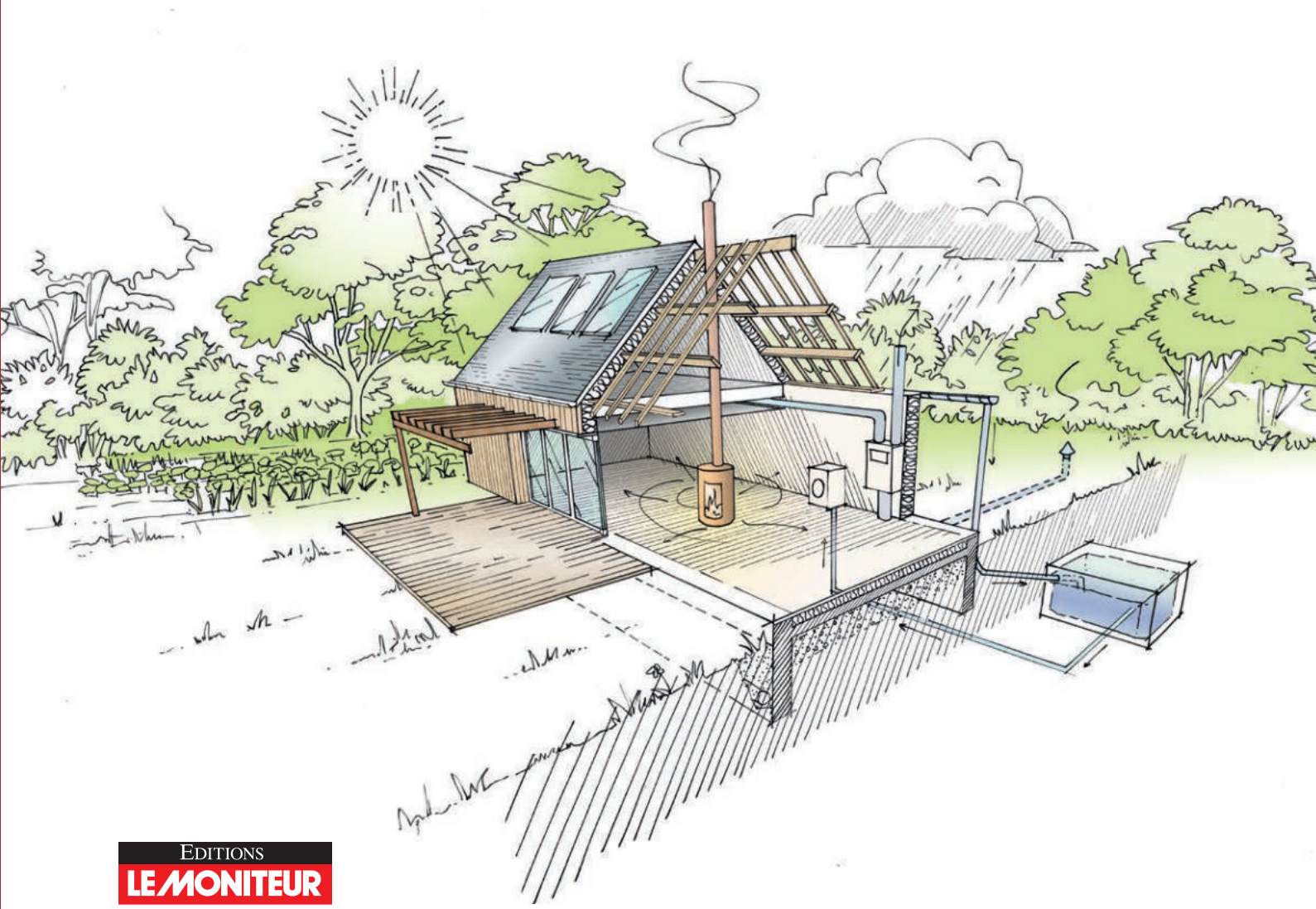
Catherine Charlot-Valdieu

Philippe Outrequin

Maisons passives
Concevoir, construire et habiter

Qualité architecturale, confort d'été et performances

2e édition



Editions Le Moniteur

Sommaire

Avant-propos 5

Partie 1 **L'écosystème passif** 7

Chapitre 1 – Cadre général 8

Chapitre 2 – Les différents labels et outils 15

Chapitre 3 – Les acteurs 27

Partie 2 **Les aspects techniques de la maison individuelle passive** 37

Chapitre 4 – Le traitement de l'enveloppe du bâtiment 38

Chapitre 5 – Les isolants biosourcés de la construction passive 52

Chapitre 6 – La ventilation et les systèmes techniques 70

Chapitre 7 – Les actions écologiques complémentaires 83

Partie 3 **Opérations exemplaires** 87

Chapitre 8 – Maisons à ossature bois en secteur diffus 88

1 Chambles, une maison orientée au nord et en altitude 91

2 Perros Guirec, une maison contemporaine glissée entre les arbres 99

3 Fougères, une maison passive à colombages dans le quartier médiéval 105

4 Josselin, un jeu de volumes coulissants sous une même toiture 111

5 Le Mans, une maison en site contraint à proximité du centre-ville 119

6 La Giettaz, un chalet de montagne pour la location, béton & bois 126

7 Sansais, une maison de constructeur bois sur pilotis 136

8 Fleury-la-Forêt et Valmondois, deux maisons préfabriquées en ossature bois 142

9 Saint-Avé, une maison atypique dans un quartier pavillonnaire 152

Chapitre 9 – Maisons passives en ossature bois en secteur dense 158

10 Saint-Étienne, 18 maisons passives en accession dans un quartier ANRU dont 5 en ossature bois – paille 160

11 Villeneuve-Saint-Georges, 26 maisons en accession 168

12 Florange, huit logements passifs : la résidence Passiflore 175

13 Ste-Anne-de-Portzic, une maison de plain-pied au cœur d'un lotissement RT 2012 en parpaings 180

14 Crest, deux maisons mitoyennes en bois, terre et paille 188

15 Liffré, une maison adaptée au télétravail 196

16 Art sur Meurthe, 12 logements en résidence senior 202

Chapitre 10 – Opérations exemplaires en bois massif 209

17 Combrit, une maison en trois modules pour optimiser les apports solaires malgré la contrainte d'aménagement 211

18 La Baule, une maison de forme complexe offrant de grands volumes 219

Chapitre 11 – Opérations exemplaires en maçonnerie 231

19 Saint-Clément-de-Rivière : une aventure personnelle 241

20 Lassy, une maison R+2 avec une toiture à une seule pente 250

21 Bardos, une maison basque traditionnelle 257

22 Oberhergheim, une maison passive de plain-pied 264

23 Wolschwiller, une maison contemporaine en béton bas carbone 268

Chapitre 12 – Opérations exemplaires en acier 274

24 Gosné, un conteneur de 13 m^2, témoin d'une petite surface passive 275

25 Acigné, huit villas techni-color 281

Partie 4 Des atouts incontestables 287

Chapitre 13 – La satisfaction des usagers 289

Chapitre 14 – Qualité sanitaire 310

Conclusion 318

Opérations exemplaires présentées dans ce livre 319

Bibliographie 323

Sigles et abréviations 324

Table des matières 325

5 Les isolants biosourcés de la construction passive

(Crédit photo : Schnepp Renou, Agence Karawitz, le salon de musique dans une maison passive à Marly-le-Roi)

5.1 Introduction

Le choix des isolants est très important pour concilier la diminution des pertes thermiques, le traitement du confort d'été, de l'humidité et le coût.
L'emploi des différents isolants (en vrac, panneau ou rouleau) va dépendre du type de paroi à isoler ainsi que de la performance recherchée.
La qualité des isolants se mesure à l'aulne de trois principes : ils doivent retenir la chaleur, réguler la chaleur et gérer la vapeur d'eau.

Retenir la chaleur

Deux principes physiques sont essentiels : la conductivité thermique et la résistance thermique des matériaux.

- **La conductivité thermique** est la capacité d'un corps à transmettre la chaleur par conduction. Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est isolant. Elle est désignée par le coefficient λ**, exprimé en W/(m.K)**. Les matériaux isolants courants ont des λ compris entre 0,022 et 0,080 W/(m.K).
- **La résistance thermique** est la capacité d'un corps à résister à la transmission de chaleur. Elle dépend de l'épaisseur du matériau (e, en mètre) et de sa conductivité thermique (λ) : R = e/λ exprimée en m^2.K/W. Plus la résistance thermique est élevée, plus la paroi considérée est isolante.

À partir de la résistance thermique de chaque matériau d'une paroi, on caractérise sa capacité thermique par le coefficient de transmission thermique U exprimé en W/(m^2.K). Ce coefficient mesure le flux de chaleur (en W) qui traverse 1 m^2 de structure quand la différence de température de part et d'autre de la structure est de 1 °C (ou K).

– **Le coefficient de transmission thermique** exprime la performance thermique d'une paroi, somme de l'inverse de la résistance thermique de chaque composant d'une paroi. **Plus la valeur de U est faible, plus les déperditions de chaleur sont faibles et plus la paroi est performante thermiquement.**

▼ **Tab. 5.1.** Exemple de calcul d'un coefficient U d'une paroi

Matériau	**Coefficient λ** (W/(m.K))	**Épaisseur e** (mètres)	**Résistance thermique R** (e/λ en m^2.K/W)
Moellons	2 000	0,500	0,25
Polyuréthane	0,022	0,160	7,27
Laine de bois	0,036	0,120	3,33
BA 13	0,320	0,013	0,04
Résistances superficielles			0,17
Résistance thermique de la paroi			R = 11,06
Coefficient de transmission thermique U = 1/R			U = 0,09 W/(m^2.K)

Réguler la chaleur

La régulation de la chaleur (fournie à l'intérieur par le système de chauffage ou provenant de l'extérieur par les apports solaires) permet de lisser les besoins de chauffage ou de refroidissement. L'objectif est de stocker de la chaleur dans les parois du bâtiment pour limiter les variations de température et la restituer quand on en a besoin. **Le choix des matériaux doit permettre de jouer sur trois paramètres : l'inertie thermique, le déphasage thermique et la capacité hygrothermique.**

– **Inertie thermique** : Résistance d'un matériau au changement de température lorsqu'intervient une perturbation de son équilibre thermique. L'inertie thermique dépend de la masse volumique et de la capacité thermique massique du matériau. Plus elle est élevée, mieux elle permet au bâtiment de lisser les variations de sa température intérieure.

$$\textbf{Inertie} = \rho \times Cp/3\,600$$

en Wh/(m^3.K)

La masse volumique ρ est exprimée en kg/m^3.

La capacité thermique massique Cp représente l'énergie à apporter à un matériau pour augmenter sa température de 1 °C. Elle s'exprime en Joule par degré K et par kg.

– **Diffusivité thermique** : Capacité d'un matériau à transférer la chaleur à travers ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (conductivité thermique) et de sa capacité à accumuler la chaleur.

$$D = \lambda / \rho.Cp$$

ρ est la masse volumique du matériau en kg/m^3 et Cp est la capacité thermique massique.

D s'exprime en m^2 par seconde.

Ce critère est à minimiser.

– **Déphasage thermique** : Temps que met la chaleur pour traverser une épaisseur donnée de matériau (ou retard avec lequel la paroi – isolant + mur porteur - va émettre la chaleur transmise). Le déphasage thermique dépend de la masse volumique, de la capacité thermique massique du matériau et de son épaisseur. Plus le temps est long, mieux la paroi est capable de réguler la température extérieure.

Le déphasage thermique augmente avec une grande épaisseur du matériau, une meilleure conductivité thermique, une masse volumique élevée et une capacité thermique massique élevée (une diffusivité faible).

Ce critère est à maximiser.

Pour assurer le confort d'été d'un bâtiment passif, il est important de recourir à des matériaux (et pas seulement les isolants) qui ont la capacité de ralentir la vitesse de pénétration de la chaleur. Le déphasage thermique permet de ralentir l'évolution de la température intérieure suite aux variations des températures extérieures.
Il est souhaitable que la chaleur provenant de l'extérieur traverse la paroi en 10 heures minimum. Un pic de chaleur à 12 heures ne sera restitué à l'intérieur de la maison qu'à 22 heures et à ce moment-là, il est facile de ventiler la maison en faisant entrer de l'air extérieur plus frais.

Le temps de déphasage thermique (T exprimé en heures) est proportionnel à l'épaisseur et à la densité du matériau (plus il est dense, plus la chaleur met du temps à le traverser, d'où le choix fréquent du béton dans le sud de la France). À l'inverse, plus un matériau est léger, plus il se réchauffe vite et il sera meilleur pour lutter contre le froid) :

$$T = 1{,}38 \times e/100 \times \sqrt{\frac{\rho \times Cp}{\lambda}}$$

Le coefficient « ρ » est la masse volumique en kg/m^3 ; « Cp » est la capacité thermique du matériau en Wh/(kg.K)[1] ; « e » est l'épaisseur du matériau en cm et « K » est l'unité en degré Kelvin (ou Celsius).

Le béton cellulaire, la pierre ponce, les bottes de paille haute densité, le béton de chanvre, le liège, les fibres de bois denses, le Fermacell ont des temps de déphasage particulièrement élevés.

– **Capacité hygrothermique** : Capacité d'un matériau à absorber ou à rejeter l'énergie pour préserver le confort thermique du logement. Elle se mesure par deux coefficients de diffusivité et d'effusivité thermiques.
– **Effusivité thermique** : Capacité d'un matériau à échanger plus ou moins vite de l'énergie thermique avec son environnement. Lorsqu'elle est faible, le matériau absorbe des calories en se réchauffant en surface (bois, matériaux isolants).

E = racine de λ.ρ.Cp

Ce critère est à maximiser.

Gérer la vapeur d'eau

Les échanges de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment sont dus à la différence de température et d'humidité entre ces deux milieux. Les parois du bâtiment sont soumises à des flux d'humidité sous forme d'eau liquide ou de vapeur, mais aussi à d'éventuelles remontées capillaires ou à des pluies battantes. Une mauvaise gestion de l'humidité des parois peut entraîner des pathologies telles que des moisissures et peut même mettre le bâtiment en péril à plus long terme en attaquant la structure.
Il faut s'assurer de la capacité de séchage des murs et de l'évacuation de l'humidité vers l'extérieur. Cette capacité se mesure par le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ) d'un matériau ou à l'épaisseur de lame d'air équivalente (Sd) d'une épaisseur donnée d'un matériau.
– **Coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau** (μ) : Capacité du matériau à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau. C'est un coefficient sans unité. Plus il est élevé, plus le matériau est étanche à la vapeur d'eau. Le coefficient μ est le rapport de la résistance à la diffusion d'une couche de matériau à celle d'une couche d'air immobile de même épaisseur (μ = 1). Un matériau ayant un μ égal à 15 résiste 15 fois mieux que l'air immobile à la diffusion de la vapeur d'eau.
– **Épaisseur de lame d'air équivalente** (Sd) : remplace le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur (μ). On a : Sd = μ.e, où e est l'épaisseur du matériau en question et Sd s'exprime en mètre. Sd est l'épaisseur d'une couche d'air ayant une résistance à la diffusion équivalente à celle du matériau considéré. Plus Sd est élevé, plus le matériau est étanche à la vapeur d'eau. Le coefficient Sd peut être calculé sur le site http://www.u-wert.net/

Pour que la vapeur d'eau puisse migrer à travers une paroi, il faut que la *valeur Sd* du matériau qui se trouve à l'intérieur de la maison soit plus élevée (en général on s'accorde sur un facteur 5) que la *valeur Sd* du dernier des matériaux qui constitue la façade. Il faut en outre qu'aucun des matériaux qui constituent la façade n'ait une *valeur Sd* plus élevée que la *valeur Sd* du premier des matériaux, ce qui constituerait un frein à cette migration[2].

Un coefficient très faible rend obligatoire la présence d'un pare-vapeur pour éviter la condensation à l'intérieur de la paroi (ou point de rosée), sauf si celle-ci est perspirante.
Une paroi perspirante est une paroi d'un bâtiment qui permet la migration de la vapeur d'eau au travers de tous les éléments qui la constituent, tout en restant étanche à l'air.
Quatre autres critères peuvent être mis en avant dans le choix :
– le classement au feu ;
– l'isolation phonique ;
– la sensibilité aux rongeurs ;
– l'impact sur la santé.
Le classement au feu des matériaux se mesure selon une norme européenne dite euroclasse qui va de A (incombustible) à E (très combustible) et F (non classé), avec des sous-critères correspondant à l'opacité des fumées (s1 à s3) et à la présence de gouttelettes et débris enflammés (d0 à d2). La norme distingue les matériaux de sols et les

1. La capacité thermique est la quantité d'énergie qu'il faut transférer à un matériau pour augmenter sa température de 1 degré Kelvin.

