

SOLAIRE THERMIQUE

LA MAISON QUI NE FUM



Photo © 2020 - Philippe Harig - AOC

TEXTE : PHILIPPE HEITZ
PHOTOS & ILLUSTRATIONS : PHILIPPE
HEITZ/AQC, MOLL/PRO CLIMA, SOLISART

Zéro émission de CO₂ et de particules fines pour produire tout le chauffage et l'eau chaude d'une maison confortable, à 960 m d'altitude, avec une facture d'achat d'énergie pour la chaleur de moins de 20 euros par an : retour d'expérience d'une maison solaire thermique exemplaire.

E PAS



Selon l'Ademe, le chauffage représente 66 % des consommations énergétiques d'un foyer et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) 11 %, soit un total de 77 % pour la chaleur domestique. 5,6 millions de ménages en précarité énergétique peinent à se chauffer et la production de chaleur dans les maisons d'avant 1975 engloutit 14 milliards d'euros par an, d'après l'institut négaWatt (1). Même si le chauffage au bois réussit à limiter ses émissions de particules fines grâce au poêle de masse et aux chaudières à granulés de bois, il n'en reste pas moins que toute combustion produit du CO₂, c'est incontournable. Certes, le bois est une source de chaleur renouvelable, mais sa combustion relâche dans l'atmosphère du CO₂ qui mettra 40 ans pour créer un arbre. Trop tard pour répondre à l'urgence climatique : maintenant le bois doit être au maximum utilisé en stockage de carbone, sous forme de bois de construction et d'ameublement. Journaliste pour *Qualité Construction*, je vais écrire exceptionnellement cet article à la première personne car c'est le retour d'expérience sur ma propre maison que je veux partager ici, en expliquant comment l'on peut atteindre, avec des moyens courants, zéro émission de gaz à effet de serre pour la consommation de chaleur d'une maison, un grand niveau de confort (19 à 26 °C) et une facture d'achat d'énergie dérisoire pour toute la chaleur domestique.

Convaincu qu'il me fallait concevoir et construire ma maison zéro émission de CO₂ et de particules fines – une maison qui ne fume pas –, j'ai démarré le projet en 2015. Tant pis pour le plaisir d'une flambée : ossature bois, paille, isolants biosourcés et solaire thermique seraient les piliers du projet. Et des systèmes de mesures des températures et de consommations électriques permettraient d'évaluer les résultats et de les partager.

Le fil rouge négaWatt

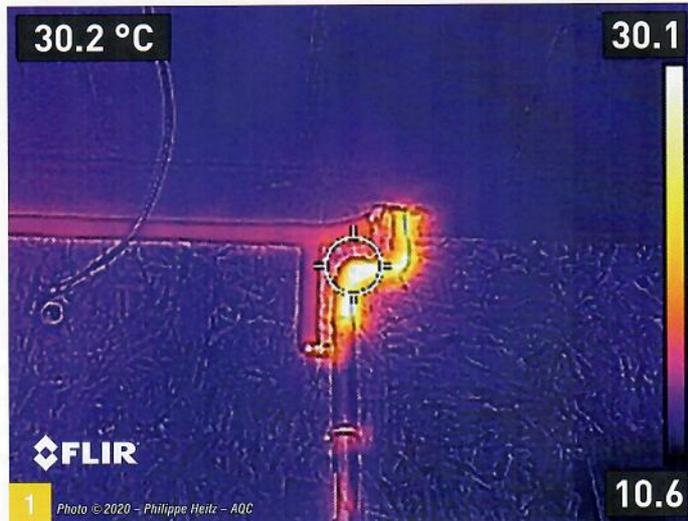
La démarche négaWatt a guidé la conception de la maison.

■ **Sobriété** : pour réussir à couvrir les besoins de chauffage avec seulement de la chaleur solaire, il fallait réduire fortement les besoins grâce à une enveloppe très isolée. La maison est située à Burdignes (Loire), village de moyenne montagne, sur la bordure nord-est du Massif Central, en limite de l'Ardèche et de la Haute-Loire. L'altitude de 960 m rend le chauffage indispensable, avec une forte amplitude des températures entre jour et nuit. Mais l'altitude favorise aussi les apports solaires hivernaux, alors que le brouillard stagne en contrebas, dans la vallée du Rhône.

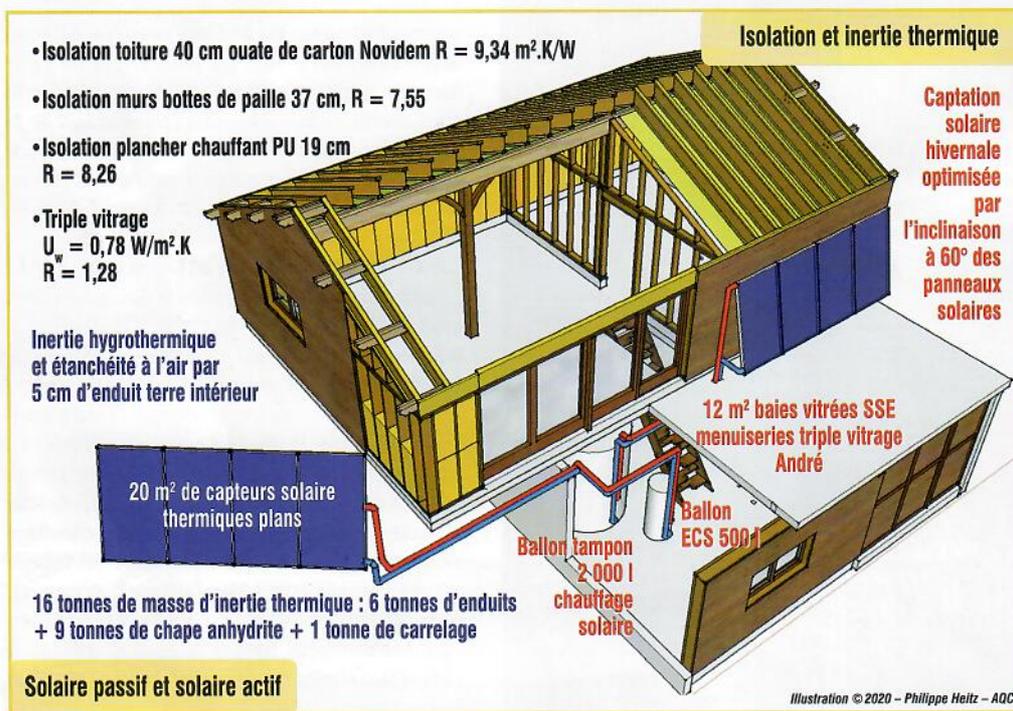
Le bureau d'études thermiques Heliasol a calculé un besoin d'énergie utile de 23 kWh/m²/an pour le chauffage : la maison n'entre pas dans le label PassivHaus (limite à 15 kWh/m²/an), mais, vu le résultat final, une dépense d'isolants supplémentaires n'aurait pas été justifiée. La sobriété concerne aussi la consommation des matériaux de construction. >>>>

(1) Le rapport *Résorber la précarité énergétique et rénover les passoires thermiques* (institut négaWatt, juin 2018) est téléchargeable sur <https://negawatt.org>.

