

Construire



une maison passive

Conception
Physique de la construction
Détails de construction
Rentabilité

Carsten Grobe

B.M. DE NIMES



815485 0120

Carsten Grobe
en collaboration avec
Christian Rienass

Construire une maison passive



CONCEPTION
PHYSIQUE DE LA CONSTRUCTION
DÉTAILS DE CONSTRUCTION
RENTABILITÉ

Sommaire

Avant-propos de l'éditeur	8	2.2.3	Triple paroi de la cave en béton cellulaire	27
Préface	9	2.2.4	Béton cellulaire en matériau d'emballage recyclé	27
Introduction	10	2.25	Construction en ossature bois et bardage rapporté	28
1 Bases	13	2.3	Construction des dalles de sol et fondations	30
1.1 Qu'est qu'une maison passive ?	13	2.3.1	Isolation des dalles en béton armé préfabriquées	31
1.2 Principes de construction de la maison passive	15	2.3.2	Sol à cavité et son isolation écologique	31
1.3 Principes fondamentaux de la ventilation et du chauffage	17	2.3.3	Isolation des dalles de sol en béton armé monolithique	32
1.4 Mode de fonctionnement d'une maison passive	19	2.3.4	Vide ventilé avec isolation en polystyrène expansé recyclé	33
1.5 Résumé : critères et avantages de la maison passive	20	2.4	Systèmes locaux de toiture préfabriqués	35
1.6 L'exemple allemand d'application du règlement sur les économies d'énergie 2002 (EnEV) autour de la maison passive	21	2.4.1	La toiture inclinée	35
		2.4.2	La toiture terrasse	38
		2.4.3	Le toit photovoltaïque	39
		2.4.4	Isolations thermiques alternatives pour toiture, paroi, plafond et sol	41
2 L'enveloppe du bâtiment - construction des parois extérieures, toiture et dalles de sol	24	2.5	Isolation thermique des fenêtres	43
2.1 Bases de l'esquisse du projet	24	2.5.1	Le critère « bien-être » des grandes façades vitrées	43
2.2 Construction de la paroi extérieure	24	2.5.2	Le facteur solaire du vitrage	44
2.2.1 Maçonnerie et système d'isolation thermique extérieur	25	2.5.3	Le vitrage de la maison passive	45
2.2.2 Parois de coffrage préfabriquées en béton	26	2.5.4	Les entretoises	46
		2.5.5	Le châssis de fenêtre conforme au standard maison passive	47
		2.5.6	Systèmes de fenêtres	47
		2.5.7	Fenêtres en PVC recyclé	48
		2.5.8	Façades poteaux-traverses isolées	49

3 Ventilation et chauffage dans la maison passive	52	4 Le contrôle de qualité	78
3.1 Introduction aux techniques d'alimentation en énergie	52	4.1 La qualité d'une enveloppe étanche	78
3.1.1 Principes de bases	52	4.1.1 Construire sans ponts thermiques	79
3.1.2 Bien-être et principes physiques	53	4.1.2 Différents types de ponts thermiques et règles pour les éviter	79
3.2 La ventilation	55	4.1.3 Exigences en matière de ponts thermiques	79
3.2.1 Le puits provençal	55	4.1.4 Conséquences en cas de formation de ponts thermiques dans l'enveloppe du bâtiment	81
3.2.2 L'installation de ventilation	56	4.1.5 Détails pour la minimisation des ponts thermiques dans une maison passive	82
3.2.3 La répartition de l'air	57		
3.2.4 Systèmes de ventilation	59		
3.3 Chaleur intérieure et distribution d'eau chaude sanitaire	60	4.2 Étanchéité à l'air du bâtiment	84
3.3.1 La distribution de chaleur	60	4.2.1 Causes et conséquences d'une isolation inappropriée	84
3.3.2 La distribution d'eau chaude sanitaire	61	4.2.2 Exigences en matière d'étanchéité à l'air	85
3.4 La production de chaleur pour l'eau et le chauffage	63	4.2.3 Le test « blower-door » pour mesurer l'étanchéité à l'air	85
3.4.1 Chauffage d'appoint électrique	63	4.2.4 Identification et mesure de fuites d'air	86
3.4.2 Installations photovoltaïques	63		
3.4.3 Installations solaires thermiques	64		
3.4.4 Pompes à chaleur	68	4.3 Le système de ventilation	88
3.4.5 Poêles à bois	70	4.4 Réalisation et historique du projet	89
3.4.6 La mini centrale de co-génération	71	4.4.1 L'étude générale du projet	89
3.4.7 Systèmes de chauffage conventionnels	72	4.4.2 Les fondations	89
3.4.8 Accumulateur solaire stratifié avec chaudière à basse consommation énergétique	73	4.4.3 Les murs porteurs	90
3.4.9 Accumulateur de chaleur latente pour systèmes de chauffage	74	4.4.4 Le débords de toiture	91
3.4.10 Systèmes de chauffage combinés avec un accumulateur de chaleur latente	74	4.4.5 Le châssis de fenêtre	91
3.5 Systèmes compacts ventilation/chauffage	76	4.4.6 Enduit intérieur, chape, film de protection : installation et isolation thermique	91
		4.5 Bilan	93

5 Exemples 5.1 Maison passive « Grobe » à Ottbergen (Allemagne) 94 5.1.1 Description du projet de construction 94 5.1.2 Ombrage des grandes surfaces vitrées orientées vers le sud 96 5.1.3 Projet d'installation et bilan annuel du budget énergétique 96 5.1.4 Fiche technique « Passivhaus Grobe » 100	6.6 Le réchauffement de la maison grâce au rayonnement solaire à travers de grands espaces vitrés 110 6.7 Le standard maison passive et l'écologie 111 6.8 Bilan 112	113
7 La rentabilité		113
 5.2 Maison passive à Celle (Allemagne), projet d'étude en collaboration avec le Fraunhofer-Institut (Institut de physique du bâtiment) 101 5.2.1 Description du projet de construction 101 5.2.2 Bilan annuel du budget énergétique 104	7.1 Le principe économique de la maison passive 114 7.2 Raisonnement économique lors de l'analyse de logements 114	
 5.3 Approche de la décoration de maisons passives individuelles 105	7.3 Exemples de calcul 116 7.3.1 Comparaison entre la maison passive et la maison conventionnelle à l'aide d'un logiciel de gestion énergétique 116	
 5.4 Expériences lors de la réalisation du projet de construction 106	7.3.2 Comparatifs de différentes techniques de chauffage d'une maison passive 119 7.3.3 Calcul de la rentabilité d'un projet de rénovation de bâtiment 130	
6 Vivre dans une maison passive : un plus grand confort et une meilleure qualité de vie		
107		
Annexes		
 6.1 La ventilation mécanique contrôlée (VMC) à double flux 107 6.2 Taux d'humidité de l'air et qualité de l'air 108 6.3 Optimisation de la qualité de l'air grâce aux installations d'aération centralisée 109 6.4 Les fenêtres fermées 109 6.5 Plus grand confort grâce à la chaleur rayonnante 110	1 La construction à faibles dépenses énergétiques en Suisse et en Autriche 133 2 Subventions et aides fiscales en France 136 3 Glossaire de la technologie solaire et vocabulaire lié à la maison passive 143 4 Bibliographie 148	

Avant-propos de l'éditeur

Le réchauffement de la planète met l'humanité en face de ses responsabilités. Soit nous continuons à consommer l'énergie de façon effrénée, avec les conséquences catastrophiques que l'on commence à percevoir, soit des mesures indispensables pour réduire l'effet de serre sont mises en œuvre.

La place des bâtiments résidentiels et tertiaires représente aujourd'hui en 2008, 40 % de la demande énergétique finale (source ADEME). Ces bâtiments font donc parti des postes sur lesquels des économies d'énergie sont possibles.

Tous les professionnels du bâtiment sont concernés mais aussi les particuliers et les entreprises. Le but est, à l'horizon 2025, de diminuer la consommation pour arriver à 40 kWh/m² par an (soit 4 litres de fuel par an et par m²). Les maisons anciennes, avec une isolation mal conçue, consomment près de 500 kWh/m².

Une maison moderne avec un chauffage performant consomme 150 kWh/m². L'effort à fournir est donc important au niveau des maisons anciennes pour ce qui est de la rénovation et, pour les maisons modernes, pour ce qui est de la mise aux normes.

L'objectif est d'aboutir à ce que les bâtiments ne consomment pas plus qu'ils ne produisent.

L'Europe est à la pointe dans le monde pour la recherche et la mise en œuvre de la diminution de la consommation d'énergie. L'Allemagne et l'Autriche ont été les premiers pays à travailler sur la façon d'économiser l'énergie dans les maisons. Avec leur label « Passiv Häuser » (« Maison passive » en français) qui représente plusieurs milliers de bâtiments, ces deux pays ont réussi à imposer des normes drastiques pour la construction de maisons. En Suisse, le label « Minergie », équivalent au label allemand prend lui aussi une part importante dans les nouvelles constructions.

La France, depuis le Grenelle de l'environnement, met en place progressivement des normes contraignantes pour la consommation énergétique des bâtiments. Les

efforts nécessaires pour arriver en 2050 à une diminution par 4 des rejets de CO₂ dans l'atmosphère représentent un gisement d'emploi considérable. Ainsi la CAPEB chiffre à 600 milliards d'euros sur 40 ans le coût des travaux de rénovation.

Les solutions techniques existent et les progrès dans les matériaux permettent une bien meilleure performance dans les domaines de l'isolation, de la production d'énergie autonome et du chauffage.

La publication de ce livre constitue pour nous un pas important dans la démocratisation de cette démarche. Si la France a pris du retard, elle est dans l'obligation de le rattraper avant 2020. La réglementation thermique (RT 2005) va accélérer les performances des bâtiments, avec comme objectif, l'obligation de construire des bâtiments passifs ou à énergie positive dès 2020.

Le travail fait par les Allemands nous permet de mieux aborder les données techniques pour atteindre cette diminution drastique de la consommation d'énergie.

Nous souhaitons que ce livre serve tout autant aux professionnels qu'au grand public qui y trouvera de très nombreuses informations.

Préface

La situation politique mondiale de ces dernières décennies nous ont montré que la dépendance aux énergies atomiques et fossiles des pays industrialisés ne nous mènera nulle part. De nombreuses catastrophes écologiques le prouvent et nous amènent à commencer à changer nos modes de vie.

Cependant, une grande partie de l'humanité continue de penser que les ressources atomiques et fossiles ne s'épuiseront pas, et que les ressources régénératrices ne peuvent pas suffire à couvrir notre dépense énergétique.

Le premier et plus important pas pour créer un futur vivable est désormais d'économiser l'énergie. Pour cela la maison passive est la maison du futur. En utilisant des matériaux de construction et des processus modernes de haute qualité, la consommation énergétique d'une maison passive sera tellement faible qu'un chauffage conventionnel ne sera pas rentable. Le besoin énergétique restant peut également être couvert par les énergies régénératrices.

Nous avons la possibilité de concilier le plus haut confort et l'efficacité énergétique tout en contrôlant le réchauffement de la planète pour ainsi laisser un environnement sein à nos enfants.

Ici j'aimerais remercier mon collègue et collaborateur, l'ingénieur M. Christian Rienass, dont le suivi technique a été indispensable pour réaliser ce livre. Il a contribué grâce à ses recherches et développements, à la mise sur pied des projets de maisons passives.

Un grand merci aussi au Dr. Feist du « Passivhaus-Institut » à Darmstadt, fondateur du standard maison passive. Sans son travail innovant, ce sujet ne se serait pas autant répandu depuis quelques années.

Je remercie une dernière personne, mais non la moindre, ma femme, qui m'a aidé tout au long de la réalisation de ce livre.

Je me réjouis de pouvoir mettre cet ouvrage à la disposition des promoteurs, constructeurs et maîtres d'ouvrage comme information et outil de travail. J'espère qu'il contribuera à la réalisation de nombreuses maisons passives de haute technologie, au design moderne.

Carsten Grobe

Introduction

La maison passive : l'habitat écologique et économique du futur

Nous nous rendons tous compte de l'effet de serre et de l'explosion des coûts de l'énergie, ne serait ce que par l'augmentation constante des prix de l'essence. Seulement un sixième de la population mondiale (une minorité) dépense la totalité des ressources énergétiques et des matières premières, contribuant ainsi à l'effet de serre.

Cela représente un grand défi pour les nations occidentales industrialisées au niveau de la protection de l'environnement.

Certains secteurs industriels ont relevé ce défi avec succès et utilisent de plus en plus de technologies modernes pour protéger l'environnement.

On construit des voitures qui ne consomment plus que 3 litres de gasoil au cent ou qui fonctionnent grâce à des carburants régénérateurs tels que l'hydrogène, le gaz et le colza.

On construit également des maisons qui chauffent un mètre carré avec la même quantité de fioul, c'est-à-dire 3 litres de fioul pendant un an.

Notre génération dispose du savoir et des moyens technologiques nécessaires pour utiliser de manière plus efficace les énergies régénératrices et ainsi faire baisser la pollution engendrée par la consommation excessive des ressources naturelles et la destruction de l'environnement depuis de nombreuses années.

Le Passivhaus-Institut (L'institut de l'habitat passif), sous la direction du Dr. Wolfgang Feist, a apporté une contribution importante à ce sujet, ses maisons nécessitant seulement 5 à 10 % de la consommation énergétique d'une maison traditionnelle. Elles offrent une température ambiante agréable sans l'utilisation d'un chauffage conventionnel au fioul ou au gaz. En effet, on peut tout à fait concilier la diminution des dépenses énergétiques et la rénovation écologique

tout en augmentant le confort. Cette nouvelle norme est de plus en plus utilisée pour la construction de bâtiments.

À la fin du XX^{ème} siècle, il n'existe que 1 000 maisons passives. La bonne promotion de la maison passive par le Passivhaus-Institut, les subventions de la "coopération financière allemande pour la promotion de la restructuration" et enfin aussi l'augmentation des prix de l'énergie, ont fait que le concept "maison passive" s'est développé très rapidement.

Par conséquent, beaucoup de constructeurs qui refusaient le concept de l'habitat passif auparavant commencent à adapter leurs produits au haut standard maison passive.

Avec une demande croissante et un plus grand nombre de constructeurs, les produits artisanaux tels que les fenêtres et les installations de ventilation ont commencé à se fabriquer en série. Ainsi, on a pu minimiser les coûts pour la recherche et la fabrication ; ce qui rendra la construction au standard maison passive de plus en plus économique dans les années qui viennent.

Malheureusement, depuis ces dernières années, on a tendance à penser à court terme dans l'industrie du bâtiment ; la rapidité de la construction de l'habitat ainsi que le prix sont plus importants que le choix de matériaux de construction sains, de systèmes de construction énergétiquement efficaces ou encore que la longévité des produits.

Tout cela a des conséquences négatives sur la qualité d'un bâtiment.

En augmentant la prestation propre du maître d'ouvrage, la qualité de la maison sera meilleure. En effet, deux de nos objets ont été réalisés avec une prestation propre de 60% par le maître d'ouvrage, son intérêt personnel ayant considérablement amélioré le résultat. Cependant, cela est possible seulement si le projet est constamment supervisé par un architecte expérimenté.

Plus on investit de temps dans la conception et la coordination d'un projet, meilleure et plus économique sera la construction de la maison passive, car on minimise les défauts de construction.

Dans l'industrie automobile, la conception, le développement et la réalisation d'un projet sont indispensables. L'objectif est de fabriquer un produit de très haute qualité en grande série pour amortir les coûts de conception et de fabrication du produit.

Dans l'industrie du bâtiment, la tendance est opposée. Les concepteurs et les architectes sont de moins en moins sollicités afin de minimiser les dépenses. Les coûts de production baissent, ce qui augmente de manière drastique les charges telles que la consommation énergétique et les coûts de réinvestissement.

L'une des solutions à ce dilemme est la conception de maisons individuelles ou mitoyennes de haute qualité et de les faire construire par des promoteurs-constructeurs ou des maîtres d'ouvrage avec leurs fonds propres. En améliorant et détaillant la conception

du projet, la qualité de la construction sera garantie à long terme. Le maître d'ouvrage profitera de divers avantages, par exemple de la préservation du bâtiment et des faibles coûts énergétiques.

Les réserves énergétiques ne vont probablement pas s'épuiser dans les 30 années qui viennent, mais leur exploitation sera plus chère.

Si cette hausse des prix n'est pas directement déclenchée par l'économie, on pourra sûrement s'attendre à une augmentation continue des coûts énergétiques sous forme d'impôts écologiques.

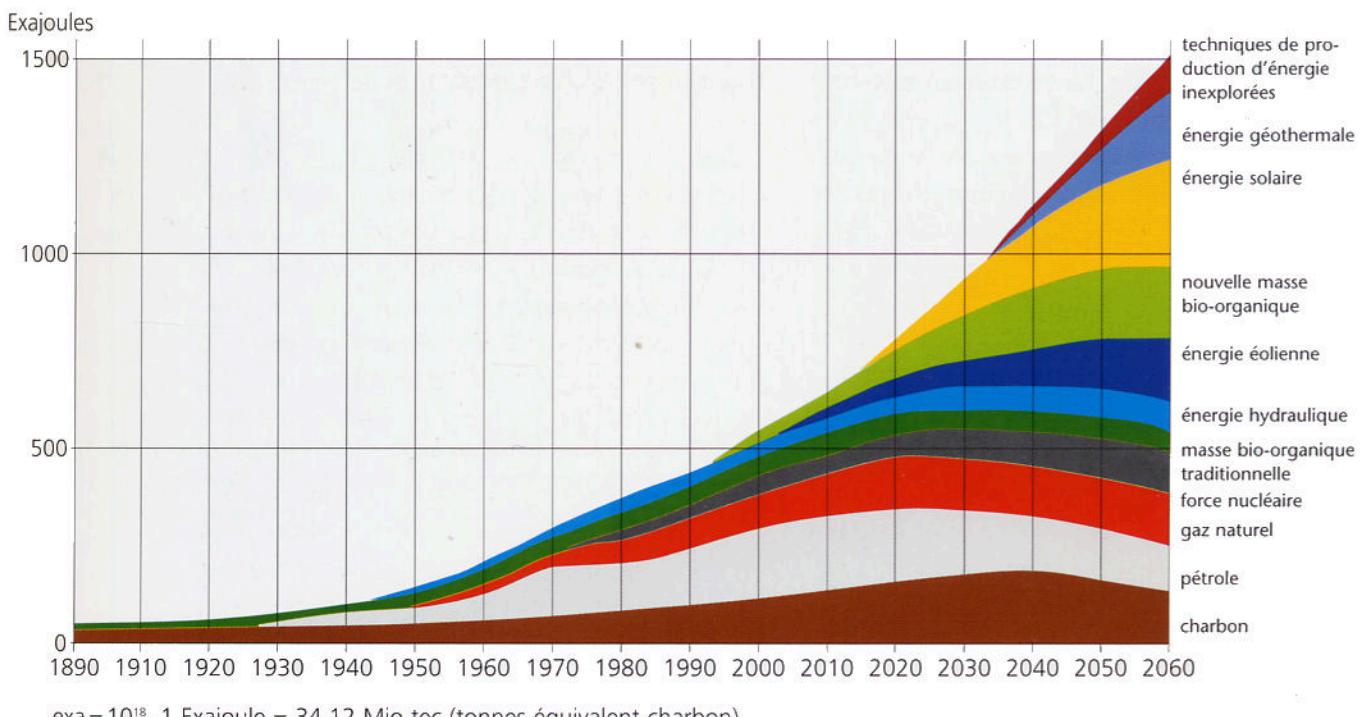
La maison passive utilise l'énergie de manière rationnelle, et devient par là-même indispensable pour la protection des ressources naturelles.

Le Docteur Ernst Ulrich von Weizsäcker nous le dit de manière explicite lors de sa conférence publique du quatrième congrès sur les maisons passives :

« La duplication de la prospérité mesurable, tout en divisant par deux la consommation des ressources naturelles, rend indispensable le "facteur 4" de la

fig. 0-1 Shell - scénario énergétique :

Dépense énergétique mondiale jusqu'à 2060 (développement probable)



productivité des ressources ". Par conséquent, la maison passive joue un rôle important dans le secteur de la construction, et l'on peut même dire qu'elle le révolutionne.

Tous ces arguments peuvent se résumer en une phrase :

La maison passive concilie les connaissances modernes de la physique architecturale avec la plus haute efficacité énergétique et la qualité de vie, tout en diminuant les dépenses énergétiques et en préservant la valeur immobilière.

Les idées mentionnées ci-dessus seront développées dans les prochains chapitres afin de fournir la preuve que le standard maison passive représente plus qu'une concurrence pour la construction conventionnelle. En effet, elle est l'alternative la plus économique des deux standards, et ce dès le début de la construction.

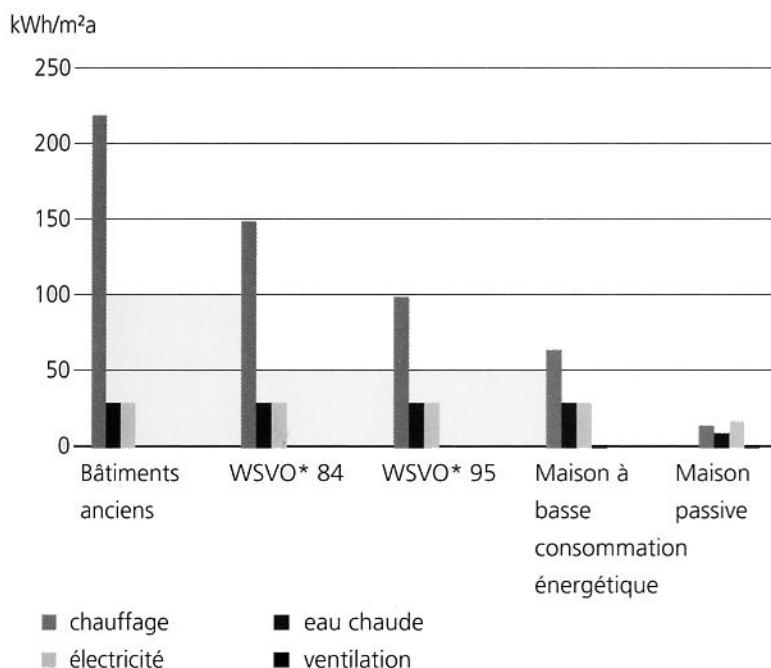
Dans le premier chapitre vous aurez un aperçu des principes de bases de la maison passive et de son futur standard de construction. L'enveloppe du bâtiment, les plans de construction, les dalles du sol ainsi que les parois et la toiture seront illustrés dans le chapitre 2. Je vous parlerai de différents systèmes de chauffage et de ventilation dans le chapitre 3. Le chapitre 4 comporte les principes de l'étanchéité à l'air et des ponts thermiques qui font partie des éléments majeurs de la maison passive. Deux projets de construction seront présentés de manière détaillée dans le chapitre 5, et la vie dans une maison passive sera décrite dans le chapitre 6. Le chapitre 7 analyse la rentabilité d'une maison passive.

1 Bases

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

La maison passive n'est pas un type de construction déterminé, mais un standard de construction qui respecte certains critères. Grâce au développement constant de l'architecture, de la technologie, de l'éco-logie et du confort, on est passé en Allemagne, du règlement sur l'isolation thermique en 1984 à la maison basse énergie puis au standard maison passive.

fig. 1-1 Comparaison du besoin en énergie thermique et électrique



La consommation énergétique d'une maison passive représente seulement 25 à 33% d'une maison conventionnelle (au fur et à mesure du standard de construction).

* Règlement sur l'isolation thermique (Allemagne)

Une maison passive est, selon le Passivhaus-Institut à Darmstadt, un bâtiment qui atteint une température ambiante agréable sans chauffage conventionnel en hiver, et sans climatisation en été.

Consommation énergétique

Logements anciens

besoin calorifique = env. 150 à 275 kWh/m²a

Construction neuve conforme à la norme allemande sur l'isolation thermique de 1995

besoin calorifique = env. 54 à 100 kWh/m²a

Maison à basse consommation énergétique

besoin calorifique = 35 à 75 kWh/m²a (25 à 30 % de moins que les bâtiments conformes au règlement sur l'isolation thermique en 1995)

Maison à 3 litres

= maison ultra basse consommation

le besoin en énergie primaire est inférieur à 34 kWh/m²a, ce qui correspond à environ 3 litres de fioul; par rapport à la consommation énergétique, elle se situe entre la maison à basse consommation énergétique et la maison passive

La maison passive

besoin calorifique = 15 kWh/m²a, électricité incluse (limité à 120 kWh/m²a)

La maison à énergie nulle

- ne consomme pas plus d'énergie que ce qu'elle produit
- n'a pas besoin d'énergie fossile et s'alimente en autarcie

La maison autonome

- s'approvisionne en énergies régénératrices (le photovoltaïque) comme la maison à énergie nulle
- met en plus à disposition d'autres énergies primaires
- produit plus d'énergie que ce dont elle a besoin

La maison se chauffe et se refroidit de manière « passive ». L'installation d'un chauffage conventionnel est inutile, l'enveloppe étanche du bâtiment diminuant les déperditions thermiques. Les faibles déperditions thermiques se compensent presque complètement grâce aux apports directs de chaleur.

De manière chiffrée, la maison passive peut se décrire ainsi :

- un bâtiment avec un besoin en chauffage de 15 kWh/m²a par an [correspond environ à 1,5 litres de fioul par m²], et
- un bâtiment avec un indice de dépense d'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et l'électricité du foyer inférieur à 120 kWh/m²a

Une source d'énergie primaire est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. On différencie l'énergie renouvelable (énergie éolienne, hydraulique et solaire) de l'énergie fossile (pétrole, charbon, combustible nucléaire, gaz naturel).

La consommation d'énergie finale est la consommation totale du chauffage, de l'eau chaude sanitaire et d'électricité. Pour protéger l'environnement, il faut non seulement diminuer la consommation énergétique mais aussi l'énergie primaire : $q_p \leq 120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

L'énergie thermique, l'énergie finale et l'énergie primaire

L'énergie finale est l'énergie utilisée par l'utilisateur final, obtenue à partir des sources disponibles dans la nature, qui sont qualifiées de « primaires » (charbons, pétroles, gaz naturel). Selon la source d'énergie s'applique un coefficient de conversion par lequel on multiplie l'énergie finale pour obtenir l'énergie primaire.

$$Q_p = p \cdot Q_{\text{End}}$$

Équation 1-1 Besoin en énergie primaire Q_p

Le coefficient de conversion « p » de la source énergétique est le coefficient de transformation d'énergie primaire.

A l'aide de ce coefficient, on peut comparer deux bâtiments indépendamment de la source d'énergie.

Voici un tableau comparatif du coefficient de l'énergie primaire et le facteur d'émission de CO₂.

* pourcentage d'électricité produite en co-génération (houille)

** pourcentage d'électricité produite en co-génération (gaz naturel)

*** pourcentage d'électricité produite en co-génération (mazout)

tab. 1-1 indices pour l'énergie primaire et la dépense d'émissions de CO₂

Source énergétique	Coefficient d'énergie primaire p	Facteur des émissions g/kWh _{End}
Sigles	kWh _{Prim} /kWh _{End}	
Carburants		
Fioul	1,08	293
Gaz naturel	1,07	229
Houille	1,07	396
Bois de chauffage	1,01	55
Électricité		
Électricité MIX	2,97	689
Électricité du foyer	2,72	1018
Centrale de chauffage à distance (houille)		
StK HKW 70 %* KWK	0,71	214
StK HKW 35 %* KWK	1,10	306
StK HW 0 %* KWK	1,49	398
Centrale de chauffage à distance (gaz naturel)		
BHKW 70 %** KWK	0,62	-84
BHKW 35 %** KWK	1,03	113
BHW 0 %*** KWK	1,43	311
Centrale de chauffage à distance (mazout)		
BHKW 70 %**** KWK	0,65	75
BHKW 35 %**** KWK	1,06	238
BHW 0 %**** KWK	1,44	401

1.2 Principes de construction de la maison passive

Les principes de base de la maison passive sont d'une part **la diminution des déperditions thermiques**, et d'autre part **les apports directs de l'énergie solaire**. Ces principes sont réalisables en respectant les règles suivantes :

I CHOIX D'UN CORPS DE BÂTIMENT COMPACT

Le choix du rapport surface/volume va affecter le besoin calorifique car, en fonction de la surface, ce besoin peut être diminué. Plus le coefficient entre la surface et le volume est petit, plus la surface à chauffer est petite et moins les déperditions thermiques vers l'extérieur sont importantes. En diminuant la surface, on empêche des déperditions thermiques excessives ; et en utilisant des corps urbains compacts, on diminue le besoin en énergie. Le chapitre 2 traite le rapport entre la surface et le volume (enveloppes étanches et volume brut du bâtiment) et démontre l'avantage de certaines formes telles que le carré, l'octogone, l'ellipse ainsi que des formes rondes. Une maison mitoyenne constitue un avantage, surtout si elle a plusieurs étages, car le nombre de murs extérieurs est fortement réduit. Dans ce cas on peut atteindre un rapport surface/volume entre 0,4 et 0,7.