2. Jean Pierre Oliva, *L'isolation écologique : conception, matériaux, mise en œuvre*, Terre vivante, 2001.

▼ **Tab. 5.2.** Classement au feu européen

Classe	Combustion énergétique à la propagation d'un incendie	Classification complémentaire			
A1	Incombustible	Production de fumée		Chute de gouttes et débris enflammés	
A2	Pratiquement incombustible	S1	Faible production de fumée	d0	Pas de gouttelettes/ particules enflammées
B	Résiste à une attaque prolongée des flammes et d'un objet isolé ardent tout en limitant la propagation de la flamme	S2/ S3	Production moyenne de fumée	d1	Gouttelettes/particules enflammées persistant moins de 10 s.
C	Résiste à une attaque brève des flammes et d'un objet isolé ardent tout en limitant la propagation de la flamme				
D	Résiste à une attaque brève de petites flammes et d'un objet isolé ardent tout en limitant la propagation de la flamme	S4	Production importante de fumée	d2	Gouttelettes/particules enflammées persistant plus de 10 s.
E	Résiste à une attaque brève de petites flammes en limitant la propagation de la flamme	Pas testé		Sans indication ou d2	
F	Aucune performance déterminée				

autres produits. L'euroclasse A correspond à la classe de la norme NF M0 alors que l'euroclasse E correspond à la classe M4 de la norme NF (tab. 5.2.).
Les laines minérales nues, les monomurs, les minéraux (verre) sont incombustibles (A ou NF M0), la ouate de cellulose, le liège expansé et les bottes de paille ont une très bonne résistance au feu (B ou NF M1). À l'inverse les polystyrènes, le chanvre, les fibres de bois sont beaucoup plus sensibles au feu (Euroclasse E ou NF M4).
Le tableau 5.3. récapitule les propriétés physiques des différents isolants en donnant des valeurs moyennes, car, pour chaque matériau, il existe sur le marché différentes variantes qui peuvent améliorer ou non la valeur moyenne.

▼ **Tab. 5.3.** Propriétés physiques des principaux matériaux isolants

Isolant	Masse volumique moyenne (en kg/m³)	Conductivité thermique λ (W/m.K) – valeur moyenne	Épaisseur pour R = 5 – Produit performant (en cm)	Valeur de R pour 20 cm d'isolant	Résistance vapeur d'eau μ	Classement au feu – Euroclasse	Capacité thermique (J/kg.K)	Temps de déphasage pour 20 cm d'isolant	Isolation phonique	Confort d'été	Sensible aux rongeurs	Impact sur la santé
Isolants biosourcés												
Ouate de cellulose (insufflée)	60	0,038	19	5,3	2	B-S2	2000	8,2	Bonne	Bon	Non	Aucun
Paille (botte) flux dans le sens des fibres	100	0,067	34	3,0	< 2	B	1400	6,6	Moyenne	Bon	Peu	Aucun
Paille (botte) flux transversal au sens des fibres	100	0,045	23	4,4	< 2	B	1400	8,1	Moyenne	Bon	Peu	Aucun
Botte de paille haute densité	200	0,070	35	2,9	2	B	1400	9,2				
Fibre de bois souples (laine)	40/80	0,038	20	5,0	2	E	2100	7,1	Bonne	Bon	Non	Aucun
Fibre de bois denses	190	0,049	25	4,1	4	E	2100	13,1	Bonne	Bon	Non	Aucun
Liège expansé	115	0,040	20	5,0	7,5	B	1560	9,7	Bonne		Non	Aucun

Isolant	Masse volumique moyenne (en kg/m³)	Conductivité thermique λ (W/m.K) – valeur moyenne	Épaisseur pour R = 5 – Produit performant (en cm)	Valeur de R pour 20 cm d'isolant	Résistance vapeur d'eau μ	Classement au feu – Euroclasse	Capacité thermique (J/kg.K)	Temps de déphasage pour 20 cm d'isolant	Isolation phonique	Confort d'été	Sensible aux rongeurs	Impact sur la santé
Isolants biosourcés (suite)												
Textile recyclé	30	0,040	20	5,0	2,2	E-S1	1400	4,7	Bonne	Faible	Non	Aucun
Lin, coton	25	0,039	20	5,1	< 2	E	1500	4,5	Bonne	Faible	Non	Aucun
Biofib (lin, chanvre, coton)	30	0,039	20	5,1	< 2	E	1500	4,9				
Chènevotte bituminée	150	0,060	30	3,3	900	B	1950	10,2				
Chènevotte	105	0,052	26	3,8	< 2	E	1944	9,1	Bonne		Non	Aucun
Chanvre	38	0,042	21	4,8	< 2	E	1800	5,9	Bonne		Non	Aucun
Briques de chanvre	300	0,070	35	2,9	6	F	1700	12,4	Bonne	Bon	Non	Aucun
Béton de chaux - chanvre	420	0,100	50	2,0	8	F	1700	12,3	Bonne	Bon	Non	Aucun
Plume de canard/laine mouton/ textile	25	0,038	19	5,3	1,5	E ou F	1600	4,7	Bonne	Faible	Non	Aucun
Laine de mouton	16	0,040	20	5,0	1,5	D-S3	1720	3,8	Bonne	Faible	Non	Aucun
Isolants minéraux												
Verre cellulaire	150	0,043	22	4,7	> 70 000	A1	900	8,2	Bonne		Non	
Perlite expansée	70	0,080	40	2,5	2	A	900	4,1	Faible		Non	Aucun
Vermiculite exfoliée	90	0,062	31	3,2	< 4	A	900	5,3			Non	Aucun
Misapor (granulats de verre recyclé)	175	0,120	60	1,7	< 2	A1	900	5,3			Non	Aucun
Pouzzolane	850	0,150	75	1,3	< 4	F	850	10,1	Faible		Non	Aucun
Laine de verre	80	0,035	18	5,7	6,4	A1	1030	7,1	Bonne	Faible	Oui	Oui
Laine de roche	100	0,038	19	5,3	12,8	A1	1030	7,6	Bonne	Faible	Oui	Oui
Béton cellulaire	400	0,090	45	2,2	3	A	900	9,2	Bonne	Bon	Non	Aucun
Pierre Ponce	700	0,133	67	1,5	15	A	1000	10,6	Bonne		Non	Aucun
Fermacell (gypse 80 % fibre papier 20 %)	1200	0,380	190	0,5	16	A1		9,1	Bonne	Bon	Non	Aucun
Isolants organiques												
Polystyrène expansé (PSE)	20	0,034	17	5,9	70	E	1450	4,2	Mauvaise	Faible	Oui	Oui
Polystyrène extrudé (XPS)	30	0,032	16	6,3	120	E	1400	5,3	Mauvaise	Faible	Oui	Oui
Mousse de polyuréthane (PUR)	34	0,025	13	8,0	150	C-S3	1450	6,5	Mauvaise	Faible	Oui	Aucun
Panneaux de polyuréthane	34	0,024	12	8,3	150	E	1450	6,6	Mauvaise		Oui	Aucun
Polyisocyanurate (PIR)	30	0,023	12	8,7	150	D-S2 d0	1450	6,3	Mauvaise		Oui	
Aérogels	70	0,120	60	1,7	100	F	1400	4,2	Bonne		Non	Aucun

5.2 La ouate de cellulose

La ouate de cellulose est issue de la transformation de papiers recyclés. Elle convient pour quasiment toutes les surfaces de l'enveloppe des bâtiments. Elle est largement utilisée pour les combles perdus et pour les murs dans les constructions à ossature bois. Elle isole aussi les faux plafonds, les planchers, les murs en ITE (isolation thermique par l'extérieur), les rampants, les cloisons intérieures, les vides de construction. En rénovation, la technique d'insufflation de ouate de cellulose permet d'isoler les doublages existants, en remplissant les vides d'air sans déconstruction ou démolition.

La ouate de cellulose est disponible en vrac dans des sacs allant de 10 à 14 kg et en panneaux semi-rigides.

La mise en œuvre de la ouate de cellulose, disponible en vrac, se fait à l'aide d'une cardeuse-souffleuse afin de bien décompacter le produit. L'isolant est ensuite soufflé ou insufflé :

– **Le soufflage** est particulièrement recommandé pour isoler tous les combles perdus, car l'isolant est réparti de façon homogène même dans les coins peu accessibles. Le matelas uniforme ainsi formé supprime tous les ponts thermiques. La densité est comprise entre 25 et 35 kg/m^3.

– **L'insufflation** de la ouate est la technique qui compacte la ouate dans des caissons fermés : murs, rampants, planchers, doublages… Une buse est alors nécessaire pour remplir à haute densité, soit une densité minimale de 55 kg/m^3.

« L'isolation par insufflation de la ouate de cellulose permet une rapidité de réalisation, une performance énergétique et un prix abordable. Elle est adaptée aux structures en bois, et au système de poutres en « I ». Les caissons d'insufflation sont produits par l'espacement entre poutres, l'OSB intérieur de contreventement et les panneaux de fibre de bois en face extérieure. » M. Lachat, HL Structures bois.

Pour les cloisons distributives ou les murs intérieurs, la ouate est proposée en panneaux. Elle est mélangée à d'autres matières pour la lier et lui amener de la souplesse : par exemple les panneaux Biofib Ouate avec 25 % de chanvre, 60 % de ouate et 15 % de liant ou les panneaux Univercell avec 60 % de ouate, 20 % de fibre textile de coton issue du recyclage et 20 % de liant en polyester.

À noter que toutes les ouates de cellulose ne sont pas équivalentes sur le marché, leur qualité dépendant du choix des fibres collectées. Ainsi, les différentes ouates de cellulose ne bénéficient pas toutes du label ACERMI (Association pour la Certification des Matériaux Isolants). En revanche, elles disposent dans la majorité des cas d'avis techniques du CSTB (Atec) qui donnent une indication fiable sur le produit.

La ouate de cellulose présente de nombreuses qualités :

– Elle est durable : sa durée de vie est de 50 ans sans perte significative de performance.

– C'est une matière renouvelable et recyclable.

– Elle possède un bilan carbone négatif puisqu'elle stocke du CO_2 pendant sa production. Par exemple 1 m^2 de ouate de cellulose insufflé avec une épaisseur de 220 mm (R = 5,2 m^2.K/W) à un bilan carbone de – 1,95 kg eqCO_2/m^2 (source fiche inies de SOPREMA UNIVERCELL+).

– Elle consomme peu d'énergie grise : de l'ordre de 75 kWh/m^3 contre 250 kWh/m^3 pour la laine minérale et 470 kWh/m^3 pour le polystyrène expansé.

– Elle n'émet pas de COV qui polluent l'air intérieur.

– Elle offre une excellente isolation acoustique grâce à sa densité naturelle et sa capacité d'absorption, certifiée par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

– Elle est perspirante, c'est-à-dire qu'elle permet la régulation de l'humidité des pièces, avec la capacité d'absorber 15 % de son poids en eau. La paroi laisse passer l'humidité générée par les habitants d'un logement qui va ainsi pouvoir s'évaporer vers l'extérieur.

– Elle a un excellent déphasage thermique. La ouate de cellulose offre un déphasage thermique de 7,7 heures (en soufflage) à 11,7 heures (en insufflation) alors que la laine de verre ne dépasse pas les 4,2 heures pour la même résistance thermique. Une étude in situ a été menée pour étudier le déphasage et comparer le confort d'été entre 2 maisons identiques, une isolée en laine minérale et l'autre en ouate de cellulose (Ouatéco) ; cette dernière obtient une température inférieure de 5 degrés en été, permettant de fonctionner sans climatisation. Pour une durée de déphasage thermique équivalente, il faudrait une épaisseur de 81,5 cm de laine de verre contre 28,6 cm de ouate de cellulose.

– Elle a une excellente conductivité thermique (λ) comprise entre 0,037 et 0,041 W/(m.K).

– Elle ne propage pas la flamme en cas d'incendie, ne s'enflamme pas et ne dégage pas de fumées toxiques. La protection contre le feu est assurée par 5 % de sel de bore pur à 99,9 %, conforme à la réglementation REACH. La plupart des ouates de cellulose sont classées M1 en France ou EN B-S2, d0 pour l'Euroclass en Europe. Sa densité de pose limite l'apport d'oxygène, ce qui limite le développement des flammes. En surface, au contact du feu, la ouate « carbonise » et se crée alors une croûte noire en surface qui agit comme une barrière de protection.

– Elle résiste naturellement aux moisissures. De plus, les nuisibles, comme les rats et les souris n'aiment pas la ouate de cellulose.

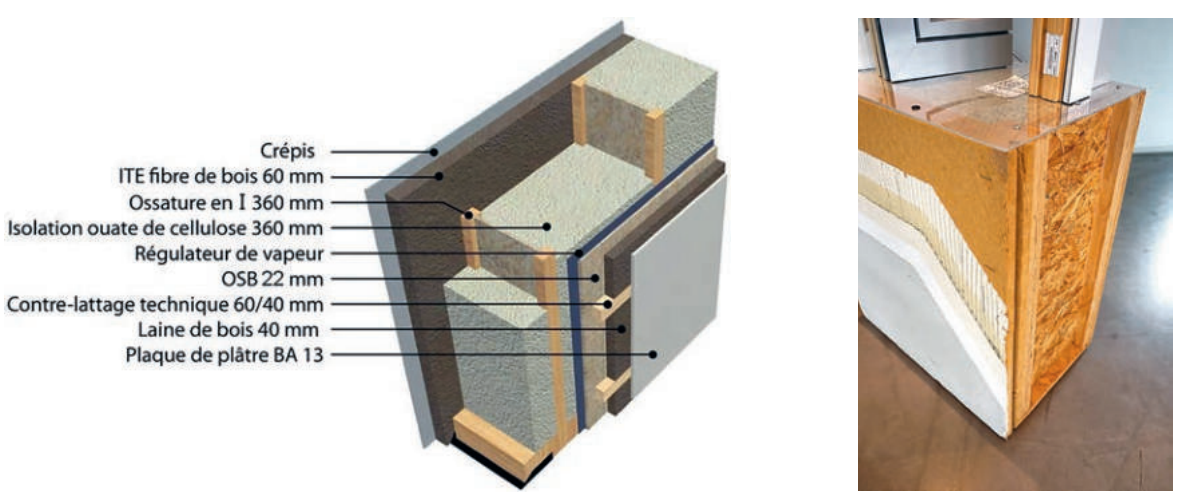
– Elle ne présente aucun risque pour la santé, connu ou prévisible dans les conditions normales d'utilisation.

La résistance thermique R minimale en fonction des exigences de la RE2020 doit être au minimum égale à 7 m^2.K/W pour les combles perdus. En passif on sera en général plus proche de 10 m^2.K/W, ce qui correspond à une épaisseur minimale de 0,038 × 10 = 0,38 m ou 38 cm. Le tassement déterminé pour la ouate est de 20 % (en fait entre 5 et 20 %). Il faut par conséquent une épaisseur à souffler dans les combles de 38 × 1,2 = 45,6 cm pour assurer un R de 10.
La pose d'un frein vapeur hygrovariable ou d'un pare-vapeur accompagnera généralement l'isolation avec la ouate de cellulose, en particulier pour des combles aménagés, le doublage des murs, les maisons à ossature bois et dans les climats de montagne.
Le prix de la ouate de cellulose dépend de son conditionnement et de l'épaisseur d'isolant. La méthode de pose, la main-d'œuvre et la surface à couvrir impactent aussi le coût. Conditionnée en vrac pour les combles perdus, la ouate de cellulose coûte entre 1 et 1,5 € le kg.
Le coût de la pose en soufflage est de l'ordre de 10 à 15 €/m^2, soit un coût posé de l'ordre de 30 à 40 €/m^2.
Le coût posé par insufflation est un peu plus élevé, entre 35 et 50 €/m^2.
Les panneaux isolants sont proposés à des prix entre 5 et 20 €/m^2 selon l'épaisseur. Deux panneaux de 120 mm ont un coût d'environ 40 €/m^2 auquel s'ajoute la pose dont le coût peut varier entre 15 et 60 €/m^2.