- 1 La caméra thermique montre que la douche rejette de l'eau à 30 °C. Le récupérateur de chaleur Recoh renvoie une partie de cette chaleur vers la douche et l'autre vers le ballon sanitaire
- 2 Ossature bois et poutres en I sont dimensionnées pour loger 37 cm de paille et 40 cm d'ouate de carton (isolation répartie dans l'épaisseur de la paroi).
- 3 L'isolation paille est complétée par endroits par du liège (soubassement) et de la fibre de bois. Le frein-vapeur hygrovariable armé supporte 40 cm d'ouate de carton insufflée.



“Le récupérateur de chaleur en cuivre [...] installé sur la canalisation d'évacuation permet de récupérer une partie de ces calories rejetées pour préchauffer d'une part l'eau froide de la douche et d'autre part celle alimentant le ballon sanitaire”



La sobriété dans les équipements et les usages réduit également fortement la consommation de l'électricité, achetée au fournisseur Enercoop (100 % renouvelable, zéro carbone et zéro nucléaire). Aucune domotique dans la maison, ni de lave-vaisselle, ni de sèche-linge, ce dernier étant rendu totalement inutile par les enduits à l'argile qui absorbent l'humidité de l'air: le linge est sec en une nuit.

■ **Efficacité:** un équipement ou une énergie doit rendre un maximum de services, ou un besoin doit être couvert par un minimum d'équipement et d'énergie. En se douchant par exemple, on rejette à l'égout de l'eau à 30 °C. Dommage... Le récupérateur de chaleur en cuivre (modèle *Recoh vert*) installé sur la canalisation d'évacuation permet de récupérer une partie de ces calories rejetées pour préchauffer



Photo © 2020 - Philippe Heitz - ABC

2



Photo © 2020 - Philippe Heitz - ABC

3

d'une part l'eau froide de la douche et d'autre part celle alimentant le ballon sanitaire. Cette chaleur servira donc une nouvelle fois.

Cet équipement simple est frugal dans sa conception et son fonctionnement. Constitué de deux tubes de cuivre emboîtés, il crée une circulation double flux, comme une VMC double flux. En bas du tube de 2,20 m arrive l'eau froide, qui circule en film de 3 mm entre

[2] Voir l'article « Poutres en I : quand l'économie de matière offre de multiples avantages » paru dans le n° 172 de Qualité Construction (janvier-février 2019, pages 50-55).

les deux tubes concentriques. En haut du système, l'effluent de la douche s'écoule dans le tube métallique intérieur, cédant sa chaleur à la paroi métallique qui la transmet à l'eau froide entrante qui circule à contre-courant. La thermographie mesure une température de l'effluent de 30 °C en entrée du récupérateur et de 16 °C en sortie, preuve de l'efficacité du système, qui fonctionne uniquement par gravité.

■ **Renouvelable** : l'énergie renouvelable la plus efficace pour la production de chaleur est la chaleur du soleil, apportée par le rayonnement solaire. Celui-ci est absorbé par les surfaces sombres (phénomène physique « du corps noir »), et piégés par la réflexion sur une couche réfléchissante (gaz, verre, métal : phénomène physique « de l'effet de serre »). Un capteur solaire thermique combine un vitrage piégeant les infrarouges et une tôle bleu nuit absorbant le rayonnement. La maison associe donc la captation du rayonnement solaire par ses surfaces vitrées (solaire dit « passif » car sans dépense d'énergie) et par ses panneaux solaires (solaire dit « actif » car demandant une petite dépense d'électricité pour la circulation du fluide caloporteur).

La chaleur solaire couvrant plus de 95 % des besoins, c'est une résistance de 4 kW qui fournit le petit complément nécessaire quand les stocks de chaleur solaire sont épuisés. L'électricité fournie par Enercoop étant 100 % renouvelables, l'objectif zéro émission de GES est respecté.

L'enveloppe isolée

Le talus de trois mètres créé par la voirie communale dans le terrain naturel granitique à 14 % de pente imposait la création d'un sous-sol logeant les espaces techniques non chauffés et supportant en partie le logement en ossature bois.

Le plancher et le toit-terrasse du sous-sol, en béton armé, sont isolés par l'extérieur par plaques de 8 cm de polyuréthane. Les murs en béton enterrés sont isolés par l'intérieur avec 10 cm de fibre de bois. L'ossature bois de la façade contient 22 cm d'épaisseur de ouate de carton (Novidem).

À l'étage, les murs du logement à ossature bois sont remplis de bottes de paille (37 cm d'épaisseur) posées verticales. Côté extérieur, le fond de caisson en planches de 27 mm est recouvert d'une membrane pare-pluie soigneusement scotchée pour l'étanchéité au vent. Le parement est un bardage en Douglas peint à l'ocre. Côté intérieur, les bottes de paille sont recouvertes par un enduit terre épais de 4 à 5 cm, dont la couche de corps et les deux couches de finition réalisent à la fois l'étanchéité à l'air et le décor en sgraffito (enduit gratté).

La toiture à deux pans inclinés à 25° sera végétalisée en prairie de graminées. Les poutres en I de la charpente [2], calculées par le bureau d'études du fabricant Steico pour supporter la charge de la toiture végétalisée, forment des caissons de 40 cm fermés en dessous par un frein-vapeur hygrovariable (Intello de pro clima) et au-dessus par des panneaux contreventants de fibre de bois rigide de 16 mm (Agepan DWD). Trois tonnes de ouate de carton (Novidem) ont été insufflées dans cette toiture chaude, à isolation répartie dans toute l'épaisseur de la paroi, >>>

TABLEAU N° 1

COÛTS DE CONSTRUCTION

Le coût de construction de 1496 €/m² TTC (TVA à 20 %) montre que répondre à la fois à des objectifs ambitieux environnementaux, de confort et de charges de chauffage et eau chaude est atteignable avec des techniques courantes, disponibles localement et à des coûts de construction maîtrisés. Même si une part d'auto-construction a diminué le coût de certains lots (maîtrise d'œuvre notamment), la majorité des lots a été réalisée par les entreprises locales.

POSTE	Coût TTC
Études	3 708
Terrassement	6 832
Maçonnerie	44 222
Ossature/charpente	50 231
Fenêtres triple vitrage	8 383
Autres menuiseries	6 601
Paille	672
Autre isolation	8 085
Étanchéité à l'air	498
Cloisons et finitions	9 124
Couverture EPDM	5 006
Plomberie/sanitaires	7 146
Électricité	2 745
Solaire thermique (Solisart)	24 454
Plancher chauffant	2 544
VMC DF	1 154
Enduits terre+ocre	8 074
Chape	1 559
Étanchéité eau murs	2 882
Zinguerie	2 097
Carrelage	3 612
Terrasse	4 926
Escalier	6 349
Coût construction	210 904
Surface habitable (m²)	141
Coût construction au m²	1 496

comme celle des murs avec la paille. Cette première charpente supporte la toiture froide en chevrons 6 x 10 cm recouverts de panneaux d'OSB3, supports de l'étanchéité EPDM. Ces chevrons séparent les deux toitures pour faire les avancées de toit et créer une lame d'air de 10 cm qui débouche sur une faîtière ouverte.

Au sol, posés entre la dalle porteuse et le plancher chauffant, 19 cm de panneaux de polyuréthane renvoient la chaleur du plancher chauffant vers le volume chauffé.