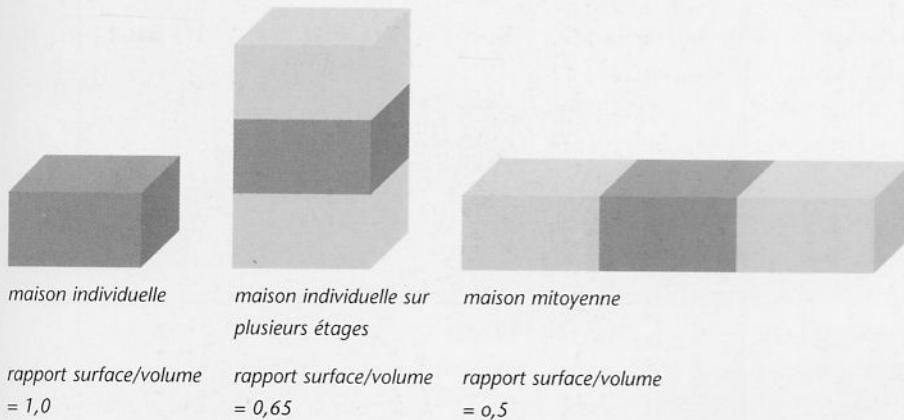
I ORIENTATION DU BÂTIMENT VERS LE SUD

La deuxième mesure importante pour minimiser les pertes de chaleur est d'orienter les façades avec une grande surface vitrée vers le sud. La disposition des chambres est particulièrement importante : de ce fait, les espaces de vie tels que la salle de séjour et la chambre des enfants devraient être orientés vers le sud, et les pièces secondaires telles que la chambre, la salle à manger et les toilettes vers le nord.

Un jardin d'hiver peut servir de zone tampon entre l'intérieur chauffé et le vent extérieur.

I ÉVITER L'EXPOSITION AU VENT (AUVENT ET OMBRAGE)

Comme déjà évoqué, le bâtiment devrait être orienté vers le sud pour utiliser de façon optimale les apports solaires. Cependant, un store est avantageux pour empêcher le surchauffement de la pièce en été. Pour que le vent ne puisse pas refroidir l'enveloppe du bâtiment, la maison peut être protégée avec une haie. Les arbres à feuilles caduques sont préférables, car les résineux réduisent fortement le rayonnement solaire en hiver.



*fig. 1-2 Rapport surface/volume
Les contraintes pour la comparaison :
surface habitable de 70 m² par espace,
hauteur de plafond : 2,50 m.
Une maison mitoyenne sur quatre étages aurait en comparaison un rapport surface/volume de 0,4.*

I L'ENVELOPPE ÉTANCHE DU BÂTIMENT

Pour minimiser les déperditions thermiques par transmission, la maison passive nécessite une enveloppe de bâtiment extrêmement étanche qui capte et retient l'énergie solaire. L'énergie solaire est ensuite exploitée pour générer de la chaleur.

Pour les éléments de construction non transparents tels que la paroi, le plafond et le sol, on vise à atteindre un coefficient de transmission de chaleur $U < 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- Le coefficient U vitrage est $\leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Le degré de transmission du rayonnement solaire des fenêtres est de 50 à 60 %

Pour y parvenir, les fenêtres doivent être très bien isolées et présenter un coefficient U vitrage inférieur à $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, le facteur de transmission du rayonnement solaire étant supérieur à 50 %. Plus d'informations sur ce sujet dans le chapitre 3 sur les fenêtres étanches.

I LIMITATION DES PONTS THERMIQUES

Les ponts thermiques constituent le maillon faible dans la construction. Ce sont des zones où le comportement des flux de chaleur est dérangé. Par conséquent, la chaleur est perdue plus facilement à ces endroits. L'objectif est de supprimer les ponts thermiques pour éviter d'une part des pertes de chaleur importantes et d'autre part un taux d'humidité trop élevé à l'intérieur de la maison.

La maison passive est très sensible aux ponts thermiques car la moindre faille dans la construction peut occasionner un besoin calorifique trop élevé pour chauffer la maison.

Pour éviter cela, les constructions sont isolées de manière rotative et symétrique. Les ponts thermiques seront illustrés d'exemples et expliqués de manière plus détaillée dans le chapitre 5.

I L'ÉTANCHÉITÉ À L'AIR

L'enveloppe du bâtiment est à construire de façon à garantir l'étanchéité à l'air afin d'éviter les déperditions thermiques par ventilation.

Par conséquent, le taux de renouvellement d'air ne doit pas dépasser 0,6 h⁻¹ pour une différence de pression de 50 Pa.

Plus de détails sur l'étanchéité à l'air dans le chapitre 4.2.

Nouvelles appellations pour le coefficient de transmission de chaleur

Le coefficient de transmission de chaleur U, également appelé « valeur U », exprime la quantité de la conductivité thermique entre deux régions d'un même milieu, provoquée par une différence de température (mesuré en watt et kelvin par m²).

Pendant l'europeanisation, on a adopté l'appellation anglaise U. Cependant, dans certains graphiques, on trouve encore les anciennes appellations.

Voici un tableau comparatif :

Avant :	Désormais :		
Fenêtre	K _{fenêtre}	window	U _w
Vitrage	K _{vitrage}	glazing	U _g
Châssis	K _{châssis}	frame	U _f

Attention : La valeur U des éléments de construction et des fenêtres se réfère uniquement à un mètre carré de l'élément de construction ou de fenêtre et non pas à la surface entière habitable déterminante pour le besoin calorifique annuel.

1.3 Principes de base de la ventilation et du chauffage

La ventilation sert à réguler l'échange d'air frais, indispensable pour obtenir une bonne hygiène dans la maison. Pendant la construction, les odeurs, le CO₂ et l'air vicié sont aspirés de manière continue pour éviter des dégâts (par exemple l'humidité et les moisissures) et pour créer un climat ambiant agréable. Une personne a besoin de 30 m² d'air frais par heure pour que la teneur en CO₂ dans l'air n'augmente pas. La température de l'air frais doit s'élever à 16,5°C pour maintenir un confort agréable. Par conséquent, pour assurer un climat ambiant agréable, le système de ventilation dispose d'un récupérateur de chaleur efficace.

I LE TAUX DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR $\eta_{RDC} \geq 75\%$

Pour assurer les fonctions mentionnées ci-dessus, les immeubles anciens sont aérés puis réchauffés. Par conséquent, pendant la saison de chauffage, il y a une augmentation incontrôlée des pertes de chaleur ce qui provoque des moisissures, par exemple dans les ébrasements de fenêtre. La cause de ces déperditions thermiques est souvent une faille dans la construction qui provoque des fuites ou encore des ponts thermiques dans l'enveloppe du bâtiment.

Dans une maison passive, un système de chauffage conventionnel est complètement inutile car le besoin calorifique est tellement faible que n'importe quel chauffage usuel s'avère surdimensionné.

Dans une maison passive, le système de chauffage est raccordé au système de ventilation. Voici les facteurs à considérer pour le chauffage et la ventilation :

- la chaleur corporelle des habitants
- l'émission de chaleur des appareils électriques et de la lumière
- le rayonnement solaire

Jusqu'à présent, ces facteurs énergétiques n'ont jamais été considérés, ils ont été éliminés de la maison. Dans la maison passive, ces sources énergétiques sont utilisées pour chauffer celle-ci. La chaleur interne

ne ou libre de la pièce, comme par exemple le rayonnement solaire, passe par l'échangeur double flux et est récupérée pour ventiler la maison de nouveau. Il faut souligner qu'il ne s'agit pas de réutiliser l'air vicié, mais de récupérer l'énergie restante sous forme de chaleur pour la réintégrer au processus de ventilation.

En effet, la chaleur libre est considérée dans le bilan énergétique global, le besoin en chauffage restant n'excédant pas 0,15W/m²K. Cette quantité énergétique est nécessaire pour assurer un climat agréable dans la maison et peut être fournie entre autres à l'aide d'énergie électrique, notamment grâce à une installation électrique centralisée ou décentralisée. L'avantage d'une telle installation est sa disponibilité immédiate et sa régulation facile. Cependant, le coefficient d'énergie primaire élevé de 2,97 est plutôt désavantageux. Pour générer 1 kilowattheure d'électricité, on a besoin de presque 3 kilowattheures d'énergie primaire.

En utilisant des **pompes à chaleur** (voir chapitre 3 « ventilation et chauffage dans la maison passive »), le besoin en énergie de chauffage peut être fortement réduit. Les systèmes de pompe à chaleur modernes sont très performants et énergétiquement efficaces, leur performance dépendant de la différence de température entre la source énergétique et la puissance thermique (par exemple un chauffage au sol).

La plupart du temps, l'eau est chauffée à l'aide d'une installation solaire, parfois avec des pompes à chaleur (par exemple pompe à chaleur air/eau ou géothermique). Une installation solaire assure environ 60 % du besoin annuel, les 40 % restants peuvent être fournis à l'aide d'une résistance électrique ou d'autres chauffages d'appoint. Il existe aujourd'hui des systèmes de chauffage solaire qui chauffent à l'aide de chaudières miniatures à condensation. Cependant, celles-ci fonctionnent au gaz ou au fioul et engendrent par conséquent des frais supplémentaires.

Les possibilités de chauffages d'appoint pour une maison passive sont multiples et faciles à combiner (voir le chapitre "la ventilation et le chauffage dans la maison passive". En outre, il est raisonnable d'effectuer une analyse coûts/avantages pour valider la rentabilité de ces systèmes (voir chapitre 7).

I LE CONFORT DANS L'HABITAT

Le mot bien-être est déjà utilisé dans le chapitre 1.1 « Qu'est qu'une maison passive ? ».

En effet, la maison passive est un bâtiment qui atteint le bien-être sans système de chauffage actif en hiver ou d'air conditionné en été.

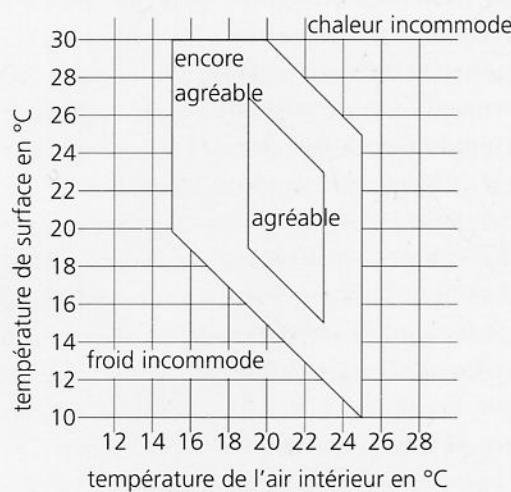
C'est le sentiment subjectif de notre corps qui dépend de la complémentarité de plusieurs composants.

Le corps humain échange sans cesse de la chaleur avec son environnement. Les facteurs suivants sont particulièrement importants pour le bien-être des personnes habitant la maison :

- la température ambiante ainsi que la température de surface des éléments de construction qui les entourent (mur, plafond, sol)
- l'humidité atmosphérique relative
- la manière et la durée de la ventilation
- la capacité des éléments de construction à accumuler la chaleur.

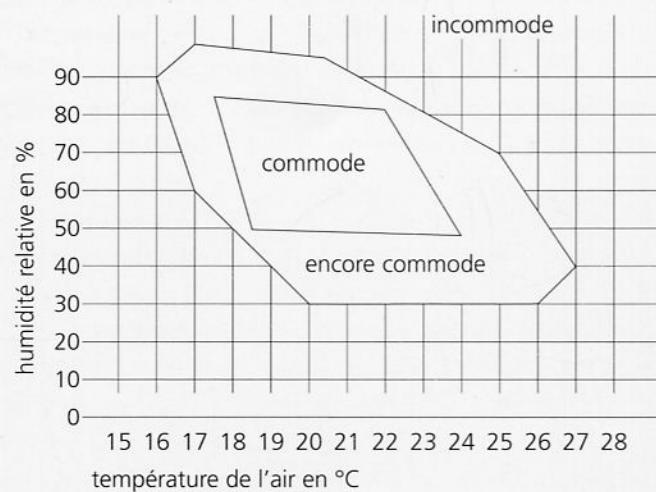
Quant au bien-être, la température ambiante et la température de surface des éléments de construction se complètent jusqu'à un certain point.

fig. 1-3 Diagramme du bien-être selon Frank et Reiher



Si la température de surface murale est d'environ 10°C, la température ambiante a beau être élevée, il sera impossible de créer un climat ambiant agréable, car en approchant les murs, le corps humain perd trop de chaleur corporelle. Au contraire, en augmentant la température de surfaces qui enveloppent le bâtiment à p.ex. 20°C tout en baissant la température ambiante à seulement 16°C, le climat ambiant sera encore agréable et permettra en même temps d'économiser de l'énergie.

fig. 1-4 Diagramme du bien-être selon Leusden et Freymark



L'humidité relative dépend de la température de l'air : le bien-être d'une personne est garanti quand le taux d'humidité atmosphérique relatif est compris entre 40 et 70% avec une température ambiante de 20°C. L'humidité relative change quand la température change. Si la température baisse, le taux d'humidité augmente et inversement.

La consommation maximale doit être inférieure ou égale à 0,10W/m²K.

Si l'on considère tous ces facteurs, on obtient la charge thermique, indispensable pour calculer la puissance thermique du chauffage. Dans les bâtiments conventionnels, on évalue la puissance nominale conformément à la norme DIN 4701, pour ensuite déterminer le débit d'air nécessaire pour la chaudière. L'objectif de la construction au standard maison passive est une consommation énergétique très faible pour pouvoir renoncer à un chauffage conventionnel.

1.4 Mode de fonctionnement d'une maison passive

L'enveloppe étanche, quasiment sans pont thermique et extrêmement bien isolée de la maison passive, assure une rétention de l'air chaud à l'intérieur du bâtiment et protège l'espace intérieur chauffé du vent froid.

Par ailleurs, les fenêtres à isolation thermique renforcée ont un très faible coefficient de conductivité thermique, ce qui permet une réduction des déperditions thermiques. Grâce à leur bonne capacité de transmission de la lumière, les vitres capturent les rayons solaires pour les stocker dans les dalles de sol, les plafonds et les murs. On considère ces fenêtres comme une source de chaleur car elles collectent même en hiver l'énergie solaire. Pour optimiser les apports solaires, les grandes fenêtres sont orientées vers le sud et l'ouest et les petites vers le nord et l'est. Le problème causé par l'ombre est extrêmement critique. Il faut prendre en considération l'exposition de la maison (la topographie de l'emplacement), mais aussi les installations d'ombrage temporaire. Une couverture de végétation dense pourrait être trop excessive, cependant, sans ombrage, la maison serait exposée au vent froid. En cas de fuite ou de pont thermique, le vent peut s'infiltrer à l'intérieur du bâtiment pour ensuite le refroidir.

L'avantage des installations d'ombrage temporaire, comme des persiennes extérieures, donne la possibilité d'exposer les façades sud et ouest au soleil pour en récupérer l'énergie. En cas de rayonnement solaire trop fort ou de sur-échauffement de la pièce, les habitants peuvent utiliser les persiennes afin de garantir leur bien-être.

Une autre idée « passive » est l'exploitation de sources chaudes internes, telles que l'émission des appareils ménagers électriques ou des personnes qui se trouvent à l'intérieur de la maison. Il ne faut pas sous-estimer

cette forme de source thermique. Deux personnes qui se trouvent dans une petite pièce pendant un certain temps produisent une chaleur agréable. Les apports internes de chaleur dus aux émissions sont souvent mal interprétés. On augmente alors le nombre d'appareils électroniques ou le nombre d'ampoules, ce qui permet de diminuer le besoin en chaleur.

Cependant, ce n'est en aucun cas l'objectif souhaité ; et les répercussions sur le bilan général énergétique s'avèrent plutôt négatives (électricité : coefficient 3,0). Par conséquent, le coefficient de conversion d'énergie primaire doit toujours être inférieur ou égal à 120 kWh/m²a.

1.5 Résumé : critères et avantages de la maison passive

Les principaux critères de la maison passive

Besoins annuels en chaleur (en termes d'énergie de chauffage)
 $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Besoins annuels en énergie primaire $\leq 120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, dont moins de 55 kWh/m²a pour la production électrique

Coefficient de transmission de chaleur pour la construction de murs, plafonds et sols
 $U < 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$

Fenêtres triple vitrage au gaz argon et châssis de fenêtre isolés
 $U_w < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Etanchéité à l'air: taux de renouvellement de l'air par heure de 0,6 max. et différence de pression de 50 Pa ($n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$)

Système de ventilation avec un taux de récupération de chaleur de $\geq 75\%$

Par rapport à une maison conventionnelle, la maison passive offre de nombreux avantages à son maître d'ouvrage :

Indépendance concernant les énergies fossiles ;

Plus grand confort:

- Températures équilibrées
- Pas de surchauffe en été grâce au haut standard d'isolation
- Beaucoup de lumière entre par les grandes surfaces vitrées orientées sud
- Pas de nuisance sonore si l'on garde les fenêtres fermées
- Un habitat sain grâce à une bonne régulation de température
- Températures de surface élevées et bien-être garanti
- Pas d'utilisation de radiateur

Haute qualité de l'air:

- Pas de poussières engendrées par les radiateurs
- Filtres d'air de haute qualité (personnes allergiques)
- Régulation du taux de CO₂ et d'humidité
- Pas de courant d'air à cause de fenêtres ouvertes
- Pas d'humidité et de moisissures

Conception et construction de haute qualité

Valeur immobilière très élevée

1.6 L'exemple allemand d'application du règlement sur les économies d'énergie 2002 (EnEV) autour de la maison passive

Le nouveau règlement sur les économies d'énergie, entré en vigueur le premier janvier 2002, a engendré des changements quant aux exigences de la construction de l'enveloppe du bâtiment ainsi que des systèmes de chauffage et de ventilation.

Le critère essentiel quant au changement du règlement allemand sur les économies d'énergie (EnEV) de l'année 1995 est la fusion de la réglementation relative à l'isolation thermique des habitations et du dispositif de ventilation conforme au DIN V 4701-10 pour la consommation de chauffage et de ventilation. En considérant le réchauffement de la planète, il est de plus en plus indispensable de réduire la consommation énergétique. En Allemagne, la consommation en chauffage à elle seule représente un tiers de la consommation énergétique totale.

Ainsi, le règlement allemand sur les économies d'énergie sert principalement de bilan énergétique et adapte les réglementations techniques aux normes européennes.

La pré norme allemande 4108-6 complète la norme DIN 832 au niveau national seulement, ce qui crée des conflits quant à l'application des règles de calcul pour la conception des maisons passives au niveau international. En calculant la consommation annuelle de la maison passive selon la pré norme DIN V 41086, il est possible qu'il en résulte une consommation annuelle en chauffage de 0 kWh/m²a, correspondant à une valeur impossible à réaliser. Ce résultat est dû à une inexactitude dans le calcul ($4,6 \text{ kWh/m}^2\text{a} \pm 5,0$), le besoin en chauffage réaliste étant de 15 kWh/m²a selon nos expériences concrètes.

Pour les maisons mitoyennes du lotissement maison passive à Hannovre-Konsberg, on a calculé une valeur moyenne de $14 \text{ kWh/m}^2\text{a} \pm 3$. Cependant, la consommation d'énergie de chauffage s'élevait à $15,8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ au final. La cause principale de ces différences dans les calculs provient des objectifs trop optimistes en termes d'apport internes, ainsi que d'une différence de température dans le règlement sur les économies d'énergie (- 1 Kelvin).

Le Passivhaus-Institut à Darmstadt, sous la direction du Dr. Wolfgang Feist, a développé le logiciel PHPP "Passive House Planning Package", un outil de conception de l'enveloppe (basé sur des feuilles de calcul). La sensibilité de la maison passive quant aux changements de position, de qualité et de technique, exige des valeurs exactes et non pas des valeurs globalisées. En effet, le PHPP est privilégié par rapport au EnEV. Cependant, le règlement EnEV représente le droit public. C'est la raison pour laquelle on a introduit le règlement EnEV dans la version 4 du "PHPP 2002", pour effectuer et référencer les calculs conformes au règlement. Le tableau comparatif 3-1 du Dr. W. Feist du Passivhaus-Institut à Darmstadt résume les différences entre le PHPP et le EnEV.

fig. 1-2 Tableau comparatif des différents calculs de valeurs selon le EnEV et le PHPP

	EnEV	PHPP
<i>Apports internes de chaleur</i>	On fixe une valeur de 5 W/m^2 (condition : utilisation d'appareils ménagers efficaces)	Après mesures, les valeurs réalistes s'élèvent à $2,1 \text{ W/m}^2 \pm 0,3$. En analysant de manière détaillée toutes les sources d'énergie, on arrive à des résultats plus exacts.
<i>Déperditions de chaleur par transmission (le facteur degrés/jours se détermine selon les différences de température intérieur/extérieur pendant la saison de chauffage)</i>	Le facteur degrés/jours dans le règlement EnEV s'élève à $69,6 \text{ kWh/a}$ après une augmentation de l'isolation thermique, la température limite de chauffage étant de 12°C et la température intérieure de 19°C . Pendant la nuit, cette valeur baisse de $69,6 \text{ kWh/a}$ à $66 \text{ kWh/a} \rightarrow$ facteur ~ 0,95.	Le facteur degrés/jours est de 84 kWh/a et augmente à cause de la différence de température de 8K (20°C à l'intérieur/ 12°C à l'extérieur).
<i>Apports solaires</i>	Contrairement au règlement sur l'isolation thermique (WSVO) de 95, on a enregistré de nouveaux angles d'azimut (sud-est, nord-est, nord-ouest, sud-ouest) ainsi que différentes inclinations ($30/45/60/90^\circ$).	Quant aux fenêtres, le châssis est généralement plus grand que prévu dans le règlement EnEV. Par conséquent, le rayonnement solaire, la surface vitrée et les facteurs de réduction varient énormément.
<i>Déperditions de chaleur par ventilation</i>	Le EnEV applique des valeurs d'échange thermique de $0,2/\text{h}$ en cas de fuite dans les installations de ventilation avec récupération de chaleur. Les apports solaires selon le DIN V 4108-6 sont trop optimistes, alors que les déperditions thermiques par ventilation dues aux fuites par les fenêtres sont trop élevées.	Quant à l'isolation thermique de l'enveloppe envisagée, dans la maison passive il y a quasiment plus d'échanges d'air. Ces échanges d'air minimaux sont mesurés à l'aide du procédé de repérage (Blower-Door-Test). Par ailleurs, les pertes de chaleur par les fenêtres sont quasi nulles grâce aux installations de récupération de chaleur efficaces.
<i>Surface habitable</i>	La valeur limite pour la maison passive est relatif à la surface habitable (m^2). Cependant, le EnEV applique un facteur de conversion global qui dit que la surface utile dépend de la surface de base, inférieure au volume net du bâtiment ($= 0,8 \times$ volume brut du bâtiment). La surface utile est calculée à l'aide du facteur 0,32 en multipliant le volume brut du bâtiment.	La base de calcul de la surface à chauffer est le DIN 277 (Surface nette de référence énergétique II. BV), relatif à l'enveloppe thermique du bâtiment, sans compter les balcons, terrasses et débarras (comptés à 60 %).

Bilan: Les deux méthodes donnent des résultats complètement différentes en terme de calculs et de résultats. Il est impossible de calculer toutes les variables d'une maison passive à l'aide du règlement EnEV qui se base toujours sur des hypothèses trop favorables et peu réalistes (par exemple quant aux déperditions thermiques par ventilation).

Le PHPP est une méthode de calcul qui ne correspond pas aux normes publiques, pourtant elle permet un calcul réel et variable selon les différentes circonstances. Le EnEV se base sur le développement de l'isolation thermique alors que le PHPP présente les résultats concrets d'expériences et de mesures de bâtiments énergétiquement efficaces.

2 L'enveloppe du bâtiment - construction des parois extérieures, toiture et dalle de sol

2.1 Bases de l'esquisse du projet

Pour atteindre le standard de la maison passive, l'enveloppe complète du bâtiment, constituée de la paroi extérieure, de la toiture et des dalles est particulièrement importante. Par conséquent il existe de grandes exigences quant :

- au rapport surface/volume
- à la qualité de l'isolation thermique
- à la limitation de ponts thermiques
- à l'étanchéité à l'air

L'enveloppe thermique du bâtiment entoure toutes les pièces chauffées qui devraient avoir une température supérieure de 15°C en hiver. L'objectif sera d'obtenir la plus grande surface habitable pour une surface d'enveloppe minimale.

Les éléments de construction opaques qui séparent les zones chauffées des zones froides sont à isoler de façon à ce que le coefficient U de la paroi extérieure, de la toiture et des dalles soit inférieur à 0,15 W/m²K, idéalement égal à 0,10 W/m²K. Cela correspond à une épaisseur de mur de 25 à 40 cm jusqu'à présent peu courante.

Une fonction supplémentaire de l'enveloppe thermique du bâtiment et de son étanchéité à l'air est la limitation des ponts thermiques.

Lors de la conception d'un projet, on tentera d'appliquer, grâce aux plans et coupes, une couverture isolante close qui englobera l'ensemble des espaces intérieurs chauffés. Si la couverture est continue et sans interruption, on élimine tous types de ponts thermiques. La même technique est utilisée pour l'étanchéité à l'air.

Ces principes de construction de la maison passive ont été développés par « Passivhaus-Institut Dr. Feist » à Darmstadt (Allemagne).

Dans le chapitre 4 on traitera spécifiquement les ponts thermiques et de l'étanchéité à l'air qui sont l'objet principal du contrôle de qualité. Par la suite, on décrira de manière plus détaillée les normes de construction de la maison passive.

2.2 Construction de l'enveloppe extérieure

Les parois extérieures sont des éléments de construction qui offrent d'énormes possibilités de décoration et de choix de matériaux. On différencie les parois massives que l'on construit sur place et les cloisons légères qui se vendent en pièces préfabriquées. Cependant, la paroi massive, ce que l'on entend par maçonnerie traditionnelle avec différentes sortes de pierres, est plus commune.

De nos jours, elle est installée avec une couche isolante supplémentaire, que l'on appelle "Système d'Isolation Thermique Extérieur".

Pour atteindre la haute qualité d'isolation thermique de la norme maison passive, on ne peut pas utiliser des parois extérieures conventionnelles sans isolant supplémentaire.

Pour obtenir un coefficient U maximal de 0,15 W/m²K cela nécessiterait par exemple une paroi d'un mètre d'épaisseur en briques légères poreuses et enduites des deux côtés (conductivité thermique de $\lambda = 0,16 \text{ W/mK}$). Cette variante est impossible à mettre en œuvre du fait de la réduction de l'espace habitable mais aussi par rapport à l'épaisseur du tableau de fenêtre qui en résulte.

Grâce à l'isolation thermique de 30 cm (groupe de conductibilité thermique WLG 040), l'épaisseur de la paroi peut être divisée par deux par rapport à des constructions classiques, tout en obtenant le coefficient U requis.

Un avantage important de la paroi massive est la qualité de ses propriétés d'échanges thermiques, qui lui permettent de réguler la température intérieure. Le stockage de la chaleur solaire dans la paroi massive se fait sur un rythme de 24 heures mais pénètre seulement de 10 à 12 cm dans la paroi. Une épaisseur de mur commune de 36 cm n'est pas efficace à court terme, mais seulement sur l'année entière. Les cloisons légères sont en majorité en bois ainsi que le châssis de fenêtre comportant des matériaux isolants à l'intérieur. Par conséquent, l'épaisseur de la construction de cloisons légères est plus déterminée par l'épaisseur

requise des matériaux isolants que par l'intérêt statique. L'inconvénient des cloisons en bois est leur faible densité apparente qui fait qu'elles ne retiennent pas bien la chaleur.

Les jonctions et connexions entre les éléments de construction sont à installer soigneusement et sans faille.

La protection contre les intempéries du revêtement extérieur du bâtiment est garantie grâce à des enduits spéciaux et au bardage rapporté (coffrage de dalles ou de bois).

2.2.1 Maçonnerie et Système d'Isolation Thermique Extérieur

Cette construction de mur est une variante d'exécution qui ressemble, quant aux principes et aux matériaux de construction, à la construction conventionnelle. La combinaison de coffrage du béton classique et du béton cellulaire ou du béton et des panneaux d'isolation thermique est un standard de construction depuis longtemps. Seul la composition des différents composants est adaptée au standard maison passive.