▲ Insufflation de la ouate de cellulose pour l'isolation d'un plancher (maison passive de Bruz entièrement en matériaux biosourcés)[3] (Crédit photo : Quinze Architecture)

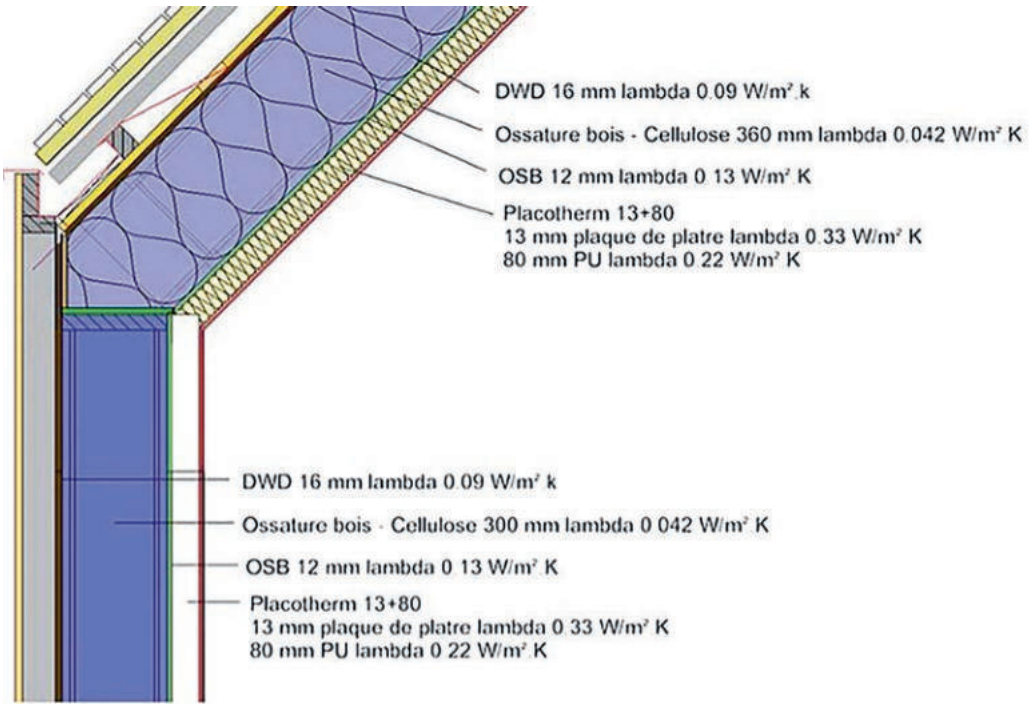
Ossature bois et ouate de cellulose : un complexe très complémentaire

Une majorité de maisons individuelles passives est aujourd'hui construite avec une technique bien rodée qui consiste à isoler en ouate de cellulose insufflée une structure en ossature bois fermée par des panneaux en fibres de bois.
La maison Chloé du constructeur de maisons Voegelé en est un exemple :



▲ **Fig. 5.1.** Les éléments constitutifs du mur d'une épaisseur totale de 49,5 cm – Maison Chloé (Maisons Voegelé) (Crédit photo : Catherine Charlot-Valdieu ; Source : Maisons Voegelé)

3. Maison présentée dans *Maisons Individuelles passives*, opus cité, 2019, pages 227 à 233.



▲ **Fig. 5.2.** Schéma de détail de la liaison mur de façade – toiture (rampants) (Source : Les Airelles)

Maisons isolées avec de la ouate de cellulose présentées ci-après : maison 2 3 4 7 8 9 12 13 14 17 et 22.

5.3 La paille

La paille est un co-produit de la production agricole : blé, orge, seigle, riz, etc. La paille de blé représente 75 % de la production nationale. Elle est donc majoritairement utilisée dans la filière construction. C'est également celle qui est prescrite actuellement dans les règles professionnelles.

L'usage des bottes de paille en tant que matériau isolant performant et vertueux valorise une ressource disponible sans production spécifique. En effet, le volume de paille nécessaire à la construction d'un bâtiment est anecdotique en comparaison de la production. Les usages agricoles (dont les apports de matière organique) ne sont nullement concurrencés. Dans l'hypothèse où la construction paille représenterait 10 % du marché neuf de la construction, sur les 20 millions de tonnes de paille produites par an, il ne faudrait que 1 % de ce volume pour répondre au besoin.

La paille correspond à la tige de la céréale. C'est un **matériau brut** qui ne nécessite quasiment pas de transformation et ne produit pas de déchet. La paille peut être utilisée sous différentes formes : en bottes de différentes tailles (22 cm, 37 cm, etc.), en vrac ou hachée. Les bottes de paille vont être utilisées pour le remplissage de caissons préfabriqués en isolation par l'extérieur ou de toiture. Les grandes bottes peuvent aussi être utilisées comme structure porteuse. La paille hachée sera utilisée par insufflation pour l'isolation de murs ou de toiture (rampants).

La paille a de nombreux avantages[4] :

– Elle demande très peu d'énergie grise.

– Elle s'inscrit dans une économie locale durable. La paille parcourt en moyenne moins de 75 km entre le champ et le chantier où elle est mise en œuvre.

– Elle est durable. La maison « Feuillette », construite en 1920 à Montargis (45), inscrite au patrimoine national, est un bel exemple de pérennité de la paille dans les constructions.

– Elle est naturelle et ne demande aucun adjuvant ni aucun produit chimique lors de la mise en œuvre.

– Elle n'émet aucun Composé Organique Volatil (COV).

– Elle est un matériau sain qui n'a pas d'impact négatif sur la qualité de l'air intérieur.

– Elle est un réservoir qui joue le rôle de puits de carbone. Une paroi en botte de paille de 36 cm d'épaisseur stocke plus de 9 kg de CO_2/m^2 (calcul d'Analyse de Cycle de Vie – ACV).

4. Source : RFCP. *Construire avec la paille, du champ au bâtiment*, 2024.

– Elle a une capacité de déphasage thermique comprise entre 12 et 16 heures.
– Elle crée un confort hygrothermique en assurant une température constante en toutes saisons, un taux d'humidité de 40 à 60 % et une différence maximale de température entre l'air intérieur et les parois de 3 °C.
– Matériau perspirant, la paille absorbe et évacue naturellement l'humidité.
– Elle agit phoniquement suivant un effet dit masse ressort masse. L'isolation phonique peut atteindre un indice d'affaiblissement acoustique Rw de 57 dB (Rw+Ctr 52 dB) avec une botte de paille de 36 cm d'épaisseur renforcée sur sa face extérieure. La botte de paille présente une faiblesse au niveau de l'isolement sur les graves (200 à 250 Hz) qui peut être compensée en ajoutant de la masse à l'extérieur par un enduit plus épais ou un bardage adapté.
– Elle ne s'enflamme pas quand les parois sont composées d'isolation en bottes denses ; elle se consume très lentement en dégageant une faible quantité de fumée.
– Elle a un point faible qui est sa sensibilité à l'eau liquide. Si de l'eau liquide stagne dans une botte de paille, elle risque d'entraîner un compostage de la matière. Les Règles Professionnelles indiquent que les bottes paille doivent présenter une teneur en eau < 20 % et être mise à l'abri de l'eau liquide lors de leur stockage et de leur mise en œuvre.
– Elle ne présente aucun intérêt alimentaire pour les rongeurs qui délaissent ses tiges ; elle est un aliment insuffisant d'un point de vue nutritif pour permettre à un groupe de termites de survivre sans apport de bois.

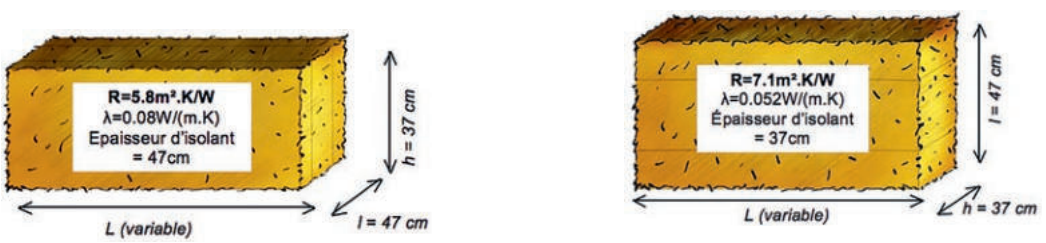
Les fibres sont transversales au flux thermique quand la botte est posée sur chant. **Quand la botte est posée à plat, elle perd une part importante de son efficacité thermique.**

Le prix d'une botte de paille varie selon sa taille et sa densité. Le RFCP estime entre 5 et 7 € le prix d'une botte de paille permettant d'atteindre un R de 7 m^2.K/W.

▼ **Tab. 5.4.** Caractéristiques du matériau paille

Critères	Valeurs spécifiques
Densité	entre 80 et 120 kg/m^3
Dimensions	36 cm × 46 cm × L (55 < L < 120 cm)
Conductivité thermique *	λ = 0,048 W/(m.K)
Résistance thermique *	R = 7,5 m^2.K/W (botte épaisseur 36 cm)
Coefficient de transmission thermique *	U = 0,13 W/(m^2.K) (botte ép. 36 cm)
Déphasage thermique	entre 12 et 16 heures (botte ép. 36 cm)
Capacité thermique massique	Cp = 1558 J/(kg.K)
Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	μ = 1,04 (Sd = 0,37 m) (botte ép. 36 cm)
Classement de la réaction au feu	B - S1 - d0 (paille enduite de chaux ou terre crue)
Classement de résistance au feu	REI 120
Comportement au feu des façades	4 essais LEPIR II réussis
Affaiblissement acoustique	43 dB (botte ép. 36 cm enduite de terre crue)
Empreinte carbone (FDES)	9.11 kg eqCO_2/m^2 (source Inies)
Étiquette qualité de l'air	A+

* Fibres transversales au flux thermique
(Source : Réseau Français de la Construction Paille, RFCP)



▲ **Fig. 5.3.** Performance thermique des bottes de paille selon leur positionnement (Source : RFCP)

La paille hachée

Cette technique nouvelle vise à utiliser de la paille hachée qu'on insuffle dans des caissons en utilisant les mêmes cardeuses que pour la ouate de cellulose, avec des réglages adaptés.

La société coopérative d'intérêt collectif (SCIC) Ielo, qui commercialise la paille hachée (sacs de 12 kg ou en vrac), intègre des agriculteurs, des ingénieurs, des architectes et des artisans, soit au 1er janvier 2025, 146 sociétaires. Située dans la Vienne, l'entreprise travaille dans un rayon optimal de 100 km. En décembre 2023, en attente d'avis techniques ultérieurs, la SCiC a reçu une première ATEX[5] pour l'isolation des parois verticales. La paille est insufflée à environ 100 à 110 kg/m^3. Le coefficient de conductivité thermique λ est de 0,049 avec une capacité de déphasage thermique supérieure à 13 heures pour 30 cm d'isolant (nécessaire pour atteindre un R réglementaire de 7 m^2.K/W).

Maisons présentées ci-après isolées avec de la paille : maisons 10 et 14.

UNE MAISON PASSIVE À ALIXAN (DRÔME)[6]

Ce projet est né d'une co-construction dès l'origine. Les architectes, le bureau d'étude thermique, le charpentier et le maître d'ouvrage ont longuement échangé leurs points de vue autour d'un objectif commun. Ce travail collaboratif a permis d'éviter tout surcoût et d'atteindre le standard passif au prix habituel d'une maison[7].

Le projet a conservé les murs en béton d'une maison construite en 1978 et a fait l'objet d'une extension de 40 m^2 en ossature bois. L'ensemble a été isolé par l'extérieur à l'aide de bottes de paille de 36 cm d'épaisseur. La toiture a été supprimée et remplacée par un toit plat en bois massif (panneaux contrecollés en lamellé-croisé), isolé avec 46 cm de paille, qui déborde de l'enveloppe afin de constituer un brise-soleil et un abri pour la terrasse.

▲ Pose des fenêtres et des panneaux avant la mise en place des bottes de paille (façades sud et ouest) (Crédit photo : Hélène Palisson architecte)

▲ Pose des bottes de paille (Crédit photo : Sylvain Deschamps)

▲ La maison isolée en botte de paille recouverte d'un enduit à la chaux (Crédit photo : Stephan Peignier)

5. Appréciation technique d'expérimentation, numéro de référence CSTB 3219_V2, valide du 14/12/2023 au 14/12/2026.
6. Voir *Maisons Individuelles Passives,* 2019, op. cit. pages 87 et suivantes.
7. Architectes Hélène Palisson et Stéphane Peigner. Maître d'ouvrage et artisan Sylvain Deschamps.

5.4 La terre crue

La terre crue est un matériau naturel présent partout qui a été largement utilisé en France avant d'être remplacé par des matériaux industriels. La terre argileuse utilisée peut provenir du terrassement du chantier lui-même ou à proximité, de terres locales de réemploi ou de carrières.

Il existe cinq familles de techniques recourant à la terre crue, toutes sans aucun adjuvant ni cuisson :

– les enduits terre ;

– la brique de terre crue fabriquée par moulage ;

– le torchis, mélange utilisé entre les montants des maisons à colombages ;

– la bauge, technique produisant des structures porteuses, mélange de terre limono-argileuse et parfois de paille compactée. Les murs se créent par levée successive de 60 à 80 cm de haut sur 50 à 80 cm de large. Le séchage de chaque levée est de deux à trois semaines ;

– le pisé, mélange sableux d'une terre plus graveleuse, compacté entre des banches et élevé par tranches successives de 40 à 60 cm de large.

Dans les constructions neuves, on trouvera surtout des murs intérieurs en terre crue (mur de brique) qui vont apporter un supplément d'inertie ainsi que des enduits terre qui contribuent à améliorer la qualité de l'air intérieur. Une terre propre ne dégagera aucune substance nocive pendant sa mise en œuvre ni pendant sa durée de vie. Ce matériau est intéressant pour son côté réversible : pour réparer un trou dans un mur, il suffit de réhumidifier la terre et de la remodeler.

La terre crue est un excellent régulateur d'humidité, car c'est un matériau ouvert à la vapeur d'eau. Grâce aux argiles qu'elle contient, la terre possède un pouvoir absorbant important. Utilisée en enduits intérieurs, la terre est capable d'absorber le surplus d'humidité d'une pièce, y compris dans une salle de bain. La terre est également capable de libérer de l'eau pour équilibrer un air trop sec. Elle permet un équilibre hygroscopique de l'air intérieur avec une hygrométrie d'environ 55 %. Seulement 2 cm d'épaisseur de terre crue sur les murs (en enduit ou panneaux d'argile) apportent un confort de vie sensible.

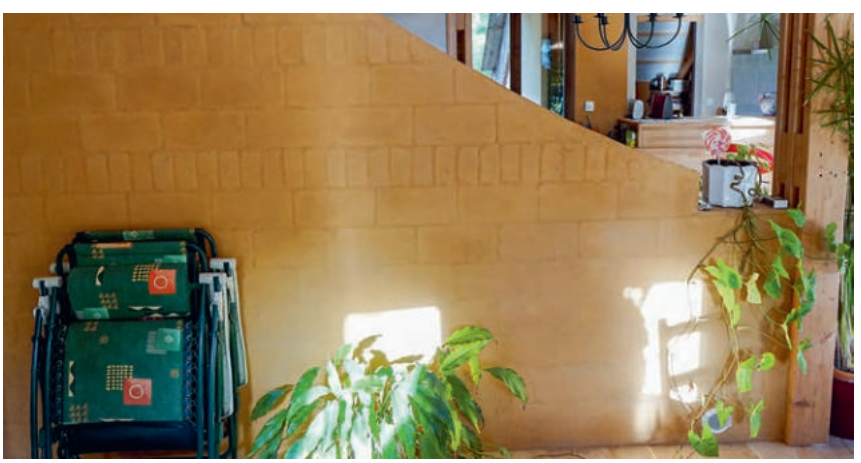
Les enduits terre appliqués en intérieur sur des matériaux perspirants (bottes de paille, ouate de cellulose, chanvre…) en intérieur permettent d'avoir une inertie thermique très intéressante pour le confort d'été, en gardant les maisons fraîches en période estivale. En hiver, les enduits terre associés à des fibres permettent d'emmagasiner de la chaleur et d'harmoniser les températures dans une pièce.

Les enduits en terre crue ont pour propriété d'absorber les ondes. Ils sont recommandés pour atténuer les effets d'écho dans une pièce vide par exemple. Le type de finition de l'enduit aura un impact plus ou moins important sur la réverbération acoustique souhaitée dans une pièce. Plus l'enduit est rugueux, plus l'atténuation de l'écho est importante.

