne Bâtiment à l'horizon 2050.

### **6-2 Premier bilan environnemental**

Cette maison a pu bénéficier d'une étude très approfondie faite par l'Ecole des Mines de Paris dans le cadre d'un projet de recherche européen. L'objet était de voir sur des bâtiments réels, si leurs caractéristiques constructives et celles liées à leur fonctionnement (consommations diverses)

les conduisaient à être conformes à ce qu'on appelle les « limites planétaires » permettant de respecter un réchauffement de seulement 1,5°C en 2050. Il s'avère que la maison respecte parfaitement ces limites (exprimées avec différents paramètres dont les émissions de CO2) ! L'étude complète n'est pas encore disponible car le projet européen n'est pas encore arrivé à son terme.

Mais incidemment le travail de l'Ecole des Mines a fourni d'autres informations intéressantes :

- Compte tenu des procédés de fabrication des panneaux photovoltaïques et de leur production réelle d'électricité, il s'avère que le temps de retour de l'investissement énergétique nécessaire à la fabrication des panneaux **est de 1,1 année**.
- La quantité de déchets radioactifs générée par la construction de la maison est compensée par la quantité d'électricité réseau évitée grâce à la production PV **en moins de 2 ans**.
- Si on considère, comme le fait l'Ecole des Mines, que le bois investi dans la construction a un contenu énergétique fort puisque c'est un combustible (situation défavorable pour une construction en bois !), le temps de retour de l'investissement énergétique nécessaire à la construction de la maison, et compensé par la production des panneaux photovoltaïques, est de 11 ans.

Selon tous ces premiers résultats, qui doivent bien entendu être confirmés, la Poutinière semble tenir ses promesses ! Elle constitue en tout état de cause un formidable laboratoire pour mieux construire demain.

## 7 – Les coûts

Toutes les entreprises qui sont intervenues sont locales, situées à 30 km maximum du chantier, à l'exception de l'entreprise ayant réalisé l'enduit extérieur (50 km) et celle ayant mis en œuvre la VMC (Isère). Pour cette dernière il s'agissait d'un ami ventiliste, ce qui est une profession encore assez rare. Autre particularité : le fournisseur de briques de terre crue est dans l'Oise. Il a été choisi, malgré la distance, pour ses délais et ses coûts.

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, hormis le lot enduit extérieur, nous n'avons jamais fait de véritables mises en concurrence. Nous avons contracté avec des artisans ou des entreprises que nous connaissions parfois, ou qui avaient des délais d'intervention compatibles avec l'avancement de notre chantier, et que la nature du projet intéressait.

Voici les coordonnées des entreprises ayant participé à la construction :

Nom	Lot	Adresse
Teknibat	Fondation, gros œuvre	55 route de la Faiencerie - 26160 Le Poët Laval
Habitat Bois Massif	Ossature, toiture, isolation, menuiseries extérieures, bardage	7, chemin de Pouloumard - 26200 Montélimar
Jean Paul Zimmermann	Menuiseries intérieures, cloisons, parquet, ameublement	Quartier les Touches - 26160 Pont de Barret
Helioscop	Photovoltaïque	ZA la Fauchetière 2 - 4 impasse Thomas Edison - 26250 Livron s/Drôme
Sudel	Electricité	8, avenue de la Feuillade - 26200 Montélimar
Energifrance	Plomberie	zone artisanale Fontgrave - 26740 Montboucher s/Jabron
Cizeron	Enduit extérieur	831, rue Aristide Berges - 26500 Bourg lès Valence
Sébastien Giraudias	Enduit terre intérieur	Les Broues - 26340 Vercheny
Top Carrelage	Carrelage	22, allée Harouad de Suarez - 26200 Montélimar
Volthelios	VMC	7, rue du Violet - 38118 Hières s/Amby
Sorodi (devenu Groupe Braja)	VRD	170 A chemin de Miomeye - 26450 Cléon d'Andran
Briquetterie de Wulf	Fournisseur des briques de terre crue	5, Ancienne route de Paris - 60000 Allone