L'épaisseur des murs peut être réduite à l'épaisseur statique requise car les isolants réduisent les déperditions thermiques. L'utilisation des matériaux avec une forte densité apparente, tels que le grès ($\rho=2,0 \text{ kg/dm}^3$), le béton ou le béton armé ($\rho=2,3-2,5 \text{ kg/dm}^3$), permet une petite épaisseur du revêtement tout en garantissant une bonne résistance et isolation thermique.

L'étanchéité à l'air est indispensable. Cependant, la maçonnerie seule ne peut pas la garantir, car il y a toujours de joints ou de fissures dans le mur, provoqués par des pressions. De ce fait, on rajoute un enduit intérieur comme couche isolante supplémentaire. Cette couche doit s'appliquer du sol jusqu'au plafond et sur la totalité des murs de la maison. L'interruption de cette couche isolante par des installations électriques ou sanitaires est à éviter si cela est possible, sinon à isoler de manière appropriée. Contrairement à la maçonnerie légère, un mur de béton est d'ores et déjà étanche.



fig. 2-1 Panneau d'isolation thermique en mousse dure de Sto



fig. 2-2 Mur extérieur de la cave avec joint d'étanchéité et isolation

En matière de système d'isolation thermique extérieur, il existe pour le revêtement du bâtiment des éléments à une couche (épaisseurs jusqu'à 36 cm) livrés sur les lieux de la construction. L'ancrage avec la paroi s'effectue à l'aide d'un collage simple, comme pour les systèmes d'isolation thermique extérieurs conventionnels.

Pour plus d'information : www.sto.com

2.2.2 Système de construction de parois préfabriquées en béton à l'aide d'un coffrage

Ces systèmes de parois préfabriquées sont faits d'éléments de coffrage en béton (LB 8 léger) de 1 x 2 m qui se montent directement sur le chantier. La construction entière a une isolation thermique extérieure EPS (en mousse de polystyrène expansé) de 300 mm, un mur de béton de 150 mm et, à l'intérieur, un panneau isolant de fibres de verre. L'isolation extérieure et le panneau intérieur sont reliés par des entretoises isolantes et sont montés à l'aide d'un coffrage perdu. Ces modules ont une taille de 2 m² et pèsent initialement 50kg. Les mesures spéciales et les pièces de montage (par exemple volets roulants) sont également préfabriquées. Le coffrage EPS est doté de rainures moulées pour permettre une meilleure fixation. Lors du montage sur le chantier, les éléments seront posés côte à côte ou l'un au-dessus de l'autre, on pose les ressorts pour ensuite les emboîter et verrouiller à l'aide des languettes qui se trouvent à l'intérieur. Pour garantir une stabilité supplémentaire, les éléments peuvent être collés en plus d'être emboîtés. Après montage

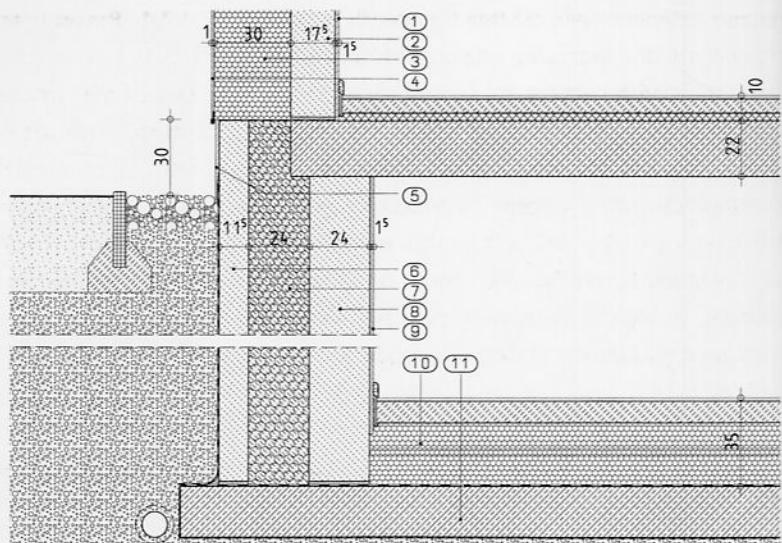


fig. 2-3 triple paroi de cave en béton cellulaire isolant

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1 enduit intérieur | 7 béton à conductivité thermique ($\lambda = 0,09 \text{ W/mK}$) |
| 2 béton cellulaire en bloc | 8 béton cellulaire en bloc |
| 3 isolation thermique | 9 enduit intérieur |
| 4 enduit extérieur | 10 sol de la cave |
| 5 béton cellulaire de socle | 11 semelles en béton armé |
| 6 béton cellulaire en bloc | |

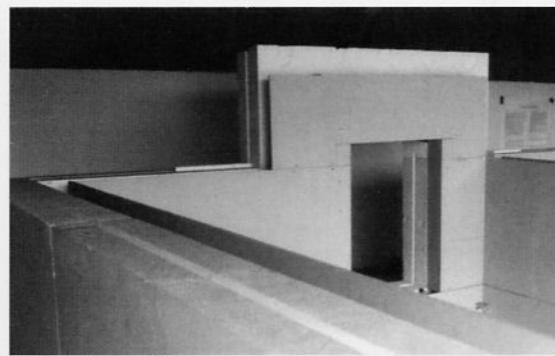


fig. 2-4 Système de mur lors du montage

du mur extérieur, celui-ci atteint un coefficient U de $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$. L'enveloppe continue du bâtiment assure l'étanchéité à l'air. Les panneaux intérieurs n'ont pas besoin d'enduit, et après rebouchage des joints on peut les tapisser. Pour une isolation complémentaire, on utilise un coffrage perdu en éléments « sandwich » qui font $1,00 \times 1,25 \text{ m}$ et pèsent 38 kg. Les murs extérieurs seront creusés là où ils appuient sur un mur intérieur, pour les bétonner de manière symétrique. Ainsi, tous les murs de la maison sont faits des mêmes matériaux isolants.

Pour plus d'informations :

www.passivhaus-massiv.de
www.lamaisonpassive.be
www.lamaisonpassive.fr

2.2.3 Triple paroi de la cave avec béton cellulaire

Le système de montage décrit ci-dessus peut être amélioré en termes d'énergie dans la construction de murs non porteurs (par exemple la construction étanche) en utilisant du béton thermique.

L'isolation périphérique des façades compactes extérieures de la cave est presque deux fois plus chère que l'isolation en polystyrène. L'isolation est constamment exposée à l'humidité et peut perdre un peu de sa propriété isolante. L'application d'un coffrage à trois couches dont deux couches de béton cellulaire (p.ex. Ytong) isolant serait une bonne alternative, car elle présente une très bonne propriété d'isolation contre l'humidité.

2.2.4 Béton thermique en matériau recyclable

Le béton thermique est un isolant thermique EPS (en polystyrène expansé), très résistant selon sa composition, et facile à appliquer sans laisser de joints. Il est polyvalent dans son utilisation. À l'aide d'un catalyseur spécial on traite la surface du matériau recyclé. Le matériau constitué de 250 à 600 kg de ciment/ m^3 , peut être mélangé sur le chantier et appliqué en cas de grande quantité à l'aide d'un système de pompage. Selon sa proportion, le ciment s'étale presque tout seul et, grâce à une toupie, on peut mélanger le béton prêt à l'emploi, acheté en sac. L'isolation thermique est résistante au gel et son comportement a été testé dans la construction de routes alpines ou encore de pistes d'atterrissements dans les aéroports. L'idée écologique de recycler un matériau et de le mettre en œuvre avec un constant souci d'économie d'énergie est un objectif de la politique environnementale aussi important que l'économie énergétique relativement au chauffage.

Caractéristiques techniques des matériaux de construction :

Densité apparente	$250-600 \text{ kg/m}^3$
Coefficient U	$0,08-0,20 \text{ W/mK}$
Combustibilité	400 Kg/m^3 non combustible, A1
Résistance à la compression	$0,2-1,2 \text{ N/mm}^2$
Diffusion de vapeur d'eau μ	7 à 15
Résistance	anorganique, résistant à la décomposition
Besoin en énergie primaire	faible, car le matériau est recyclable
Composition	polystyrène recyclé, du ciment et du liant
Propriétés	à partir de 600 kg auto nivellant

Domaines d'application :

- Dalles de sol sans reprise des charges excessive
- Isolation
- Sous la chape surtout dans la construction de halls
- Béton léger dans la partie haute du toit
- Isolation d'égalisation en vrac des plafonds bois et plafonds voûté
- Isolation des murs extérieurs de la cave (n'importe quelle épaisseur)
- Isolation résistante aux rongeurs dans le secteur agricole
- Isolation des tuyaux
- Bétonnage de la paroi portante (matériau classé A1)
- Plafonds pare-feu

Pour plus d'informations :

www.waermedaemmbeton.de



fig. 2-5 Béton cellulaire appliquée à l'aide d'une pompe à béton

2.2.5 Construction en ossature bois et bardage rapporté

Le bois est le matériau de construction le plus ancien qui existe sur notre terre. Il a été utilisé dans les constructions les plus diverses. La construction de l'exemple suivant, en ossature de bois porteuse, est revêtue des deux côtés par des panneaux de bois. Ces panneaux servent d'isolation et donnent une rigidité supplémentaire à la construction. Dans la cavité de la construction on applique des panneaux feutres, des panneaux de fibre de bois ou, en vrac, un bardage rapporté servant de protection contre les intempéries pour assurer une bonne isolation.

L'étanchéité à l'air de la construction à ossature bois est assurée par les bardages intérieurs en gypse carton standard, résistants au feu et à l'humidité, montés directement sur l'ossature bois ou sur les couches intermédiaires de fourrure ou des plaques agglomérées/OSB. Il est particulièrement important

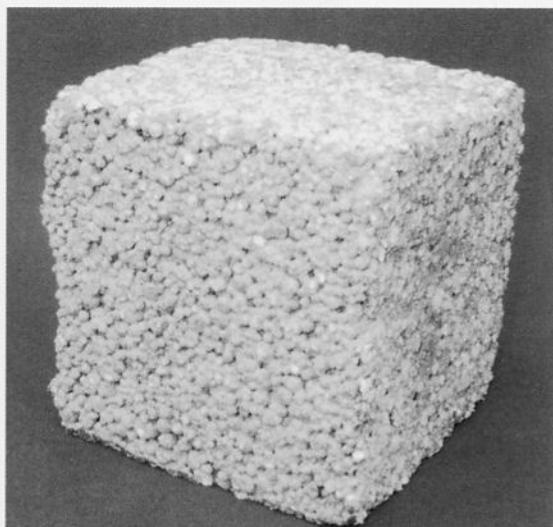


fig. 2-6 Béton cellulaire durci après deux heures

d'assurer les connexions et jonctions étanches des éléments de construction. Une zone technique (env. 5 cm d'isolation avec revêtement) permet la pose de conduites sans endommager les éléments de construction étanches. Pour éviter des pertes de chaleur par l'enveloppe extérieure à cause des percements des tuyaux de ventilation, l'entreprise Westaflex a élaboré un collier de passage pour tuyau étanche empêchant la formation de condensation.

Pour plus d'informations : www.westaflex.de

Les murs à ossature bois sont très légers par rapport aux murs massifs, ce qui empêche la rétention de la chaleur à long terme et les températures baissent vite pendant la nuit. En règle générale, la construction à ossature bois est plus problématique pour assurer l'étanchéité à l'air à long terme, les nombreux éléments de construction représentant des points faibles une fois la maison exposée au vent et aux intempéries. En effet, à long terme, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe d'un bâtiment est mieux assurée par la construction massive.

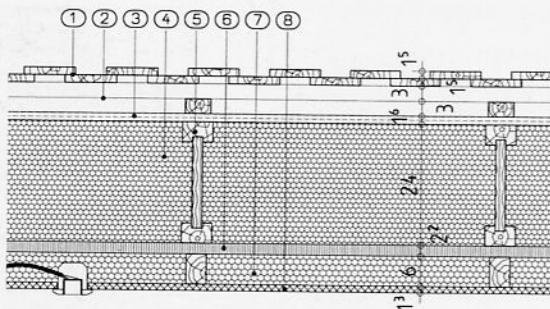


fig. 2-7 Paroi à ossature bois de doublage

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1 Lambris extérieur bois | à tenon et mortaise |
| 2 Contre lattis | (22 mm ø) (assemblages |
| 3 Panneau de fibres de bois | des angles recouverts |
| (16 mm ø) | d'un film pare vapeur) |
| 4 Isolation à injection ou | 7 Panneaux en laine miné- |
| en vrac | rale (isolation supplémen- |
| 5 Traverse de jonction TJI | taire et zone technique) |
| 6 Plaque OSB étanche | 8 Placoplâtre (12,5 mm ø) |

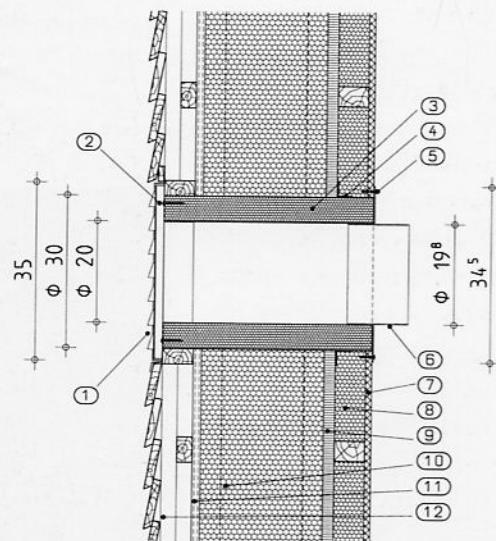


fig. 2-8 Paroi étanche Westaflex comme isolation des tuyaux

- | | |
|---|---|
| 1 Connexion extérieure,
p.ex. grille à air | 6 Raccord PE/ PP |
| 2 Assemblages
démontables (4x) | 7 Placoplâtre (12,5 mm ø) |
| 3 Fourreaux tubulaires
en polypropylène
expansé (EPP) | 8 panneaux de laine
minérale |
| 4 Raccord en plastique
étanche | 9 Plaque OSB (22 mm ø) |
| 5 Assemblages démontable
(4x) | 10 Traverse de jonction TJI |
| | 11 Panneau de fibres de
bois (16 mm ø) |
| | 12 Lambris posé sur un
lattis en bois |

2.3 Construction des dalles de sol et fondations

L'isolation des dalles de sol et des plafonds de la cave, qui sépare les zones chauffées des zones froides, peut s'appliquer au-dessus ou en dessous de l'entablement.

Souvent, la couche isolante est posée sur une plaque en béton armé à l'intérieur du bâtiment; ceci est insignifiant s'il s'agit de l'isolation pour la cave ou de la dalle du rez-de-chaussée. Si la maison est très enfoncée dans la terre, on porte une attention particulière à l'isolation intérieure.

La dalle d'un diamètre de 24 cm présente un coefficient U d'env. 0,12 W/m²K. Les matériaux d'isolation varient selon le type de construction et la démarche écologique du maître d'ouvrage. Quant à l'ossature bois, on utilise des panneaux rigides en mousse de polystyrène extrudé ou bien en fibre cellulosique.

La construction de dalle se fait de la manière suivante: on applique d'abord une couche granulaire d'env. 20 cm qui agit à titre de coupure de capillarité, protégeant ainsi la dalle de l'humidité. Par-dessus, on pose la dalle de béton armé et le revêtement de sol.

Dans les deux variantes, on applique de manière continue une couche thermique sur le mur à l'aide de matériaux à faible conductivité thermique (béton cellulaire ou polyuréthane). Les représentations suivantes montrent comment éviter de manière efficace les ponts thermiques. La mousse rigide en polystyrène est résistante et s'applique en dessous de la dalle.

Cette technique de construction avec des dalles conventionnelles est extrêmement longue, car l'épaisseur maximale des dalles est de 16 cm, et exige par conséquent une pose de plusieurs couches. Une alternative : les dalles préfabriquées en béton armé.

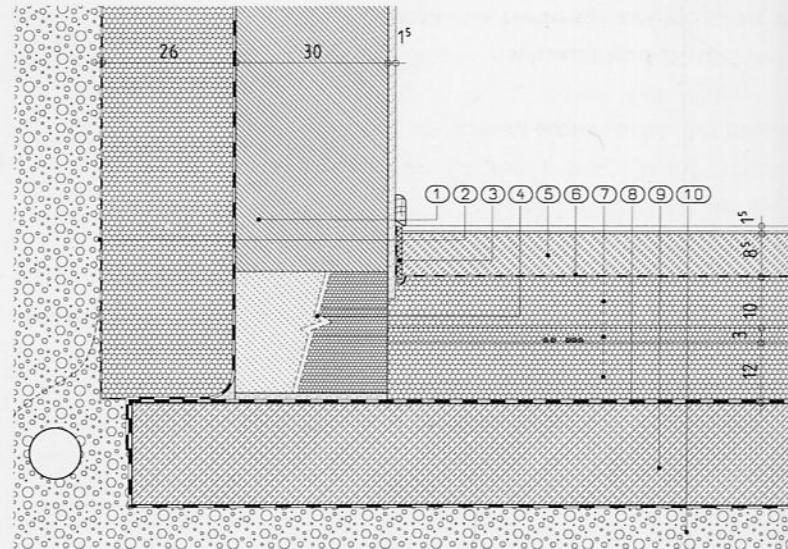


Fig. 2-9 Construction d'une plaque de base

- | | |
|---|--|
| 1 mur extérieur de la cave | 5 chape de ciment |
| 2 couche de peinture anti-rongeur | 6 film anti-vapeur étanche |
| 3 bande de rive autocollante | 7 panneaux en polystyrène
$d = 100/30/120 \text{ mm}$ |
| 4 béton cellulaire ou purenit pour réduire les ponts thermiques | 8 isolation horizontale |
| | 9 dalle en béton armé |
| | 10 lit de gravier |

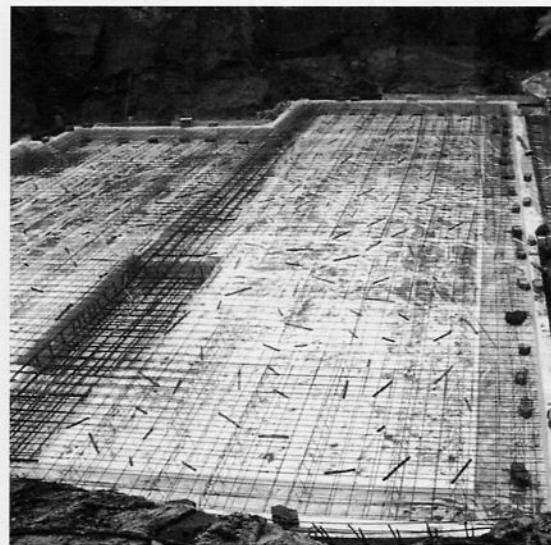


fig. 2-10 Dalle isolée avec une couche de 26 cm de mousse de polystyrène (groupe de conductibilité thermique 035)

2.3.1 Isolation des dalles en béton armé préfabriquées

On applique une couche isolante de 30 cm en mousse dure de polystyrène expansé sous la dalle, sur la surface entière jusqu'au chant de la dalle.

Données de base sur l'isolation des dalles :

- Tenon, système d'assemblage et coffrage en béton armé
 - Isolation thermique WD/WS selon DIN 18164, section 1
 - Difficilement inflammable
 - Matériaux de construction classés B1
 - Résistance à la flexion $0,12 \text{ N/mm}^2$
 - Flambage de 3 % au bout de 50 ans
 - Pose d'une couche de gravier propre
 - Construction rapide et bonne précision
 - Pose de fondation et anti-gel inutiles
 - L'enveloppe du bâtiment retient la chaleur

L'isolation peut être livrée directement sur le chantier par le fabricant sous forme d'éléments préfabriqués, palettisés avec un guide de pose.

Pour plus d'informations :

www.Wolf-Thermomodule.de

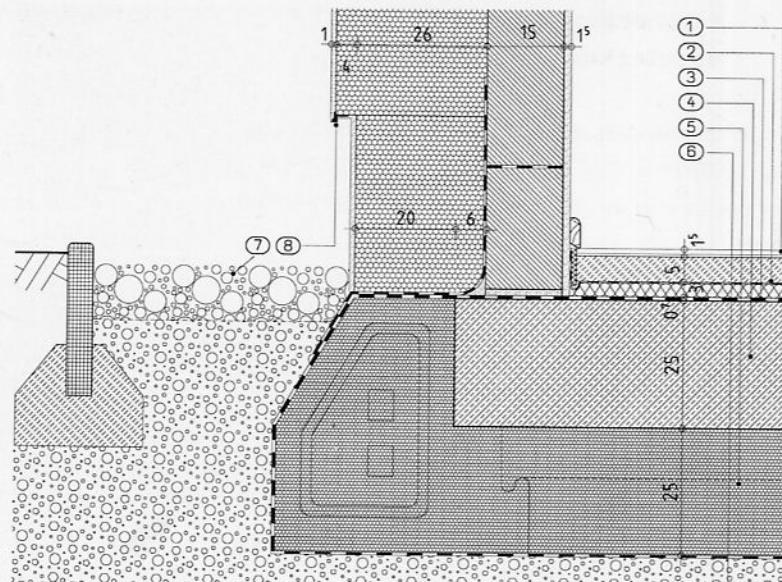


fig.2-11 Coupe d'une dalle thermique de l'entreprise Wolf

- | | | |
|---|---|--|
| 1 | Dallage | polystyrène de 300 mm |
| 2 | Couche de ciment avec
isolation acoustique | de diamètre (Wolf) |
| 3 | Isolation horizontale | 6 Gravier 16/32 et gravier |
| 4 | Dalle de béton armé
(250 mm ø) | qui ne gèlent pas |
| 5 | Éléments thermiques en | 7 Gravier roulé au niveau
de l'embase |
| | | 8 STO Profil |

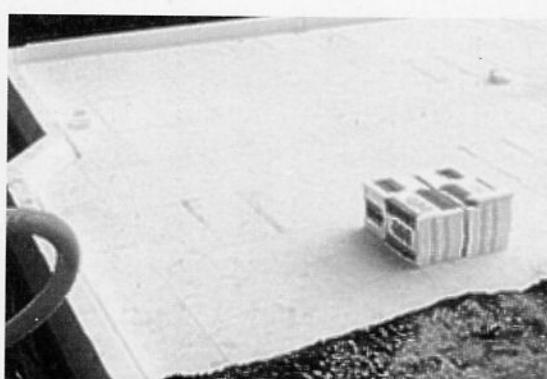


fig. 2-12 Éléments thermiques pour dalles (entreprise Wolf)

2.3.3 Isolation de la dalle de sol en béton armé monolithique

Une méthode innovante d'isolation est le bétonnage avec le béton isolant mentionné plus haut pour donner un plancher en béton monolithique. En effet, il en résulte un coût avantageux, car il n'y a plus besoin d'appliquer plusieurs couches de béton, telles que la couche de propreté, la pose de l'isolation résistante en plusieurs couches (méthode longue et onéreuse), ainsi que les coûts pour le découpage, la pose du dallage et de la chape (double couche).

Les planchers en dalles YTONG assurent une bonne répartition des charges du bâtiment sur le béton isolant. Il en résulte une construction sans pont thermique, le coefficient étant de 0,146. Cependant, on peut tout de même améliorer le résultat en appliquant une double couche dans la deuxième levée de bétonnage, mais normalement on n'a pas besoin de la haute capacité portante de la couche d'usure dans une maison individuelle. Le coefficient U pourrait alors aller jusqu'à 0,135. Les conduits sanitaires et les conduits de ventilation peuvent sans problème être installés sous la dalle grâce aux dalles faciles à poser.

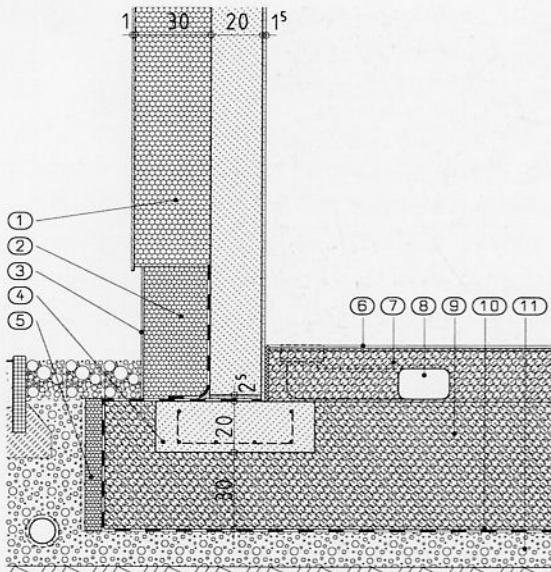


fig. 2-13 Isolation de la dalle de sol en béton armé monolithique

- | | |
|--|---|
| 1 béton cellulaire - élément de mur avec système composite d'isolation | 7 béton isolant thermozell 400 |
| 2 isolation de socles | 8 système de ventilation avec trappe de sol |
| 3 enduit de socle | 9 béton isolant thermozell 250 |
| 4 dalle de béton cellulaire pour la répartition des charges | 10 revêtement étanche |
| 5 plaques d'isolation et de drainage en toison | 11 lit de gravier pour incision dans la couche capillaire |
| 6 dallage avec du mortier liquide entoilé | |

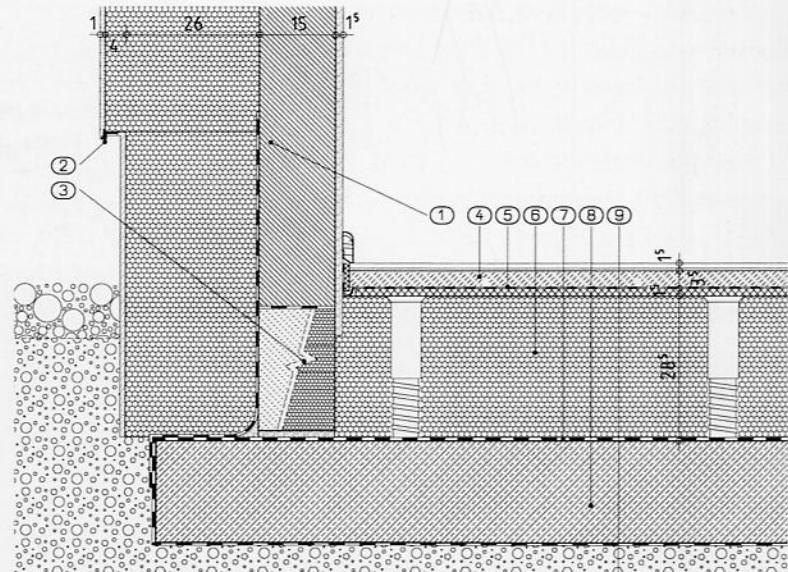


fig. 2-14 Faux plancher avec isolant en vrac

- | | |
|--|---|
| 1 mur extérieur au niveau du socle | 5 film pare-vapeur pour l'étanchéité |
| 2 Sto-Profil de goutte pendante | 6 isolant en vrac par exemple en laine de chanvre |
| 3 couche d'assise en béton cellulaire ou en purenit pour la réduction des ponts thermiques | 7 isolation horizontale |
| 4 système de faux plancher | 8 dalle en béton armé |
| | 9 lit en gravier jusqu'au niveau de gel |

Grâce à une fondation élevée comme dans le schéma ci-dessus, on peut renoncer à une semelle filante pour des raisons de protection antigel. Le béton isolant protège contre le gel, puisque il a été développé spécialement pour la construction de routes alpines et pour la construction de pistes d'atterrissement. La combinaison avec un plancher chauffant sur la couche supérieure est tout à fait possible, comme l'on peut le constater dans la représentation 2-15.