Aucune ouverture au nord. L'ensemble des menuiseries extérieures (menuiserie André) est en triple vitrage. La comparaison des résistances thermiques R des différentes parois démontre que les ouvertures, même protégées par des menuiseries triple vitrage de grande qualité, sont toujours les trous dans la raquette d'une enveloppe bien isolée. Le triple vitrage est incontournable pour obtenir une enveloppe bien isolée contre le froid et contre la chaleur.

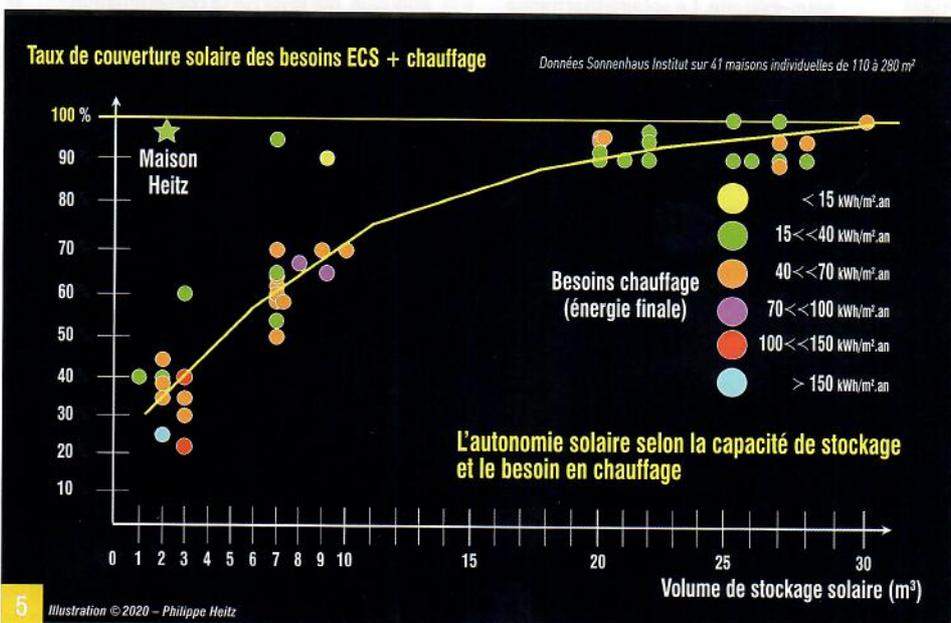
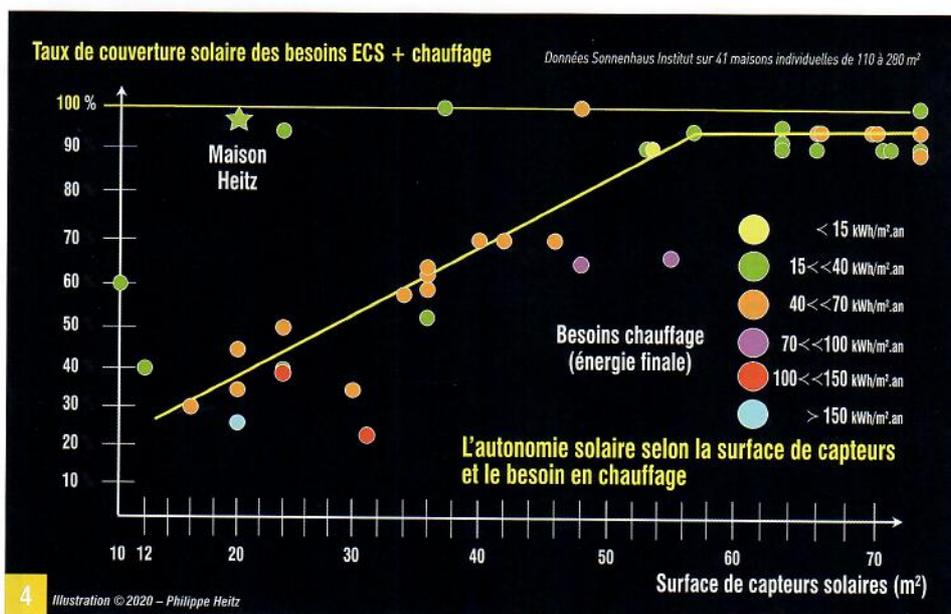
Dimensionner le système solaire

Beaucoup de visiteurs de la maison croient que ce sont des panneaux solaires photovoltaïques qui chauffent la maison. Non, car le rendement (la proportion du rayonnement solaire captée) d'un panneau thermique est d'environ 80 % contre 20 % pour un panneau photovoltaïque : pour la chaleur, il faudrait installer quatre panneaux photovoltaïques pour remplacer un panneau thermique, qui chauffe de l'eau additionnée de glycol, antigel.

Utiliser un flux d'énergie renouvelable naturelle (eau, soleil, vent), par nature intermittent, revient à adopter une stratégie agricole : récolter la ressource naturelle au bon endroit et au bon moment, la stocker et consommer en fonction des besoins et de ce stock, avec un complément éventuel par achat. Pour ma chaleur domestique, une fois le besoin réduit par l'isolation et quantifié par la simulation thermique dynamique à 23 kWh/m²/an, comment dimensionner la surface de capteurs solaires thermiques et le volume du ballon tampon de stockage, pour atteindre si possible 100 % de couverture des besoins en chauffage et ECS par le solaire ?

Le Sonnenhaus Institut allemand recense dans une base de données (3) des centaines de maisons solaires thermiques avec les critères d'ancienneté, de type de construction, de surface utile, de besoin annuel de chauffage, de surface de capteurs avec l'orientation et l'inclinaison et le taux de couverture solaire des besoins en chaleur. Compte tenu de la très grande étendue du degré de couverture solaire et du nombre de variables, il n'était pas possible de dire de façon certaine que telle surface de capteurs associée à tel volume de stockage aboutit à tel niveau de couverture solaire avec tel besoin calculé pour le chauffage. La surface à chauffer du projet étant de 86 m², j'ai donc commencé par sélectionner dans la base un échantillon de 41 maisons entre 110 (la plus petite de la base de données) et 280 m², avec des taux

(3) www.sonnenhaus-institut.de, puis bouton « Solarhäuser suche > Finden ».



“Le taux de couverture solaire des besoins en chaleur domestique :

- croît linéairement de 10 m² jusqu’à 56 m² de capteurs. Au-delà, la surface installée est inutile ;
- croît de manière logarithmique entre 1 et 30 m³ de stockage en ballon tampon”

de couverture solaire allant de 22 % à 100 %. Puis j’ai procédé à une répartition des maisons en nuage de points (voir les graphiques n° 4 et 5 présentés ci-dessus) : taux de couverture en fonction du volume de stockage et taux de couverture en fonction de la surface de capteurs. Pour l’échantillon considéré, avec des besoins en chaleur essentiellement entre 15 et 70 kWh/m²/an, il apparaît que le taux de couverture solaire des besoins en chaleur domestique :

- croît linéairement de 10 m² jusqu’à 56 m² de capteurs. Au-delà, la surface installée est inutile ;
- croît de manière logarithmique entre 1 et 30 m³ de stockage en ballon tampon.