Le détail des coûts est fait dans ce qui suit en indiquant le montant du coût de construction de la maison, avec ou sans panneaux photovoltaïques. Ces coûts sont en valeur 2022 et 2023, c'est-à-dire tous sans exception post Covid, avec toutes les conséquences à la hausse que nous avons dues intégrer.... Rappelons que le coût de construction n'inclut pas le coût du terrain, les taxes, les VRD mais seulement les coûts relatifs à l'ouvrage lui-même. Afin de pouvoir comparer avec des constructions d'autres maisons, nous avons retiré le coût de l'abri voiture et de la terrasse (que nous indiquons séparément).

Ouvrages	Total €HT	€HT/m²shab	Structure
Fondation/dalle basse isolation	23 227,94	218,60	11,8%
Enveloppe/isol/toiture/bardage	88 244,93	830,46	44,7%
Menuiseries extérieures	16 830,04	158,39	8,5%
Briques inertie terre crue	2 836,59	26,69	1,4%
Electricité	8 676,01	81,65	4,4%
Parquet R+1	2 743,48	25,82	1,4%
Carrelage RdC+Crédence	3 753,06	35,32	1,9%
Menuiseries intérieures	24 657,37	232,05	12,5%
Enduit extérieur	6 100,00	57,41	3,1%
Enduit intérieur terre crue	4 212,00	39,64	2,1%
Equipement de cuisine	962,48	9,06	0,5%
VMC	4 958,90	46,67	2,5%
Plomberie	10 321,03	97,13	5,2%
Photovoltaïque			0,0%
<b>Total H.T.</b>	<b>197 523,83</b>	<b>1 858,87</b>	<b>100,0%</b>
<b>Coût de construction hors VRD, PV, garage, terrasse</b>			

Le coût de construction hors VRD, garage, terrasse et PV est de 1 859 € HT/m²hab. Le plus gros bailleur social d'Ardèche construit ses villas pour 1 900 € HT/m². On peut en déduire qu'en supprimant les coûts d'une installation de chauffage dans une maison on peut financer un niveau général d'isolation beaucoup plus élevé (allant jusqu'à supprimer quasiment tous les besoins de chauffage) ainsi qu'une qualité accrue de l'aménagement intérieur (utilisation du bois massif).

Il est ensuite intéressant d'examiner le coût de la maison équipée d'un pan de toiture recouvert de panneaux photovoltaïques. Le coût de ceux-ci est de 132,69 € HT/m²hab (14 100 € HT) si bien que le tableau de détail du coût de construction évolue comme suit :

Ouvrages	Total €HT	€HT/m²shab	Structure
Fondation/dalle basse isolation	23 227,94	218,60	11,0%
Enveloppe/isol/toiture/bardage	88 244,93	830,46	41,7%
Menuiseries extérieures	16 830,04	158,39	8,0%
Briques inertie terre crue	2 836,59	26,69	1,3%
Electricité	8 676,01	81,65	4,1%
Parquet R+1	2 743,48	25,82	1,3%
Carrelage RdC+Crédence	3 753,06	35,32	1,8%
Menuiseries intérieures	24 657,37	232,05	11,7%
Enduit extérieur	6 100,00	57,41	2,9%
Enduit intérieur terre crue	4 212,00	39,64	2,0%
Equipement de cuisine	962,48	9,06	0,5%
VMC	4 958,90	46,67	2,3%
Plomberie	10 321,03	97,13	4,9%
Photovoltaïque	14 100,10	132,69	6,7%
<b>Total H.T.</b>	<b>211 623,93</b>	<b>1 991,57</b>	<b>100,0%</b>
<b>Coût de construction avec PV, hors VRD, garage, terrasse</b>			

Le coût de construction de la maison en incluant les panneaux photovoltaïques est de 1 992 € HT/m²hab. Donc pour 14 100 € HT supplémentaire cette maison ne s'offre pas seulement une autonomie énergétique (puisqu'on a vu que la consommation réelle était 5 fois inférieure à la production) mais un statut de bâtiment « exportateur » d'électricité ce qui lui vaudra annuellement de disposer non pas d'une facture d'énergie mais d'une recette d'énergie !