2.3.4 Vide ventilé avec isolation en verre expansé recyclé

Une variante supplémentaire de l'isolation de la cave est la construction d'un vide ventilé à l'aide de dalles de béton cellulaire (photos 2-16 et 2-17). L'avantage de son installation facile et rapide est la possibilité d'éventuelles installations ultérieures, car les dalles en béton armé peuvent être rouvertes, permettant ainsi une révision régulière des conduits, surtout des conduits de ventilation. L'isolant résistant à l'humidité doit être en vrac pour effectuer une installation rapide et le recouvrement facile du vide ventilé et des conduits. Pour cela le nouvel isolant en verre expansé SLS® 20, composé de matières premières naturelles est particulièrement approprié. Le mélange brut de verre, d'eau et du matériau de remplissage est transformé en granulés durs. Un simple processus de chauffage transforme ces granulés en différents produits en mousse. L'isolant en vrac est universel, minéral et microporeux.



fig. 2-15 Plancher chauffant par-dessus la couche de béton isolant

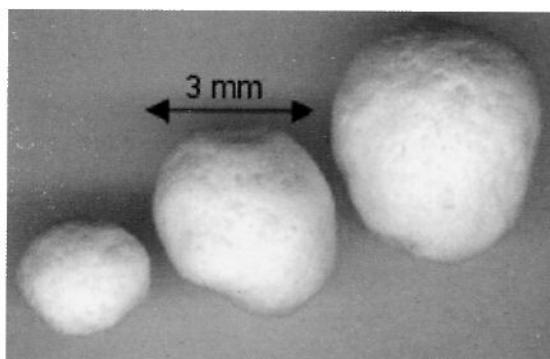


fig. 2-16 Photo microscope électronique, verre expansé

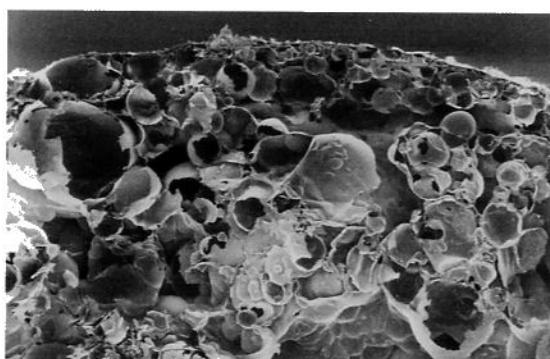


fig. 2-17 Photo microscope électronique, coupe SLS® 20

Caractéristiques techniques des matériaux de construction :

Densité apparente	15-25 kg/m ³
Coefficient U	0,040 W/mK
Classement au feu	A1
Résistance à la compression	0,02 [N/mm ²]
Diffusion de vapeur d'eau μ	1 à 5 μ
Besoin en énergie primaire	très faible
Propriétés	à injection ou en vrac
Dimensions des graines	1 à 6 mm
Durabilité	résistant à la décomposition

Domaines d'application :

- Vide ventilé
- Isolation extérieure et isolation dans le vide ventilé de la cloison
- Isolation du plafond, sans charge
- Construction légère en bois et aménagement des combles
- Faux planchers et vides ventilés
- Cage d'installation

L'isolant SLS® 20 est également utilisé comme isolant en vrac afin d'assurer une couche sans joints pour des double parois extérieures, les parois avec cavité et pour les toits inclinés. La propriété hydrofuge de SLS® 20 assure toujours une isolation impeccable même en cas de pluie battante.

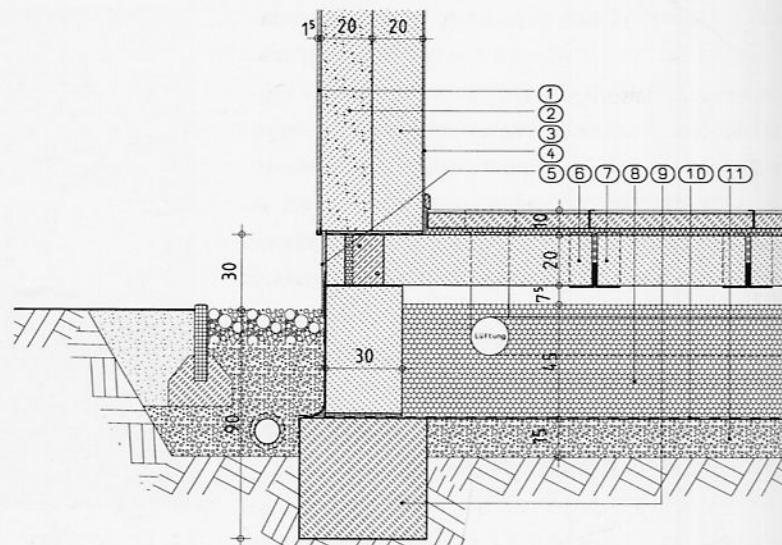


fig. 2-18 Vide ventilé avec isolation en verre

expansé recyclé en vrac

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1 béton cellulaire - enduit extérieur | 6 béton cellulaire - dalles de plafond |
| 2 béton cellulaire - béton isolant | 7 ouverture pour révision |
| 3 béton cellulaire - planches murales | 8 isolant en verre expansé recyclé en vrac |
| 4 béton cellulaire - sous enduit | 9 semelle filante |
| 5 enduit du socle | 10 film étanche |
| | 11 lit de gravier pour incision dans la couche capillaire |

2.4 Systèmes locaux de toiture préfabriqués

Le standard maison passive comprend diverses formes de toit, comme par exemple, le toit terrasse ou encore le toit à un versant. Outre la construction conventionnelle de toit, on utilise de plus en plus des systèmes de toit préfabriqués qui sont conçus avec une plus grande précision, car ils ne sont pas exposés aux intempéries d'un chantier. Voici les types et particularités dans la construction étanche de toits.

Dans la représentation 2-20, nous voyons une construction conventionnelle avec une isolation renforcée. L'isolation de 30 cm au niveau des murs passe sans l'interrompre jusqu'à 40 cm au niveau du toit. En règle générale, l'isolation est plus épaisse pour le toit que pour les murs et la cave, l'isolation du toit étant moins coûteuse que celle de la cave. La construction conventionnelle des chevrons pour toiture n'est pas possible dans une maison passive, car l'épaisseur des chevrons conventionnels ne dépasse pas 24 cm. Une possibilité serait la double construction transversale des poutrelles afin d'obtenir l'épaisseur requise pour l'isolation.

2.4.1 La toiture inclinée

La différence par rapport à la toiture inclinée est essentiellement la position de l'isolation. On différencie la charpente visible et invisible.

Dans les charpentes invisibles, l'isolation est appliquée entre les chevrons, ou plutôt ceux-ci traversent l'isolation représentant pour la maison passive un pont thermique important (le coefficient de transmission thermique du bois est 4 fois plus élevé). Le coefficient de transmission thermique est relatif à la surface.

Pour atteindre un coefficient U de la charpente plus performant, on utilise des doubles poutrelles en bois au lieu d'un chevron de section. Les doubles poutrelles en bois présentent une stabilité extraordinaire, ce qui permet de les éloigner davantage. Les écarts plus grands et les entretoises fines (sur le schéma ce sont

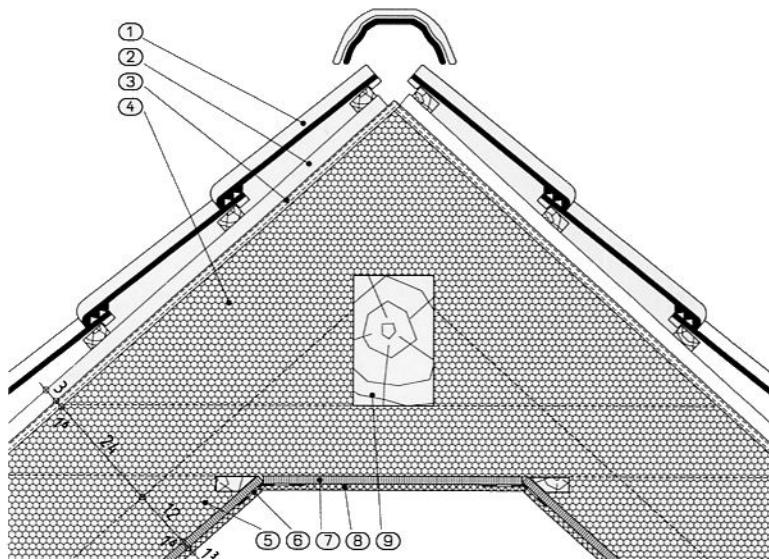


fig. 2-19 Coupe d'une toiture - Détail de faîtière

- | | |
|---|---|
| 1 Tuiles | 5 Double chevron comme isolation supplémentaire |
| 2 Contre lattis | 6 Isolation étanche |
| 3 Planche de fibre de bois (16 mm Ø) | 7 Plaque OSB (16 mm Ø) |
| 4 Isolant à injection ou panneaux de fibres minérales | 8 Placoplâtre |
| | 9 Panne faîtière |

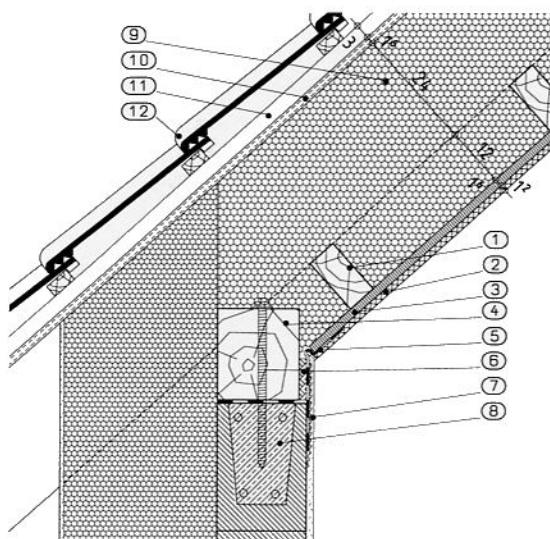


fig. 2-20 Coupe d'une toiture - sablière

- | | |
|--|---|
| 1 Bois d'équarrissage
8/10 cm | 8 Anneau en béton |
| 2 Placoplâtre | 9 Isolant à injection
(mélange de laine de
mouton et chanvre) |
| 3 Plaque OSB (16 mm Ø) | 10 Planche de fibre de bois
(16 mm Ø) |
| 4 Panne sablière | 11 Contre lattis |
| 5 Isolation étanche | 12 Tuiles |
| 6 Support d'enduit | |
| 7 Métal déployé et enduit
intérieur | |

des tiges fines en bois) minimisent fortement les ponts thermiques. Pour la construction de toit suivante, nous avons calculé un coefficient U de $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dans le détail de construction ci-dessus, la sous toiture assure l'étanchéité. Elle empêche les flux de ventilation parallèles à la couche isolante et par conséquent les déperditions de chaleur.

Un panneau dérivé du bois sert de couche étanche ainsi que de pare vapeur, ce qui empêche les flux thermiques entre l'intérieur et l'extérieur (perpendiculaire à la surface du toit).

Pour assurer l'étanchéité à l'air, les fentes doivent être bouchées de manière régulière et sans faille à l'aide de rubans adhésifs ou de colle d'étanchéité.

Une autre possibilité pour la construction de toit sans pont thermique est l'application de deux couches d'isolation séparées. Avec un coefficient U_m de $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, cette technique correspond de justesse au standard maison passive, en représentant des ponts thermiques dans les éléments de construction extérieurs ($\sim 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Quant aux isolants, les flocons de cellulose ainsi que l'injection de laine de mouton et du chanvre sont, en matière d'écologie et de construction, plus avantageux que la laine de roche, les panneaux étant plus chers et la préparation sur le chantier ne correspondant pas toujours à la qualité du standard maison passive.

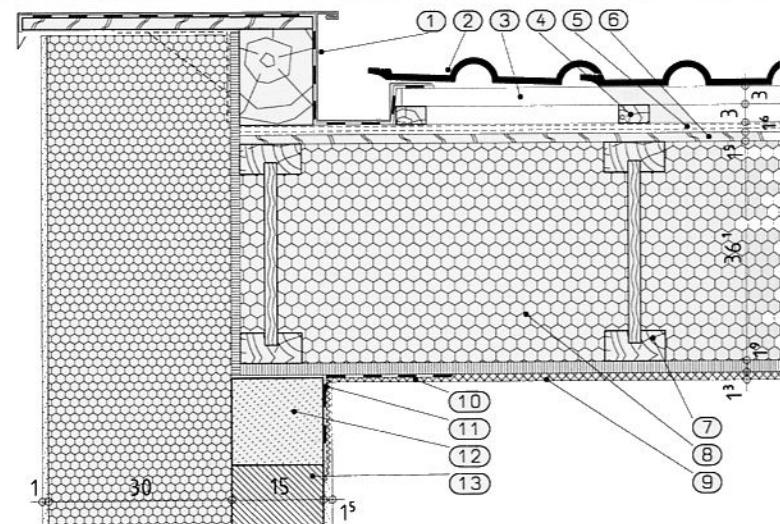


fig. 2-21 Coupe débord du toit

- | | |
|--|---|
| 1 Recouvrement en feuille de zinc (Attika) avec raccordement (sous toiture en bois assemblée avec des boulons en bois) | 8 Isolant à injection (mélange de laine de mouton et chanvre) |
| 2 Tuiles | 9 Plaque OSB (16 mm Ø) |
| 3 Lattage du toit | 10 Placoplâtre 12,5 mm Ø |
| 4 Contre lattis | 11 Isolation étanche dans les assemblages des angles avec métal déployé à enduire |
| 5 Planche de fibre de bois (16 mm Ø) | 12 Clé de voûte en béton cellulaire à ajuster ultérieurement |
| 6 Coffrage bois | |
| 7 Traverse de poutres | 13 Façade |

Systèmes de toiture préfabriqués: Deux principes d'assemblage de toiture sont de plus en plus inappropriés pour la maison passive. La technique artisanale traditionnelle est devenue beaucoup trop chère et ne garantit pas la sécurité requise. La fabrication industrielle de grands éléments de toiture se heurte aux limites de faisabilité dues au transport, au montage et à la manutention à cause de leur taille. Par ailleurs, il est quasiment impossible de préfabriquer de si grandes toitures sans pont thermique. La seule possibilité serait un système de toiture modulaire.

La construction consiste en 4 éléments de construction préfabriqués qui seront montés sur le chantier, le montage étant rapide et peu coûteux.

Dans ce type de construction, l'élément de construction porteur est la poutrelle du système de toiture avec séparation thermique. La poutrelle préfabriquée est prête à être montée sur le chantier, sa hauteur de construction allant jusqu'à 500 mm. Sa bonne installation est la condition préalable pour éviter les ponts thermiques dans les raccordements.

Le film pare-vapeur avec contre latte sur la poutrelle sert de mesure supplémentaire, relative aux exigences de recouvrement, formes de toiture et inclinaisons, du ZVDH (fédération des artisans couvreurs allemands-Cologne). Ceci est également valable pour les toitures terrasses et les toitures recouvertes de végétation.

La plaque de serrage spéciale avec une haute densité apparente constitue l'isolation de base de la construction et est très performante au niveau de la protection acoustique, la protection contre l'incendie et l'étanchéité à l'air.

La plaque compacte en dessous de la poutrelle présente une couche d'isolation supplémentaire et après enduction des joints sur la surface d'installation. Tous les travaux se font conformément aux règles techniques de la construction artisanale.

En effet, la toiture contient toutes les exigences requises. Les frais supplémentaires habituels pour la sous toiture et les zones techniques, les films pare-vapeur et les joints pour les raccordements sont inutiles dans ce système, ce qui constitue un avantage économique très important.

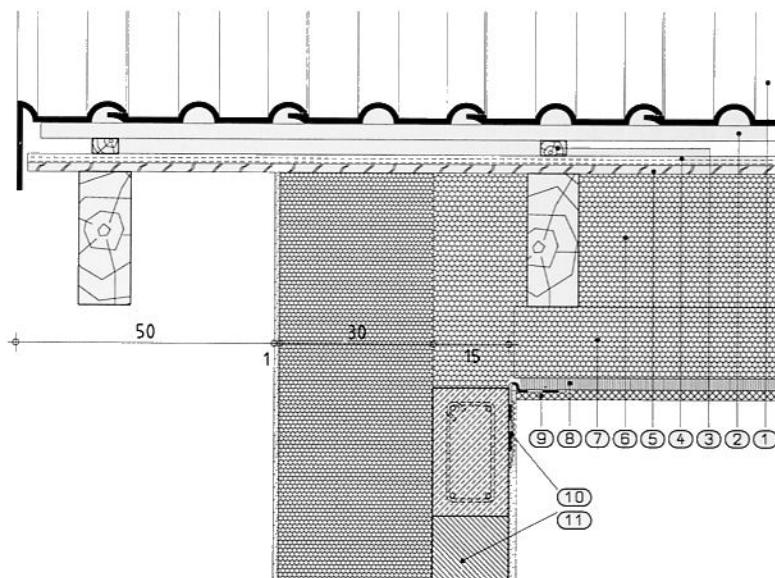


fig. 2-22 Réduction des ponts thermiques à l'aide de couches d'isolation séparées

- | | |
|---|---|
| 1 Tuiles | 7 Double chevron |
| 2 Lattage du toit | 8 Plaque OSB (16 mm ø) |
| 3 Contre lattes | 9 Placoplâtre 12,5 mm ø |
| 4 Planche de fibre de bois (16 mm ø) | 10 Isolation étanche dans les assemblages des angles avec métal déployé à enduire |
| 5 Coffrage en bois | |
| 6 Isolant à injection ou panneaux de fibres minérales | 11 Façade |

Grâce à la conception minutieuse et optimale de la construction, le fabricant donne une garantie quant au bon fonctionnement du système et à ses qualités. Cela diminue d'autant plus le risque pour l'architecte, la direction des travaux et l'artisan.

Le système permet toutes les conceptions architecturales et tous les objectifs constructifs. Les débords de toit minces sans pont thermique ainsi que les pannes invisibles constituent un avantage énorme. L'installation de lucarnes est tout à fait possible.

Pour plus d'informations : www.hallerdach.de

2.4.2 La toiture terrasse

Malgré une isolation moins efficace, les toitures terrasses ont fait leurs preuves. L'isolation thermique et la construction de ces toitures se font sans problème. Cependant, ce type de construction n'est pas assez volumineuse pour retenir toute la chaleur, la construction massive étant plus efficace que la construction en bois quant à l'étanchéité à l'air. Elle est aussi plus coûteuse.

De plus, le risque d'humidité dans la construction de toitures terrasses est plus élevé car l'eau pénètre facilement quand il y a des fentes dans le joint d'étanchéité. Il est également déconseillé de recourir à une toiture inversée, car dans ce système, le joint d'étanchéité est appliqué sous la couche isolante. L'avantage est la protection thermique du joint d'étanchéité par l'isolation ; cependant, l'humidité rentre plus facilement dans ou bien sous l'isolant. La pluie qui pénètre dans l'isolation réduit le coefficient U de 10 à 20 % par rapport à d'autres systèmes de toiture. Par conséquent, des constructions coûteuses empêchent les isolants épais conformes au standard maison passive, d'absorber l'eau et entraînent la perte de leur faculté d'isolation.

De nombreux maîtres d'ouvrage de maisons écologiques et passives mettent de la végétation sur le toit, pour l'esthétique mais aussi pour profiter de leur faculté de refroidissement. Il y a ainsi moins de tensions entre les différents matériaux et par conséquent moins de risques de fissures.

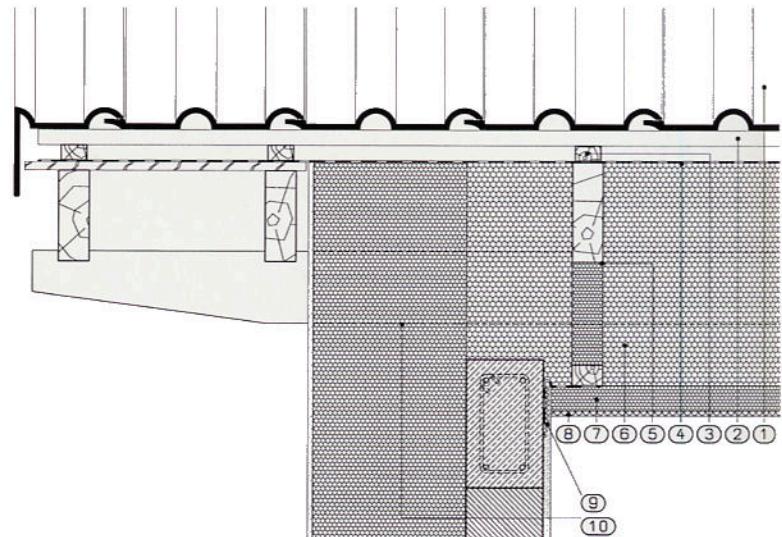


fig. 2-23 Poutrelle (Haller)- débord du toit

- | | |
|--|---|
| 1 Tuiles | 6 Isolant à injection ou plaque de serrage |
| 2 Lattage du toit | 7 Panneau isolant |
| 3 Contre liteaux | 8 Plaque de plâtre |
| 4 Joint d'étanchéité ouvert à la diffusion | 9 Joint d'étanchéité avec métal déployé à enduire |
| 5 Poutrelle (Haller Wärmeschutz GmbH) | 10 Toit de pignon |



fig. 2-24 Toiture (Hallerdach® Passiv)

2.4.3 Le toit photovoltaïque

Les modules photovoltaïques générateurs d'électricité du système de toiture SolarWorld remplacent complètement ou en partie la toiture conventionnelle. Le montage des modules standards de grande taille et sans cadre est facilité par les raccords d'étanchéité préfabriqués comme ceux des fenêtres de toit.

Sur la photo ci-contre, on voit une maison à énergie positive avec des panneaux photovoltaïques sur le côté sud et nord du toit. En effet, le standard maison passive permet aussi l'approvisionnement total en énergie électrique grâce à des panneaux photovoltaïques.

La charpente du toit consiste en un système d'intégration pour les capteurs solaires de toiture épais de 3,5 à 7 mm. Ce système permet un remplacement peu coûteux de la couverture conventionnelle d'une charpente par une installation photovoltaïque à partir d'une inclinaison du toit de 15°.

Pour plus de détails de construction et de l'intégration d'éléments photovoltaïques :
www.SolarWorld.de



fig. 2-25 Toiture solaire



fig. 2-26 Panneaux solaires monocristallins - côté nord du toit

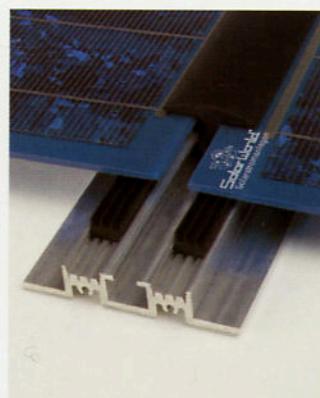


fig. 2-27 Profilés d'assemblage du module photovoltaïque

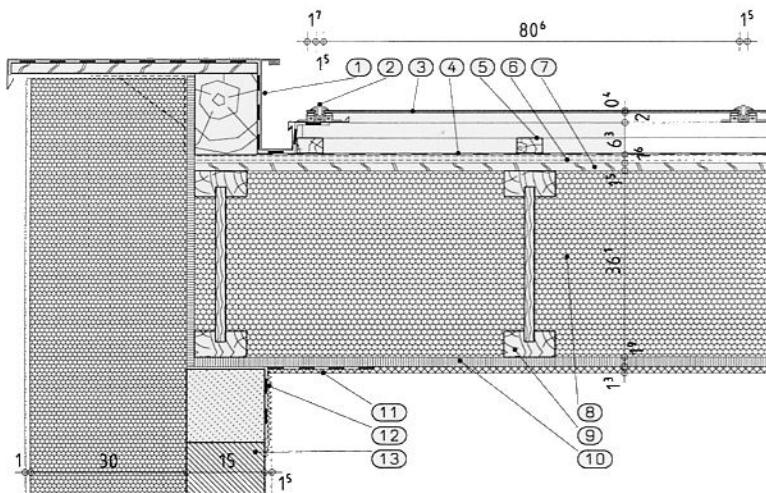


fig. 2-28 Débord de toit d'un toit solaire - coupe de l'acrotère

- 1 Couverture d'acrotère en zinc avec raccordement
 - 2 Rail en aluminium avec joint en caoutchouc
 - 3 Modules solaires 806 / 1579 mm
 - 4 Sous toiture étanche ouverte à la diffusion
 - 5 Liteaux et contre liteaux
 - 6 Planche de fibre de bois (16 mm ø)
 - 7 Coffrage en bois
 - 8 Isolant à injection
 - 9 Traverse de jonction TJI (361 mm)
 - 10 Plaque OSB (19 mm ø)
 - 11 Plaque de plâtre 12,5 mm ø
 - 12 Joint d'étanchéité et assemblages des angles
 - 13 Toit de pignon

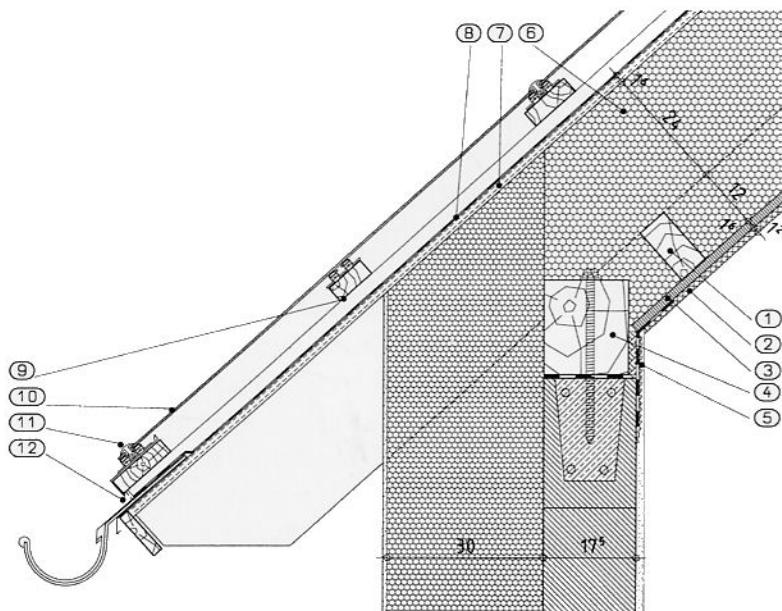


fig. 2-29 Gouttière d'un toit solaire

- 1 Double chevron avec isolation supplémentaire
 - 2 Plaque en plâtre 12,5 mm ø
 - 3 Plaque OSB (16 mm ø)
 - 4 Sablière
 - 5 Joint d'étanchéité
 - 6 Isolant à injection ou panneaux en fibres minérales
 - 7 Planche de fibre de bois (16 mm ø)
 - 8 Rail
 - 9 Liteaux et contre liteaux
 - 10 Modules solaires 806/1579 mm
 - 11 Rail en aluminium avec joint en caoutchouc
 - 12 Gouttière et profilé de ventilation en zinc

2.4.4 Isolations thermiques alternatives pour toiture, paroi, plafond et sol

L'isolation plus épaisse requise par le standard maison passive, surtout au niveau de la toiture (jusqu'à 40 cm) doit remplir de nombreuses conditions. La qualité des matériaux, leur bonne installation et le standard écologique sont particulièrement importants.

L'isolation de l'enveloppe d'une maison passive est épaisse de 25 à 40 cm. Cela varie entre le toit et la cave, l'isolation de la cave étant beaucoup plus chère. Parfois on applique plusieurs couches de panneaux isolants, le résultat étant souvent négatif quant à la qualité de l'installation car la pose de plusieurs couches de panneaux isolants est difficile sans fente dans le chevron. D'autre part, une fente de 3 mm à peine, provoque une circulation d'air qui transporte chaleur mais aussi humidité. Grâce à une injection à haute pression d'air, l'isolant est appliqué sans fente.

Avec les avantages suivants :

- Application plus facile que la pose de panneaux isolants
- Permet d'éviter les ponts thermiques
- Liberté dans le choix de l'épaisseur de l'isolation
- Bonne isolation dans les endroits difficilement accessibles.

Cependant, il faut toujours veiller à garder une sécurité maximale, le poids de la couche supplémentaire étant plus élevé. Pour réduire le tassement de la cellulose (le vieux papier recyclé) sur une épaisseur d'isolation de 30 cm, la densité doit être doublée. Par conséquent, à cause de la plus haute densité, la propriété d'isolation est inférieure, et donne des valeurs moins performantes dans le bilan énergétique.

Isolation par injection en laine de chanvre : En matière d'isolation, la fibre de laine est très appropriée. Après des milliers d'années d'utilisation, on tend vers la perfection dans la qualité et la fonctionnalité de la laine. La laine est la seule fibre textile qui a la propriété de protéger les Hommes contre les influences ambiantes, telles que le froid, la chaleur, l'humidité et le vent. Ces exigences sont congruentes avec les exigences que l'on a pour l'isolation de nos maisons, que ce soit les cavernes durant l'âge de pierre ou les maisons passives aujourd'hui.

L'entreprise SHWL GmbH ökologische Dämmstoffe (isolations écologiques) propose le nouveau produit ECOLAN, l'isolant écologique à base fibres de laine de mouton et de chanvre, applicable à l'aide d'une technique connue dans la pose de l'isolant en cellulose de papier, l'injection. En effet, l'isolant est injecté à haute pression d'air dans le vide et compacté. Le même isolant existe en vrac. La forme crépue et souple de la fibre de laine est très avantageuse pour la stabilité, ce qui est indispensable pour la pose. La laine naturelle est idéale pour empêcher les ponts thermiques dus à la construction ou aux installations de matériels dans une maison.