Wantant obtenir l’autonomie solaire avec une certaine frugalité de moyens, qui serait répliquable par une grande partie des maîtres d’ouvrage français, j’ai abandonné le concept du stockage de chaleur inter-saisonnier dans des ballons de très grand volume,

▲ **4 Taux de couverture solaire des besoins chauffage et ECS en fonction de la surface des capteurs solaires.**

■ **5 Taux de couverture solaire des besoins chauffage et ECS en fonction du volume de stockage solaire.**

(Données Sonnenhaus Institut sur 41 maisons individuelles de 110 à 280 m²)

qui obligent à construire le ou les logements autour de la cuve (pouvant contenir plusieurs centaines de m³ dans certains immeubles suisses, allemands ou autrichiens). Le ballon tampon ne dépasserait pas 4 m³ pour rentrer au sous-sol et non sur deux étages. Une approximation graphique à partir des courbes obtenues et des caractéristiques des maisons les plus proches du projet (en termes de besoins de chaleur et d’équipements) m’ont amené à déposer un permis de construire pour 27 m² de panneaux solaires au sol et 4 m³ de tampon, en espérant une autonomie solaire d’environ 80 %.

La discussion technique avec l’ingénieur Olivier Godin – fondateur de l’entreprise Solisart – sur les performances du système solaire direct, m’a convaincu de réduire encore les moyens engagés à 20 m² de capteurs et 2 m³ de volume tampon pour le chauffage et 500 litres pour l’ECS. >>>

PAROLE D'EXPERT

OLIVIER GODIN > Ingénieur thermicien fondateur de l'entreprise savoyarde Solisart, et vice-président en charge du solaire thermique d'Enerplan, syndicat des acteurs du solaire. Développeur passionné du solaire direct, il a déposé un brevet sur la gestion des trop-pleins d'énergie d'été des capteurs solaires, grâce à la décharge nocturne par les panneaux de l'excédent de chaleur stocké la journée dans le ballon sanitaire.

Le solaire, seule énergie avec aucun impact négatif sur l'environnement, facile à mettre en œuvre et à exploiter partout, combinable avec toute autre énergie

« On le voit avec cette maison, le solaire direct suffit largement à se chauffer. Sur les courbes de comparaison avec l'échantillon de la base de données du Sonnenhaus Institut, on voit que, pour une autonomie solaire supérieure à 90 %, le solaire direct réduit d'un tiers la surface capteurs nécessaire et divise par 10 le volume de stockage. Plus économique en prix et en ressources ! La COVID-19 a accéléré la prise de conscience des gens sur l'intérêt du solaire thermique. Trois nouvelles demandes apparaissent. D'abord de l'autonomie, pour ne plus dépendre des augmentations et des approvisionnements en énergies fossiles, ni des incertitudes et des coûts de la maintenance. Ensuite une production de chaleur respectueuse de

l'environnement. Enfin, une production industrielle locale, loin des aberrations et des risques de rupture des approvisionnements en Chine. Le solaire thermique produit en métropole entre 300 et 1000 kWh par m² par an. C'est un gisement d'énergie gratuite et inépuisable complètement sous-exploité. Le solaire thermique permet le stockage dans l'eau de l'énergie produite, ce qui compense sa disponibilité aléatoire, sans risque ni matériaux dangereux ou polluants. C'est la seule énergie avec aucun impact négatif sur l'environnement, facile à mettre en œuvre et à exploiter partout, combinable avec toute autre énergie. La filière française est créatrice d'emploi, la fabrication et l'installation sont réalisées en France, la chaîne de

valeur est locale. Elle est même exportatrice nette d'équipements et elle réduit les importations d'énergie. Malgré ses avantages pour notre balance commerciale, pour l'environnement, pour la production industrielle du pays, c'est l'énergie qui a le soutien le plus faible de la puissance publique, qui favorise la consommation d'électricité en orientant un maximum d'aides vers le photovoltaïque et les pompes à chaleur. L'absence de communication de la puissance publique sur le solaire thermique est pénalisante pour nos entreprises, alors même que la qualité des installations a beaucoup progressé depuis dix ans. Solisart vient d'ailleurs d'être labellisée "Solar Impulse Efficient Solution" par la fondation Solar Impulse. » ■

Bonne analyse : la sobriété et l'efficacité thermique de la construction et du système solaire direct Solisart ont donné des résultats au-delà des prévisions, avec 97 % de couverture entre le 1^{er} février 2019 et le 1^{er} février 2020.

Le solaire direct plus efficace

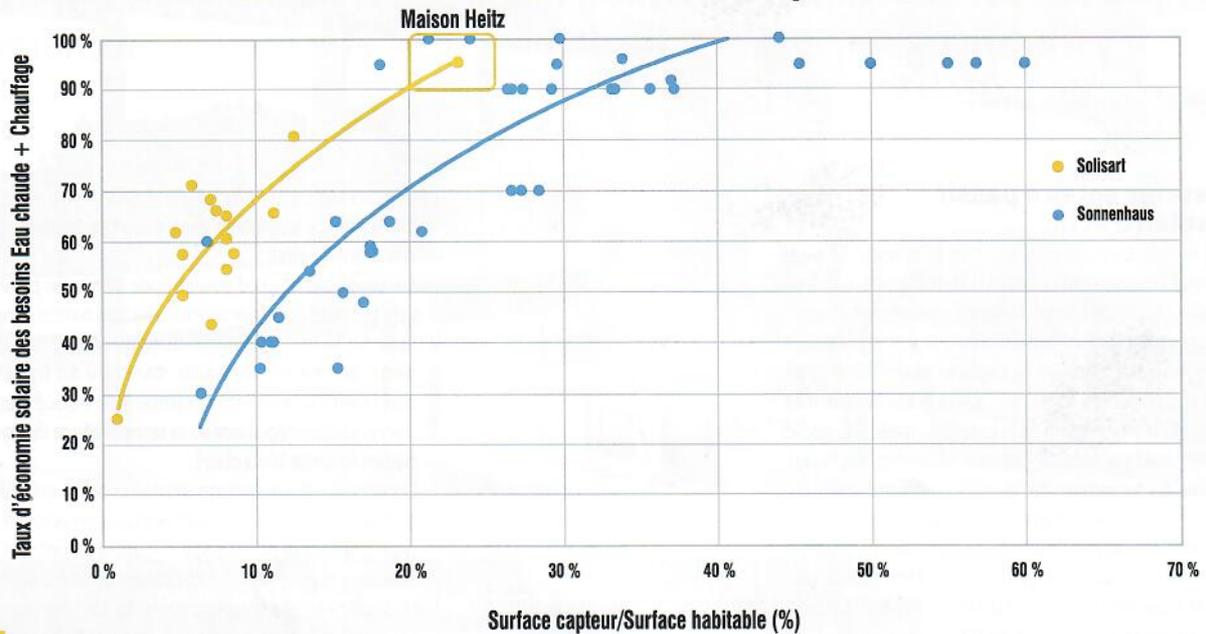
Le système solaire fabriqué par l'entreprise savoyarde Solisart (4) est caractérisé par le solaire direct : la chaleur des capteurs est d'abord envoyée directement dans le plancher chauffant, sans passer par un ballon échangeur. Quand la température intérieure atteint 23 °C (consigne réglable par l'utilisateur), la chaleur est ensuite stockée dans le ballon sanitaire de 500 litres, puis dans le ballon tampon de 2000 litres. D'où un rendement supérieur aux systèmes à échangeur. En effet, j'ai pu le constater, un quart d'heure de soleil, ou un ciel gris mais lumineux, suffisent à monter les capteurs à 30 °C. En plancher solaire direct, la maison étant à 20 °C, le circulateur se déclenche. Si le circuit devait passer par un ballon déjà à 40 °C, rien ne se passerait et ces précieuses calories seraient perdues. Ainsi, comme le transfert

de chaleur pour le chauffage fonctionne même avec des capteurs à basse température, le rendement du plancher solaire direct est supérieur en période de chauffe aux systèmes solaires à hydro-accumulation, où il faut d'abord charger le ballon tampon avant d'en soutirer la chaleur. Autre avantage du solaire direct : la chaleur est prioritairement stockée dans l'enveloppe très isolée de la maison plutôt que dans des cuves moins bien isolées.