Il existe différents types de finitions, comme les enduits talochés, stuqués ou épongés. Les enduits terre offrent également une très **grande variété de couleurs naturelles.**

Les enduits terre, comme ceux à la chaux, répondent parfaitement aux normes actuelles d'étanchéité à l'air lorsqu'ils sont posés, conformément aux règles professionnelles, et sont totalement adaptés aux exigences de la construction passive.[8]

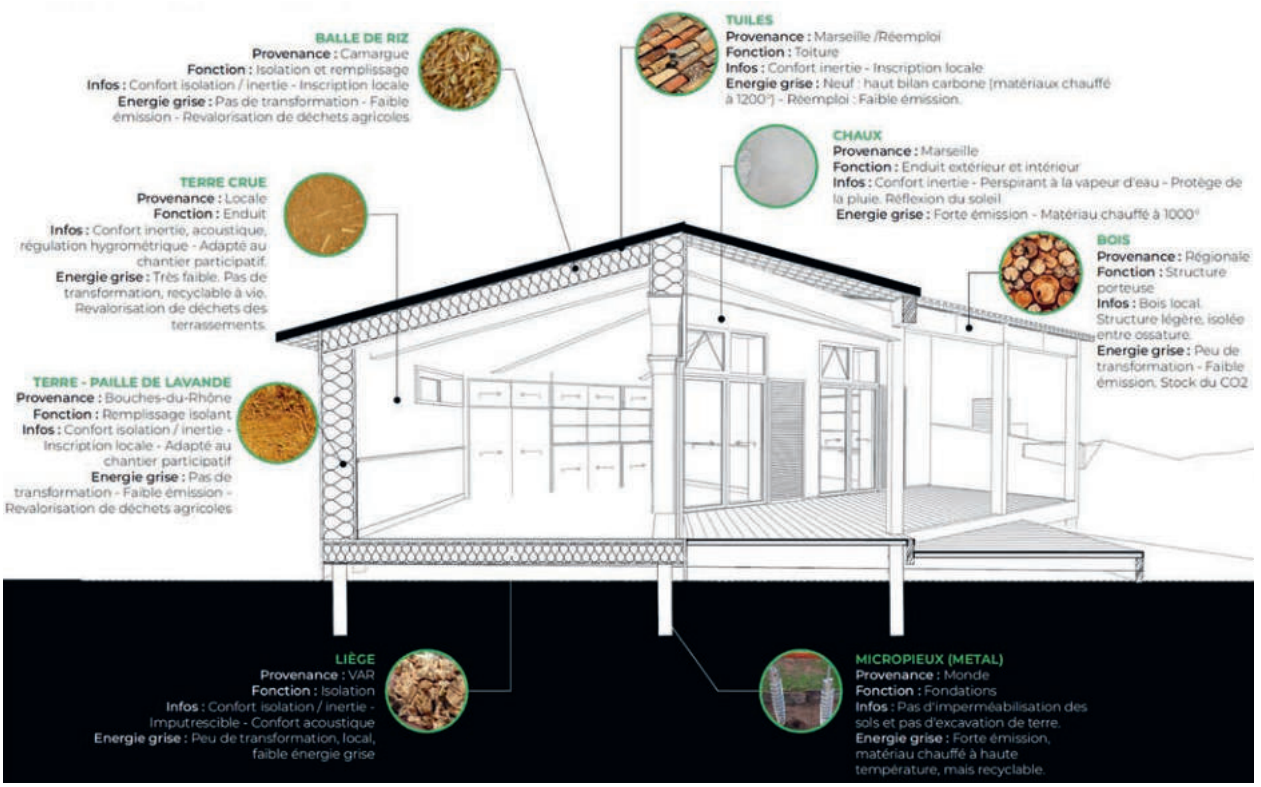
▲ Mur radiateur en terre crue
(Crédit photo : le maître d'ouvrage)[8]



▲ Insert et mur de briques en terre crue au milieu de la maison
(Crédit photo : Catherine Charlot-Valdieu)

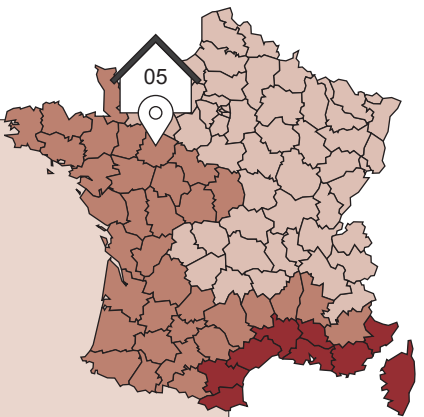
8. Voir la présentation de cette maison dans *Maisons individuelles passives*, édition Le Moniteur, 2019, pages 209 à 218.

Le bâtiment d'accueil de la cité de l'agriculture à Marseille n'est pas passif, mais c'est un bon exemple de la proximité des matériaux de construction utilisés.



▲ **Fig. 5.4.** Projet de bâtiment d'accueil de la cité de l'agriculture à Marseille (Source : Anatomie d'Architecture)

MI 05. Le Mans, une maison en site contraint à proximité du centre-ville



Maître d'ouvrage : Nicolas Maurice & Delphine Pommereuil
Architecte : A2A Architectes, Le Mans (Sarthe) : Nicolas Maurice architecte formé CEPH & Delphine Pommereuil, architecte d'intérieur
BET Thermique : Effitherm (Sarthe)
BET Structure bois : Artemis (Sarthe)
Entreprises : gros œuvre SAGIR ; charpente MCCE ; bardage GLOT ; couverture CLIMELEC ; menuiseries extérieures Ébénisterie JL

Localisation : Le Mans (Sarthe)
Altitude : 82 m
Date de livraison : 2023
Surface habitable : 150 m^2
Surface de la parcelle : 800 m^2
Coût de construction : 1 850 € HT/m^2
Part en autoconstruction : 20 %

(Crédit photo : Nicolas Maurice)

Le projet

La maison Rebecca est située au Mans à proximité immédiate du centre-ville, dans les quartiers vallonnés de la ville à l'est du quartier des Jacobins. Les propriétaires habitaient déjà le quartier et souhaitaient y rester, ils ont ainsi passé environ un an à la recherche d'un foncier permettant soit une rénovation lourde, soit une démolition/reconstruction, leur objectif étant d'habiter dans une maison passive en contexte urbain.

Après l'achat d'un premier foncier en 2016 puis d'un second mitoyen en 2020 sur un terrain en pente (12 %) orientée au sud, sans masque important, les maîtres d'ouvrage ont pu lancer leur projet de maison passive !

Le contexte urbain est relativement dense avec un règlement du PLUi qui impose de construire à l'alignement sur la rue, en mitoyenneté et dans une profondeur de 20 mètres.

La pente de 12 % a incité à disposer la maison en point haut afin de profiter des meilleures vues sur le paysage urbain qui s'ouvre au sud. Cette orientation permet aussi de maximiser les apports solaires.

Enfin, la maison est construite en mitoyenneté sur le grand pignon de la maison voisine tout en se préservant des vis-à-vis.

La maison comprend :

– un espace de vie au rez-de-chaussée avec un séjour, une cuisine avec cellier, une entrée et des toilettes ; de larges parois vitrées sont ouvertes au sud ;

– un niveau dédié aux enfants au R+1 avec 2 chambres exposées au sud, un espace de jeu, une salle de bains et des toilettes ;

– une suite parentale au R+2 comprenant une chambre avec salle de bains et un espace bureau.

Le stationnement est prévu pour un seul véhicule sous forme de carport et les vélos (utilisés quotidiennement) disposent d'un espace abrité.

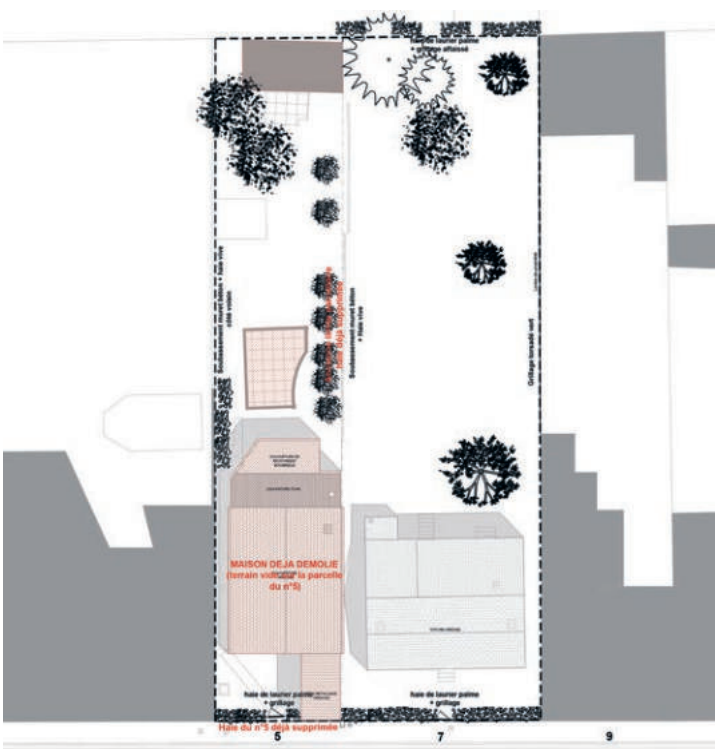
Le projet s'est ainsi développé sur trois strates horizontales, lisibles depuis le jardin, mais aussi deux strates verticales suivant une lecture urbaine depuis la rue.

Le choix constructif s'est porté sur l'ossature bois avec un maximum de matériaux biosourcés. Le parti pris a été également de laisser un maximum de matériau brut apparent :

– Les panneaux trois plis en épicéa en plafond du séjour et des deux chambres d'enfants avec les poutres épicéa demeurent visibles,

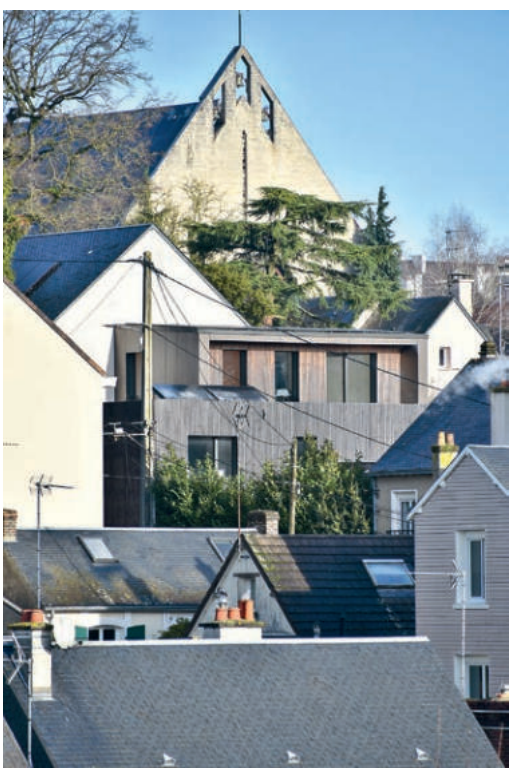
– Les panneaux trois plis sont également apparents au sol de l'ensemble des étages, ils ont simplement été poncés et huilés.

– La chape anhydrite a juste reçu un vernis mat en finition.

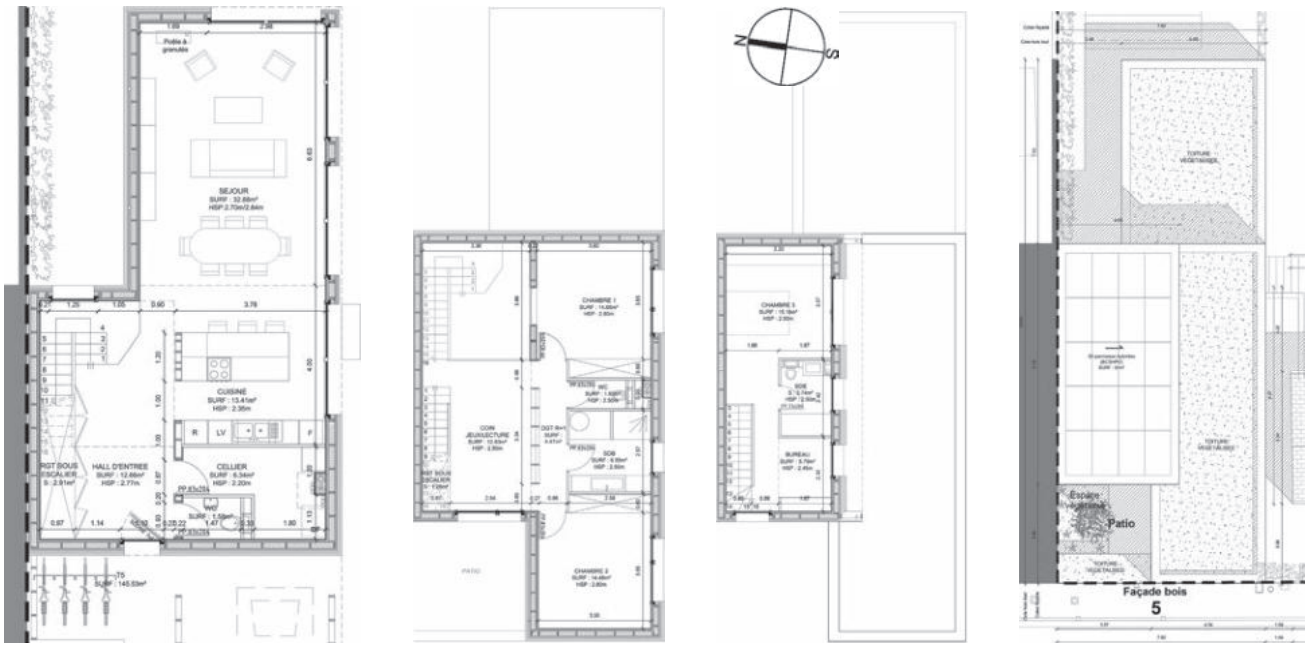


▲ Plan masse de la parcelle avec la maison déjà démolie sur laquelle s'implante la maison passive et la dépendance réhabilitée

(Source et crédit photo : A2A Architectes)



▲ Une maison passive dans la ville dense

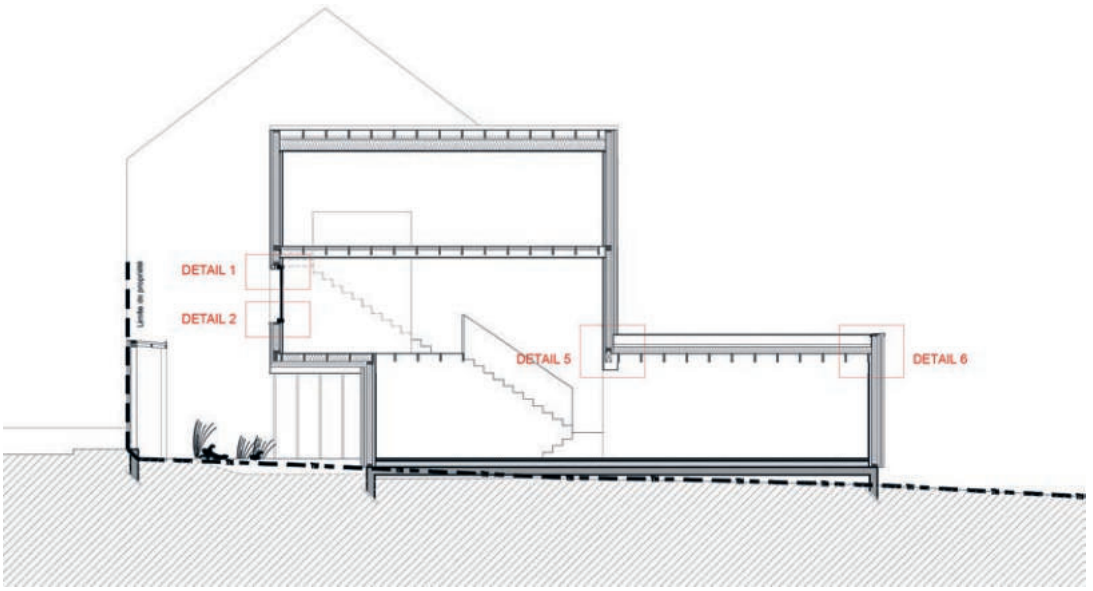


▲ **Fig. 8.18.** Plans (Source : A2A Architectes)