Caractéristiques techniques des matériaux de construction :

Composition	50 % de laine de mouton, 50% de chanvre
Densité apparente	35-45 kg/m ³
Coefficient U	0,040 W/mK
Classement au feu	B2
Capacité thermique	env : 0,60 Wh/kgK
Résistance à la compression	0,02 [N/mm ²]
Diffusion de vapeur d'eau μ	1 à 2 μ
Besoin en énergie primaire	très faible
Propriétés	à injection ou en vrac

L'isolation par injection en laine de chanvre présente les avantages suivants :

- des propriétés d'isolation excellentes et un poids faible
- une pose stable grâce à la forme naturellement stable des fibres
- un climat ambiant sain grâce à la bonne faculté d'absorption et de transmission thermique (jusqu'à 40 %)
- l'absorption active par les fibres de laine des toxiques (par exemple formaldéhyde) de l'air ambiant

Domaines d'application :

- Isolation extérieure et dans les vides des cloisons
- Isolation extrêmement épaisse dans la maison passive ou la maison à énergie nulle
- Isolation de toiture, particulièrement du chevron
- Isolation du plafond non chargé
- Construction légère en bois et aménagement des combles
- Faux planchers et vides ventilés

L'isolation en laine de mouton et chanvre est particulièrement économique pour les isolations épaisse conformes au standard maison passive. Elle assure une pose stable et une transmission thermique très performantes, tout en étant peu coûteuse. L'isolation en vrac peut être appliquée par le maître d'ouvrage lui-même.

L'isolation en laine de mouton et au chanvre est seulement 10 à 30 % plus chère qu'un isolant aux fibres synthétiques.

Pour plus d'informations :

www.eco-logis.com



fig. 2-30 Injection de l'isolant de laine de chanvre dans le solivage de comble



fig. 2-31 Photo de l'isolation du chevron

2.5 Isolation thermique des fenêtres

La fenêtre constitue pour l'habitant le moyen d'entrer en contact avec l'environnement et pour l'architecte un élément de décoration essentiel. Le rayonnement solaire améliore le bien-être, car il a une influence importante sur le psychisme d'une personne. D'autre part, les grandes fenêtres sont très demandées car une pièce illuminée paraît beaucoup plus spacieuse.

Un autre aspect de plus en plus pris en compte est l'aspect écologique. La fenêtre est toujours un élément de construction qui constitue un point faible dans l'enveloppe du bâtiment. Depuis des décennies, elle est la source première de pertes de chaleur, car elle présente une conductivité thermique extrêmement élevée, tout autant qu'un élément de mur extérieur de la même taille. Cependant, la fenêtre transparente assure un rayonnement solaire, non seulement bénéfique pour sa lumière mais également pour ces apports énergétiques gratuits. On parle alors d'énergie solaire passive.

La fenêtre a un rôle très important dans une maison passive, même si elle constitue le maillon faible dans l'enveloppe de la construction. Les éléments de construction extérieurs sont en continulement développés, cependant on a négligé longtemps la fenêtre, en remplaçant uniquement la vitre par un vitrage isolant. Le développement du verre flotté au gaz inerte a contribué à réduire considérablement les déperditions thermiques, pour s'approcher des autres éléments de construction quant à l'étanchéité à l'air.

La fenêtre Ewitherm® est certifiée maison passive et se base sur la construction d'un châssis classique en bois. Son caractère innovant réside dans la combinaison bien étudiée des matériaux utilisés. Le bois et le liège sont assemblés dans une structure sandwich. Grâce à cette nouvelle technologie brevetée, on atteint un coefficient U_w inférieur à 0,8, plus précisément 0,73 W/m².

Pour plus d'informations :
www.hotz-schiller.de
www.schuco.fr

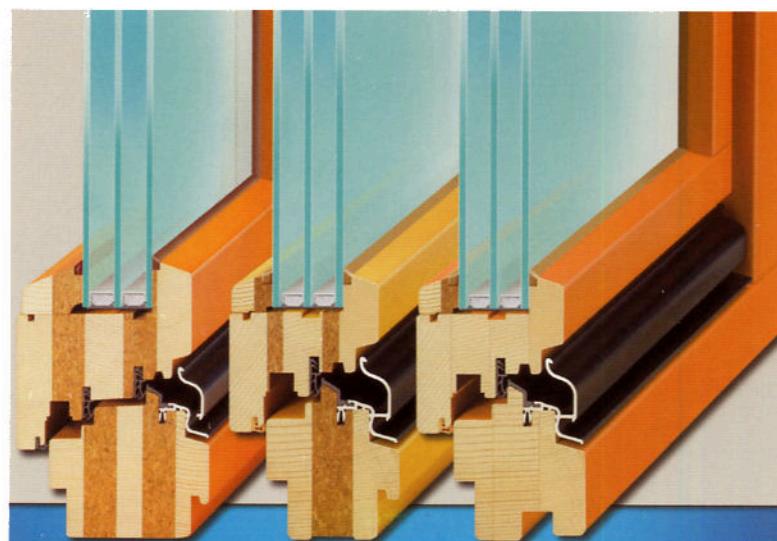


fig. 2-32 *ewitherm® - profil du battant et du cadre d'une fenêtre pour maison à basse consommation énergétique de l'entreprise Winter Holzbau GmbH*

2.5.1 Le critère « bien-être » des grandes façades vitrées

Une ancienne règle de construction dit : « le radiateur doit être installé en bas de la fenêtre pour assurer le confort de vie ! ». Le corps humain perd de la chaleur par convection, c'est-à-dire par le rayonnement des surfaces froides et par l'évaporation d'eau. Dans les constructions anciennes, on se rend compte des flux d'air frais ; les murs extérieurs étant mal isolés, la température est froide et désagréable dès qu'on s'en approche. L'air froid est plus lourd que l'air chaud, il longe la vitre jusqu'au niveau du sol, occasionnant le fameux « lac d'air froid ». Ce phénomène arrive surtout si l'on utilise des vitres conventionnelles qui créent toujours des températures désagréables au niveau des pieds. Comme l'on peut renoncer à un système de chauffage conventionnel dans une maison passive, avec un besoin de chauffage inférieur à 10 W/m² de surface, une bonne performance thermique des fenêtres est indispensable pour éviter ce genre d'effet négatif.

Dans un immeuble avec des radiateurs, le coefficient Uw des fenêtres ne doit pas dépasser 2,0 W/m²K. Maintenant on arrive à obtenir des valeurs finales de 1,3 à 1,4 W/m²K, le coefficient Ug du vitrage étant de 1,1 W/m²K et avec un châssis conventionnel. Les fenêtres doivent en plus présenter un coefficient de transmission thermique efficace, c'est-à-dire, inférieur à 0,8 W/m²K ce qui assure une température agréable et ainsi un bien-être.

coefficient Uw des fenêtres $\leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

équation 2-1 valeur limite du coefficient U effectif

Sans pelliculage des vitres, la chaleur se perd essentiellement par rayonnement thermique, le verre flotté sans pelliculage ayant une haute performance d'émission thermique de 0,84 ($5 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 50 \mu\text{m}$). La transmission de la chaleur peut être réduite par le pelliculage du verre flotté ; plus la capacité d'émission thermique du pelliculage est petite, plus le rayonnement thermique est petit et par conséquent le coefficient de transmission de chaleur Ug (de 0,04 à 0,10). augmente.

La transmission thermique par convection dépend de la distance des vitres et du gaz inerte contenu.

2.5.2 Le facteur solaire du vitrage

La taille des fenêtres des maisons passives est de 1,23 x 1,48 m, leur coefficient Uw ne doit pas dépasser 0,8 W/m²K et le coefficient de déperdition volumique Ug doit être inférieur à 48 %.

Pour calculer le coefficient de transmission thermique réel, il faut toujours considérer la fenêtre dans son ensemble :

$$U_w = A_g U_g + A_f U_f + s_g \Psi_{1+2} + s_{montage} \Psi_{montage} / A_w$$

équation 2-2 Coefficient de transmission thermique des fenêtres

U_w Coefficient de transmission thermique des fenêtres (w=window)

A_g Surface du vitrage (g=glazing)

U_g Coefficient de transmission thermique des vitres

A_f Surface du châssis de fenêtre (f=frame)

U_f Coefficient de transmission thermique du châssis

s_g Périmètre du bord de vitre

Ψ_{1+2} Coefficient de déperdition thermique (psi)

$s_{montage}$ Périmètre de la fenêtre

$\Psi_{montage}$ Coefficient de déperdition thermique (psi) (dépend du montage)

Le principe essentiel de la construction passive est l'apport solaire et thermique passif. En effet, les apports thermiques doivent être plus importants que les déperditions thermiques par transmission :

Coefficient $U_g - 1,6 \text{ W/m}^2\text{K} g < 0$

équation 2-3 Valeur énergétique limite d'une fenêtre passive

Si l'on veut respecter le critère de bien-être de 0,8 W/m²K, la capacité thermique doit être inférieure à 48 %. Par conséquent, les fabricants de fenêtres ont développé des vitres avec un coefficient Ug de 0,7 W/m²K (selon l'office fédéral) et un coefficient de déperdition thermique entre 0,53 et 0,62.

En conclusion, le coefficient U effectif des fenêtres ne doit pas dépasser les $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ conformes à la formule ci-dessus !

2.5.3 Le vitrage de la maison passive

L'énergie solaire est une forme d'exploitation d'énergie. Par conséquent, les façades transparentes, telles que les fenêtres doivent être conformes au standard maison passive. Elles doivent remplir deux fonctions fondamentalement différentes :

- une faible conductivité thermique pour réduire les déperditions de chaleur par transmission,
- une forte transmission d'énergie pour obtenir des apports solaires.

Grâce au triple vitrage thermique, le coefficient de transmission thermique U_g atteint 0,6 et va jusqu'à $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$, qui correspondait encore il n'y a pas longtemps au standard d'un mur extérieur !

Malgré la forte résistance thermique, le vitrage doit pouvoir absorber de l'énergie solaire et chauffer la pièce. Cependant, en réduisant le coefficient U de la fenêtre, la transmission d'énergie réduit également. Lorsque le vitrage isolant simple est d'un coefficient d'env. $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, la translucidité est de 90% et la transmission d'énergie de 80 %.

Aujourd'hui, les fenêtres au standard maison passive sont dotées d'une pellicule spéciale et un triple vitrage. Malgré le faible coefficient U de $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, les apports énergétiques sont de 60 % voire plus, la translucidité étant de 70 %.

En effet, il existe deux possibilités pour optimiser le vitrage :

Soit on réduit le coefficient U et ainsi les déperditions thermiques, soit on augmente les déperditions thermiques en gardant le même coefficient U. Les charges thermostatiques contenues dans le vitrage ont une très forte influence sur sa qualité (gaz inertes : argon, krypton, xénon), le degré de remplissage de gaz, le coefficient d'émission du pelliculage et l'espacement des vitres. Cependant, l'épaisseur n'a aucune influence sur la qualité du vitrage.

Le remplissage de xénon et l'espacement de 8 mm entre les vitres du triple vitrage présentent la perte de

chaleur la plus faible. La disponibilité du gaz est fortement limitée. L'application du gaz argon est plus facile et plus économique, occupant 0,93 Vol-% de l'air ambiant, alors que le xénon et le krypton occupent env. 0,0001 Vol-%.

Pour compenser la mauvaise performance thermique de l'argon, l'espacement de 12 mm des vitres contenant du krypton et du xénon devient 16 mm pour le vitrage qui contient de l'argon.

Outre l'application du gaz, le coefficient de transmission du pelliculage joue un rôle très important. Quant au pelliculage, il y a deux procédures différentes au choix : la pyrolyse (Hardcoating) ou alors le magnétron (Softcoating). En ce qui concerne la pyrolyse, il s'agit d'une couche pyrolyse extrêmement rigide avec un haut coefficient de déperdition thermique, ayant un effet négatif sur le vitrage. La procédure du magnétron décrit la séparation sous vide des couches métalliques.

Les armatures métalliques galvanisées permettent d'une part une grande transmission de la lumière solaire, d'autre part, la surface vitrée dispose d'un coefficient d'émission plus faible. Le coefficient d'émission ϵ décrit la relation entre la quantité énergétique émise par un corps humain et la transmission de chaleur d'un corps noir sous les mêmes conditions de température.

Pour assurer une forte translucidité en même temps qu'une bonne isolation thermique, il est raisonnable d'installer une vitre contenant de l'argon dans l'espacement de 16 mm et un magnétron, pour obtenir ainsi un coefficient U de $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Si l'on veut obtenir une translucidité encore plus forte, cela est possible en appliquant un pelliculage spécial encore plus efficace et du verre blanc. La transmission peut alors augmenter de 6 % et le coefficient g d'env. 7 %. En l'Europe centrale en hiver, ces fenêtres présentent plus d'apports d'énergie solaire que de pertes de chaleur. Même si la température extérieure est de -10°C , la surface vitrée intérieure est inférieure de seulement 1 kelvin à la température ambiante, ne pouvant pas créer la sensation d'un courant d'air. On n'a pas enregistré de baisse du coefficient U_g du vitrage.

tab. 2-1 Aperçu des coefficients U de vitrages

	remplissage de gaz	espacement entre les vitres	coefficient d'émission ϵ	valeurs calculées Ug	g	Ug -1,6g(W/m ² K)
2-double vitrage isolant						
	Air	12 mm	0,84	3,0	0,77	1,8
	Argon	16 mm	0,1	1,4	0,60	0,44
	Argon	16 mm	0,05	1,2	0,58	0,27
	Krypton	10 mm	0,05	1,1	0,58	0,17
3-triple vitrage isolant						
	Krypton	2 × 8 mm	2 × 0,05	0,8	0,42	0,13
	Krypton	2 × 12 mm	2 × 0,05	0,6	0,42	-0,07
	Argon	2 × 16 mm	2 × 0,1	0,7	0,45	-0,02
	Xénon	2 × 8 mm	2 × 0,05	0,5	0,42	-0,17

2.5.4 Les intercalaires

Pour que les vitres soient stables et séparées uniformément pendant le remplissage, les profilés intercalaires sont indispensables. Les profilés intercalaires des fenêtres traditionnelles sont en aluminium, une matière inappropriée pour la fenêtre au standard maison passive à cause des ponts thermiques. Pour correspondre au standard maison passive, on applique une isolation plus performante, mais on doit également réduire les ponts thermiques. Il existe différentes possibilités pour assurer une bonne isolation des profilés.

Autrefois dans la construction de fenêtre, la feuillure était épaisse de 40 mm. Cela avait pour conséquence une diminution de la taille de la vitre visible. Aujourd'hui l'épaisseur commune de la feuillure est de 30 mm dans une maison passive.

Le polycarbonate modifié avec un coefficient de transmission thermique 1 052 fois plus faible que l'aluminium assure une séparation thermique des bords de vitre. Seul l'acier inoxydable a une performance thermique meilleure et garantit une construction stable.

Feuillure et profilés intercalaires

Pour maintenir un confort thermique, il est indispensable que la prise en feuillure soit supérieure à 24 mm, elle est généralement de 30 mm. Une prise de feuillure plus grande nécessiterait un châssis plus grand, diminuant les apports énergétiques. L'idéal serait une épaisseur de 40 à 50 mm, cependant, 30 mm est un bon compromis pour unir l'aspect optique, la statique et le financement de la fenêtre.

La feuillure et la bonne qualité du vitrage sont très importantes, les déperditions thermiques d'un vitrage conventionnel étant démesurées.

Les profilés intercalaires d'une fenêtre conventionnelle constituent également un pont thermique contrairement à la fenêtre au standard maison passive. Pour être certifié standard maison passive avec $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$, la feuillure doit être en matière plastique. Les matériaux métalliques sont inappropriés.

Les intercalaires garantissent également une diffusion de vapeur d'eau et l'étanchéité de la vitre.

Pour plus d'informations : www.Thermix.de.

2.5.5 Le châssis de fenêtre conforme au standard maison passive

Le coefficient de transmission thermique (U_f) des châssis de fenêtre traditionnels est entre 1,5 et 2 W/m²K. Les châssis de fenêtre au standard maison passive, par ailleurs, exigent un coefficient U_f inférieur à 0,8 W/m²K. Pour atteindre une telle performance thermique, il faudrait augmenter la profondeur du châssis et installer des cales spécialement isolantes dans les profils en PVC. En outre, on augmente la feuillure pour réduire les ponts thermiques. Pour assurer une construction de fenêtre sans pont thermique, on peut exploiter les meilleures performances de ces fenêtres extrêmement performantes en les installant directement dans la couche isolante.

2.5.6 Systèmes de fenêtres

Les fenêtres en bois d'une maison passive de la nouvelle génération sont construites en 5 couches. C'est le cas de la fenêtre Thermostar 0.8 de la menuiserie Brennecke (Allemagne). La fenêtre atteint un coefficient U de 0,8 W/m²K, le coefficient U_g du vitrage étant de 0,7 W/mK, de l'intercalaire avec des faibles ponts thermiques de 0,021 W/mK et du châssis de fenêtre de 0,82 W/m²K.

Quant au profil, 3 couches d'isolation assurent une étanchéité absolue des fenêtres. Même au niveau des raccords, l'isolation est sans interruption. La couche centrale est en polyuréthane, un matériau d'isolation de très haute qualité et résistant. L'autre couche du châssis est en purenit. Le châssis en polyuréthane et

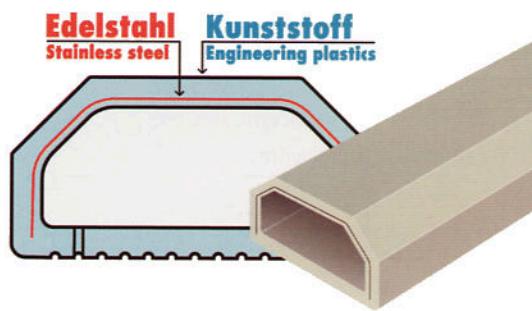


fig. 2-33 Système d'intercalaires thermix



fig. 2-34 Encastrement d'une fenêtre - joint d'un châssis de fenêtre

bois recyclé présente de meilleures propriétés d'isolation que le bois massif, mais aussi une bonne solidité statique grâce à sa forte densité apparente. La couche superficielle intérieure et extérieure est en bois massif constituant le charme de la fenêtre. En effet, châssis et ouvrants se vendent en sapin rouge, mélèze, meranti et chêne. Il y a également possibilité de combiner les différentes sortes de bois.

Grâce à la thermographie de la figure 2-37 l'efficacité des fenêtres au plus haut standard est visiblement prouvée :

Le flux thermique au milieu est presque rectiligne, ce qui nous indique que le montage de la vitre dans le châssis est complètement étanche. La température de surface intérieure et extérieure est de 18°C. On constate un léger déplacement des isothermes à cause du rail anti-pluie, compensé par les ouvrants épaisse de 110 mm.

Pour plus d'informations :

www.Tischlerei-Brennecke.de

2.5.7 Fenêtres en PVC recyclé

Les fenêtres "Rehau Clima-Design" pour maison passive certifiées par le Passivhaus-Institut à Darmstadt présentent un coefficient U_f de 0,71 W/m²K avec une profondeur de construction du châssis de 120 mm. Le coefficient de déperdition thermique sur la bordure de vitre est de 0,035 W/mK (intercalaires Swissspacer). Par conséquent, une fenêtre standard d'une taille de 1,23 x 1,48 m avec un coefficient U_g de 0,7 W/m²K pour les vitres, atteint un coefficient de transmission thermique U_w de 0,79 W/m²K.

Le système de fenêtre comporte trois couches d'isolation. Un profil spécial pour l'appui de fenêtre assure le drainage invisible vers le bas de la fenêtre. Les cales isolantes du châssis dormant, des ouvrants et de l'appui de fenêtre sont posées en usine.

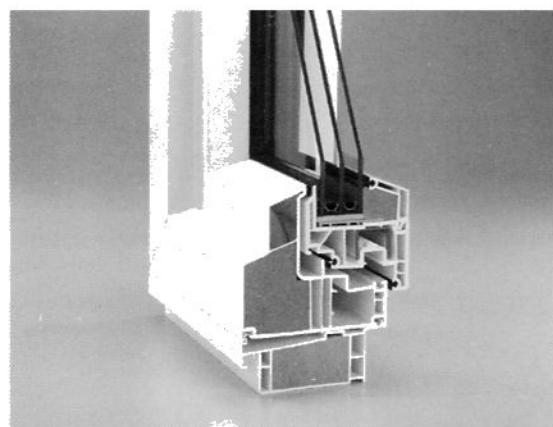


fig. 2-34 Fenêtres en PVC de l'entreprise Rehau Clima-Design

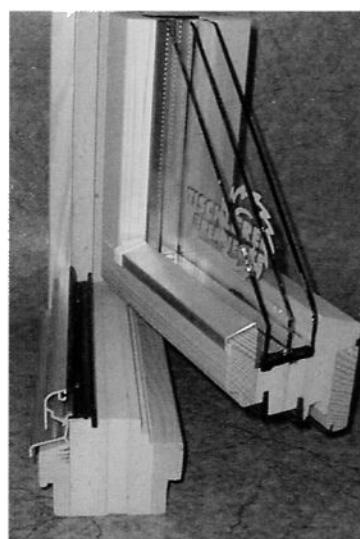


fig. 2-35 Fenêtres en bois « Thermostar 0.8 »

Les profils sont en pvc rigide extrêmement résistant et facile à nettoyer. Nous attachons une grande importance au traitement des déchets, la fenêtre de Rehau étant recyclable et le matériau exempt d'impuretés. L'esthétique ressemble à une fenêtre traditionnelle décalée avec une largeur de face de 112 mm. L'ouvrant est caché dans le châssis dormant, l'aspect extérieur étant le même, que la fenêtre soit ouverte ou fermée. L'exigence d'une petite largeur de face est assurée par le châssis dormant avec une largeur de face de 70 mm.

Outre son système de fenêtre, Rehau propose un système de portes spécialement adapté à une maison passive. En effet, le Passivhaus-Institut à Darmstadt a certifié que le système correspond aux exigences thermiques des portes d'une maison passive ($U_d < 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$). Les remplissages sont appliqués au-dessus des ouvrants et assurent une esthétique harmonieuse et sans interruption. Il existe différents contours, applications en acier avec 150 couleurs RAL au choix. Grâce aux jonctions transversales et à la grande armature, la fenêtre est extrêmement résistante. En cas de besoin, il est possible d'équiper la fenêtre d'une protection acoustique et contre le cambriolage.

Pour plus d'information : www.REHAU.de

2.5.8 Façades poteaux - traverses isolées

Vakupaneel® est un système d'isolation innovant et polyvalent avec une conductivité thermique de $0,004 \text{ W/mK}$ qui révolutionne les systèmes d'isolation pour façades, fenêtres et portes. Le bon effet des isolants conventionnels (fibres de verre, mousse et laine de roche) se base essentiellement sur les vides macroscopiques et microscopiques remplis d'air et de gaz propulseur. Les propriétés d'isolation des matériaux



fig. 2-36 Élément de châssis en bois « Thermostar 0.8 »

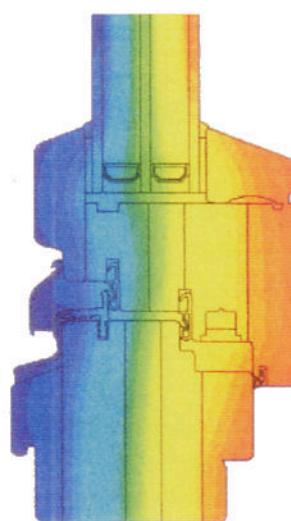


fig. 2-37 Thermographie d'une fenêtre en bois « Thermostar 0.8 »

isolants sont très différentes au moment de leur évacuation. Pour exclure les apports de gaz du bilan énergétique, la pression du gaz doit être réduite de 50 mbar. Grâce à ce procédé de fabrication innovant, le coefficient U du système d'isolation s'élève jusqu'à 0,23 W/m²K.

Jusqu'à présent, on a utilisé en grande partie la laine de roche dans la construction de façades. Le système d'isolation garantit une performance 8 à 10 fois plus forte. L'isolation d'une épaisseur de 26 mm est plus performante qu'une isolation conventionnelle de 140 mm. Le système est couvert par une couche de verre, de métal ou par des panneaux photovoltaïques.

Si l'on utilise une chaudière pour le chauffage et le refroidissement, le système poteaux - traverses peut être intégré dans l'allège, permettant ainsi une vue intérieure pleine. Le système d'isolation "Klimapaneel®" de l'entreprise Boetker sert de chauffage d'appoint, l'épaisseur étant inférieure à 20 cm.

Pour plus d'informations :

www.boetker.de

www.vakupaneel.ch



fig. 2-39 Façades poteaux-traverses isolées

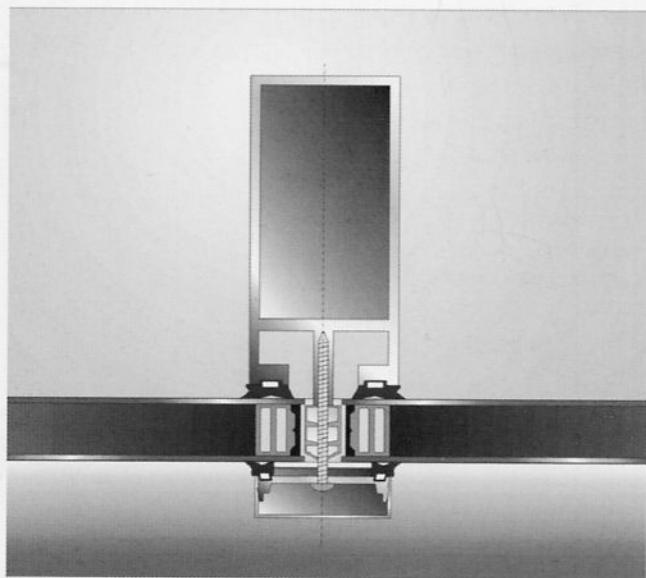


fig. 2-40 Coupe d'un système d'isolation pour façades

fig. 2-41 Plan d'un système d'idolation pour façades avec radiateur intégré

- 1 Élément de balustrade pour façades poteaux-traversales avec dispositif de chauffage et de refroidissement
- 2 Conduits (aller/retour/ventilation)
- 3 Système d'isolation Boetker (0,004 W/mk) (super-isolation dans film composite étanche au gaz avec revêtement variable, p.ex. verre, métal, céramique etc.)
- 4 Profilé de fixation pour élément de balustrade
- 5 Poteaux de façade (par exemple Schüco SK 60)
- 6 Joint élastique du plancher de l'étage

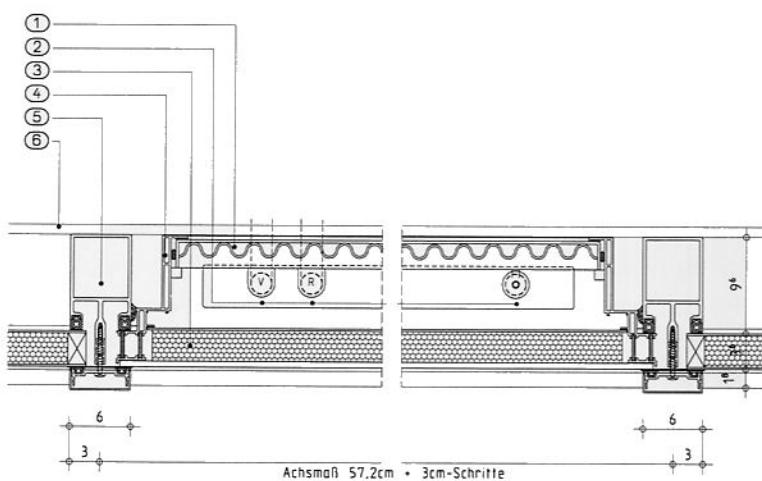
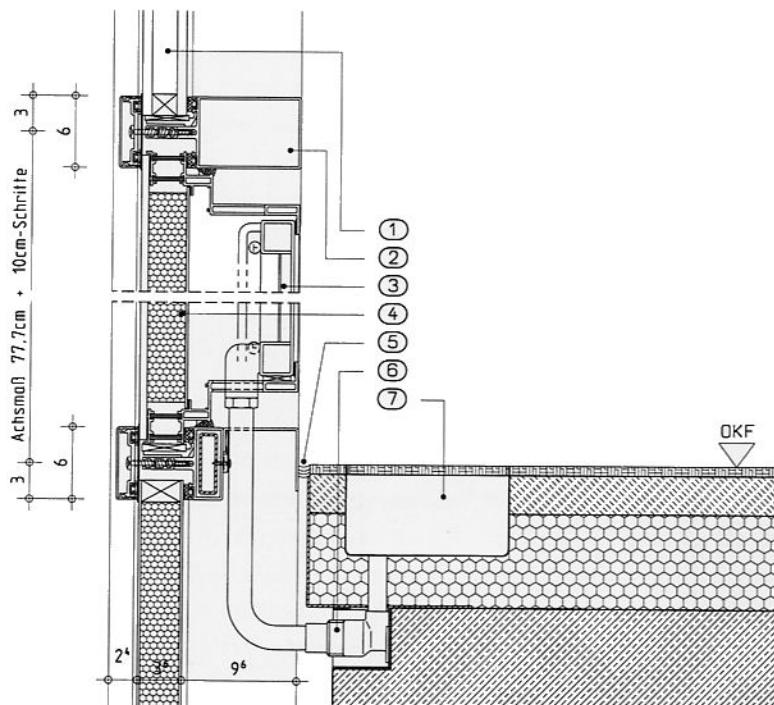


Fig. 2-42 Coupe d'un système d'isolation avec radiateur intégré

- 1 Vitrage d'isolation
- 2 Traverse de façade (par exemple Schüco SK 60)
- 3 Élément de balustrade pour façade poteaux-traverses avec dispositif de refroidissement
- 4 Système d'isolation Boetker (0,004 W/mk) (super-isolation dans un film composite étanche au gaz avec revêtement variable, par exemple du verre, du métal, de la céramique etc.)
- 5 Joint de raccordement élastique
- 6 Raccordement Kemper
- 7 Système de caisson avec kit de connexion, vanne de régulation et propulsion électromotrice



3 Ventilation et chauffage dans la maison passive

Comme nous l'avons déjà dit, la maison passive n'a pas besoin de système de chauffage actif, étant donné qu'elle est pratiquement autonome pour ses besoins en chauffage. Le faible besoin énergétique peut être fourni à l'aide d'un système de chauffage combiné ou encore d'un chauffage additionnel électrique. Le choix du chauffage approprié dépend du rapport surface/volume, mais également de la volonté écologique du maître d'ouvrage. Le recours systématique au chauffage électrique direct va nous permettre de réduire les émissions de CO₂ dans le bâtiment contrairement au chauffage au mazout par exemple. Il est important de savoir comment l'électricité a été produite. Une installation photovoltaïque est très écologique alors qu'une centrale électrique au charbon nécessite trois fois plus d'énergie primaire pour la production d'électricité. Tout cela est à considérer dans le bilan énergétique.