Reprenant la méthode des nuages de points évoquée précédemment, Olivier Godin a remplacé la variable « surface capteurs » par le ratio « surface capteurs / surface habitable », et positionné sur deux nouveaux graphes (voir les graphiques n° 6 et 7 page ci-contre) les données des maisons les moins gourmandes en chaleur de l'échantillon de la base Sonnenhaus (15 à 70 kWh/m²/an, points bleus) et les données de maisons équipées en plancher solaire direct Solisart (points jaunes) ayant des besoins en chaleur comparables. Les courbes montrent que l'autonomie solaire peut être atteinte en plancher solaire direct avec moins de surface de capteurs et beaucoup moins de volume de stockage. ▶▶▶

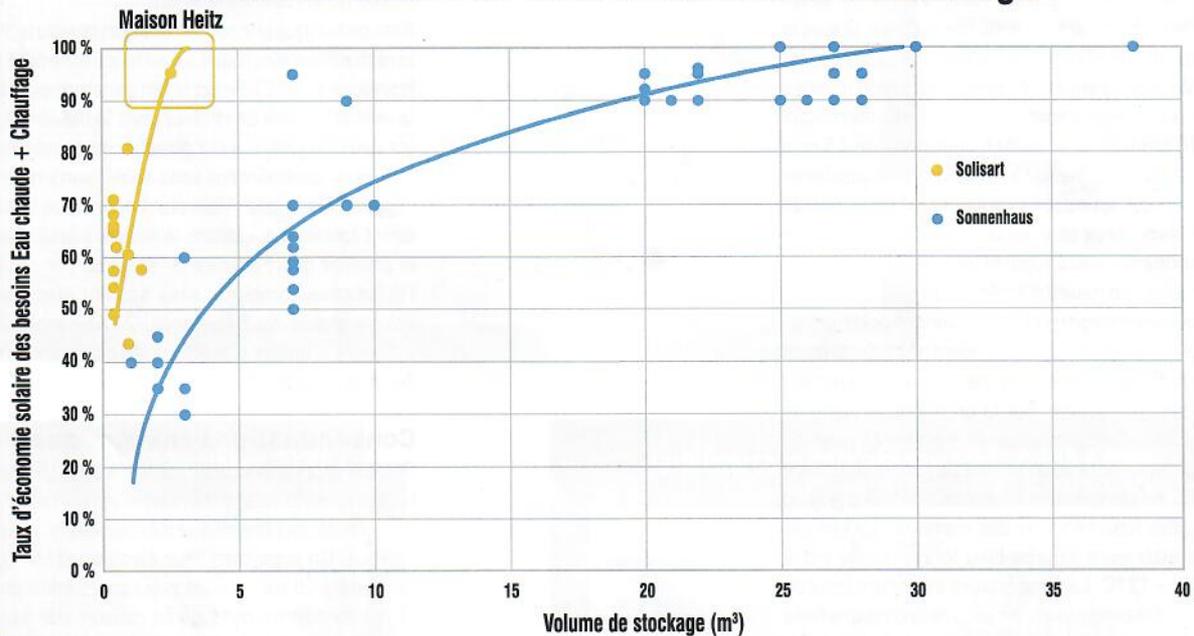
(4) www.solisart.fr

Autonomie solaire en fonction de la surface capteur/surface habitable



6 Illustrations © Solisart

Autonomie solaire en fonction du volume de stockage



7 Illustrations © Solisart

“Les courbes montrent que l'autonomie solaire peut être atteinte en plancher solaire direct avec moins de surface de capteurs et beaucoup moins de volume de stockage”

“Quand la régulation calcule que la chute de température nocturne va faire passer la température intérieure sous la consigne de 19 °C (J4), il y a anticipation de l'inertie du plancher et injection de chaleur à partir du ballon tampon”

Associer solaire passif et solaire actif

12,5 m² de baies à triple vitrage, orientées sud/sud-est, fournissent la plupart des apports solaires passifs. Deux très fines couches d'oxydes métalliques déposées sur les faces intérieures des vitrages isolés à l'argon réfléchissent le rayonnement infrarouge vers l'intérieur du logement sans pour autant trop arrêter la transmission de la lumière visible (TL, en %) ou de l'énergie solaire (facteur solaire g, en % [5]). L'ordre de grandeur de la puissance radiative qui traverse ce triple vitrage est donné en considérant, en première approximation, la puissance radiative maximale du soleil à environ 1 kW/m², pour une surface perpendiculaire au rayonnement solaire. Avec un facteur solaire g de 53 %, ce sont donc au maximum 6,6 kW (0,53 x 12,5) qui traversent les baies, soit l'équivalent de 6 radiateurs électriques de base. Avec l'orientation SSE, le soleil rentre profondément dans la maison dès son lever. Les apports passifs sont immédiats et font rapidement augmenter la température de la grande pièce à vivre de 50 m² d'un degré par heure, en début de matinée. Quand la hauteur du soleil diminue les apports passifs, c'est la chaleur des panneaux solaires qui prend le relais en fin de matinée, compte tenu de l'inertie thermique des 10 tonnes du plancher chauffant de 55 mm d'épaisseur. L'inclinaison à 60° des panneaux solaires posés au sol optimise la captation du soleil bas de l'hiver. Avoir deux champs de capteurs, l'un orienté SSE, l'autre plein sud, répartit leur ensoleillement du matin jusqu'en milieu d'après-midi.

Les courbes enregistrées par les sondes de température de l'installation Solisart rendent très précisément compte du fonctionnement thermique du logement et du système solaire. Sur la première semaine de janvier 2020 (voir graphique n° 9 présenté page ci-contre), en autonomie solaire totale pour le chauffage et l'ECS, on observe une alternance de jours gris ou ensoleillés (courbe rouge des capteurs). La température extérieure (courbe bleu foncé) oscille entre - 2 °C et + 12 °C. La température intérieure (courbe verte) ne descend pas en dessous de la consigne fixée à 19 °C. S'il y a du soleil, les apports passifs puis actifs font rapidement monter la température à 25 °C. La charge du plancher solaire direct est limitée à 23 °C, mais les apports passifs continuent et les 16 tonnes de masse d'inertie thermique constituées par la chape, le carrelage et les enduits terre limitent l'élévation de température à 25 °C puis relarguent doucement la chaleur en fin de journée et la nuit, voire le jour suivant sans soleil (J3/J4). Quand la régulation calcule que la chute de température nocturne va faire passer la température intérieure sous la consigne de 19 °C (J4), il y a anticipation de l'inertie du plancher et

injection de chaleur à partir du ballon tampon (courbe blanche). Le soutirage de chaleur se traduit par un tracé en escalier.