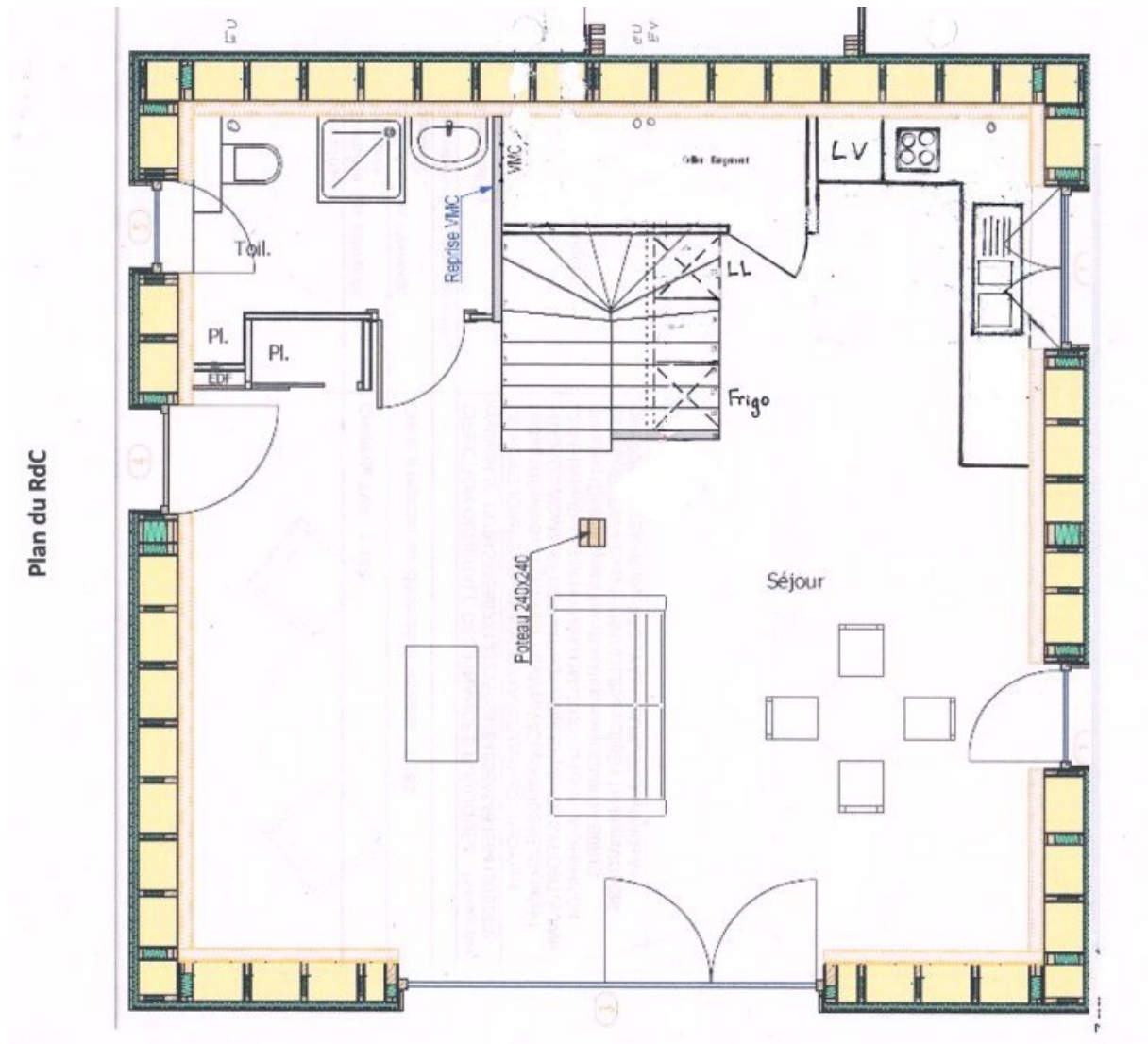
Si on se projette dans la perspective de la Directive Européenne Bâtiment qui semble effrayer autant le monde politique que les acteurs du bâtiment, ce projet devrait pouvoir rassurer en montrant que le savoir-faire existe, qu'il n'est pas très complexe, et qu'il n'y a pas de surcoût. En prime il n'y a plus aucune dépense de chauffage mais une recette annuelle due à la vente de courant.