Un chauffage additionnel serait idéal dans une maison passive (par exemple une chaudière à condensation), cependant il n'est pas indispensable, contrairement au système de ventilation. D'un point de vue énergétique et architectural ainsi que pour garantir le bien-être, une maison passive ne fonctionne pas sans système de ventilation.

Ce chapitre représente différents systèmes de chauffage avec leurs avantages et inconvénients. Dans le chapitre 7 nous étudions la rentabilité des différents composants.

3.1 Introduction aux techniques d'alimentation en énergie

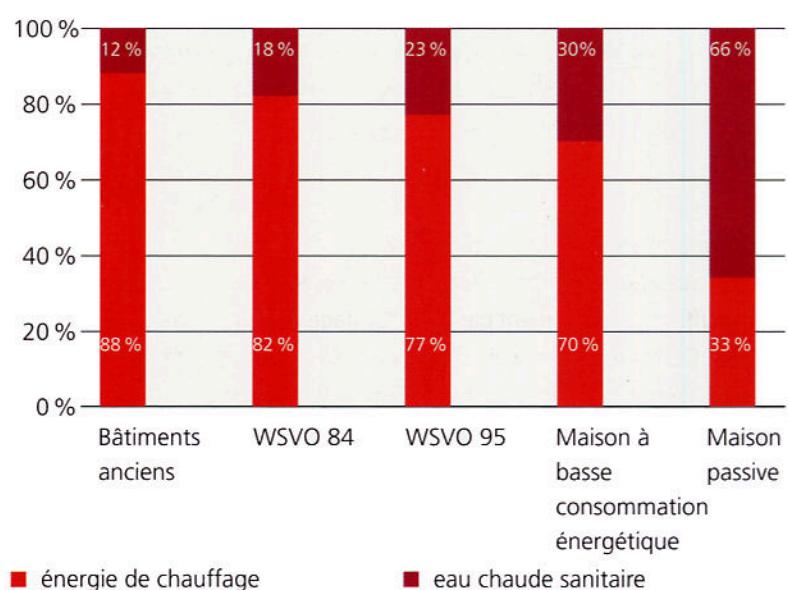
3.1.1 Principes de base

Par rapport à la construction conventionnelle, qui comprend les immeubles anciens, les maisons conformes au règlement sur l'économie d'énergie ou encore les maisons à basse consommation énergétique, la maison passive se différencie sur trois points quant à sa consommation d'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire :

1. son faible besoin annuel en chauffage
2. ses besoins très élevés en eau chaude sanitaire
3. ses faibles déperditions thermiques

Le premier point a déjà été explicité. Avec un besoin en chauffage annuel de 15 kWh/m²a, la maison passive consomme moins d'énergie qu'une maison à basse consommation énergétique. Ce faible besoin énergétique a pour conséquence un besoin très élevé en eau chaude sanitaire, son approvisionnement étant plus important que celui demandé pour l'énergie de chauffage, comme on peut le constater dans le diagramme ci-dessous.

fig. 3-1 L'évolution relative du besoin d'eau chaude sanitaire



Cette constatation faite, il est nécessaire que les installations de chauffage produisent non seulement l'énergie de chauffage mais également l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau. En multipliant l'apport minimum d'air frais par personne ainsi que la surface habitable par personne par la capacité calorifique et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, la puissance électrique de chauffage maximale est de 10 W/m^2 .

Pour simplifier le calcul, on suppose une température d'air de retour de 50°C . Avec une température intérieure de 20°C , il en résulte une différence de température de 30 kelvins.

$$P_{el} = 30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pers} \cdot 0,34 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) \cdot (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$\text{K} = \text{W/m}^2$$

Équation 3-1 Calcul de la puissance électrique à l'aide du programme PHPP

P_{el}	<i>puissance électrique</i>
$30 \text{ m}^3/\text{h}\text{P}$	<i>l'apport minimum d'air frais par personne et par heure (conditions d'hygiène)</i>
$0,34 \text{ Wh/m}^3\text{K}$	<i>la capacité calorifique à pression normale</i>
$30 \text{ m}^3/\text{P}$	<i>surface habitable par personne</i>
50°C	<i>température maximale de l'air, sinon la poussière s'aggrave</i>
20°C	<i>température intérieure</i>

Si l'on respecte les valeurs de calcul ci-dessus, il est possible et autorisé de remplir le faible besoin en énergie de chauffage exclusivement par le réchauffage de l'air ventilé. Cependant, le calcul de puissance électrique, conformément à la norme allemande DIN 4701 (réglementation concernant les installations de chauffage central), a souvent pour conséquence l'installation

d'un chauffage surdimensionné. Mais le calcul PHPP de la maison passive Grobe (voir l'exemple 1 dans le chapitre 7 "la rentabilité") révèle une puissance électrique plus faible. Selon le DIN 4701, sa puissance électrique est de $25,9 \text{ W/m}^2$ de surface habitable, et selon le critère maison passive, elle est de $8,9 \text{ W/m}^2$.

La maison Grobe dispose d'une surface habitable de 323 m^2 . Par conséquent, conformément au DIN 4701 on devrait installer un système de chauffage d'une puissance de $8,5 \text{ kW}$, alors que le besoin réel est seulement de 3 kW . La maison a une surface supérieure à la moyenne ; les maisons avec une surface de 150 m^2 ont besoin d'une puissance électrique de 2 kW . La raison de cet écart dans le calcul est la suivante : alors que le DIN ne prend pas en considération les apports calorifiques internes, dans le calcul de la maison passive ces apports sont inclus et calculés en fonction du nombre de personnes, de la puissance thermique, des appareils électroménagers et des apports solaires.

Parallèlement au besoin annuel en chauffage, la maison passive présente une forte inertie thermique qui s'oppose aux variations brutales de température. Si l'on renonce à un abaissement de nuit, on peut installer des capacités de chauffage très faibles.

Pour une pièce de 20 m^2 , des ampoules de seulement 100 watts suffisent à fournir la puissance nécessaire pour chauffer la pièce. Théoriquement, on peut également inviter deux ou trois personnes qui chauffent la pièce par leur propre chaleur corporelle.

3.1.2 Bien-être et principes physiques

Températures : Dans la maison passive, les températures de la surface intérieure des murs sont presque égales à la température ambiante. En supposant une température d'air frais de -10°C , une température intérieure de 20°C et des fenêtres à 17°C , les murs extérieurs atteignent une température de 19°C . La maison passive n'a pas besoin de radiateurs car le besoin en chauffage est comblé par le réchauffement de l'air frais. Si l'on décide quand même d'installer un chauffage, le lieu de montage n'est pas déterminant, un montage sur paroi intérieure étant acceptable. On peut utiliser, pendant les 6 premières heures d'occu-

pation de la maison, un chauffage d'appoint. Le chauffage au sol dans la salle de bain ainsi que les radiateurs muraux ne sont pas indispensables mais représentent un critère de confort supplémentaire pour garantir le bien-être.

Les efforts pour renoncer aux radiateurs situés au-dessous de fenêtres dans la maison à basse consommation énergétique se sont avérés négatif, occasionnant des courants d'air et un froid au niveau du sol. À cause des basses températures de surface des fenêtres, l'air est refroidi et longe la vitre jusqu'au sol, ce qui produit l'effet désagréable d'un courant d'air. Le coefficient U des fenêtres de la maison à basse consommation est de $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, dans une maison passive il est d'env. $0,8 \text{ W/m}^2$. Même près des fenêtres, la différence de température représente moins de 2,5 kelvins, alors que la norme DIN en exige 8 K. En conclusion, la fenêtre est un critère de confort important quant au choix de la puissance électrique des installations de chauffage.

Le renouvellement de l'air: Selon le DIN, le renouvellement de l'air par mètre de hauteur de plafond ne doit pas dépasser 2 kelvins. Dans une maison passive, ce taux est de 0,5 kelvin grâce à l'excellente isolation de l'enveloppe du bâtiment.

La vitesse des flux d'air: La vitesse des flux d'air dans une pièce est importante pour le bien-être thermique. Elle dépend du degré de turbulence (3-5 %) et de la température ambiante. Avec un degré de turbulence de 40 % et une température de l'air de 20°C , la vitesse est de 0,13 m/s ; elle est de 0,4 m/s avec un degré de turbulence de 5 % et une température de l'air de 27°C . Dans la maison passive, la vitesse de l'air est inférieure à 0,1 m/s.

L'humidité de l'air: Le DIN 1946-2 limite le taux d'humidité dans les pièces intérieures à 11,5 g d'eau par m^3 d'air, ce qui représente une humidité relative de 65 %. Il n'existe pas de valeur pour limiter l'humidité relative. Quant au bien-être, on peut fixer comme limi-

te, indépendamment de la température de l'air, un taux d'humidité de 30 %. Dans la maison passive, on mesure une humidité relative entre 40 et 60 %.

3.2 La ventilation

Le système de ventilation constitue le cœur de la maison passive. Sans un système de ventilation, la conception est impossible. En premier lieu, elle assure la bonne qualité de l'air ambiant. Selon le DIN 1946-6, le débit volumique d'air sortant et les débits volumiques d'air entrant sont relatifs à l'hygiène, aux émissions polluantes ainsi qu'au bien-être. De plus, la ventilation doit assurer une bonne performance de récupération de chaleur pour maintenir le faible besoin en chauffage. Pour cela, le standard maison passive exige l'installation d'un puits provençal.

Seule une ventilation contrôlée à double flux associée à un échangeur thermique peut assurer une aération suffisante et diminuer les déperditions thermiques pour maintenir les besoins hygiéniques. Cette installation, assurant l'alimentation en air frais et l'extraction d'air vicié, permet d'optimiser la ventilation tout en respectant l'apport minimum d'air frais de 30 m³ par personne et par heure, conseillé par les médecins experts.

Le renouvellement permanent de l'air est indispensable pour assurer sa bonne qualité et le haut confort dans une maison. En plus d'assurer une bonne qualité constante de l'air, une VMC associée à un échangeur à co-courant permet d'économiser env. 30 à 40 % d'énergie.

Les facteurs suivants sont indispensables pour la ventilation d'une maison passive :

- l'étanchéité à l'air ($n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$)
- une pompe à chaleur électrique $< 0,4 \text{ Wh/m}^3 \text{ d'air}$
- l'aération contrôlée de la maison

Une bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment empêche d'un côté l'infiltration incontrôlée de l'air extérieur et de l'autre côté les pertes de chaleur. Les flux incontrôlés ne peuvent pas être récupérés sous forme de chaleur.

La pompe à chaleur électrique intégrée dans le ventilateur doit être énergétiquement efficace, son moteur à courant continu étant silencieux, économique et de longue durée de vie.

Une ventilation contrôlée signifie que les espaces de vie (salle de séjour et chambres) constituent le réseau d'entrée de l'air ; les couloirs et les escaliers : la zone de débordement ; la cuisine, la salle de bain et le WC servent à l'extraction de l'air.

3.2.1 Le puits provençal (puits canadien)

L'échangeur géothermique est un tuyau enterré en pvc ou en béton et assure le préchauffage hivernal de l'air ventilé avant d'entrer dans le système de ventilation, ce qui l'empêche de geler. Il sert également de rafraîchisseur estival de l'air ventilé à une température ambiante en utilisant l'inertie thermique du sol. Le puits provençal n'est pas indispensable mais il présente un avantage important. Une alternative serait d'installer un dégivreur, cependant ceux-ci fonctionnent à l'électricité. Les tuyaux de l'échangeur géothermique sont faciles à installer. Cependant, pour des raisons d'hygiène, il faut les protéger contre la pollution et la moisissure en appliquant des filtres sur les extrémités. Au printemps et pendant les périodes chaudes, les tuyaux récoltent de l'eau condensée. La partie la plus basse peut se terminer par un siphon ou un regard percé afin de permettre l'infiltration de cette eau dans le sol. Il faut prévoir une pente pour favoriser l'écoulement de l'eau de condensation. Si un drainage jusqu'à la cave n'est pas possible, les condensés peuvent s'évacuer sur un lit de gravier. En cas de risque d'inondation, les évacuations d'eau se font par pompes de relevage.

3.2.2 L'installation de ventilation

L'installation de ventilation est un ensemble de dispositifs associé à un échangeur thermique destiné à assurer le renouvellement de l'air à l'intérieur des pièces. Il s'agit d'une ventilation permettant d'insuffler de l'air frais et d'extraire l'air vicié, formant ainsi un circuit.

Les critères suivants sont indispensables pour assurer le système de récupération de chaleur :

- **Température de l'air soufflé $\geq 16,5^{\circ}\text{C}$**

Si la température est inférieure, la puissance électrique n'est pas atteinte. En cas de températures extrêmes, on utilise un chauffage d'appoint.

- **L'hygiène**

Pour des raisons d'hygiène, il est conseillé d'utiliser deux étages de filtration de particules : le filtre extérieur F7 et intérieur G4. Les filtres sont faciles à changer et sont à remplacer environ tous les trois mois, ce qui est important pour la qualité de l'air frais.

- **Indice de dépense d'énergie de chauffage $\leq 0,45 \text{ Wh/m}^3$**

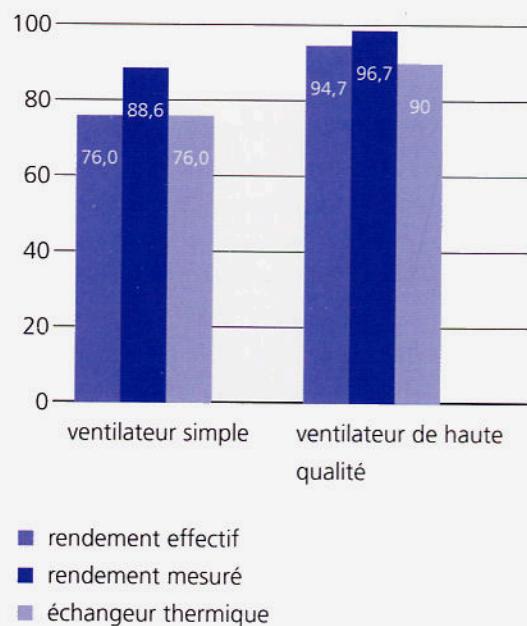
La consommation d'énergie électrique pour la ventilation et le réglage ne doit pas dépasser $0,45 \text{ W/m}^3$ d'air par heure.

- **Le critère d'efficacité, c'est-à-dire la récupération de chaleur $\geq 75\%$**

Si la récupération de chaleur est inférieure à 75 %, l'installation du système et la construction de la maison ne sont pas rentables.

La figure 3-2 montre les résultats d'un bilan énergétique effectué par le Passivhausinstitut à Darmstadt (Allemagne). On constate une variation du rendement effectif en fonction de l'isolation, des fuites et des flux de ventilation. Les paramètres suivants ont été calculés :

fig. 3-2 Calcul du rendement effectif du VMC



tab. 3-1, fig. 3-2

	Installation simple	Installation de haute qualité
Rendement thermique	76,0 %	90,0 %
Épaisseur de l'isolant (0,04 W/mK)	5 mm	80 mm
Coefficient U	3,4 W/m ² K	0,5 W/m ² K
Coefficient H	9,5	1,3
Fuite externe	3,0 %	0,5 %
Fuite interne	3,0 %	1,0 %
Flux de ventilation	48 Watt	36 Watt
Rendement thermique effectif	76,0 %	94,7 %
Besoins calorifiques	6,9 kWh/m ²	1,5 kWh/m ²

Le coefficient H désigne la capacité thermique mas-
sique déterminée par la quantité d'énergie à apporter
par échange thermique. Moins l'isolation est per-
formante, plus le coefficient H est élevé. Nous pouvons
constater que l'appareil de haute qualité (90 % de
récupération thermique) avec une bonne isolation,
des fuites minimales et des ventilateurs performants
présente un rendement effectif plus élevé.

Réduire les fuites à 3 % : Pour fonctionner de
manière efficace, les systèmes de récupération ther-
mique ne doivent pas comporter de fuites, l'absence
de fuites améliorant la qualité de l'air.

L'isolation thermique (5 W/K) : L'appareil doit être
bien isolé pour ne pas perdre de chaleur. Une mauvaise
isolation thermique a pour conséquence un faible ren-
dement thermique effectif.

Le réglage : La ventilation doit pouvoir s'éteindre à
tout moment. Elle est dotée de trois niveaux de régle-
ge : la ventilation de base, la ventilation normale et la
ventilation renforcée. Les programmes capables de
retourner automatiquement au réglage initial sont
très pratiques. Par exemple, quand une personne
fume et que l'on règle l'appareil sur le mode "venti-
lation renforcée", le programme retourne ensuite
automatiquement sur le mode "ventilation normale".
Un mode signalant le besoin de changer le filtre est
également très utile. Lors de la mise en marche, l'ins-
tallation doit régler le débit massique entre l'air frais
et l'air vicié. Étant donné qu'il s'agit d'une ventilation
à double flux, la relation entre l'air frais et l'air vicié doit
toujours être équilibrée pendant la ventilation, sans sur-
pression ni dépressurisation.

Protection antigel sans interrompre l'aération :
Pour les systèmes de ventilation sans puits provençal,
il y a risque de givrage. De ce fait, il est préférable
d'utiliser un dégivreur qui ne perturbe pas la réparti-
tion de l'air dans le système. En effet, quand on arrête
l'alimentation en air frais et que l'air vicié continue
de s'évacuer, il y a dégivrage. Cependant, l'effet
secondaire serait une dépressurisation dans le bâti-

ment et l'infiltration de masses d'air frais, augmentant
la consommation d'énergie électrique de trois à cinq
fois plus que la normale.

Niveau de pression acoustique < 35 dB(A) : Dans
les pièces principales, le niveau de pression acoustique
ne doit pas dépasser 35 dB(A). Pour les conduits d'aé-
ration, les exigences sont plus strictes.

3.2.3 La répartition d'air

La répartition d'air par les canaux de ventilation sert à
aérer les pièces.

Le débit/volume d'air de l'installation doit corres-
pondre aux habitudes et se répartir dans la maison
selon les besoins des habitants de la maison.

Pour plus d'informations :

www.aldes.fr

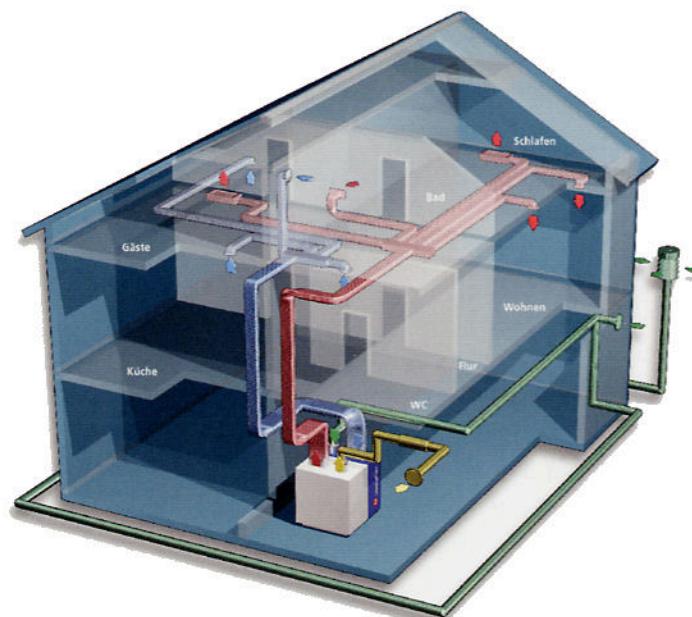


fig. 3-3 Réseau de tuyaux de ventilation
contrôlé à double flux

Les conditions d'hygiène sont à respecter. En règle générale, le débit volumique maximal se calcule par rapport aux critères suivants :

- $30 \text{ m}^3/\text{h}$ d'air frais par personne
- Taux de renouvellement d'air $> 0,3/\text{h}$
- Conditions spécifiques pour l'extraction d'air dans les espaces utilitaires

tab. 3-2 Débits volumiques dans les espaces utilitaires

Pièce	Débit volumique
Cuisine	$\sim 40\text{--}60 \text{ m}^3/\text{h}$
Salle de bain	$\sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$
Toilettes, cagibis etc.	$\sim 20 \text{ m}^3/\text{h}$

Débit d'air et dimensionnement : Le débit d'air frais peut se réguler de façon à aérer plus les espaces de vie que les pièces utilitaires. Les clapets de réglage dans les conduits d'air entrant de l'installation de ventilation assurent un flux d'air régulier et empêchent les infiltrations involontaires d'air frais. Un déséquilibre de la répartition des flux d'air provoque une dépressionsurisation et l'infiltration de grandes quantités d'air frais par les fuites. L'on choisit souvent des systèmes de répartition d'air plus simples et moins coûteux avec multifonction et ventilation contrôlée.

Le réseau de ventilation doit être conçu par une agence d'architecture. Il est important que la vitesse d'écoulement de l'air ne dépasse pas 3 m/s . Il faut également prendre en considération que la forme du canal influence la vitesse d'écoulement de l'air. Par conséquent, l'architecte et le planificateur en ventilation doivent travailler étroitement ensemble pour développer un système de tuyaux de ventilation approprié. L'endroit de l'installation, que ce soit dans le plafond ou dans le mur, dépend de la technique de construction (construction massive ou légère).



fig. 3-4 Canaux plats du système de ventilation Westaflex

Pour respecter les limites de la pression acoustique, le système de ventilation est à insonoriser en fonction des critères suivants :

- L'étanchéité des canaux de ventilation
- L'utilisation de canaux courts
- La possibilité de nettoyer
- Une vitesse d'écoulement de l'air $\leq 3 \text{ m/s}$
- L'application de tuyaux métalliques agrafés en spirale avec des surfaces intérieures lisses
- Une pression acoustique inférieure à 25 dB (A) dans les espaces vitaux
- Une pression acoustique inférieure à 30 dB (A) dans les espaces utilitaires

Bouches de ventilation : L'air frais aspiré, que ce soit par l'échangeur thermique ou non, doit être propre. L'air dans l'environnement ne doit pas être pollué et il faut éviter l'infiltration de substances étrangères dans le système de ventilation.

Il y a plusieurs modèles de bouches de ventilation qui peuvent s'installer presque partout si l'on respecte les conditions suivantes :

- lors de l'aération il faut éviter les courants d'air,
- la vitesse d'écoulement et le degré de turbulence sont à limiter,

- la température de l'air ne doit pas être trop basse,
- leur installation au-dessus des radiateurs est à éviter afin d'éviter l'inhibition des flux thermiques, c'est-à-dire que les flux soient opposés, qu'ils se gènent mutuellement,
- éviter une inhibition de ventilation, c'est-à-dire éviter d'aérer la pièce entière quand l'air s'échappe par la porte avant,
- assurer des zones qui servent à échanger l'air vicié et l'air frais (par exemple les couloirs),
- réduire les pertes de pression dans la totalité du système de tuyaux.

Il y a différentes bouches de ventilation équipées de clapets pour la paroi ou le plafond. À l'aide des clapets de refoulement, l'air frais est aspiré à grande vitesse (effet d'induction), provoquant ainsi le mélange des couches d'air sans pour autant produire de courants d'air.

La "portée du jet d'air" désigne la distance du faisceau dépendant de la température de l'air entrant. Plus la température est élevée, plus le diamètre du faisceau est grand. Pour que l'air frais se répande dans la pièce entière, la bouche d'introduction d'air est installée dans la paroi juste au dessous du plafond. L'air longe alors le plafond, provoquant ainsi une dépressurisation atmosphérique permettant une répartition régulière de l'air (l'effet Coanda).

Contrairement aux grandes vitesses d'air dans les canaux et au plafond, les flux dans la pièce sont modérés. Dans les espaces de vie, la vitesse ne dépasse pas 0,01 m/s, ce qui empêche les courants d'air.

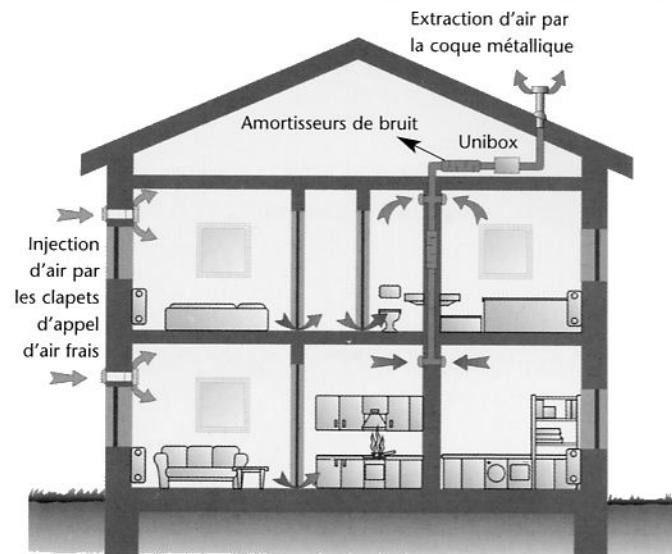


fig. 3-5 Installation d'évacuations d'air vicié avec clapets

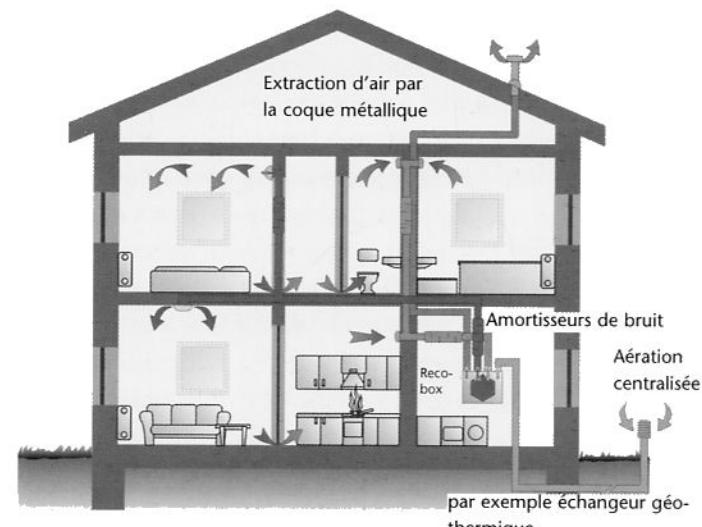


fig. 3-6 Système de ventilation à double flux

3.2.4 Systèmes de ventilation

Appareil d'extraction d'air : L'air vicié est évacué par des conduits d'air centralisés qui évacuent en permanence l'air de la maison. Une même quantité d'air frais filtrée est réinjectée par les clapets installés à la bouche de ventilation. L'avantage de ce système est la bonne qualité de l'air, tout en assurant une consommation énergétique raisonnable. On constate une

consommation de 20 W, voire moins, pour une installation de ventilation centralisée d'une maison individuelle. La ventilation contrôlée assure son efficacité et la réduction des déperditions thermiques. Contrairement à l'aération par les fenêtres, elle peut régler le volume d'air et ne dépend pas des changements climatiques. Tout cela augmente le confort et la qualité de vie pour les habitants de la maison. Avec un coût de 15 €/m² de surface habitable (correspondant à 2 000 € pour une maison individuelle), le système de ventilation représente la ventilation mécanique la moins chère pour une maison.