La consommation d'eau chaude sanitaire provoque une baisse de température du bas du ballon sanitaire (courbe jaune), qui reçoit l'arrivée d'eau froide. La perte de chaleur du ballon sanitaire au travers de son manteau de 55 mm d'isolant se traduit par une décroissance régulière de la température du haut du ballon (courbe bleu clair).

Comment se passe une semaine sans soleil? Les enregistrements d'une telle semaine en octobre 2019 (voir graphique n° 10 page ci-contre) montrent que, avec une consigne de température intérieure à 20 °C, le soutirage de chaleur dans le tampon (courbe blanche) n'a commencé que la nuit du 4^e jour. Les trois jours et demi-précédents, c'est la chaleur stockée dans les masses d'inertie de la maison qui a maintenu la maison à 21 °C. Puis c'est le soutirage dans le tampon qui a pris le relais pendant trois jours et demi, avant que le retour du soleil ne recharge la maison et les ballons le 8^e jour.

Il est certain que si le soleil n'était pas revenu le 8^e jour, le réchauffeur électrique aurait fonctionné pour l'ECS (consigne à 38 °C). Selon la température extérieure, le vent et le stock de chaleur dans la maison et dans les deux ballons, il a été possible de passer entre 4 et 7 jours continûment sans soleil, sans recours à l'appoint électrique. Mais étant donné que le solaire direct fonctionne, comme le solaire passif, dès que le premier quart d'heure de soleil ou par ciel voilé, l'autonomie complète, sans appoint électrique, a été constatée du 5 février au 21 novembre 2019 : 277 jours d'affilée d'autonomie solaire complète à 960 m d'altitude.

Consommations énergétiques

Outre la suppression des émissions de CO₂ et de particules fines, le solaire thermique permet de profiter d'un vrai confort thermique même avec de très petits revenus. Un sous-compteur électrique (éco-compteur Legrand) mesure les puissances instantanées et les consommations de la maison sur 5 postes distincts : chauffage + ECS, circulateurs, VMC double flux, four et lave-linge. Le reste est comptabilisé par déduction de la consommation totale. Une fois tous les réglages optimisés (à distance depuis le serveur de l'entreprise Solisart connecté à l'installation), il apparaît que l'appoint électrique pour la chaleur s'est limité à 127 kWh (17 € d'achat hors abonnement) pour une année complète. Les quatre circulateurs de l'installation Solisart ont consommé 83 kWh, moins que la VMC double flux. La très faible consommation du lave-linge (35 kWh) en 2019 s'explique par le foyer limité à une personne et par l'usage >>>

[5] Menuiseries André modèle Mixte78, vitrage de base 4/18/4/18/4; U_w de 0,78 W/m².K; g: 53 %. www.andre-menuiserie.fr



Photo © 2020 - Philippe Heitz - ADC 8

Du 1^{er} au 8 janvier 2020 - Autonomie solaire intégrale

9

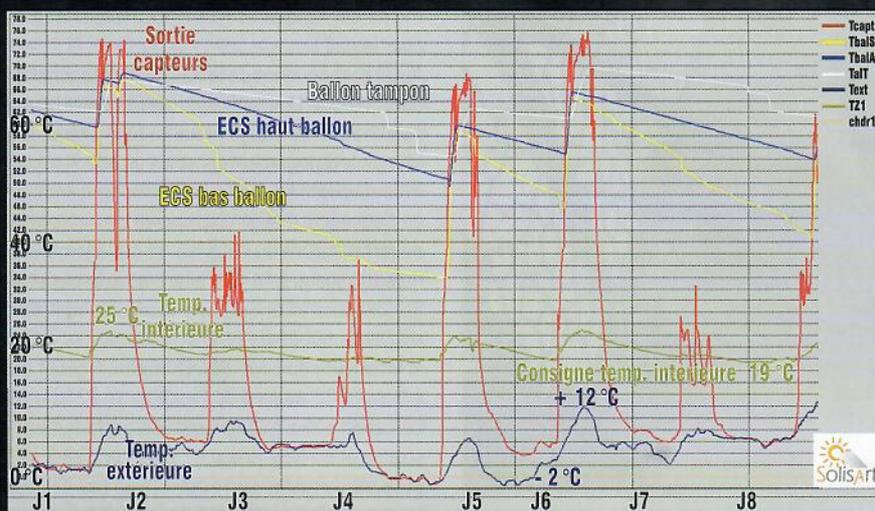


Illustration © Solisart

8 L'orientation SSE favorise les apports solaires passifs dès le lever du soleil, au moment où la maison est la plus froide.