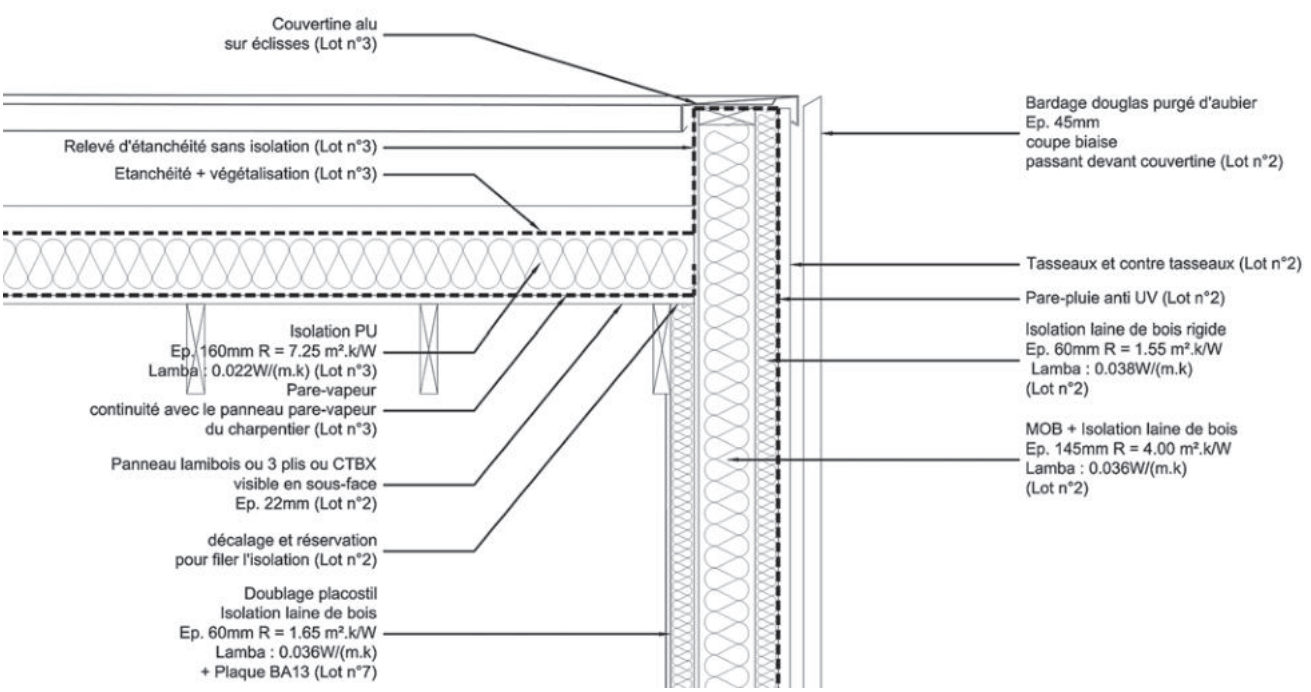
Le choix des parois verticales s'est fait suivant une logique de performance en 3 couches permettant de limiter les ponts thermiques des montants des murs à ossature bois de 145 mm avec une isolation par l'extérieur en fibre de bois dense et un doublage thermique intérieur.
Cette solution a permis de limiter les coûts (en retenant des montants standards de 145 mm) tout en assurant une bonne gestion des ponts thermiques.
Le bardage est en bois douglas (essence locale) à claire-voie. La section est de 45 mm × 45 mm avec un vide de 20 mm.
Le lattage et le contre lattage sont noirs et posés devant un pare-pluie noir anti UV pour ajourage jusqu'à 50 %. La couvertine est cachée derrière ce bardage (voir fig. 8.21.)
Les toitures intermédiaires sont en membrane EPDM, support d'une végétalisation constituée de bacs de rétention et d'un substrat pour végétalisation extensive (sédum, graminées).
La toiture haute est en bac acier support de 20 panneaux photovoltaïques d'une puissance de 7,5 kWc. Cette production d'énergie renouvelable permet d'atteindre le niveau « **Bâtiment Passif PLUS** ».

▲ Bardage en bois douglas à claire voie (Crédit photo : Nicolas Maurice)

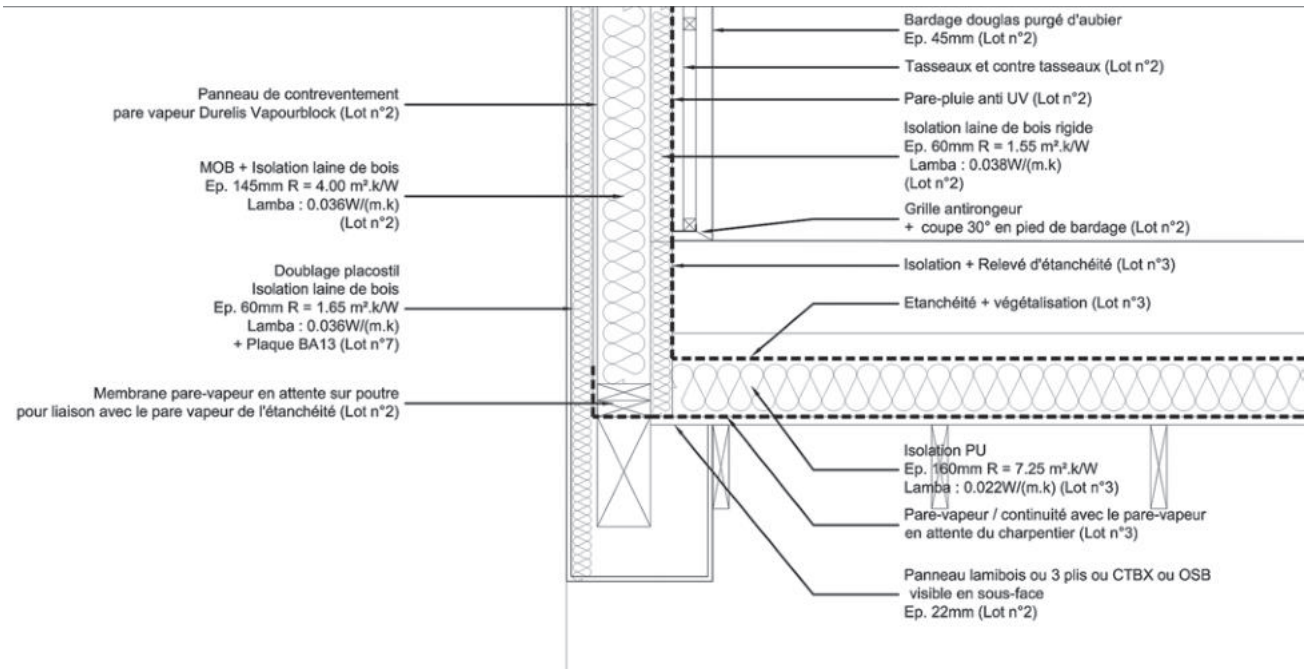
Des schémas de détail pour les principaux ponts thermiques identifiés



▲ **Fig. 8.20.** Coupe transversale de la maison montrant les ponts thermiques (Source : A2A Architectes)



▲ **Fig. 8.21.** Un bardage douglas passant devant la couvertine – détail 6 (Source : A2A Architectes)



▲ **Fig. 8.22.** Détail 5 (Source : A2A Architectes)

Techniques constructives et solutions techniques

▼ **Tab. 8.8.** Les caractéristiques thermiques de l'enveloppe et des systèmes techniques

Composants	Caractéristiques	**U** (W/(m^2.K))
Murs extérieurs (de l'intérieur vers l'extérieur)	BA13, 60 mm laine de verre, pare vapeur siga majrex, panneau durelis, isolation 145 mm fibres de bois dans MOB, isolation ITE panneau rigide 80 mm fibre de bois, pare pluie, bardage bois douglas à claire-voie ou bardage bois panneau fibres ciment Equitone	0,137 et 0,135
Mur mitoyen	Idem sans bardage	0,135
Toiture	BA13, pare vapeur Siga Majrex, 2 × 220 mm couches croisées en fibres de bois, bac acier Terrasse végétalisée : Support panneau épicéa 3 plis, pare vapeur, 2 × 80 mm couches croisées PU, étanchéité, végétalisation	0,095 0,117
Plancher bas sur sol	Chape anhydrite, panneau 160 mm mousse PU, dalle béton	0,132
Plancher bas porte-à-faux	Plancher bois épicéa 3 plis, pare vapeur siga majrex, 220 mm fibres de bois, panneau rigide bois 100 mm	0,124
Menuiseries extérieures	Menuiseries triples vitrages Minco Lumia (certifiées PHI)	
Occultations	Brise-soleil orientables (BSO)	
Chauffage d'appoint	Poêle à granulés bois MCZ reflex dans le séjour et bouches chauffantes (400 W) dans les 3 chambres	
Eau chaude sanitaire	Ballon solaire Rotex 500 L avec 2 panneaux solaires Daikin	
Ventilation	Ventilation Double flux Brink Flair 325, Rendement 91 % (PHI)	
Énergies renouvelables	20 panneaux photovoltaïques de 385 Wc, soit une puissance de 7,7 kWc	

Étanchéité à l'air

n50 en volume/heure sous 50 Pa = 0,51
Q4Pa_surf = 0,109 5 $m^3/(h.m^2)$

Compacité

Indice de compacité : 596/151 = 3,95
La maison présente une compacité moyenne liée à une inscription dans la parcelle peu évidente avec notamment le stationnement du véhicule au rez-de-chaussée décalant le volume du séjour vers le jardin par rapport au volume de l'étage qui est à l'alignement sur la rue.

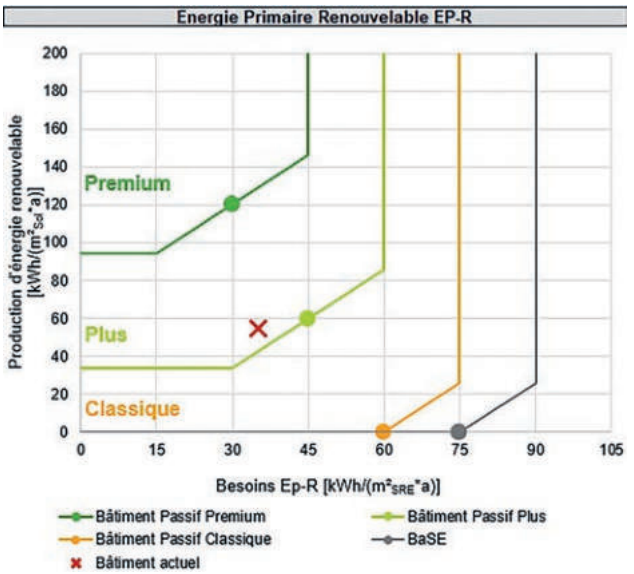
Inertie

L'inertie est légère à moyenne, car le système constructif est l'ossature bois. Seule la dalle avec la chape du rez-de-chaussée donne un peu d'inertie à l'ensemble. Le choix d'isolant à fort déphasage a été, dans ce cas, un impératif pour le confort d'été.

Performance énergétique (PHPP)

▼ **Tab. 8.9.** Consommation d'énergie théorique

Surface de référence (m^2) : 150,8 m^2
Besoin de chauffage (kWh/m^2) : 8,9
Puissance de chauffe (W/m^2) : 11
Besoin de refroidissement (kWh/m^2) : 0
Puissance de refroidissement (W/m^2) : 0
Consommation en énergie primaire (kWh_{EP}/m^2) : 56
Consommation d'énergie primaire renouvelable (kWh_{EP}/m^2) : 30
Production d'énergie renouvelable : 66 kWh/m^2 (d'emprise au sol)
Confort d'été (fréquence de surchauffe d'heures dans l'année supérieure à 25 °C) : 4 %



▲ **Fig. 8.23.** Bilan énergétique en énergie renouvelable (Source : PHPP)

Retour d'expérience sur le projet

Consommation d'énergie et dépense énergétique

En 2023, la consommation finale d'énergie de la maison s'est élevée à 2 024 kWh soit 1 449 kWh d'électricité et 575 kWh de granulés de bois. Le ratio de consommation finale d'énergie est de 13,5 $kWh/(m^2.an)$.
En 2024, la consommation finale d'énergie de la maison s'est élevée à 2 623 kWh soit 1 473 kWh d'électricité et 1 150 kWh de granulés de bois. Le ratio de consommation finale d'énergie est de 17,5 $kWh/(m^2.an)$.
En énergie primaire, le ratio moyen de consommation d'énergie tous usages, sur deux années, est seulement de 28 $kWh_{EP}/(m^2.an)$.

Le confort

Confort thermique

Le poêle à granulés dans le séjour n'est utilisé que les jours gris et froids sans soleil. Les bouches chauffantes sont peu ou pas utilisées : « *Le confort est excellent, grâce aux apports solaires en hiver et la très bonne isolation et étanchéité à l'air des parois. Par exemple, en plein hiver avec 1 °C de température extérieure, avec du soleil, l'intérieur de la maison est à 23 °C sans apport de chauffage !* »

Confort d'été et d'ambiance

Toutes les menuiseries sont équipées de brise-soleil orientable (BSO), ce qui permet d'assurer une protection solaire efficace au phénomène de surchauffe. Au dernier niveau, les BSO sont complétés d'un débord de toit formant un cadre architectural.

« Le confort d'été est très bon, il n'y a pas de surchauffe constatée grâce aux BSO et au déphasage important de la paroi. L'éclairage est aussi très bon, grâce aux menuiseries orientées pour la plupart d'entre elles plein sud. Les menuiseries orientées à l'est et à l'ouest l'ont été pour la vue que l'on a sur le jardin et le magnifique cèdre du voisin. Enfin, la qualité de l'air est excellente grâce à la ventilation double flux et aux matériaux naturels mis en œuvre. »

Impacts environnementaux

La gestion de l'eau

Le circuit de l'eau a été étudié de toiture en toiture. L'eau de la toiture haute (photovoltaïque) se déverse sur une première terrasse végétalisée qui se déverse sur deux terrasses végétalisées pour finir sa course dans une cuve de récupération des eaux pluviales en béton de 6 000 L. L'eau est utilisée pour le jardin, les sanitaires et le lave-linge.

L'économie circulaire

Dans le cadre de la démolition de l'ancienne maison, quelques matériaux ont été récupérés pour la réalisation d'ouvrages secondaires (aménagements paysagers, cabane pour les enfants, serre).

Le jardin

Il est considéré comme une pièce vivante évolutive. Les arbres existants ont tous été conservés (un merisier, plusieurs noisetiers, deux sapins, un pommier, un poirier).

La terre à proximité immédiate de la construction est en régénération (engrais vert). Seulement une à deux tontes par an sont réalisées afin de permettre la vie de la faune locale (oiseaux, écureuils, chauve-souris, papillons, sauterelles…).

Le point de vue du maître d'ouvrage

Certaines prestations ainsi que la plupart des finitions ont été réalisées en autoconstruction.

« Les bénéfices d'une maison passive sont avant tout le confort de vie au quotidien (absence de courant d'air et de sensation de paroi froide) et les importantes économies d'énergie. Auparavant, nous habitions une maison des années 30 de 70 m^2 avec une dépense annuelle de 2 000 € d'énergie (gaz et électricité), aujourd'hui, la dépense est d'environ 400 € pour 150 m^2 !

Le chantier s'est déroulé au moment de la hausse des coûts des matériaux de l'après-covid et nous avons subi une liquidation d'entreprise et des hausses de coûts des matériaux nous obligeant à réduire nos investissements par de l'autoconstruction. Il faut aussi noter que certains matériaux ont exigé des durées d'approvisionnement très longues. Par exemple, la fibre de bois de 60 mm des doublages a dû être changée par de la laine de verre de 60 mm à cause de l'augmentation conséquente de son prix et d'une durée d'approvisionnement incertaine.

Les lots suivants ont été réalisés en autoconstruction : plomberie, eau chaude sanitaire par ballon solaire, ventilation double flux, pose d'une partie de l'isolation, ponçage et huilage des sols en plancher trois plis épicéa, vernis sur chape anhydrite, peinture, pose des carrelages et faïences, végétalisation des toitures-terrasses et aménagements extérieurs. »

Remerciements et sources
Nicolas Maurice, A2A Architectes

14 Qualité sanitaire

(Crédit photo : INTERVAL PHOTO)

Cette problématique sanitaire reste encore très insuffisamment prise en compte dans la construction d'établissements scolaires, mais aussi des maisons individuelles : « **Quant au logement, où aucun contrôle n'est réalisé, la santé reste trop souvent un argument marketing ; car, dans les faits, les exigences sanitaires lors de la conception ont le plus souvent disparu quand vient le moment de la livraison** »[23], ce qui n'est pas le cas des maisons bioclimatiques et passives.

14.1 Qualité de l'air intérieur

14.1.1 Qualité de l'air et taux de renouvellement de l'air

Un des bénéfices de la construction passive est de garantir une meilleure qualité de l'air intérieur, en évitant les entrées de particules fines, en limitant les sources de pollution à l'intérieur du logement et en maintenant un air sain grâce à un bon renouvellement d'air.