Ventilation à double flux : Dans ce système, il est intéressant d'utiliser un échangeur géothermique qui réutilise de manière énergétiquement efficace l'air vicié. Il fonctionne selon le principe d'aération transversale. L'air vicié est évacué des zones humides à l'aide de ventilateurs. Contrairement à l'appareil d'extraction d'air, l'air frais est aspiré, réchauffé par l'échangeur thermique et réparti par les réseaux de ventilation dans les chambres et la salle de séjour.

Les installations à double flux nécessitent, contrairement aux appareils d'extraction, un réseau d'introduction d'air (installation plus coûteuse) ainsi qu'un deuxième ventilateur. En effet, les coûts de construction s'élèvent à env. 50 à 70 €/m² de surface habitable, ce qui est nettement plus cher qu'un appareil d'extraction d'air.

Pour plus d'information :

www.fiabitat.com

www.aldes.fr

3.3 Chaleur intérieure et distribution d'eau chaude sanitaire

3.3.1 La distribution de chaleur

En Allemagne, depuis le regroupement du décret relatif à la surveillance de la qualité de l'air (mai 1998) avec le règlement sur l'économie d'énergie (EnEV 2002), la régulation de chauffage par pièce est inutile si la consommation d'énergie de chauffage ne dépasse pas 22 kWh/m²a. Par conséquent, la répartition de la chaleur est plus simple dans une maison passive. Il y a plusieurs systèmes possibles pour la répartition d'air.

Le chauffage à air : Le chauffage à air est la variante la moins chère pour chauffer une maison passive car il s'agit d'un chauffage d'appoint qui distribue de l'air tiédi à travers le système de ventilation mécanique contrôlée. La puissance thermique du chauffage est de seulement 10 W/m². La température de retour maximale du système de chauffage ne doit pas dépasser la température maximale admise à l'entrée. La température de l'air frais ne doit pas dépasser 52°C pour que la poussière ne s'aggrave pas dans les canaux. Le chauffage à air assure le réchauffage des espaces de vie, son installation n'étant pas nécessaire dans toutes les pièces.

Les radiateurs : Les radiateurs conventionnels peuvent être utilisés comme chauffage additionnel, par exemple, dans la salle de bain (déclaré secteur à libérer de l'air vicié), sous forme de radiateurs sèche serviettes. On peut utiliser les radiateurs muraux à très faible température dans toutes les pièces si les fenêtres sont bien isolées. Le système à tuyau unique et son montage à l'intérieur de la paroi (sur chaque étage) font que les coûts d'installation sont relativement bas.

Chauffage au sol, chauffage mural et plafonds chauffants : Pour fournir l'énergie de chauffage dont la maison passive a besoin, on peut installer des appareils de chauffage au sol, au plafond et dans les parois. Les pompes à chaleur sont particulièrement pratiques, les températures étant inférieures à 30°C. Un coefficient de performance thermique élevé aug-

mente la température de travail (le coefficient de performance thermique décrit la relation entre le rendement thermique et l'évacuation de la chaleur).

Pour permettre une activation efficace de la masse d'accumulation thermique et une compensation des différences de température entre les pièces, l'installation du chauffage devrait s'effectuer par étage et non par pièce. L'un des avantages des appareils de chauffage est leur réglage automatique. Quand la température de surface s'élève à 25°C, le chauffage chauffe automatiquement moins, alors qu'il augmente sa puissance de chaleur quand il fait plus froid.

Les appareils de chauffage sont plus inertes par rapport aux chauffages à air et réagissent différemment aux changements climatiques et au rayonnement du soleil. Alors que les appareils de chauffage génèrent des températures plus élevées que nécessaire quand il fait chaud, le chauffage à air est plus facile à réguler.

Système de plafond modulaire pour chauffage et refroidissement : Il s'agit de plafonds chauffants ou refroidissants pour la régulation thermo-active des dalles dans les petites maisons passives ou les constructions industrielles. Le système prospectif est constitué de conduits isolés préfabriqués pour distribution aérale. Le système est positionné et installé à l'aide du plan d'installation.

Les systèmes hydrauliques intégrés dans les dalles de plafond maintiennent pendant toute l'année une température entre 19 et 21°C. Cette température est suffisante pour couvrir le besoin de chauffage et permettre l'aération, assurant une température ambiante entre 21°C et 26°C. Les éventuels générateurs d'eau froide fonctionnent seulement pendant quelques mois pour compenser les faibles déficits de refroidissements.

En été, le refroidissement se fait pendant la nuit, car pendant la journée, la chaleur solaire est stockée. La différence entre les températures intérieures et extérieures fait alors que la masse d'air auparavant refroidie, se réchauffe lentement de nouveau pour ensuite se refroidir pendant la nuit.

Pour plus d'information :

www.lindner.ag

www.promodul.fr

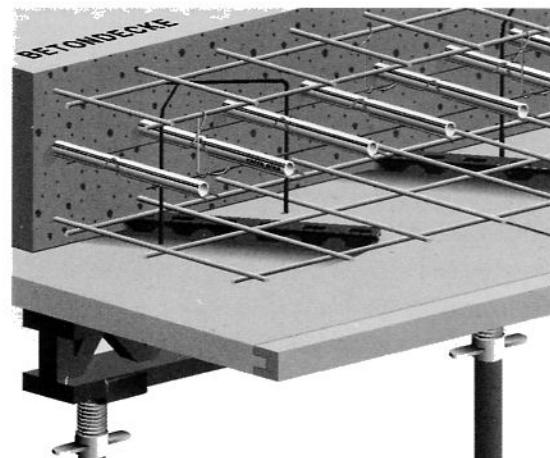


fig. 3-7 Coupe d'un plafond en béton pour chauffage et refroidissement

3.3.2 Alimentation en eau chaude

La consommation d'eau chaude d'une maison passive est calculée conformément à la norme allemande VDI 2067, selon laquelle une personne a besoin d'environ 20 litres d'eau chaude d'une température de 60°C. Pour des raisons de confort, dans une maison passive, le besoin en eau chaude sanitaire monte à 25 litres par jour. Selon le calcul courant, le besoin en énergie pour la production d'eau chaude sanitaire d'une famille de quatre personnes s'élève à 1 500 kWh. Cependant, il est difficile de déterminer un chiffre fiable car il n'est pas facile de contrôler la consommation d'eau chaude d'une famille. On l'estime donc entre 1 500 et 5 000 kWh/a.

Selon la distribution de la chaleur et la capacité thermique, il y a des déperditions thermiques entre 1 000 et 3 000 kWh/a. Il peut en résulter une consommation d'eau chaude sanitaire de 2 500 à 8 000 kWh/a par famille qui dépend des déperditions thermiques par transmission de l'enveloppe du bâtiment.

Quant aux déperditions thermiques, il existe de grandes différences qui dépendent du besoin individuel d'une personne et du système de chauffage. La consommation journalière n'est pas déterminante, mais l'isolation de l'accumulateur thermique et la dis-

tribution de la chaleur le sont. Par conséquent, il est important de choisir des produits haut de gamme pour maintenir de faibles déperditions thermiques.

L'exemple du chauffage par circulation d'eau chaude : Le tuyau d'eau chaude d'un diamètre nominal de 18 mm et d'une longueur de 20 m est isolé avec plusieurs épaisseurs (entrée et sortie d'eau). La température à l'entrée du tuyau est de 60°C et le temps de circulation est de 18 heures. Le taux annuel de déperditions thermiques dans l'enveloppe extérieure ou intérieure du bâtiment dépend de l'isolation (coefficient de transmissions thermiques 0,04 W/mK).

Exemple : Pour l'accumulation d'eau chaude sanitaire, on utilise un ballon d'eau chaude avec un débit de 300 litres. Les déperditions de chaleur dépendent du coefficient de conductivité thermique et de leur situation.

Pour réduire les pertes de chaleur lors de la distribution et l'accumulation, il faut respecter les critères suivants :

Tuyauterie :

- utiliser des tuyaux courts
- isoler l'ensemble des tuyaux (ainsi que les jonctions et les clapets)
- l'installer dans l'enveloppe thermique du bâtiment si possible.

Ballon :

- utiliser des ballons entièrement isolés
- installer le ballon dans l'enveloppe thermique du bâtiment
- installer un dispositif de réglage simple
- en cas d'installation du ballon à l'extérieur de l'enveloppe thermique, il doit être doublement isolé conformément au règlement sur l'énergie
- réduire ou empêcher complètement les ponts thermiques
- installer des robinets économiques, par exemple un mitigeur thermostatique

fig. 3-8 Déperditions thermiques par les conduits d'eau chaude

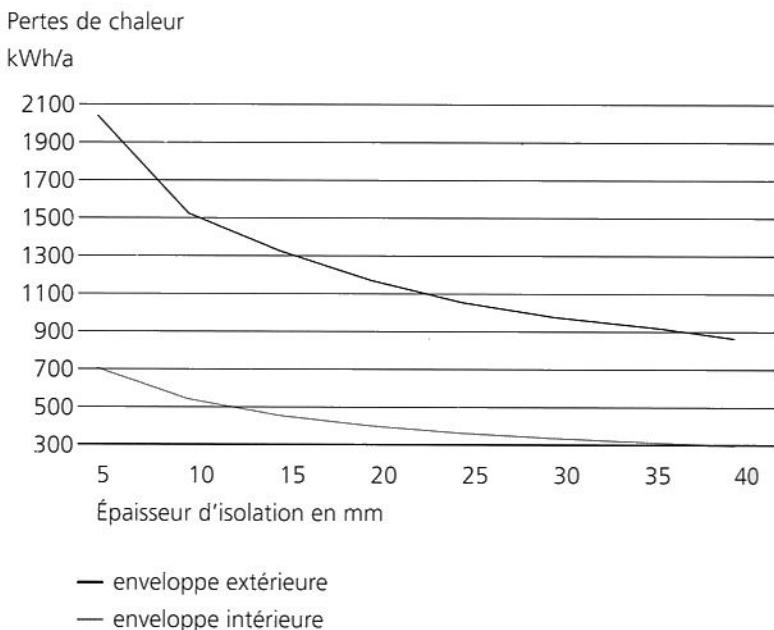
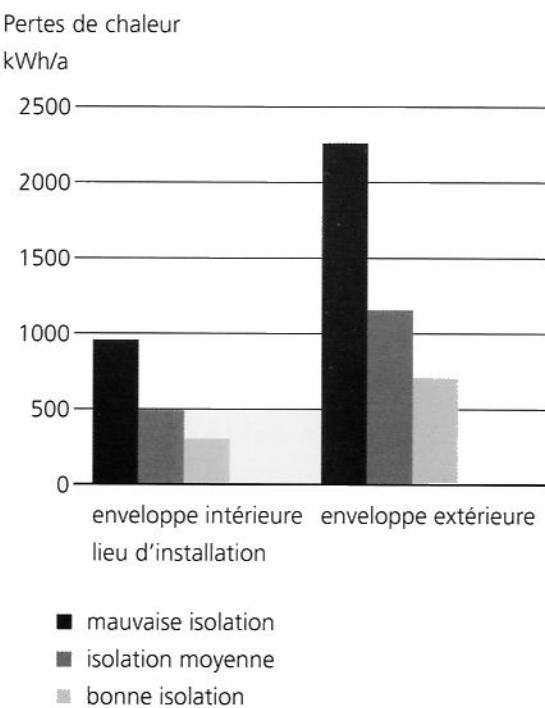


fig. 3-9 Déperditions thermiques d'un réservoir de 300 litres



3.4 Production de chaleur pour l'eau et le chauffage

Quasiment tous les systèmes conventionnels pour la fourniture de chaleur sont intégrables dans la maison passive. Les facteurs à considérer sont l'efficacité énergétique, l'énergie primaire et la rentabilité.

Plus le système est efficace, moins il consomme d'énergie primaire. L'efficacité énergétique est importante pour maintenir de faibles coûts pour les sources énergétiques.

3.4.1 Le chauffage d'appoint électrique

Malgré la récupération de la chaleur, l'installation de ventilation ne peut pas couvrir le besoin total en énergie de chauffage. De ce fait, on a besoin de systèmes économiques et efficaces qui fournissent la chaleur manquante. Le chauffage d'énergie direct alimentant la maison passive en énergie électrique peut également servir de chauffe-eau. Il s'agit d'une transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique pour alimenter le chauffage. Selon le même principe, on utilise l'énergie solaire pour chauffer une partie de l'eau sanitaire accumulée dans un ballon d'eau chaude. L'énergie excédentaire est accumulée dans l'échangeur thermique pour ensuite alimenter le chauffage. Cependant, quand le besoin de chauffage est supérieur à l'énergie disponible, il faut le compenser par un chauffage d'appoint électrique ou une pompe à chaleur.

3.4.2 L'installation photovoltaïque

Principe fondamental et fonctionnement: Par énergie photovoltaïque on entend la production d'électricité au moyen de cellules photovoltaïques solaires : Les rayons du soleil se transforment directement en électricité à l'intérieur de semi-conducteurs spécifiques (généralement silicium). Les particules de lumière viennent heurter les électrons sur le silicium et lui communiquent leur énergie. Le silicium est traité de manière à jouer le rôle de clapet anti-retour d'électricité permettant ainsi de diriger tous les électrons dans le même sens, ce qui produit un courant continu.

Les cellules peuvent être connectées en série de telle sorte qu'elles délivrent une tension continue de 12 ou 24 volts.

Technologie / types de cellule photovoltaïque : On différencie les cellules solaires à base de silicium et les photopiles en couche mince. Les cellules en silicium peuvent être monocristallines ou polycristallines. Les cellules monocristallines ont un meilleur rendement mais sont plus chères.

Ces dernières années, on applique de plus en plus de cellules solaires en couche fine. Celles-ci sont composées d'un support (par exemple en verre) sur lequel est déposée une fine couche de silicium. Une épaisseur de couches inférieure à 1 mm est suffisante grâce à la



fig. 3-10 Module solaire au silicium du fabricant Solarworld

bonne performance d'absorption de la lumière des semi-conducteurs en sélénium de cuivre et d'indium ou de tellurure de cadmium. Les cellules solaires en couche mince sont disponibles en longues couches minces et ne sont pas obligées de correspondre à l'épaisseur wafer (galette de silicium).

Grâce à leur forme, les cellules sont moins sensibles à la projection d'ombre. Ce procédé nécessite considérablement moins d'énergie et moins de matériaux. Par conséquent, une grande installation est extrêmement rentable. Cependant, il faut souligner que la technique de ce procédé est beaucoup moins développée qu'en matière de cellules cristallines.

Les apports de chaleur peuvent être augmentés de 20 à 30 % grâce au changement de direction automatique. Cependant, une telle installation est très coûteuse. Il est conseillé de faire une analyse sur les risques d'ombrages qui peuvent réduire le rendement thermique.

L'installation solaire peut être raccordée au réseau public de distribution électrique. En France, de plus en plus de particuliers se branchent sur le réseau public grâce aux subventions accordées et aux tarifs d'énergie solaire avantageux.

3.4.3 Installations solaires thermiques

L'élément central de l'installation du collecteur solaire est constitué de ce que l'on nomme l'absorbeur. La surface absorbante du collecteur solaire absorbe la lumière solaire et la convertit en chaleur. Ainsi, on chauffe l'eau sanitaire, l'eau de chauffage et l'air pour l'installation de ventilation. La plaque de verre et l'isolation thermique intérieure empêchent les pertes de chaleur.

Il y a trois types de collecteurs solaires :

- collecteurs plats
- collecteurs sous vide
- collecteurs d'admission d'air

Les **collecteurs plats** sont les collecteurs solaires les plus communs. Ils sont constitués par une plaque absorbante en cristal très résistante. Cette plaque absorbante offre un indice d'absorption de chaleur maximal et une rapide transmission thermique par le liquide caloporteur. Le support en cristal présente une très faible réflexion et une bonne absorption thermique. Pour réduire au maximum les pertes, la plaque absorbante est isolée.

tab. 3-3 Rendement de différentes cellules photovoltaïques

Matériau de la cellule solaire	Rendement des cellules η_z (laboratoire)	Rendement des cellules η_z (production)	Rendement des cellules η_M (production en série)
Silicium monocristallin	24,4 %	18 %	14 %
Silicium polycristallin	19,8 %	15 %	13 %
Silicium en bande	19,7 %	14 %	13 %
Silicium amorphe	12,7 %	8 %	7 %
CIS/ CIGS	18,8 %	14 %	10 %
Tellurure de cadmium	16,0 %	10 %	9 %
Gallium arsenid	30,2 %	27,4 %	—
Cellules à colorant	12,0 %	7 %	—
GaAs/ GaSb	35,8 %	—	—

Pour la production d'eau chaude sanitaire, les collecteurs plats sont plus rentables que les collecteurs sous vide. Le rendement énergétique est inférieur, cependant, l'installation, les matériaux, la réparation et la maintenance sont moins chers.

Les collecteurs sous vide présentent un meilleur rendement. En faisant le vide dans l'espace qui reste entre le cristal protecteur et la surface absorbante, on parvient à éliminer les pertes par convection interne. Cependant, les coûts d'acquisition, d'installation, de réparation et de maintenance sont plus élevés. Il faut donc bien les comparer avec les collecteurs plats pour trouver la solution appropriée.

Il y a deux modèles différents de collecteurs sous vide : Les collecteurs plats sous vide et les collecteurs à tube sous vide (fig. 3-11, 3-13). Les collecteurs plats sous vide sont plus faciles à transporter car le vide se fait après l'installation.

Les collecteurs à tubes risquent d'imploser, ils exigent donc un transport et une installation plus coûteux. Cependant, le vide des tubes est de meilleure qualité, ce qui augmente le rendement.

L'air comme caloporteur constitue un avantage car il est transmis directement dans l'accumulateur du chauffage. Cela permet une installation simple sans fuite et sans risque de congélation. Cependant, cette installation nécessite un très grand volume d'air, un diamètre des conduits plus grand ainsi qu'une meilleure puissance thermique des ventilateurs, la capacité calorifique étant inférieure par rapport à l'eau.

Les collecteurs d'air peuvent être utilisés pour l'approvisionnement additionnel en énergie de chauffage dans une maison passive.

L'application dans la maison passive : Les collecteurs solaires approvisionnent le chauffage d'appoint en énergie thermique. Ses caloporteurs sont l'eau ou l'air. L'absorbeur doit atteindre une température entre 40 et 60°C pour pouvoir transporter l'énergie utile au système répartiteur de chaleur ou encore à l'accumulateur. La basse température extérieure pendant la saison de chauffage occasionne une augmentation de la

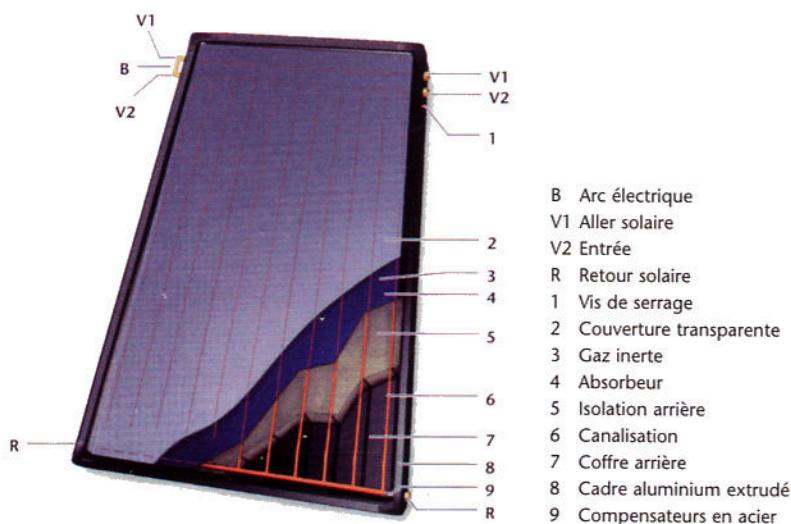


fig. 3-11 Coupe d'un collecteur plat



fig. 3-12 Collecteurs plats installés sur une toiture inclinée

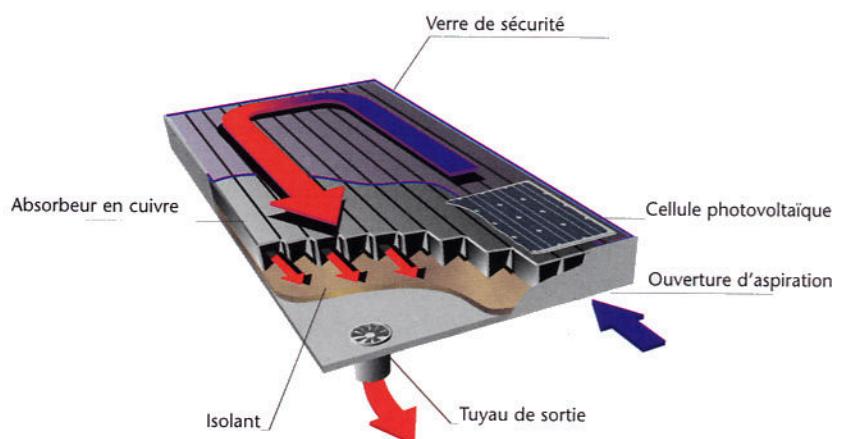


fig. 3-13 Coupe d'un collecteur solaire à tube sous vide

différence de température entre l'absorbeur et l'air frais. Grâce à une meilleure performance, on utilise pour le chauffage d'appoint des collecteurs solaires à tube sous vide, et pour la ventilation, des collecteurs d'air.

La température de travail pour la production d'eau chaude sanitaire des collecteurs est comprise entre 20 et 60°C.

Comme l'on a besoin d'une plus grande quantité d'énergie solaire quand le soleil est moins présent, on utilise des grands réservoirs, un réservoir chimique ou un régulateur thermique à changement d'état. La chaleur est alors accumulée pendant plusieurs mois.

Si la température d'eau est trop basse, on réchauffe l'eau à l'aide d'un corps de chauffe électrique, un deuxième échangeur thermique alimenté par une pompe à chaleur, une chaudière ou encore un chauffe-eau instantané. Le chauffe-eau instantané est particulièrement rentable, car le chauffage d'appoint s'adapte au besoin réel en eau chaude.

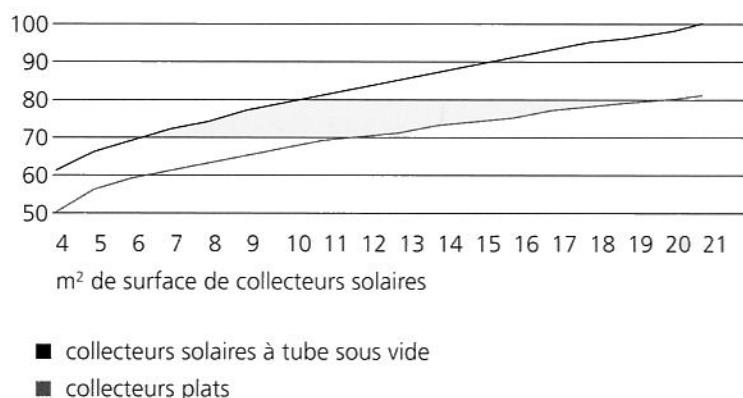
L'approvisionnement d'une maison passive en énergie thermique à l'aide d'une installation solaire : Une installation solaire avec des collecteurs solaires sur une surface de 6 m² peut couvrir, hors la saison de chauffage, presque entièrement le besoin en eau chaude sanitaire. Pendant la saison de chauffage, l'installation solaire assure 60 à 70 % de la production annuelle d'eau chaude. Si l'on raccorde la machine à laver et le lave-vaisselle à l'alimentation d'eau chaude, on économise du gaz, du fioul et l'électricité.

Le graphique suivant montre, à l'aide d'un exemple simple, la part de consommation annuelle d'énergie solaire d'une famille de quatre personnes en fonction du choix de collecteurs solaires :

fig. 3-14 La part de consommation (théorique) d'une installation solaire thermique avec des collecteurs solaires sur une surface inclinée de 60°C

Part de consommation

en %



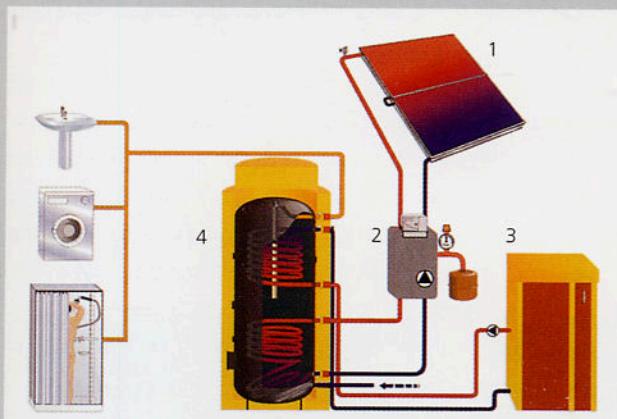
- collecteurs solaires à tube sous vide
- collecteurs plats

Les collecteurs solaires sous vide atteignent un rendement de 20 %, ce qui est nettement supérieur à celui des collecteurs plats. Cependant, les coûts d'acquisition sont plus élevés. Avec des collecteurs sur une surface de 21 m², les collecteurs sous vide atteignent un taux de couverture de 100 %, alors que les collecteurs plats nécessiteraient une surface deux fois plus grande. Avec une inclinaison supérieure à 60°, le rendement est encore supérieur, l'angle du rayonnement solaire étant vertical en été (au 21 juin env. 63°). Cependant, la plupart des toits sont inclinés à 45°.

Économie d'énergie et réduction des émissions de CO₂ : L'énergie solaire est l'énergie écologique par excellence. Elle est toujours disponible et gratuite. Dans les prochaines décennies, l'énergie solaire pourra remplacer l'énergie fossile, ne serait-ce qu'en assurant par exemple le chauffage de l'eau chaude sanitaire. L'énergie solaire contribue ainsi à couvrir les

Fonctionnement d'une installation solaire

Les installations solaires thermiques, également appelées « thermie solaire », sont proposées par de nombreux fabricants dans différentes configurations. Dans une maison passive, les collecteurs solaires peuvent être installés au mur ou en toiture. La représentation 3-15 illustre le fonctionnement d'une installation solaire.



*fig. 3-15 Système solaire thermique
(schéma Fa. Wagner & Co.)*

L'installation comprend quatre composants :

1. Collecteurs solaires
2. Station solaire
3. Ballon de stockage solaire
4. Chaudière

Les collecteurs solaires absorbent le rayonnement solaire et le transforment en chaleur qu'ils transmettent ensuite à un fluide caloporteur.

Pour éviter les déperditions thermiques, par exemple par dissipation thermique, les collecteurs solaires sont particulièrement bien isolés sur les côtés et à l'arrière. Ils peuvent toutefois atteindre des températures nettement supérieures à 200°C.

Dans les installations à circulation forcée, le fluide caloporteur est pompé dans le ballon d'eau chaude via un système de conduits. Pour cela, une pompe de circulation est activée par le régulateur dès que la température du collecteur solaire est supérieure à celle du ballon.

La station solaire contient divers dispositifs de sécurité, comme un manomètre, des vannes de sécurité, un événement de soupape, un dispositif récepteur ainsi qu'un vase d'expansion. Ce vase d'expansion enregistre les variations de volume qui se produisent à cause des températures différentes entre les liquides caloporteurs.

En effet, l'offre du rayonnement solaire correspond rarement à la demande d'énergie, le ballon de stockage équilibrant l'offre et la demande d'énergie grâce au stockage à court terme ou saisonnier. Les ballons à chauffage identiques à celui de la figure approvisionnent la baignoire et la douche en eau chaude. Un réservoir tampon peut également servir de chauffage. Le ballon solaire combiné utilise l'énergie solaire pour l'eau chaude et le chauffage.

Quand il fait mauvais temps, le chauffage d'appoint est assuré soit par une pompe à chaleur soit par une chaudière.