## 8 – Choix des locataires

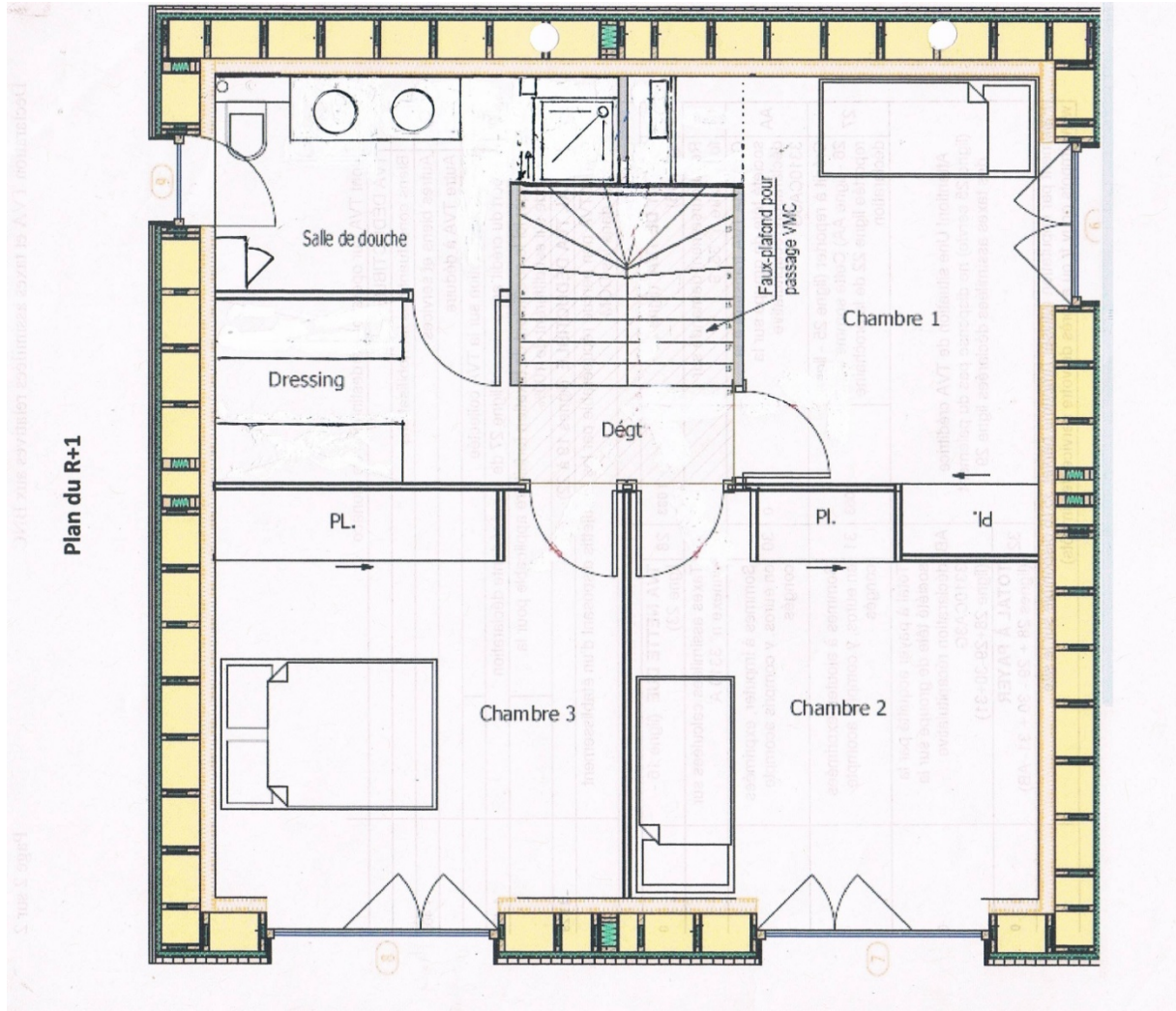
L'idée d'occuper une maison sans chauffage (et donc sans DPE rappelons-le !) a probablement effrayé bon nombre de ménages. Notre cahier des charges visait une famille de 4 ou 5 personnes, autre facteur discriminant, et nous demandions l'acceptation d'un suivi par mesure ainsi que la possibilité de faire des visites ou de répondre aux questions de journalistes (en dehors de notre présence pour ne pas influencer). Le nombre de candidats a été très réduit, et en réalité une seule famille répondait à toutes ces contraintes. Consigne a été donnée de vivre comme à l'accoutumé, mais quelques recommandations sur le bon fonctionnement de la maison (notamment pour le confort d'été) ont été données aux occupants. Nous aurions voulu une famille avec voiture électrique (avec une consommation annuelle de 2 500 kWh pour la voiture, la maison aurait quand même produit 2,6 fois plus d'électricité que la totalité des consommations domestiques+voiture....) mais nous ne l'avons pas trouvée....