La mauvaise qualité de l'air dans les logements est une source de désordres dans le bâtiment (humidité et moisissures) et provoque des maladies (allergies, asthme, maladies cardiovasculaires, cancers) et des décès estimés à 20 000 par an.

Un des indicateurs mesurant la pollution de l'air due aux occupants est le dioxyde de carbone. Celui-ci a un impact sur les fonctions cognitives. Une concentration de 1 000 ppm réduit de 20 % les fonctions cognitives des enfants dans les écoles et une concentration de 1 400 ppm de 50 %[24].

Même si le dioxyde de carbone n'a pas d'impact direct sur la santé, il constitue un bon indicateur de la pollution de l'air.

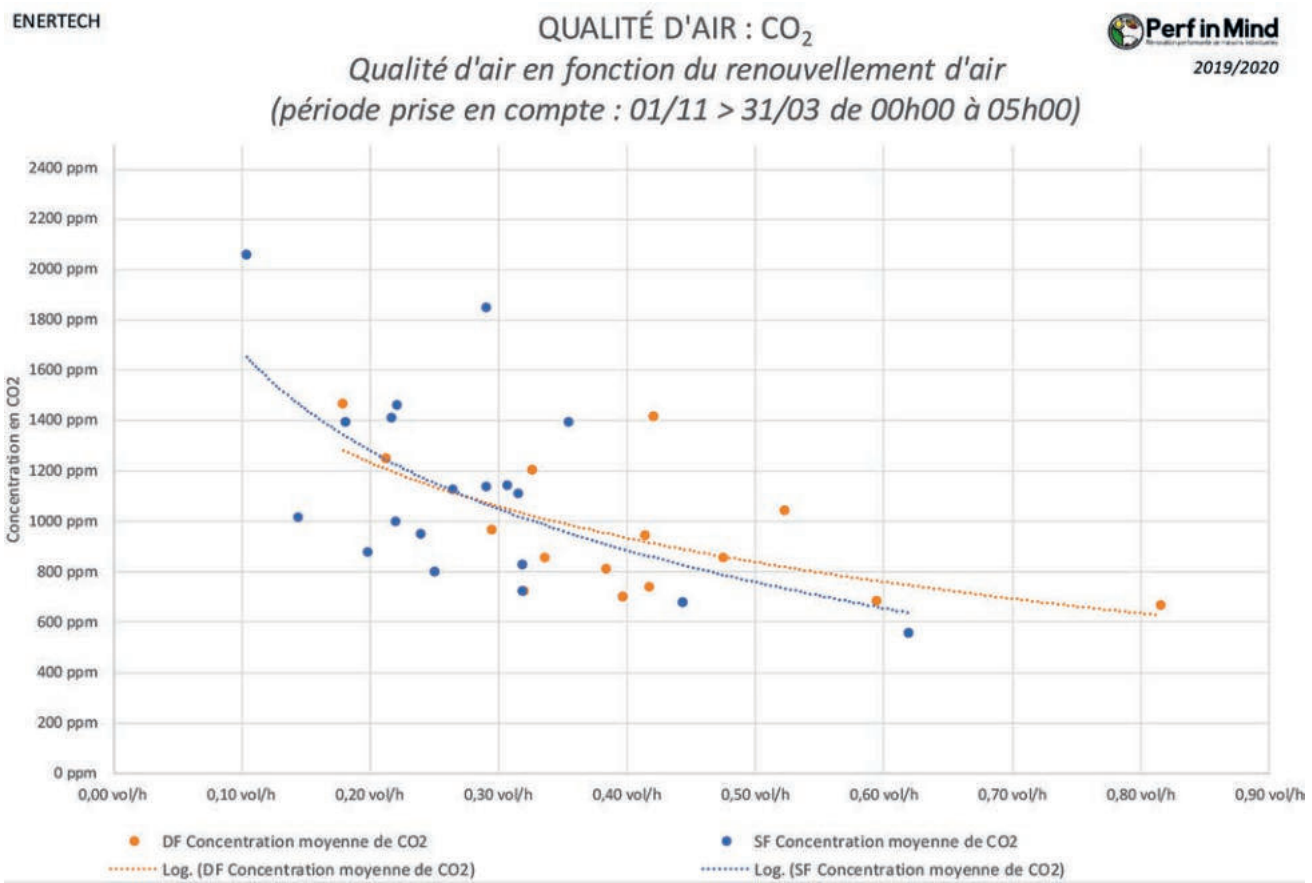
▼ **Tab.** 14.1. Concentration en CO_2 par rapport à l'air neuf en ppm (Source : norme EN 13779)

Niveau de concentration	Valeur par défaut	Qualité de l'air
≤ 400	350	Excellente
400 à 600	500	Moyenne
600 à 1 000	800	Modérée
> 1 000	1 200	Faible

L'étude de *Perf in Mind* démontre la corrélation entre la concentration en CO_2 des maisons et le taux de renouvellement d'air : le taux de renouvellement d'air effectif détermine la qualité de l'air intérieur, plus encore que le type de ventilation (simple flux ou double flux).

Le réglage et la conformité du débit d'air sont des paramètres essentiels à la bonne qualité de vie dans le logement.

23. Docteur Suzanne Déoux, Le Moniteur, 11 mai 2018, page 24.
24. Guide Nanosense de la QAI dans les écoles.



▲ **Fig. 14.1.** Qualité de l'air mesuré par le taux de CO_2 moyen pendant la nuit en fonction du taux de renouvellement d'air (Source : Enertech)

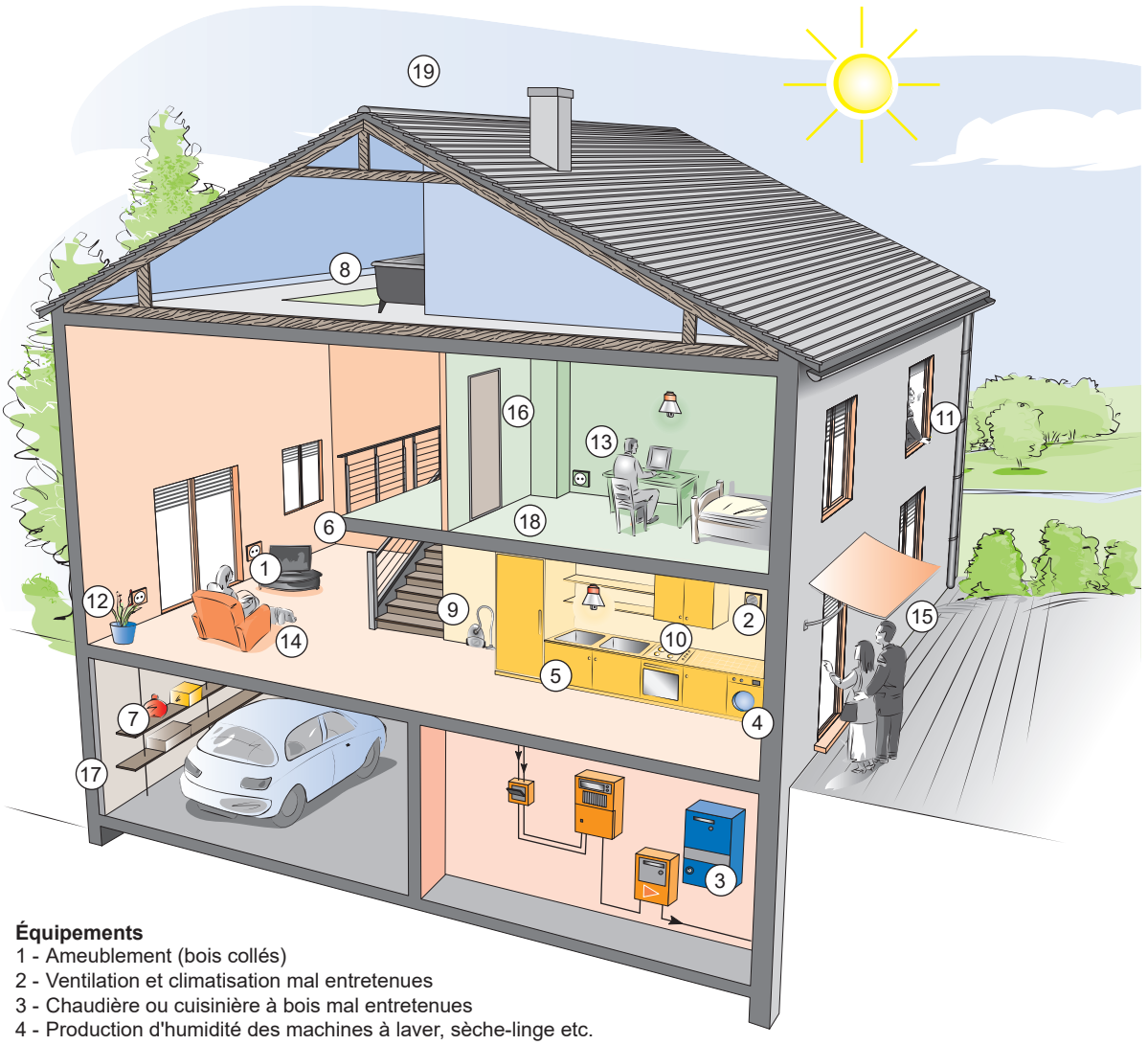
Ainsi, si on souhaite vivre dans une ambiance avec une qualité d'air excellente, moyenne ou modérée, il faut un taux de renouvellement d'air de 0,5 vol/h, soit le niveau de renouvellement d'air attendu en simple flux autoréglable ou en double flux, mais pas celui de la ventilation hygroréglable (0,3 vol/h).

Un avantage de la ventilation double flux est la présence de filtres qui peuvent retenir jusqu'à 95 % des particules PM10 et PM2,5 contrairement à tous les autres systèmes de ventilation, grâce notamment à la présence de filtres de haute performance F7. Proches d'une voie à grande circulation, la ventilation simple flux ne permet pas de filtrer suffisamment les particules fines. Mais une action essentielle pour le bon fonctionnement de la ventilation double flux est le nettoyage des filtres et leur changement périodique, en moyenne une à deux fois par an, le rythme de remplacement étant fonction du niveau de la pollution extérieure.

Dans certaines régions où l'air est particulièrement sec, **le taux d'hygrométrie** peut-être un sujet de préoccupation dans les maisons passives. En effet on reproche parfois à la VMC double flux d'avoir tendance à assécher l'air. De nombreuses solutions existent et en premier lieu le choix d'un système de ventilation muni d'une membrane enthalpique permettant de récupérer jusqu'à 65 % de l'humidité de l'air extrait (sans transfert de bactéries). Le système fonctionne aussi l'été si l'air neuf est trop humide. La gestion de l'humidité peut aussi être gérée par la présence d'un mur avec un matériau ayant des capacités hygroscopiques telles que la terre crue, le béton de chanvre ou de lin.

Un mur en PMC[25] (constitués de planches en bois massif empilées en couches croisées et collées entre elles sur toute leur surface) peut aussi gérer l'humidité, mais avec une réactivité moins importante que le béton de chanvre.

25. PMC panneaux multi-plis de construction.



Équipements
1 - Ameublement (bois collés)
2 - Ventilation et climatisation mal entretenues
3 - Chaudière ou cuisinière à bois mal entretenues
4 - Production d'humidité des machines à laver, sèche-linge etc.
5 - Poubelles, stockage des déchets
6 - Cheminée ou poêle mal entretenus

Activités humaines
7 - Bricolage, émanations des voitures, motos etc.
8 - Produits de toilette et cosmétiques, humidité
8 - Aspirateur, produits d'entretien, parfums d'intérieur, bougies, encens etc.
10 - Cuisson
11 - Tabagisme

Occupation des locaux
12 - Plantes (allergènes, engrais, pesticides)
13 - Métabolisme
14 - Animaux

Sol
15 - Émanations naturelles (radon), sols contaminés

Matériaux de construction et de décoration
16 - Peintures, vernis, colles
17 - Isolants
18 - Revêtements de sols, murs, plafonds

Air extérieur
19 - Gaz d'échappement, activités industrielles ou agricoles, chauffage au bois non performant, pollens etc.

▲ **Fig. 14.2.** Les principales sources de pollution de l'air intérieur (Source : A. Bouteveille)

14.1.2 Le radon

Les zones à potentiel radon de catégories 2 et 3 sont celles localisées sur des formations géologiques présentant des teneurs en uranium qui peuvent faciliter le transfert du radon vers les bâtiments. L'objectif est de limiter la concentration en radon à moins de 300 Bq/m^3 et de viser la valeur la plus basse possible (le niveau moyen en France est de 100 Bq/m^3)[26].

Dans ces zones, **il est recommandé d'aérer quotidiennement le domicile (ventilation naturelle) et/ou de mettre en place une ventilation double flux**, les filtres pouvant se charger de réduire la concentration en radon dans la maison. Là encore, le bon fonctionnement de la ventilation est important avec de l'entretien régulier et un taux de renouvellement d'air de l'ordre de 0,5 vol/heure.

En revanche, la ventilation simple flux contribue à une mise en dépression de la maison et favorise le transfert de ce gaz issu du sol vers l'intérieur. Le renouvellement d'air normal de la simple flux hygroréglable (0,3 vol/h, seuil réglementaire aujourd'hui en France) est jugé insuffisant dans les zones à potentiel radon relativement élevé.

14.1.3 La pollution électromagnétique

Des maîtres d'ouvrage peuvent souhaiter se protéger contre les ondes électromagnétiques avec un câblage bioélectrique. La bioélectricité consiste à réduire les émissions électromagnétiques produites par les installations électriques. Ainsi, il est recommandé de ne pas dépasser un champ électrique de 5 V/m dans les zones de repos (voire moins selon les sources). Les installations classiques créent des champs électriques généralement nettement supérieurs allant de 10 à plus de 50 V/m. Une installation bioélectrique avec un câblage adapté réduit ce champ à moins de 1 V/m.

La maison témoin de l'entreprise Voegelé à Neuve-Eglise[27], dans le Bas-Rhin, a installé un écran antimagnétique entre le contre-lattage et le panneau OSB afin de limiter l'impact des ondes émises par une ligne haute tension située en contrebas du terrain.

La maison Claudet à Rousset[28] dans les Bouches-du-Rhône a installé son système électrique avec des gaines blindées pour éviter les champs électriques et magnétiques sur l'ensemble de la maison. Ces gaines vont « tirer » les champs électriques émis par les conducteurs d'alimentation à la terre, ce qui réduit considérablement leur niveau (inférieur à 10 V/m). Pour les champs magnétiques, l'utilisation de conducteur torsadé permet également de réduire le champ (inférieur à 2 mG).

▲ Mise en place d'une barrière antimagnétique contre les ondes émises par la ligne HT (Crédit photo : Maisons Voegelé)

▲ Tableau électrique avec utilisation des gaines Courant (Crédit photo : Frédéric Claudet)

26. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires, *Le zonage radon sur ma commune*, mai 2023.

27. *Maisons Individuelles Passives*, 2e édition, pages 253 et suivantes.

28. *Maisons Individuelles Passives*, 2e édition, pages 291 et suivantes.

14.2 Sobriété active et bâtiment passif

La sobriété énergétique est définie comme **l'ensemble des actions volontaires** (et donc non contraintes) qui permettent d'économiser une partie de la consommation d'énergie.
Un certain nombre de gestes de sobriété énergétique, gratuits ou presque, permettrait d'économiser jusqu'à 30 % de la consommation d'énergie dans les logements, selon l'association négaWatt.
Les principales mesures qui peuvent accompagner les actions plus lourdes de rénovation énergétique sont principalement des actions de bon sens que beaucoup de ménages font naturellement. D'autres demandent des investissements très peu coûteux :

En matière de chauffage[29] :

– Surveiller la température dans la maison et dans les différentes pièces en suivant un adage de l'Ademe : « *19 °C dans les pièces à vivre, 16 °C dans les chambres, c'est bon pour la santé, le porte-monnaie et l'environnement* ». Il convient aussi de réduire la température en cas d'inoccupation prolongée ou de ne chauffer que les pièces occupées. La température de consigne de chauffage varie généralement de 19 °C à 21 °C. Dans les logements non rénovés, l'impact est une augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage de 7 % par degré supplémentaire. Une fois le logement rénové BBC, l'augmentation relative sera plus importante de 15 % sur un besoin de chauffage de l'ordre de 40 kWh/(m^2.an), soit environ 6 kWh/m^2 et par °C.
– Adopter les vêtements portés en intérieur selon la saison.
– Poser des films isolants quand les menuiseries sont encore en simple vitrage (en attendant de les changer).
– Réduire des infiltrations des fenêtres et des portes.
– Isoler les combles perdus.