9 Enregistrement des sondes de température de l'installation du 1^{er} au 8 janvier 2020.

10 Enregistrement des sondes de température de l'installation du 16 au 22 octobre 2019

11 Répartition de la consommation énergétique de la maison.

Du 16 au 22 octobre 2020

10

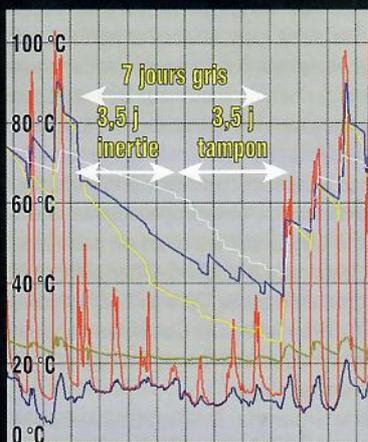


Illustration © Solisart

Tarif Enercoop hors abonnement : 0,135 €/kWh

11

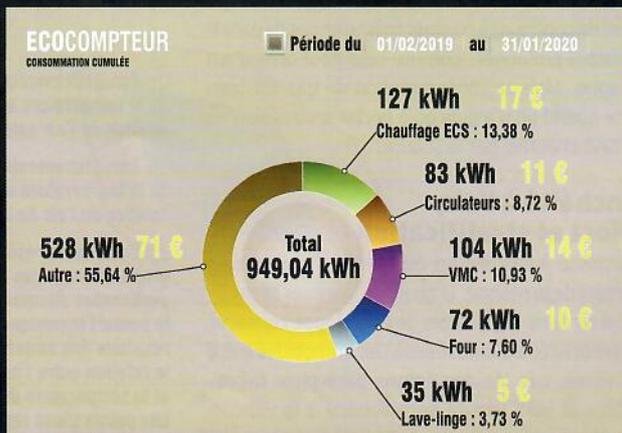
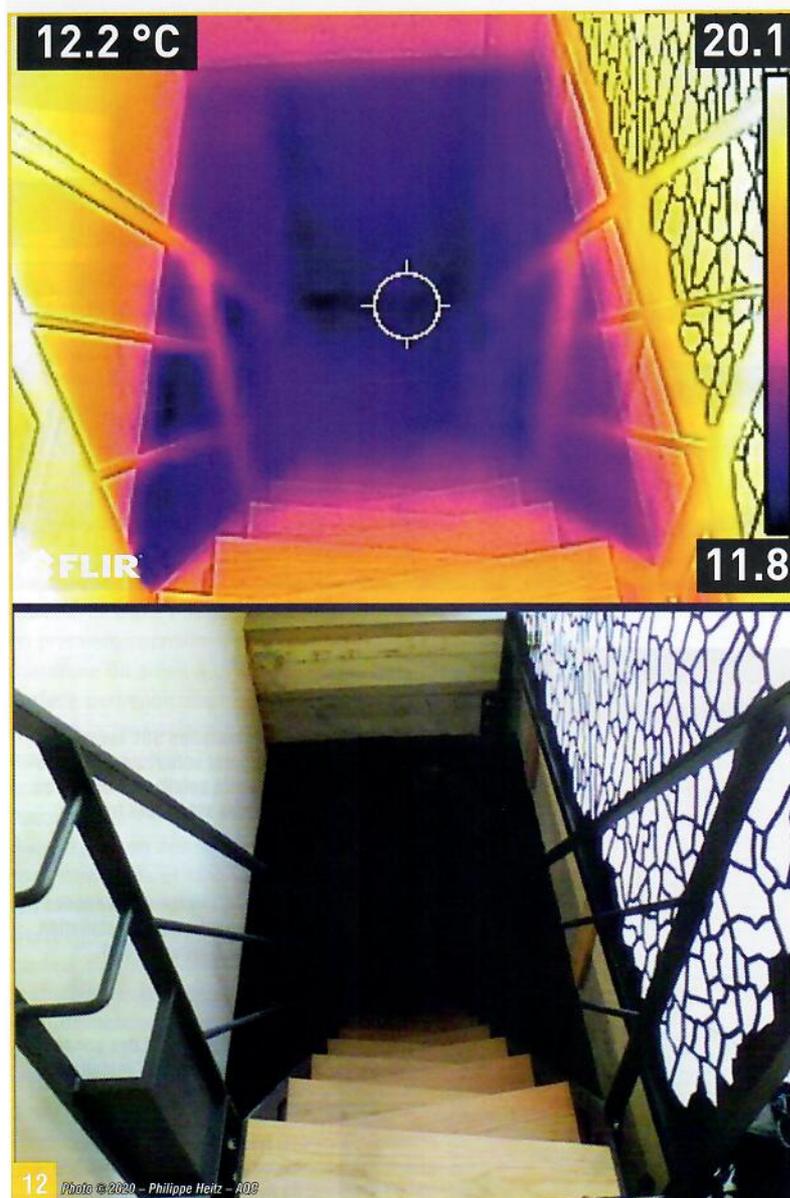


Photo © 2020 - Philippe Heitz - ADC



12 Photo © 2020 - Philippe Heitz - AOP

systématique du programme 20 °C, une alimentation du lave-linge en eau chaude solaire étant possible. Une seule autre énergie est achetée: 13 kg de gaz butane par an pour la plaque de cuisson. Choix d'énergie carbonée certes, mais marginale et qui permet de continuer à cuisiner même en cas de panne de courant prolongée, comme cela peut arriver en montagne. Mais la consommation de gaz est bien réduite quand on n'a plus qu'à porter à ébullition de l'eau déjà chauffée par le solaire.

Étanchéité à l'air, confort et stratification

L'étanchéité à l'air est un élément de confort très important de la maison. D'abord, supprimer la circulation d'air dans les isolants de l'enveloppe conserve leurs propriétés isolantes liées à l'air immobilisé entre leurs fibres. Les lés des écrans pare-pluie hygrovariables et HPV (Haute perméabilité à la vapeur) Solitex de pro clima pour les façades et la toiture ont été soigneusement scotchés ou collés entre eux



12 Conséquence de la très bonne étanchéité à l'air du logement : la stratification de l'air entre le sous-sol non chauffé et l'étage chauffé.



13 Enregistrements sur un an de la température et de l'humidité relative de l'air extérieur.

14 Enregistrements sur un an de la température et de l'humidité relative de l'air de la chambre.

15 Ce schéma résume graphiquement les normes pertinentes allemandes sur le confort thermique et les résultats des enquêtes concernant la relation entre l'humidité relative et la température de l'air ambiant. Les points bleus représentent les moyennes hebdomadaires de l'air intérieur dans la maison sur un an.

pour arrêter le vent dès l'extérieur des parois. Côté logement, les enduits terre sont étanches à l'air et le frein-vapeur hygrovariable également. Ensuite, supprimer les courants d'air procure une sensation de confort sensible au niveau de la peau. Enfin, l'étanchéité à l'air force l'air froid à rentrer dans la maison en passant par l'échangeur de chaleur de la VMC double flux (Comfort CT150 de Nilan). Celle-ci renouvelle l'air en récupérant 87 % des calories de l'air sortant, pour une consommation électrique annuelle très modérée de 104 kWh.

Un test intermédiaire d'étanchéité à l'air, réalisé avant la pose des enduits de finition en murs et des plaques de plâtre en plafond, a permis de déceler les passages d'air résiduels, notamment au niveau des interfaces entre l'enduit de corps et les autres matériaux. De la colle polyamide d'étanchéité à l'air (Orcon de pro clima) a bouché toutes ces fuites causées surtout par le retrait de séchage de l'enduit argileux. Avec des résultats du test final d'infiltrométrie à 0,20 m³/(h.m²) pour la perméabilité à l'air sous 4 Pa (Q4Pa-surf) et de 1,27 h⁻¹ pour le taux de renouvellement de l'air sous 50 Pa (n50), la maison est trois fois meilleure que la valeur de référence RT 2012 (0,6 m³/(h.m²), mais moins bonne que la référence PassivHaus (0,6 h⁻¹ pour le n50).

Autre conséquence de la très bonne étanchéité à l'air du logement : la stratification de l'air entre le sous-sol non chauffé et l'étage chauffé. L'air chaud, léger et immobile du logement constitue un bouchon pour l'air froid plus dense du sous-sol, qui ne peut donc monter en l'absence d'effet cheminée. Les enregistreurs de température du sous-sol et du logement ont pu mesurer jusqu'à 14 °C d'écart entre le bas et le haut de l'escalier intérieur, une tranquille nuit de mars où j'avais oublié de refermer les portes extérieure et intérieure du sous-sol. Le matin, il gelait dehors, il faisait 8 °C au pied de l'escalier et 22 °C à l'étage. La caméra thermique visualise parfaitement cette stratification (voir photo n°12 ci-contre). Il est ainsi possible de rester porte ouverte en bas de l'escalier sans craindre de courant d'air, pourvu qu'on garde les fenêtres fermées. En revanche, pour la ventilation nocturne pour le confort d'été, on ouvrira les fenêtres pour justement créer l'effet cheminée recherché.

Confort hygrothermique

D'importantes surfaces vitrées pour capter les apports solaires, c'est efficace et agréable pour se chauffer mais cela doit toujours s'accompagner de plusieurs tonnes de matériaux denses apportant l'inertie thermique indispensable pour stocker l'excès de chaleur et la restituer lentement le soir et la nuit. La masse à capacité thermique élevée doit se trouver à l'intérieur de l'enveloppe isolante. Six tonnes d'enduit à l'argile sur les murs en paille, épais de 4-5 cm, apportent à la fois de l'inertie thermique et une hygrométrie basse (33 à 55 % d'humidité relative [HR] de l'air intérieur). Contribuent également à l'inertie thermique les 9 tonnes de chape anhydrite et la tonne de carrelage.