# ANNEXE 1

## Plans

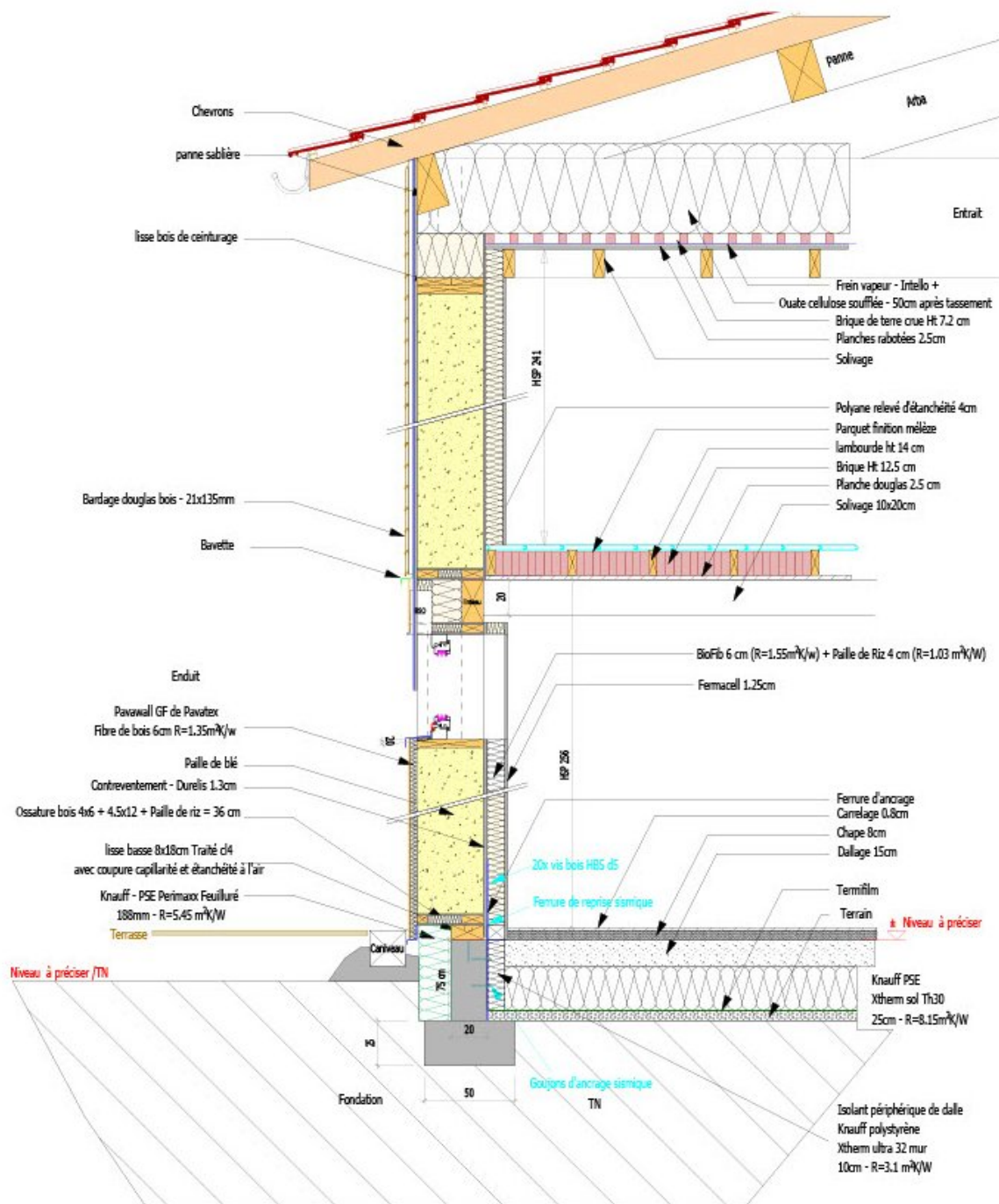


Rez-de-chaussée



Plan du R+1

Etage



## Coupe



## ANNEXE 2

### Photos



*Façade sud et ouest – A l'arrière les bureaux d'Enertech*



*Façades nord et est*



*Séjour-cuisine*



*Séjour (photo mi-janvier)*



*Aménagement cuisine en frêne massif*



*L'escalier*



*Chambre 2*



*Salle de bains*

## ANNEXE 3

### Quantités et masses de tous les composants mis en œuvre

Nature de l'ouvrage	Composants	Unité	Q	V [m3]	M [kg]
Fondations	Béton 450 kg/m3 pour semelle filante	m3	7,13	7,13	17 112
	Béton 250 kg/m3 murs filants	m3	6,29	6,29	15 096
	Fers à béton	kg	299	0,038	299
	Isolant sous bassement par PSE Knauf Perimaxx 188 sur hauteur 75 cm	m <sup>2</sup>	26	4,844	109
Dalle sur terre plein	PSE Knauf Xtherm Sol Th30 - 25 cm	m <sup>2</sup>	60	15	285
	Béton à 350 kg/m3	m3	9,34	9,34	22 416
	Fers à béton	kg	172	0,022	172
	Attaches acier antisismiques et support acier poteau central	kg	45	0,006	45
Revêtement de surface	Désolidarisation périph par PSE Knauf Xtherm ultra 32 mur de 100 mm	m <sup>2</sup>	4,68	0,468	7
	Mortier 250 kg/m3	m3	4,74	4,74	11 376
	Carrelage terre cuite épaisseur 8 mm	m <sup>2</sup>	59,29	0,47	949
	Murs extérieurs	Enduit sur isolant : armature en fibre de verre et enduit RME	m <sup>2</sup>	83,3	
Fibre de bois Pavawall de Pavatex 60 mm		m2	82,40	4,94	643
Bardage Douglas naturel abouté profil ELEGIE 21 mm		m <sup>2</sup>	107,6	2,26	1 017
Lattage et contrelattage épicea 58x37 sur bardage		ml	107,6	0,23	104