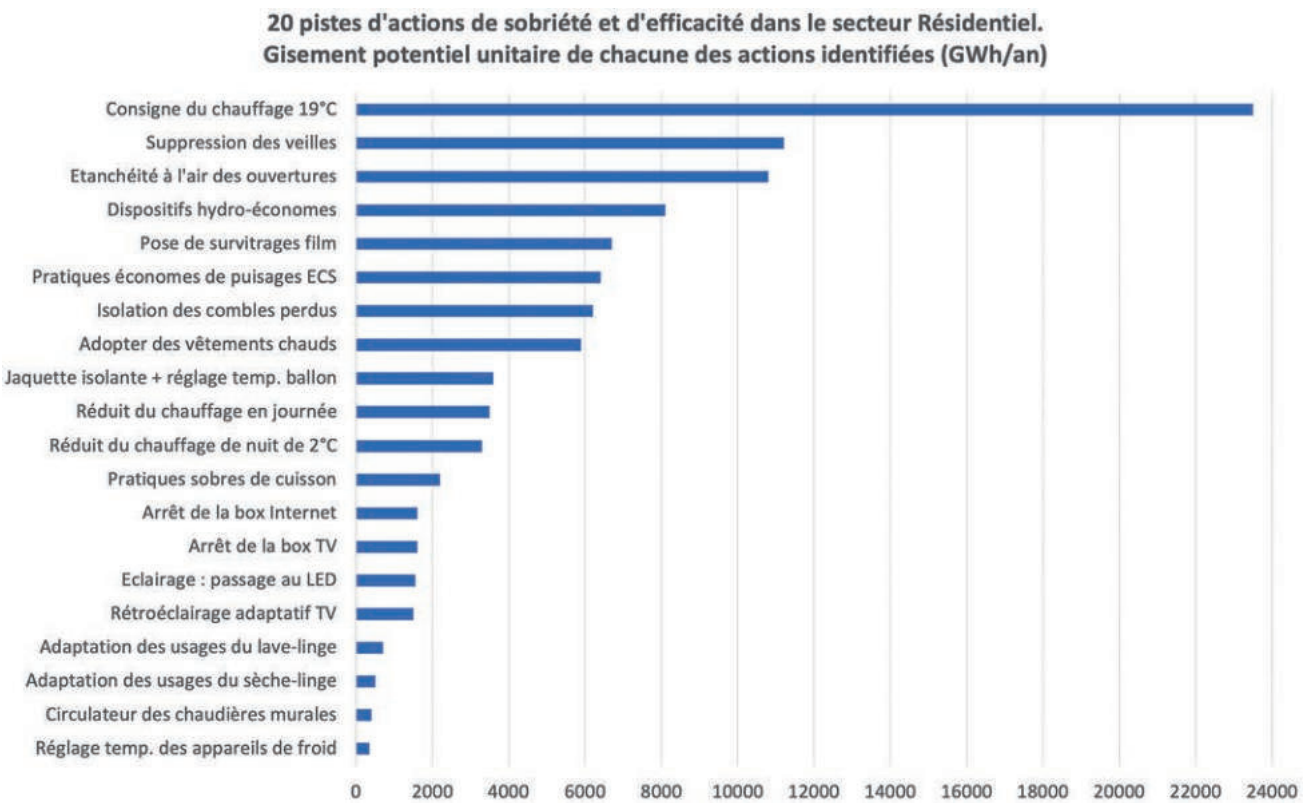
En matière d'eau chaude sanitaire (ECS) :

– Régler la température de l'ECS entre 55 et 60 °C pour éviter l'entartrage du chauffe-eau (ce qui est suffisant pour limiter le développement de bactéries pathogènes).
– Économiser l'eau (et l'eau chaude par conséquent) avec des équipements tels que :
- des robinets mitigeurs ou mitigeurs thermostatiques pour la douche et le bain ;
- des réducteurs de débit de 50 % au nez des robinets ;
- des douchettes à turbulence sur les baignoires ;
- des robinets à infrarouge, des détecteurs de proximité sur les robinets ;
- un lave-linge et un lave-vaisselle économes en eau (et en électricité), si possible directement raccordés sur l'alimentation en eau chaude ;
- des chasses d'eau double flux pour les toilettes.

En matière de consommation électrodomestique, certaines « *bonnes* » pratiques peuvent se révéler assez contraignantes, telles que l'extinction des appareils en veille, des appareils allumés inutilement ou des box internet et box TV en dehors des heures d'utilisation. Certaines pratiques de cuisine peuvent amener des économies substantielles, de même que les bonnes pratiques d'usage des appareils de lavage (vaisselle, linge), du repassage et de l'éclairage.
Le réglage des pompes de chauffage murales gaz et leur asservissement au brûleur pourraient aussi être réalisés par les installateurs au moment de la mise en service des chaudières.
Un geste tout à fait essentiel est **le réglage des installations** quelques mois et années après la mise en service. Le réglage des débits de ventilation, du renouvellement d'air, des températures de consigne est absolument indispensable pour optimiser les besoins énergétiques et assurer un confort thermique et d'usage du logement.
Plusieurs opérations exemplaires présentées dans cet ouvrage ont inscrit **un suivi de la maison** dans le contrat de maîtrise d'œuvre. La labellisation est également un moyen d'assurer la performance, mais le commissionnement est d'autant plus nécessaire que la maison est performante.
Un autre constat à rappeler est que la performance de la maison dépend du comportement de ses occupants. Dans une maison passive située dans les Pyrénées-Atlantiques, les propriétaires ont loué un été leur maison durant trois semaines et les relevés ont indiqué des températures intérieures supérieures à 31 °C alors que les relevés faits à d'autres périodes avec les propriétaires indiquaient un très bon comportement de la maison (température intérieure inférieure à 26 °C, y compris pendant des périodes de canicule)[30]. Des volets ou des fenêtres qui restent ouverts pendant les périodes chaudes et l'absence de surventilation nocturne rendent la maison beaucoup moins agréable en l'absence de climatiseurs…

29. Charlot-Valdieu Catherine et Outrequin Philippe. *Réhabilitation énergétique des logements*, éditions Le Moniteur. 2018, pages 63 à 65.

30. Voir Charlot-Valdieu Catherine et Outrequin Philippe. *Maisons individuelles passives*, édition Le Moniteur, 2019, pages 329 à 335.



▲ **Fig. 14.3.** Gisement mobilisable par mesure selon l'institut négaWatt en GWh par an pour l'ensemble du secteur résidentiel (Source : Association négaWatt, *Sobriété – négaWatt présente des propositions chiffrées*, septembre 2022)

14.3 Réduction de l'empreinte environnementale

L'évaluation de l'empreinte environnementale d'un bâtiment est régie par la réglementation environnementale RE 2020, en vigueur pour les permis de construire déposés depuis le 1er janvier 2022, pour les bâtiments d'habitation.
Cette évaluation se base sur le principe de l'analyse du cycle de vie (ACV) qui mesure les impacts du bâtiment sur plusieurs indicateurs environnementaux, sur une période conventionnelle de 50 ans.
L'ACV cherche à prendre en compte les impacts sur l'environnement depuis la production des matériaux et équipements jusqu'à leur fin de vie et le traitement des déchets qui en découle.
Dans cette analyse, nous pouvons distinguer :
– les composants du bâtiment y compris les réseaux, les systèmes de production d'énergie et les parkings : matériaux (béton, acier, bois, ouate de cellulose, etc.) et équipements (chaudière, ventilation, canalisations, etc.) ;
– les consommations d'énergie du bâtiment pendant sa phase d'exploitation ;
– les impacts du chantier en termes de consommation d'énergie, de gestion de l'eau et des déchets notamment ;
– les consommations et rejets d'eau ;
– les impacts liés aux aménagements tels que les clôtures, les voiries extérieures à la parcelle, les espaces verts, etc.
Dans la RE2020, seuls sont réglementés les trois premiers items sur un seul critère : l'impact sur le changement climatique qui est évalué en kg $eqCO_2/m^2$ de surface habitable :
$Ic_{construction}$ = Impact sur le changement climatique des produits de construction et équipements et de leur mise en œuvre (somme des items composants et chantier)
$Ic_{énergie}$ = Impact sur le changement climatique des consommations d'énergie pendant la vie du bâtiment.
Il existe d'autres critères environnementaux non réglementaires[31].
Pour ces deux indicateurs, la RE2020 a fixé des plafonds d'émission qui évoluent tous les trois ans jusqu'à 2031.
Valeur de Ic $_{énergie}$ maximum ≤ 160 kg $eqCO_2/m^2$ pour les cinq usages réglementaires (chauffage, refroidissement, eau

31. Ministère de la transition écologique, *Guide RE 2020*, janvier 2024, page 15.

chaude sanitaire, éclairage et auxiliaires de chauffage dont la ventilation) pondérés en fonction de la zone climatique, de l'altitude, de la surface de combles aménagés, de la surface du logement et des contraintes de ventilation et d'ouverture des fenêtres.

L'exigence est de 280 kg $eqCO_2/m^2$ pour un raccordement au gaz si la parcelle est concernée par un permis d'aménager octroyé avant le 1er janvier 2022 ou comprise dans le périmètre d'une zone d'aménagement approuvée avant cette même date.

Les maisons présentées dans l'ouvrage ont toutes été réalisées avec la RT2012 qui ne prévoyait pas cette exigence sur le changement climatique. Qu'en sera-t-il des maisons construites avec des permis de construire déposés depuis 2022 ?

Aucune de nos maisons passives n'étant au gaz, on peut se concentrer sur des maisons qui n'utilisent que l'électricité. Dans ce cas, il est nécessaire que la consommation d'énergie des cinq usages réglementaires ne soit pas supérieure à :

160/50 = 3,2 kg éq. CO_2/an soit 3,2/0,079 kg$eqCO_2$/kWh = **40,5 kWh/(m².an)**

Toutes les maisons passives présentées dans cet ouvrage respectent cet indicateur.

La valeur de $Ic_{construction}$ diminue dans le temps devant passer de 640 kg $eqCO_2/m^2$ dans la période 2022/2024 à 415 kg $eqCO_2/m^2$ à partie de 2031, valeurs modulées comme précédemment (plus une modulation en fonction de l'importance des données par défaut).

Les maisons passives se heurtent aux mêmes contraintes que les maisons RE 2020. Le recours courant à l'ossature bois, aux isolants biosourcés, au bois massif, au béton de bois, au béton de chanvre met les bâtiments passifs dans une bonne position pour répondre aux attentes de la réglementation.

Le tableau 14.2. compare les caractéristiques de différents matériaux selon deux critères : l'impact sur le changement climatique à travers la quantité de CO_2 stocké et les consommations d'énergie nécessaires à leur production et usage sur leur cycle de vie, appelées énergies grises. Les valeurs indiquées sont à titre indicatif, car elles sont variables dans une certaine proportion selon les sources et les entreprises et que les méthodes de mesure sont fréquemment rediscutées. Ces éléments d'information sont issus des fiches Inies – base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction, servant de référence au calcul du $Ic_{construction}$.

▼ **Tab.** 14.2. Énergies grises et contribution au changement climatique de quelques systèmes de construction

Produit	Masse volumique	Transmission thermique λ	Épaisseur isolant pour R = 5 m².K/W	Énergie grise	Changement climatique
Unité	Kg/m³	w/(m.K)	cm	kWh/m²	Kg $eqCO_2/m^2$
Murs porteurs avec isolants à ajouter					
Voiles en béton	2 430	Épaisseur du mur : 20 cm		76	42
Briques	630	Épaisseur du mur : 20 cm		120	31
Laine de verre	30	0,032	16,0	79	5
Laine de roche	50	0,035	17,5	37	12
Polystyrène PSE	17	0,035	17,5	82	11
Polyuréthane	40	0,022	11,0	48	17
Fibre/laine de bois	55	0,038	19,0	42	– 3
Ouate de cellulose	40	0,040	20,0	14	1
Murs de remplissage (avec ossature bois)					
Paille	130	0,065	32,5	71	– 8
Bloc de lin	340	0,065	32,5	58	– 1
Chanvre projeté	340	0,072	36,0	102	21

Source : les auteurs à partir de données de La Calade et Stéphen Mure Architectes

Pour lire le tableau, un mur en voile de béton isolé avec 17,5 cm de polystyrène aura un contenu en énergie grise de 76 + 82 = 158 kWh/m^2 et une émission de CO_2 de 42 + 11 = 53 kg eq.CO_2/m^2. Pour un mur en béton isolé en ouate de cellulose, les valeurs sont respectivement de 90 kWh/m^2 et 43 kg eqCO_2/m^2.
Un mur en chanvre projeté non porteur aura un contenu en énergie grise de 102 kWh/m^2 et une émission de CO_2 de 21 kg éq. CO_2/m^2.

Les données à retenir dépendent du fabricant du produit. Deux produits apparemment comparables ont parfois des ACV très différentes, les valeurs proposées sont à prendre avec beaucoup de précaution.

Table des matières

Sommaire 3

Avant-propos 5

Partie 1 L'écosystème passif 7

Chapitre 1 – Cadre général 8

1.1 Qu'est-ce qu'une maison passive ? 8

1.2 La place de la maison individuelle dans les décennies à venir 11

1.3 Panorama régional des maisons individuelles passives 11

1.4 Le positionnement du passif par rapport à la RE 2020 12

1.4.1 Des différences fondamentales dans les calculs 12

1.4.2 Comparaison de la consommation d'énergie d'une maison RE2020 calculée avec le moteur de calcul réglementaire et avec le PHPP 13

1.4.3 Des obligations de moyens très contrastées 14

Chapitre 2 – Les différents labels et outils 15

2.1 Les labels de la construction passive 15

2.1.1 Une obligation de résultat 15

2.1.2 Le label Bâtiment Passif Classique 17

2.1.3 Les labels Premium et Plus pour les bâtiments producteurs d'énergie 18

2.1.4 Les labels EnerPHit pour la rénovation 20

2.1.5 Les spécificités de la certification délivrée par la FFCP 21

2.1.6 Le label suisse Minergie-P® 23

2.2 Les outils de référence 24

2.2.1 Un outil fiable pour la conception passive : le PHPP 24

2.2.2 La STD en complément du PHPP pour assurer le confort d'été 26

2.2.3 Des produits certifiés à efficacité garantie 26

Chapitre 3 – Les acteurs 27

3.1 Qui réalise des maisons passives ? 27

3.1.1 La place centrale du maître d'ouvrage 27

3.1.2 Une structure du marché de la construction peu favorable 30

3.2 Conditions de réalisation d'une maison passive 32

3.2.1 Les exigences minimales pour réussir un projet passif 32

3.2.2 L'importance du couple architecte – thermicien et des schémas de détail pour satisfaire les exigences de performance et de qualité 33

3.2.3 Le rôle des collectivités locales : services Bâtiment et Urbanisme 35

Partie 2 Les aspects techniques de la maison individuelle passive 37

Chapitre 4 – Le traitement de l'enveloppe du bâtiment 38

4.1 Une conception architecturale bioclimatique 38

4.2 La compacité des maisons passives 40

4.3 L'isolation de l'enveloppe opaque 40

4.3.1 Déperditions thermiques 40

4.3.2 Définition de l'enveloppe chauffée 40

4.3.3 Isoler les murs 41

4.3.4 Isoler la toiture 41
4.3.5 Isoler le plancher bas 42

4.4 Le choix des menuiseries 42
4.4.1 Le choix du triple vitrage 42
4.4.2 Les caractéristiques du triple vitrage 43
4.4.3 Traitement de la porte d'entrée 44

4.5 Les points incontournables de la construction passive ou la gestion des interfaces 44
4.5.1 Assurer la continuité de l'enveloppe isolée 45
4.5.2 Rendre la maison étanche à l'air 45
4.5.3 Traiter les ponts thermiques 48
4.5.4 Gérer la vapeur d'eau 49

Chapitre 5 – Les isolants biosourcés de la construction passive 52

5.1 Introduction 52

5.2 La ouate de cellulose 57

5.3 La paille 59

5.4 La terre crue 62

5.5 Les fibres et laines de bois 64

5.6 Les textiles recyclés 65

5.7 Le chanvre 66

5.8 La pierre ponce 67

5.9 Le lin 69

Chapitre 6 – La ventilation et les systèmes techniques 70

6.1 La ventilation 70
6.1.1 Quel système de ventilation ? 70
6.1.2 La ventilation double flux, indissociable de la maison passive 72
6.1.3 Quels systèmes de ventilation double flux ? 73
6.1.4 Le métier de ventiliste : une exigence de la ventilation 73