Pour caractériser son climat intérieur, la maison a été instrumentée avec des enregistreurs de température et d'humidité relative de l'air par Leonhard Morche,

réfèrent technique du fabricant allemand des produits d'étanchéité à l'air de la marque pro clima (Moll GmbH).

Six instruments de mesure, répartis dans la grande pièce à vivre/cuisine, la chambre, la salle de bains, le bas de l'escalier et le garage, ont mesuré la température et l'humidité relative toutes les trente minutes, de septembre 2018 à octobre 2019. En outre, deux autres capteurs ont été installés en extérieur, protégés du vent et du soleil.

Les deux diagrammes sélectionnés (n° 13 et 14 ci-contre) montrent l'évolution sur une année complète de la température (en rouge, échelle de -10 °C à +45 °C puis de 0 °C à 30 °C) et de l'humidité relative de l'air (en bleu, échelle de 0 à 100 %), pour l'air extérieur et pour l'air de la chambre.

La période mesurée couvre une première période, jusqu'en janvier 2019, où seuls 4 panneaux solaires étaient installés. Expérimentant l'hypothèse de l'autonomie solaire totale, je laissais descendre la température intérieure à 16 °C (il faisait jusqu'à -10 °C dehors), avant de brancher le réchauffeur électrique. À partir du 6 février 2019, les 9 panneaux fonctionnels ont permis, sans complément électrique, d'assurer 19 °C puis au moins 20 °C à partir de mars.

L'humidité relative de l'air intérieur oscille sur une année en moyenne journalière entre 33 % et 55 %, alors que celle de l'air extérieur varie entre 45 % et 95 %. Sur les deux courbes d'humidité relative à la même échelle, il est notable que l'amplitude des variations d'hygrométrie de l'air extérieur est très atténuée pour ce qui concerne l'air de la maison, alors qu'il n'y a aucun système actif de régulation. On observe aussi que l'air intérieur s'assèche progressivement en hiver (de 50 à 33 % HR) alors que l'air extérieur passe de 95 % à 50 % HR de novembre à avril, mais qu'il se réhumidifie jusqu'à 55 % HR alors que l'air extérieur continue à s'assécher en été, jusqu'à 45 % HR, lors de la canicule de juillet 2019 (+42 °C maxi).

Les enduits à l'argile, hygroscopiques et capillaires, sont connus pour échanger avec l'air de la vapeur d'eau, avec changement de phase de l'eau. Le stockage d'humidité dans les enduits terre en saison froide et son relargage en saison chaude contribue au confort de la maison.

« Un graphique des zones de confort optimales en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air intérieur (voir graphique n° 15 ci-contre) montre que les conditions mesurées à l'intérieur du bâtiment sont correctes et stables, les données hebdomadaires étant supérieures à 40 % d'humidité relative, ce qui est la limite pour un ressenti confortable dans les bâtiments », explique Leonhard Morche.

Chaleur rayonnant doucement par le sol et les murs, stabilité de l'air, absence de sensation de paroi froide, même au niveau des baies grâce au triple vitrage, l'ambiance confortable est ressentie par tous les visiteurs. Bois, paille, terre, solaire thermique, la combinaison de moyens a fait ses preuves! ■

Contact : ph.heitz@orange.fr

Enregistrements sur un an de la température et de l'humidité relative de l'air extérieur

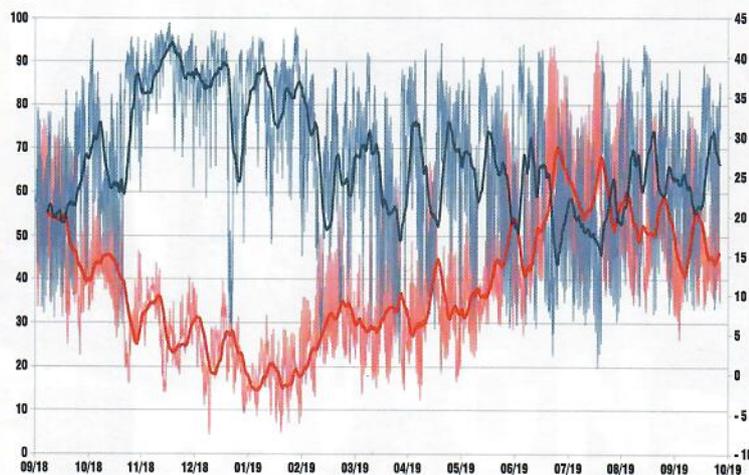


Illustration © MOLL/PRO CLIMA 13

Enregistrements sur un an de la température et de l'humidité relative de l'air de la chambre

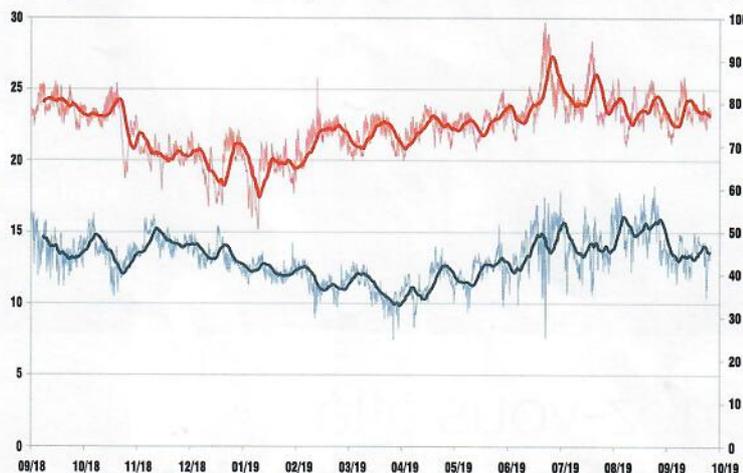


Illustration © MOLL/PRO CLIMA 14

Diagramme des zones de confort hygrothermique

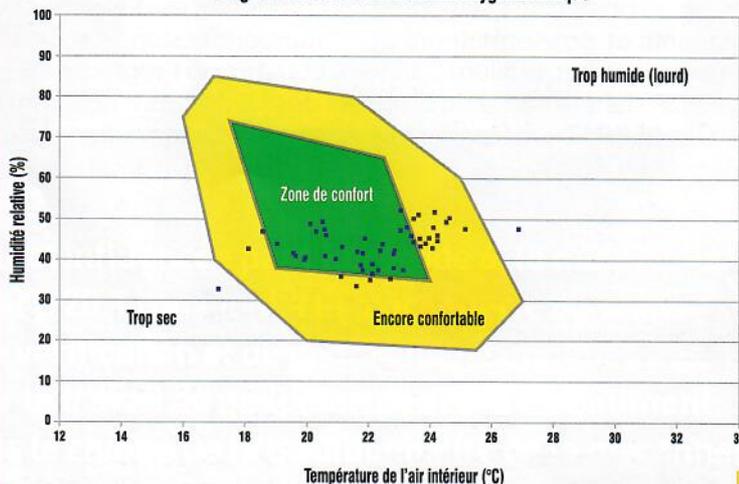


Illustration © MOLL/PRO CLIMA 15