Lattage et contrelattage épicea 27x38 sur bardage		ml	172,16	0,18	79
Clous <b>acier inox</b> tête bombée 2,3x55 pour le bardage		kg	4,98	0,001	5
Pièces métalliques d'assemblage en acier galvanisé (vis, clous, équerres, etc)		kg	76,4	0,010	76
Panneau de médium MDF 10 mm (fibres de moyenne densité)		m <sup>2</sup>	138,70	1,39	860
Panneau OSB 9 mm		m <sup>2</sup>	243,00	2,19	1 312
Paille de blé locale (moins de 10 km)		m3	48,60	48,60	4 860
Paille de riz (Camargue) de complément entre panneaux de structure		m3	3,60	3,60	198
Panneau Durélis Vapourblock 12 mm (Panneau de particules hydrofuge, structurel, étanch)		m <sup>2</sup>	138,7	1,66	1 065
Lattage et contrelattage épicea 58x37		ml	401,9	0,86	388
Biofib Trio 60 mm (isolant) - Mélange de coton, lin et chanvre		m <sup>2</sup>	121,27	7,28	218
Paille de riz intérieure (Camargue)		m <sup>2</sup>	121,27	4,85	267
Fermacell 12,5 mm		m <sup>2</sup>	127,01	1,59	1 826
Poutre Kerto 45x360 bois en lamibois collé		m3	3,35	3,35	1 709
Structure épicea toutes sections murs extérieurs		m3	4,72	4,72	2 122
Structure épicea toutes sections mur ossature bois sablière		m3	0,31	0,31	140
Structure épicea toutes sections mur ossature bois pignon		m3	0,59	0,59	264
Sablière en épicea		m3	0,13	0,13	59
Fibre de bois 20 mm pour embrasure et tableaux de fenêtres		m <sup>2</sup>	25,32	0,51	51
Appui de fenêtre en contreplaqué marine 10 mm		m <sup>2</sup>	5,92	0,06	30