6.2 Le chauffage d'appoint 74
6.2.1 Les systèmes d'appoint de chauffage 74
6.2.2 La pompe à chaleur (PAC) 75
6.2.3 Les systèmes compacts 4 en 1 ou systèmes de ventilation thermodynamiques 77
6.2.4 Poêles à bois 78
6.2.5 Le puits canadien 79

6.3 L'eau chaude sanitaire 80

Chapitre 7 – Les actions écologiques complémentaires 83

7.1 Des gestes simples 83

7.2 Une maison passive : une maison *low-tech* ? 84

7.3 Les autres équipements 85

Partie 3 Opérations exemplaires 87

Chapitre 8 – Maisons à ossature bois en secteur diffus 88

1 Chambles, une maison orientée au nord et en altitude 91
Le Projet 91
Techniques constructives et solutions techniques 95
Étanchéité à l'air 95
Coefficient de compacité 95
Performance énergétique (PHPP) 97
Consommation d'énergie théorique 98
Retour d'expérience sur le projet 98
Le point de vue du maître d'ouvrage 98

2 Perros Guirec, une maison contemporaine glissée entre les arbres 99
Le projet 99
Techniques constructives et solutions techniques 102
Étanchéité à l'air 104
Compacité 104
Performance énergétique (PHPP) 104
Consommation d'énergie théorique 104
Retour d'expérience sur le projet 104
Le point de vue de l'architecte 104

3 Fougères, une maison passive à colombages dans le quartier médiéval 105
Le projet 105
Techniques constructives et solutions techniques 108
Étanchéité à l'air 108
Compacité 108
Performance énergétique (PHPP) 110
Retour d'expérience sur le projet 110
Consommation d'énergie 110
Le point de vue du maître d'ouvrage 110

4 Josselin, un jeu de volumes coulissants sous une même toiture 111
Le projet 112
Techniques constructives et solutions techniques 116
Étanchéité à l'air 116
Compacité 116
Performance énergétique (PHPP) 117
Retour d'expérience sur le projet 117
Consommation d'énergie et dépense énergétique. 118
Confort d'été 118
Le point de vue du maître d'ouvrage 118
Le point de vue du maître d'œuvre 118

5 Le Mans, une maison en site contraint à proximité du centre-ville 119
Le projet 120
Des schémas de détail pour les principaux ponts thermiques identifiés 122
Techniques constructives et solutions techniques 123
Étanchéité à l'air 124
Compacité 124
Inertie 124
Performance énergétique (PHPP) 124
Retour d'expérience sur le projet 124
Consommation d'énergie et dépense énergétique. 124
Le confort 124
Impacts environnementaux 125
Le point de vue du maître d'ouvrage 125

6 La Giettaz, un chalet de montagne pour la location, béton & bois 126
Le projet 127
Techniques constructives et solutions techniques 127
Étanchéité à l'air 129
Ventilation 130
Compacité 130
Ponts thermiques 131
Performance énergétique (PHPP) 133
Retour d'expérience sur le projet 133
Acoustique 134
Le point de vue du maître d'ouvrage 135
Le point de vue opérationnel du maître d'œuvre 135
Le management du projet vu par le maître d'œuvre 135

7 Sansais, une maison de constructeur bois sur pilotis 136
Le projet 137
Techniques constructives et solutions techniques 138
Étanchéité à l'air 139
Compacité 139
Performance énergétique (PHPP) 141
Retour d'expérience sur le projet 141
Consommation d'énergie et dépense énergétique. 141
Le point de vue du maître d'ouvrage 141

8 Fleury-la-Forêt et Valmondois, deux maisons préfabriquées en ossature bois 142
A. Le Projet de Fleury-la-Forêt 142
Techniques constructives et solutions techniques 143
Étanchéité à l'air 143
Compacité 143
Performance énergétique (PHPP) 144
Retour d'expérience sur le projet 145
Le point de vue des maîtres d'ouvrage 145
B. Maison avec un parement pierre en rez-de-jardin à Valmondois 146
Techniques constructives et solutions techniques 148
Étanchéité à l'air 148
Compacité 148

Performance énergétique (PHPP) 148
Retour d'expérience sur le projet 151
Le point de vue du constructeur 151

9 Saint-Avé, une maison atypique dans un quartier pavillonnaire 152
Le projet 152
Techniques constructives et solutions techniques 155
Étanchéité à l'air 155
Compacité 155
Ponts thermiques 155
La performance énergétique 156
Retour d'expérience sur le projet 156
Une architecture simple et dépouillée donnant la part belle au bois 156
Confort 157
Le point de vue du maître d'œuvre 157

Chapitre 9 – Maisons passives en ossature bois en secteur dense 158

10 Saint-Étienne, 18 maisons passives en accession dans un quartier ANRU dont 5 en ossature bois – paille 160
Le projet 161
Techniques constructives et solutions techniques 166
Étanchéité à l'air 166
Compacité 166
Ponts thermiques 167
Performance énergétique (PHPP) 167
Retour d'expérience sur le projet 167
Le point de vue de l'architecte/maître d'œuvre/promoteur 167

11 Villeneuve-Saint-Georges, 26 maisons en accession 168
Le projet 169
Techniques constructives et solutions techniques 171
Étanchéité à l'air 173
Performance énergétique (PHPP) 173
Retour d'expérience sur le projet 173
Éléments de confort 173
Le point de vue du promoteur constructeur 173

12 Florange, huit logements passifs : la résidence Passiflore 175
Le projet 176
Techniques constructives et solutions techniques 178
Étanchéité à l'air 179
Compacité 179
Performance énergétique (PHPP) 179

13 Ste-Anne-de-Portzic, une maison de plain-pied au cœur d'un lotissement RT 2012 en parpaings 180
Le Projet 180
Techniques constructives et solutions techniques 183
Étanchéité à l'air 183
Compacité 183
Ponts thermiques 183
Performance énergétique (PHPP) 187
Retour d'expérience sur le projet 187
Consommation d'énergie 187
Point de vue du maître d'ouvrage sur le confort et l'environnement 187

14 Crest, deux maisons mitoyennes en bois, terre et paille 188
Le Projet 188
Techniques constructives et solutions techniques 190
Étanchéité à l'air 190
Compacité 191
Inertie 191
Ponts thermiques 191
Performance énergétique (PHPP) 192
Retour d'expérience sur le projet 192
Consommation réelle sur compteurs 192
Confort d'été 193
Qualité de l'air intérieur 194
La gestion de l'eau 194
Le point de vue du maître d'ouvrage 194

15 Liffré, une maison adaptée au télétravail 196
Le projet 197
Techniques constructives et solutions techniques 198
Étanchéité à l'air 200
Compacité 200
Ponts thermiques 200
Performance énergétique (PHPP) 200
Retour d'expérience sur le projet 200
Consommation d'énergie et dépense énergétique. 201
Le point de vue du maître d'ouvrage 201

16 Art sur Meurthe, 12 logements en résidence senior 202
Le projet 202
Techniques constructives et solutions techniques 205
Étanchéité à l'air 205
Compacité 205
Performance énergétique (PHPP) 206
Retour d'expérience sur le projet 207
Consommation d'énergie et dépense énergétique. 207
Confort d'été 207
Qualité de l'air intérieur 207
Acoustique 207
Le jardin 207
Le retour des locataires 208

Chapitre 10 – Opérations exemplaires en bois massif 209

10.1 Le bois lamellé – collé 209

10.2 Le CLT (Cross Laminated Timber pour lamellé collé croisé) 209

17 Combrit, une maison en trois modules pour optimiser les apports solaires malgré la contrainte d'aménagement 211
Le Projet 211
Techniques constructives et solutions techniques 214
Étanchéité à l'air 215
Compacité 215
Inertie du bâtiment 215
Ponts thermiques 215
Performance énergétique (PHPP) 216
Retour d'expérience sur le projet 216
Qualité environnementale 216
Le point de vue du maître d'ouvrage/architecte 218

18 La Baule, une maison de forme complexe offrant de grands volumes 219
Le Projet 219
Techniques constructives et solutions techniques 223
Étanchéité à l'air 223
Compacité 223
Inertie du bâtiment 223
Traitement des ponts thermiques 227
Performance énergétique (PHPP) 228
Retour d'expérience sur le projet 228
Le point de vue du maître d'œuvre 228

Chapitre 11 – Opérations exemplaires en maçonnerie 231

11.1 La filière traditionnelle 232
11.1.1 Le parpaing 232
11.1.2 La brique de terre cuite 234

11.2 Le mur en béton préfabriqué 235

11.3 Le béton de bois 235

11.4 Les blocs coffrants 236
11.4.1 Blocs à bancher en polystyrène expansé (PSE). 236
11.4.2 Blocs en Néopor 237
11.4.3 Blocs coffrants en bois-ciment 238

11.5 Le béton cellulaire 238

19 Saint-Clément-de-Rivière : une aventure personnelle 241
Le Projet 241
Techniques constructives et solutions techniques 243
Étanchéité à l'air 244
Compacité 244
Déphasage thermique des parois 244
Performance énergétique 245
Retour d'expérience sur le projet 245
Confort d'été 245
Stabilité des températures 247

Bilan énergétique de janvier 2024 à décembre 2024 ... 248
Qualité de l'air intérieur ... 248
Le point de vue du maître d'ouvrage ... 248

20 Lassy, une maison R+2 avec une toiture à une seule pente ... 250
Le projet ... 251
Techniques constructives et solutions techniques ... 254
Étanchéité à l'air ... 254
Compacité ... 254
Performance énergétique (PHPP) ... 255
Note sur la puissance de chauffe ... 255
Retour d'expérience sur le projet ... 255
Le point de vue du maître d'œuvre ... 256

21 Bardos, une maison basque traditionnelle ... 257
Le projet ... 257
Un terrain très contraignant ... 257
Le chantier ... 258
Le système constructif ... 258
Techniques constructives et solutions techniques ... 260
Étanchéité à l'air ... 260
Compacité ... 260
Inertie du bâtiment ... 260
Performance énergétique (PHPP) ... 260
Retour d'expérience sur le projet ... 262
Consommation d'énergie et dépense énergétique ... 262
Le point de vue du maître d'ouvrage ... 262
Le point de vue de l'architecte ... 262

22 Oberhergheim, une maison passive de plain-pied ... 264
Le projet ... 264
Techniques constructives et solutions techniques ... 265
Étanchéité à l'air ... 266
Compacité ... 266
Performance énergétique (PHPP) ... 266
Retour d'expérience sur le projet ... 267
Consommation d'énergie ... 267
Confort d'été ... 267
Le point de vue du maître d'ouvrage ... 267

23 Wolschwiller, une maison contemporaine en béton bas carbone ... 268
Le projet ... 268
Techniques constructives et solutions techniques ... 270
Étanchéité à l'air ... 271
Compacité ... 271
Performance énergétique ... 272
Traitement des ponts thermiques ... 272
Retour d'expérience sur le projet ... 273
Confort d'été ... 273
Note sur le bilan carbone ... 273

Chapitre 12 – Opérations exemplaires en acier ... 274

24 Gosné, un conteneur de 13 m², témoin d'une petite surface passive ... 275
Le projet ... 275
Techniques constructives et solutions techniques ... 276
Étanchéité à l'air ... 278
Compacité ... 278
Inertie du bâtiment ... 278
Ponts thermiques ... 278
Performance énergétique (PHPP) ... 280
Retour d'expérience sur le projet ... 280
Le point de vue du maître d'ouvrage ... 280

25 Acigné, huit villas techni-color ... 281
Le projet ... 282
Techniques constructives et solutions techniques ... 283
Étanchéité à l'air ... 283
Compacité ... 283
La construction en atelier ... 283
La performance énergétique ... 285

Partie 4 Des atouts incontestables ... 287

Chapitre 13 – La satisfaction des usagers ... 289
13.1 Des témoignages nombreux ... 289
13.2 Des économies d'énergie et de charges ... 292
13.2.1 Une très faible consommation d'énergie ... 292

13.2.2 Suivi de la consommation d'énergie d'une maison passive construite en 2013 293

13.3 Confort d'ambiance 298

13.3.1 Confort thermique 298

13.3.2. Confort d'été 301

13.4. Confort acoustique 309

Chapitre 14 – Qualité sanitaire 310

14.1 Qualité de l'air intérieur 310

14.1.1 Qualité de l'air et taux de renouvellement de l'air 310

14.1.2 Le radon 313

14.1.3 La pollution électromagnétique 313

14.2 Sobriété active et bâtiment passif 314

14.3 Réduction de l'empreinte environnementale 315

Conclusion 318

Opérations exemplaires présentées dans ce livre 319

Bibliographie 323

Sigles et abréviations 324

Maisons passives
Concevoir, construire et habiter

La construction passive permet aujourd'hui de faire coïncider les besoins de confort, de qualité d'air, de qualité de vie et de réduction des dépenses énergétiques. Cet ouvrage fournit les clés et les recommandations nécessaires à une **conception** et une **réalisation réussies**. Il répond aux questions suivantes :

- Qu'est-ce qu'une maison passive ? Pourquoi construire ou réhabiliter en passif ? Le passif prend-il en compte le réchauffement climatique ?
- Comment construire ou réhabiliter en passif dans les différentes régions de France ? Comment intégrer les contraintes budgétaires, de terrain et réglementaires ?
- Avec qui faire construire ou réhabiliter ? Quels sont les acteurs concernés ? Comment procéder lors des différentes étapes d'un projet ?
- Quand et comment intégrer le passif dans les évolutions réglementaires et les prescriptions des maîtres d'ouvrage ? Quels zonages de performance énergétique intégrer dans les PLU ? Comment intégrer la promotion du passif dans les PLH, PLU et règlement de ZAC ou de lotissement ?

Illustré par de nombreux **plans de détail et photos en couleurs**, l'ouvrage fait la part belle aux **26 réalisations** présentées qui font l'objet : d'une analyse détaillée du contexte, d'une synthèse du projet architectural et de l'optimisation énergétique, d'une description des caractéristiques de l'enveloppe et des équipements thermiques, d'une présentation des consommations d'énergie (factures) et des coûts, et d'un retour d'expérience des usagers.

***Maisons individuelles passives* est destiné :**

- à tous les particuliers qui veulent faire construire ou réhabiliter leur maison ;
- aux architectes et maîtres d'œuvre afin de les aider à sensibiliser les maîtres d'ouvrage à travers des exemples reproductibles ;
- aux collectivités afin de les inciter à inscrire le passif dans leurs documents d'urbanisme (PLU et PLUi) et Plan Climat ;
- aux aménageurs, tant publics (collectivités locales, bailleurs sociaux, SEM, SPL...) que privés (promoteurs, investisseurs, entreprises...) pour les inciter à prescrire le passif dans leurs projets de lotissement et d'aménagement ;
- aux services de l'État pour les inciter à intégrer le passif dans leurs projets et leurs critères de financement.

Intégralement refondu et actualisé, cet ouvrage reprend les éléments qui ont fait le succès de la première édition (2018) et fait le point sur les **évolutions du marché**. Des opérations récentes y sont présentées (2020 et plus) et les **différents systèmes constructifs** (ossature bois, bois massif, maçonnerie, préfabrication, acier) sont mis en avant. Ce volume met également en évidence l'**habitat individuel dense** : la densité étant une orientation forte de l'urbanisme d'aujourd'hui afin de préserver le foncier, de limiter les zones artificialisées et de préserver la biodiversité.

Catherine Charlot-Valdieu et **Philippe Outrequin** sont tous deux économistes de formation. La thèse de Philippe Outrequin portait déjà sur les énergies grises et c'est sur la valorisation énergétique des déchets de bois qu'ils ont commencé à travailler ensemble. Depuis près de trente ans, ils œuvrent pour diffuser des démarches et des outils pour un développement plus durable des territoires et des bâtiments.

La découverte des bâtiments passifs il y a une dizaine d'années, lors de projets de recherche en Allemagne et en Autriche, les a convaincus que l'avenir des maisons individuelles et plus généralement des bâtiments passe par le respect des règles du passif ; les engagements de l'État en termes de réduction des consommations d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont conforté leur conviction.

Les deux auteurs ont coordonné (et participé à) des publications scientifiques à l'échelle européenne et internationale sur les bâtiments, les quartiers durables ou l'urbanisme durable, et publié ensemble chez différents éditeurs une vingtaine d'ouvrages dont cinq traitent des bâtiments passifs.

ISBN 978-2-281-14829-9

EDITIONS LE MONITEUR