Isolation des appuis par Knauf Perimaxx 188 d'épaisseur 5 cm	m <sup>2</sup>	2,22	0,11	2	
Structure épicea cadre de fenêtre	m3	0,07	0,07	33	
Appui en acier laqué e=0,8 mm	m <sup>2</sup>	5,04	0,00	31	
Entourage baies en bois (planche Douglas 25 mm rabotée) dans partie bardée	m <sup>2</sup>	1,55	0,04	17	
Toiture	Charpente - Ensemble des volumes de bois Epicéa (yc poutre treillie)	m3	4,56	4,56	2 052
	Dalles Agépan RWH 16 mm (panneau de fibres de bois type MDF)	m <sup>2</sup>	53	0,848	483
	Pièces d'assemblage en acier galvanisé (vis, clous, équerres, etc) pour la charpente	kg	56	0,007	56
	Lattage et contre lattage épicea support de tuiles épicea (pan nord)	m3	0,418	0,418	188
	Tuiles Omega 10 STE FOY (10 tuiles/m <sup>2</sup> - 4,83 kg/tuile)	kg	2 560	1,28	2 560
	Lattage et contre lattage épicea support de bac acier (pan Sud)	m3	0,25	0,25	113
	Bac acier COVEO 3.45 avec anticondensation - e = 0,63 mm; 6,03 kg/m <sup>2</sup>	kg	319,59	0,041	320
	Planches Douglas de rive et d'égout rabotées e=25mm	m <sup>2</sup>	10,46	0,262	118
	Tuiles de rive Omega 10 Ste Foy (2,5 tuiles/m - 4 kg/tuile)	kg	218,4	0,109	218
	Tuiles de faitage Omega 10 Ste Foy (2,5 tuiles/m - 4 kg/tuile)	kg	100	0,05	100
	Closoir en plomb (14,7 kg/ml)	kg	147	0,013	147
	Planches sapin rabotées sous face de toiture e=16mm	m <sup>2</sup>	25,5	0,408	184
	Ensemble clous, vis acier galvanisé de fixation couverture	kg	12	0,002	12
	Goutières zinc dev 33 cm - 1,5 kg/ml	kg	31,5	0,004	32
Descente zinc diamètre 100 mm - 1,4 kg/ml	kg	20,02	0,003	20	

Solivage et plancher haut du Rez de Chaussée	Lamellé collé GL24h sur baie Sud	m3	0,21	0,21	95
	Solives 200x100, muralière, poutre transversale épicéa rabotées	m3	3,35	3,35	1 508
	Plancher Douglas massif raboté 1 face e=25mm	m²	59,3	1,48	667
	Lambourde 45x140mm épicéa	m3	0,69	0,69	311
	Clous, vis, tirefonds, etc en acier galvanisé pour ces assemblages	kg	49	0,006	49
	Briques de terre crue - 2000 kg/m3	m3	5,02	5,02	10 043
	Plancher mélèze e=20 mm	m²	53,76	1,08	645
Solivage et plancher haut du R+1	Solives 200x100 épicéa rabottées	m3	2,52	2,52	1 134
	Plancher Douglas massif raboté 1 face e=25mm	m²	62	1,55	698
	Plancher MDF 6mm (médium)	m²	62	0,372	231
	Clous, vis, tirefonds, etc en acier galvanisé pour ces assemblages	kg	49	0,006	49
	Briques de terre crue - 2000 kg/m3	m3	2,52	2,52	5 036
	Ouate de cellulose soufflée - Epaisseur après tassement : 500 mm	m²	62	31	884
Menuiseries extérieures	Fenêtres et portes fen. En pin - triple vitrage (descriptif joint) - Biber profil 88 mm	m²	22,32		
	Porte d'entrée en pin sylvestre 68 mm avec âme isolante	m²	2,155		
	Brise soleil Orientables marque Internorme	m²	20,9		
Cloisonnement intérieur	Lambourdes épicéa 40x60	ml	210	0,504	227
	Lambourdes épicéa 40x100	ml	6	0,036	16
	Chevrons épicéa 60x80	ml	18	0,086	39
	Planches Douglas 27 mm		5	0,135	61
	Lambris 12 mm épicéa		150	1,8	810
	Isolant Biofib Trio (mélange coton, lin, chanvre)	m²	67	4,02	121
Ameublement intérieur	Frêne 35 mm	m²	2,9	0,10	73
Plan travail cuisine, sdb	Frêne 27 mm	m²	13,61	0,37	264
placards, penderies etc	contreplaqué frêne 9 mm	m²	20,72	0,19	145
	tablette pin 9 mm	m²	0,33	0,00	1
	tablette pin 14 mm	m²	5,01	0,07	32
	tablette pin (16 et) 18 mm	m²	47,32	0,85	383
	tablette pin 21 mm	m²	6,19	0,13	58
	Pin 23 mm	m²	0,21	0,00	2
	Contreplaqué ordinaire	m²	0,51	0,00	2
	Panneau sapin 27 mm	m²	1,74	0,05	21
	Clous et vis en acier galvanisé pour cloisonnement intérieur et ameublement	kg	8,88	0,00	9
Escalier	Pin sylvestre lamellé collé (550 kg/m3)	m3	0,377	0,377	208
Abri voiture+local vélo +auvent entrée	Lisse basse épicéa	m3	0,0528	0,053	24
	Ossature bois épicéa	m3	0,394	0,394	177
	Dalles Agépan RWH 16 mm (panneau de fibres de bois type MDF)	m²	24,6	0,394	224
	Bardage Douglas naturel abouté profil ELEGIE 21 mm	m²	24,6	0,517	232
	Lattage et contrelattage épicéa 27x38 sur bardage	m3	0,040	0,040	18
	Clous <b>acier inox</b> tête bombée 2,3x55	kg	1,49	0,000	1,5
	Bois Douglas massif	m3	0,35	0,35	158
	Bois Epicéa abouté	m3	1,6	1,6	720
	Volige épicéa 16 mm rabotée une face	m²	37	0,592	266
	Lattage et contre lattage support de tuiles épicéa	m3	0,173	0,173	78
	Tuiles Omega 10 STE FOY (10 tuiles/m² - 4,83 kg/tuile)	kg	1787,1	0,894	1 787
	Planches Douglas de rive et d'égout rabotées e=25mm	m²	4,55	0,114	51
	Goutières zinc dev 33 cm - 1,5 kg/ml	kg	12,75	0,002	13
	Descente zinc diamètre 100 mm - 1,4 kg/ml	kg	4,2	0,001	4,2
				Masse totale (kg)	<b>119 417</b>