Dans le schéma de l'entreprise Wagner & Co., le chauffage d'appoint est assuré grâce à une chaudière à pellets. Ce type de ballon est appelé "ballon de stockage combiné" et le système se nomme lui "système solaire bivalent".

besoins énergétiques jusqu'au moment où l'on pourra développer de nouvelles technologies pour l'approvisionnement en énergie. Les émissions de CO₂ sont plus faibles par rapport aux autres systèmes de chauffage, car elles se produisent de manière indirecte (pompes à chaleur et commande électrique).

3.4.4 Les pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont utilisées dans les installations de chauffage et dans la production d'eau chaude sanitaire, parfois également dans les chauffages au sol. Pour la production d'eau chaude, un ballon tampon est nécessaire, la pompe à chaleur n'étant pas en mesure de mettre à disposition la quantité de chaleur requise comme le font les chaudières à gaz conventionnelles.

L'air, l'eau souterraine et l'énergie du sol constituent les sources de chaleur d'une pompe à chaleur. Le réfrigérateur est le système de pompe à chaleur le plus connu. La pompe à chaleur air/eau n'utilise pas la terre comme source de chaleur, mais l'air vicié d'un bâtiment ou encore l'air aspiré par des tuyaux souterrains.

L'entretien de l'installation circulatoire est relativement simple et peu coûteux. Les coûts de chauffage se limitent à l'énergie mécanique motrice de la pompe à chaleur. La performance énergétique dépend des variations de la température de l'air.

En règle générale, l'air frais ou l'énergie du sol constituent les sources de chaleur les plus importantes. Quant aux capteurs, ils sont de deux types :

- les capteurs horizontaux
- les capteurs verticaux

Le circuit des capteurs horizontaux est constitué de boucles qui absorbent la chaleur accumulée dans la couche superficielle. Selon la directive VDI 4640 sur l'utilisation thermique du sous-sol, les boucles sont enterrées horizontalement entre env. 1,20 et 1,50 m, c'est-à-dire à une profondeur suffisante pour éviter le gel. L'espace de 0,5 m assure d'une part que la terre où sont enterrés les tuyaux ne gèle pas, et que la pluie et la rosée peuvent s'infiltrer. D'autre part, cet espace évite que la surface des capteurs ne soit pas trop étendue. Il faut éviter que les tuyaux ne gèlent, car les températures inférieures à zéro occasionnent trop de pertes de chaleur. Contrairement aux tuyaux conventionnels en polystyrène, les tuyaux PE-Xa ne nécessitent pas de lit de sable, et peuvent s'enterrer

directement dans la terre souvent plus humide. Après l'installation des tuyaux, la terre doit être bien tassée pour assurer une transmission thermique optimale. Dans le cas d'un capteur vertical, la chaleur géothermique est transmise à un liquide caloporeux qui fait partie du circuit du système de pompe à chaleur. Les tubes du sous sol et l'échangeur thermique doivent être installés dans la couche superficielle entre le sol agricole et la nappe souterraine.

Mode de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Un agent réfrigérant circule dans un circuit enterré. Après avoir absorbé la chaleur géothermique, elle est transmise à la pompe à chaleur qui compresse la chaleur à une température supérieure pour ensuite la transmettre au circuit de chauffage. L'agent réfrigérant refroidit alors de nouveau et s'expand, le processus se répète à l'infini. Le coefficient thermique se calcule par rapport à la chaleur géothermique et à l'énergie mécanique motrice nécessaire pour la pompe à chaleur (équivalent mécanique de la chaleur).

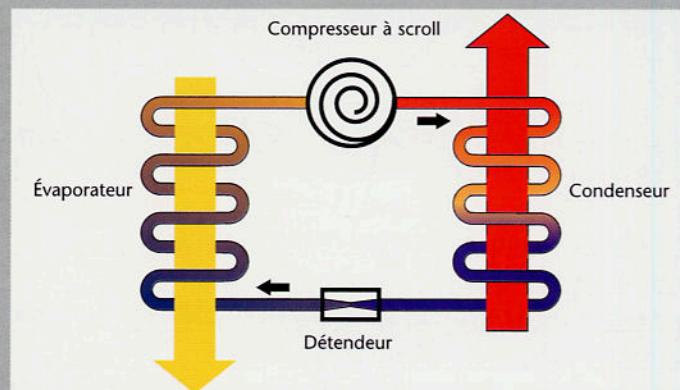


fig. 3-16 Mode de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur : L'efficacité d'une pompe à chaleur dépend du rapport entre la puissance thermique et sa consommation électrique.

$COP = \frac{\text{énergie thermique}}{\text{puissance thermique}} + \text{puissance}$ ther-

Exemple : $4 = 3 + 1/1$

Équation 3-2 Coefficient de performance ϵ

Un coefficient de performance de 4 signifie que la transformation en puissance thermique utile est d'une quantité quatre fois plus élevée que la puissance électrique. Le coefficient de performance est une valeur instantanée basée sur le cycle de Carnot. La performance de la pompe à chaleur se calcule à l'aide de la différence de température entre la source d'énergie (Évaporateur) et le condensateur :

$$COP_{chaleur} = T/T_{chaud} - T_{froid} = T/\Delta T$$

Équation 3-3 Coefficient de performance théorique (cycle de Carnot)

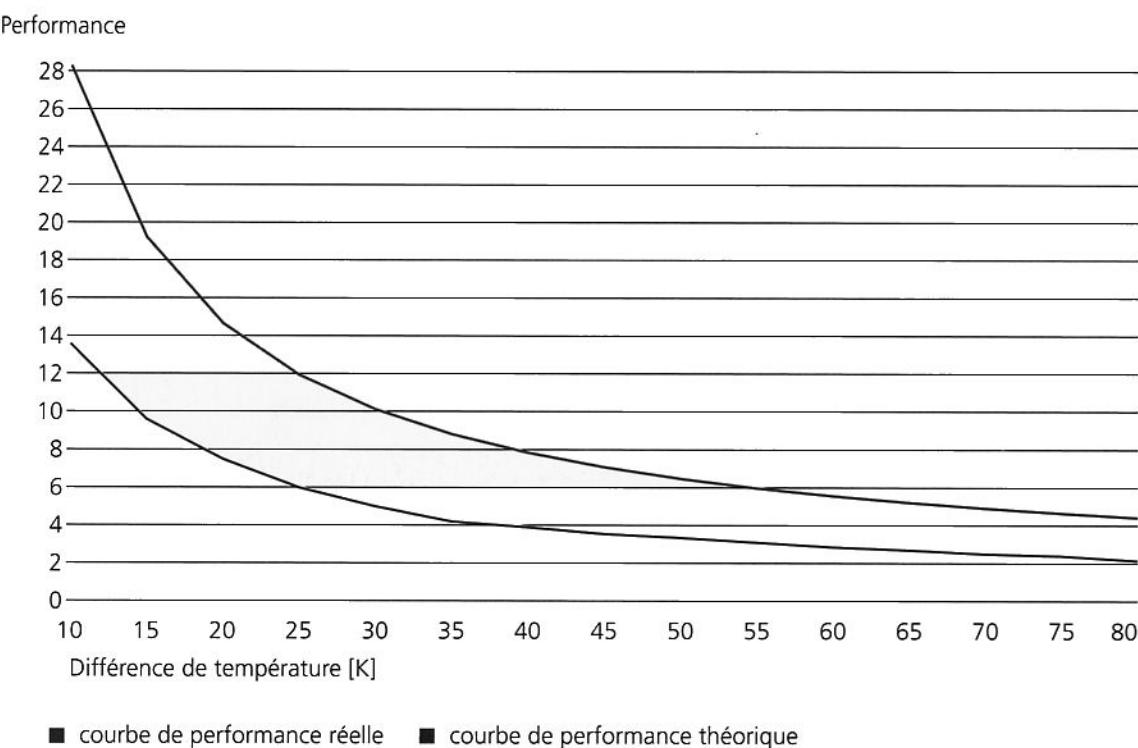
$COP_{chaleur}$	<i>Coefficient de performance selon le cycle de Carnot (théorique)</i>
$T_{chaleur}$	<i>Température de l'environnement qui absorbe la chaleur</i>
T_{froid}	<i>Température de l'environnement qui transmet la chaleur</i>
ΔT	<i>Différence de température entre le côté chaud et froid</i>

Performance annuelle d'une pompe à chaleur : Le calcul d'une telle performance sur toute l'année, n'est pas réaliste. Par conséquent, on a introduit le coefficient β . Si la pompe à chaleur est intégrée dans un système, on peut déterminer un bilan annuel de sa performance.

L'agent frigorigène : La vapeur de l'agent frigorigène est condensée dans l'évaporateur qui présente une température intérieure élevée. L'agent s'évapore donc de nouveau et absorbe la chaleur ambiante. La pompe à chaleur est remplie d'un fluide frigorigène R134a ou R304C, sans chlore qui préserve la couche d'ozone.

fig. 3-17 Performances théoriques et réelles d'une pompe à chaleur

On peut assimiler approximativement le coefficient de performance réelle ϵ et le coefficient du cycle de Carnot de 0,5.



3.4.5 Poêle à granulés de bois

Il est envisageable d'utiliser des poêles à granulés de bois pour le chauffage d'appoint et la production d'eau chaude sanitaire dans la maison passive. L'inconvénient est la nécessité d'installer une cheminée conventionnelle et donc de la faire ramoner tous les ans. Tous ces facteurs augmentent considérablement les frais accessoires et prolongent le temps d'amortissement. Cependant, le poêle ne s'allume pas en été, il faut donc recourir à une installation solaire en plus. Par conséquent, on constate qu'une telle configuration est réalisable que si l'on intègre plusieurs sous-systèmes.

Pour la production d'énergie thermique, on utilise les pellets (un produit en croissance) ou encore des granulés de bois non traités. Les chaudières installées dans la cave mais aussi les cheminées peuvent utiliser dès à présent les granulés à bois. Le critère essentiel de choix des chaudières conventionnelles est la valeur d'usage (le rendement, l'économie et les coûts d'investissement). Le choix du poêle dépend bien sûr des goûts de chacun.

Le poêle de l'entreprise Gerco réunit ces deux critères. Contrairement aux poêles conventionnels qui fonctionnent par chaleur rayonnante et par convection calorifique, ce poêle introduit l'énergie produite dans un circuit de chauffage. Il sert ainsi de chauffage central. Toutes les pièces du poêle, comme la pompe de circulation, la soupape de sécurité thermique, le réglage, etc. sont installées derrière le revêtement du poêle.

Ce poêle offre une puissance thermique de 8 kW optimale pour les maisons modernes à basse énergie, 6 kW étant transmis au circuit de chauffage et 2 kW par convection.

Du fait de l'enveloppe étanche et du système de ventilation contrôlée, propres aux maisons passives, les poêles ne sont pas alimentés avec l'air intérieur mais ils disposent d'une tubulure de raccordement de 80 mm permettant l'alimentation en air frais. Les fabricants de cheminées sont aptes à vous informer sur les solutions pour une aération indépendante de l'air intérieur.



fig. 3-18 Un collecteur de chaleur souterraine enfoui horizontalement



fig. 3-19 Forage d'un collecteur vertical

3.4.6 Mini centrale de cogénération

Principe de fonctionnement : Une centrale de cogénération permet de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. Un moteur à gaz actionne un générateur qui permet de valoriser la chaleur provenant du fonctionnement du groupe (refroidissement moteur et gaz d'échappement). Même la chaleur du gaz résiduel (inutile dans les centrales électriques conventionnelles) est utilisée pour la production d'énergie grâce à l'échangeur de chaleur des gaz brûlés.

Quant au chauffage d'une maison, la mini centrale de cogénération est complétée par une chaudière et un accumulateur de chaleur. Ces installations sont particulièrement rentables si elles travaillent toute l'année et qu'elle produisent, en plus de l'électricité, de l'énergie pour le chauffage de l'eau, nécessaire dans la cuisine et dans la salle de bain d'une maison passive.

Par conséquent, on utilise un ballon tampon qui chauffe constamment jusqu'à 85°C. Grâce à un échangeur thermique, seule la quantité d'eau nécessaire est chauffée à env. 60°C en mélangeant l'eau d'usage et l'eau du ballon tampon. Cela permet de compenser les déperditions thermiques.

A côté de la cogénération classique par moteur diesel à gaz, il existe des turbines à vapeur ou à gaz mais aussi des piles à combustible ou un moteur sterling (nouvelles technologies).



fig. 3-20 Poêle à granulés de bois pour maison passive

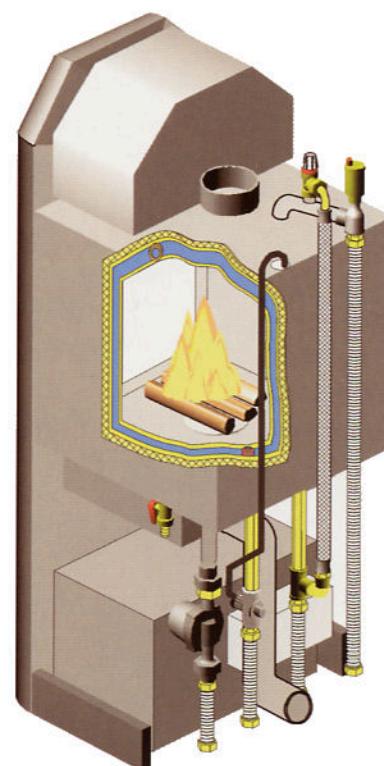


fig. 3-21 Coupe d'un poêle Gerco GD-8 RLU

Économies d'énergie : Pour des raisons thermodynamiques et constructives, la combustion transforme seulement un tiers de l'énergie primaire en énergie électrique. Grâce à la cogénération, les deux tiers restants sont utilisés comme énergie thermique avec un rendement de 85 à 100 %.

Les centrales de cogénération économisent doublent l'énergie : d'une part pour la réduction de la consommation énergétique grâce à une régulation efficace. D'autre part, grâce à la mise à disposition optimale de l'énergie.

Étant donné que cette technique permet de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité à partir d'un seul combustible, le rendement global est beaucoup plus élevé que celui qui résulte de productions séparées.

Par conséquent, la centrale de cogénération peut constituer une bonne alternative économique par rapport aux systèmes de chauffage conventionnels, non seulement pour une meilleure utilisation de l'énergie mais aussi pour la réduction des émissions de CO₂.

Cependant, malgré la basse consommation énergétique, il faut évaluer en détail la rentabilité pour les maisons particulières et les petits immeubles, les coûts d'investissement étant relativement élevés.

Pour évaluer la rentabilité d'un tel système, il est recommandé de faire une comparaison avec les panneaux solaires ou une installation de capteurs solaires qui fonctionnent également avec des énergies régénératrices.

3.4.7 Systèmes de chauffage conventionnels

Les systèmes de chauffage conventionnels au fioul et au gaz sont de moins en moins capables de s'adapter à la faible consommation énergétique d'une maison à basse consommation d'énergie ou d'une maison passive. Certes, les installations de chauffage à basse température correspondent au dernier niveau technique, mais elles ne sont tout de même pas à la hauteur des nouvelles alternatives, n'étant pas adaptées aux faibles besoins énergétiques d'une maison de ce type. En règle générale, même les chaudières à gaz à condensation sont surdimensionnées, leur niveau de

réglage minimum (6 à 9 kW) dépassant le besoin maximum d'une maison (pour 130 m² env. 4,5 kW). En effet, la consommation énergétique d'une maison passive particulière de la même taille est d'env. 2 kW. La périphérie du système constitue un problème supplémentaire, car il faut toujours utiliser des radiateurs et des éléments de chauffage conventionnels, l'installation étant plus coûteuse. Par conséquent, il faut bien évaluer la rentabilité des systèmes conventionnels.

En effet, il y a des chaudières à gaz à condensation plus petites qui, pourtant, n'ont pas la performance nécessaire pour couvrir le grand besoin en eau chaude sanitaire. Les chiffres mentionnés ci-dessus montrent un excédant dans la production d'électricité si l'on chauffe la maison passive avec des systèmes conventionnels.

Récapitulons : Une installation basse température travaille avec une puissance thermique fixe de 20 kW, le besoin effectif d'une maison étant de 3 kW. Cependant, une performance si faible peut être produite en phases cycliques. Il s'agit de systèmes modulaires complémentaires, c'est-à-dire qu'il faut éteindre la chaudière une fois l'électricité nécessaire produite et la rallumer quand elle tombe à la température minimale. Entre ces deux températures, la chaudière fonctionne à la température moyenne de 38°C, ceci étant nettement supérieur à la température nécessaire pour chauffer la maison. En effet, les déperditions thermiques occasionnent un rendement annuel de 30 % plus faible que prévu.

La chaudière moderne est une bonne alternative. Étant donné qu'une chaudière produit seulement la quantité d'énergie nécessaire, sa performance peut s'adapter parfaitement au besoin énergétique. En ce qui concerne le chauffage, la chaudière moderne travaille avec une performance minimale, la production d'eau chaude sanitaire par exemple exigeant la meilleure performance. Cependant, la plupart des chaudières présentent une performance minimale de 6 à 9 kW. En effet, la chaudière à condensation augmente ainsi l'efficacité de l'installation de chauffage, mais elle ne peut pas s'adapter de manière optimale au faible besoin énergétique d'une maison à (ultra) basse consommation et à la maison passive.

3.4.8 Accumulateur solaire stratifié avec chaudière à basse consommation énergétique

SolvisMax est une petite chaudière modulaire complémentaire qui se compose d'un accumulateur solaire stratifié, d'une chaudière à condensation (gaz ou fioul), et d'un système d'eau d'appoint anti-légionnellose.

Dans ce système optimal, l'installation solaire est un composant indispensable pour l'installation de chauffage. Il produit assez d'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le chauffage, avec une chambre de combustion montée directement dans l'accumulateur. En effet, la chaudière au fioul à elle seule atteint un rendement de 97 %.

Le système « low flow » : Les installations solaires se sont fortement développées ces dernières années, avec par exemple le système « low flow ». Ce système décrit la circulation du caloporteur dans un chauffe-eau solaire quand le débit du circuit primaire est diminué par le circulateur en fonction de la différence de température entre les capteurs et le ballon de stockage. Les systèmes « low flow » permettent de réduire les coûts en donnant la possibilité d'utiliser des conduits souples en matériau synthétique de faible diamètre et sont d'une installation simple.

L'échangeur thermique solaire spécialement développé pour le système « low-flow » permet d'améliorer la stratification thermique en utilisant un ballon de stockage de type double enveloppe avec injection du fluide du capteur à plusieurs niveaux. L'énergie solaire ainsi stockée peut approvisionner le chauffage en énergie pendant la période de transition et en hiver.



fig. 3-22 Système combiné de « SolvisMax »

Système	Gaz	Fioul
Puissance thermique	5–20 kW	16–20 kW
Rendement	105,7–108,8 %	96,8–97,1 %

Volume de l'accumulateur : 350 à 1450 litres

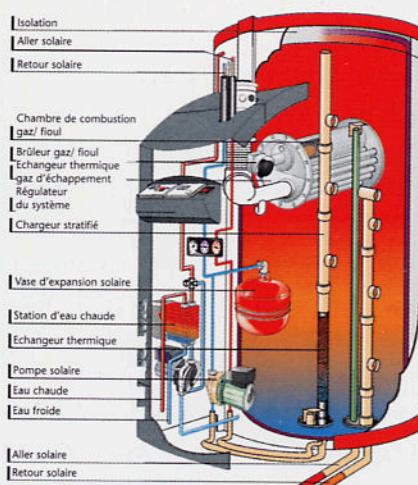


fig. 3-23 Coupe d'une chaudière « SolvisMax »

3.4.9 Accumulateur à chaleur latente

Le chauffe-eau solaire est d'ores et déjà bien répandu et subventionné par des programmes d'aide à l'investissement. Cependant, l'exploitation du rayonnement solaire pour le chauffage domestique est beaucoup moins courante, car les installations solaires conventionnelles nécessitent une surface de capteurs solaires très grande. Avec la construction de maisons passives modernes, cela a changé fondamentalement.

Dorénavant, une surface de 66 m² peut être chauffée avec une puissance de 3 kW/h jusqu'à des températures extérieures de -16°C. Pour assurer l'énergie solaire même pendant la période la plus froide de l'année, il est judicieux d'utiliser des capteurs solaires à tube sous vide. Grâce à une technique de construction spécifique, ceux-ci garantissent une puissance thermique très élevée même en hiver. Un système solaire, combiné avec un chauffe-eau ayant des possibilités d'extension, devrait en plus intégrer un poêle en faïence, une pompe à chaleur, etc. Le système doit pouvoir utiliser le minimum de quantités énergétiques, puis stocker l'énergie excédentaire et libérer de la chaleur en cas de besoin.

Pour de telles exigences, l'entreprise IVT a développé un accumulateur à chaleur latente (Latento). Les conduits en tubes plastiques ont une conductivité plus faible que les tubes en métal et permettent ainsi une accumulation optimale de la chaleur; celle-ci ne pouvant être perturbée par des déperditions thermiques à travers l'enveloppe du réservoir, ni par des tourbillonnements dans l'eau accumulée. La disposition des grands échangeurs thermiques à tubes à ailettes est très performante et permet un chargement rapide et un très bon résultat au niveau de l'absorption des énergies solaires entre env. 40°C à 95°C. Le matériau de stockage situé dans l'eau accumulée augmente la capacité d'accumulation jusqu'à 55°C. Les déperditions thermiques de 1,4 W/K sont minimales. Le système permet une gestion efficace de l'énergie, l'accumulateur étant décisif pour le rendement du système et non pas les générateurs d'énergie.

3.4.10 Systèmes combinés avec accumulateurs à chaleur latente

Ce système minimise les pertes de chaleur et forme la base d'une expansion rapide et facile de sources énergétiques du système de chauffage. Comme nous l'avons déjà vu, les déperditions thermiques les plus importantes du système de chauffage sont occasionnées par l'approvisionnement énergétique en phases cycliques de l'installation de chaudière. Pour homogénéiser la haute performance de la chaudière et le faible besoin énergétique d'une maison moderne, l'énergie produite est stockée temporairement (en minimisant les pertes de chaleur) pour ensuite pouvoir être utilisée selon les besoins pour la douche, les radiateurs, etc. On peut ainsi renoncer au déclenchement périodique de la chaudière. Jusqu'à présent, les accumulateurs conventionnels ne pouvaient pas intégrer de manière efficace des systèmes de chauffage à

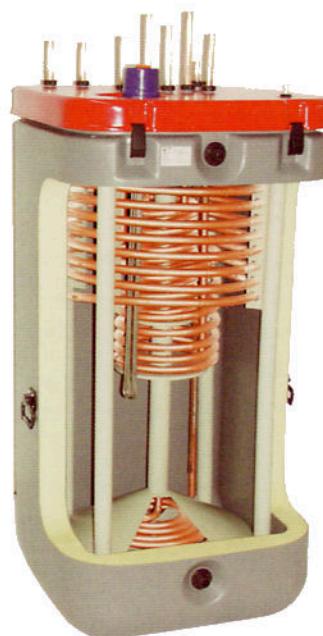


fig. 3-24 Coupe d'un accumulateur à chaleur latente

faible puissance thermique, ils servaient uniquement pour l'approvisionnement additionnel en eau chaude sanitaire. Dans la plupart des systèmes additionnels, de petites quantités d'énergie se perdent dans l'accumulateur ou dans des connexions en cascade peu efficaces.

Dans notre exemple, la chaudière fonctionne à température normale et non pas à basse température, préchauffant l'accumulateur à la température souhaité. Une chaudière à mazout avec une puissance thermique de 25 KW nécessite env. 1 heure de préchauffage (avec un débit de 500 litres et un écart de température de 40°C). Étant donné que la chaudière travaille à pleine puissance pendant une heure, il en résulte un rendement énorme et les avantages suivants :

- déclenchement périodique minimal et faibles pertes de chaleur
- pleine puissance pendant l'activité de l'appareil
- faibles pertes de chaleur grâce à une isolation thermique optimale (1,4 W/h)
- régulation facile de l'appareil grâce au temps minimal de commutation
- haute efficacité, car l'appareil fournit seulement la quantité nécessaire de chaleur
- pendant l'arrêt, il n'y a pas de consommation d'électricité ni de combustible.

La chaudière est complètement débranchée du système. Après avoir atteint la température d'accumulation, l'installation s'éteint pendant plusieurs heures sans maintenir la température de base.

La température maximale de 95°C est due à une absorption d'énergie solaire beaucoup plus importante que dans autres systèmes solaires combinés avec un chauffe-eau, la température de l'accumulateur étant au moins supérieure à 30°C. En ajoutant 20 kg de granulés (ayant une meilleure capacité thermique que l'eau), la capacité thermique peut être augmentée. Par conséquent, pendant les périodes avec un rayonnement solaire fort, le système accumule l'énergie excédentaire et gratuite. Il n'y a pas de risques de

calcification grâce au principe de chauffe-eau instantané. Même les petites quantités énergétiques (à partir de 40°C) peuvent être exploitées, sans déperdition.

Vue d'ensemble du système : L'énergie produite par la combustion de gaz, de fioul et de combustible solide est absorbée quasiment sans perte et entrestockée dans l'accumulateur du système. L'efficacité s'améliore grâce à une commande spéciale qui permet un écart de température pouvant aller jusqu'à 50°C. Le générateur d'énergie est alors enlevé du système. Par conséquent, l'énergie accumulée dans le système de tampon (voir fig. 3.25) est répartie en quantité nécessaire pour l'utilisateur.

Exemple : La température extérieure étant de 0°C avec un besoin énergétique de 2,88 KW, l'installation serait en marche toutes les sept heures pendant une heure. Entre temps, la chaudière ne consommerait ni électricité ni combustible. Les sources énergétiques alternatives sont raisonnablement intégrées dans le système de chauffage, celui-ci choisissant la source la plus appropriée.

3.5 Systèmes compacts ventilation/chauffage

Pour soupeser le pour et le contre d'un système de chauffage, il faut bien analyser la combinaison des différents éléments. Un système de ventilation contrôlée à double flux avec échangeur thermique peut couvrir une grande partie du besoin en énergie thermique. La chaleur de l'air vicié est alors récupérée et réutilisée pour le chauffage du bâtiment. Si l'on veut en plus chauffer l'eau chaude sanitaire, il est raisonnable d'installer une pompe à chaleur solaire, le système de ventilation contrôlée n'étant pas suffisant. En effet, le système consiste en plusieurs échangeurs de chaleur travaillant ensemble de manière efficace.

Système compact « Effizienzo » : Grâce à ce système avec échangeur à contre-courant et pompe à chaleur, les grandes maisons à faible consommation énergétique ainsi que les maisons passives avec une surface allant jusqu'à 300 m² peuvent s'approvisionner en énergie. Le système se compose de trois éléments :

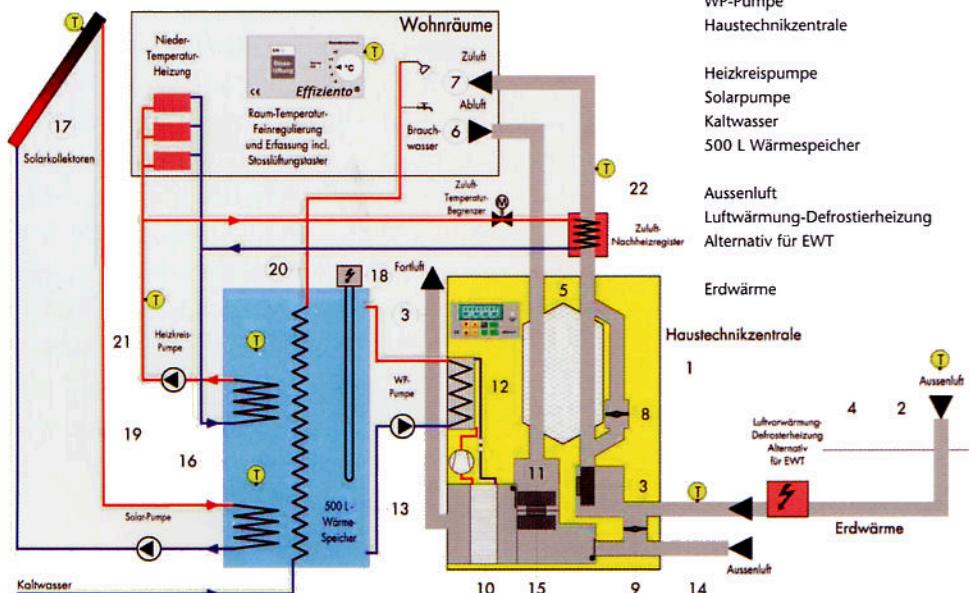


fig. 3-25 schéma d'installation du système « Effizienzo »

Module de ventilation : L'installation technique des bâtiments « Effizienzo » (1) alimente le bâtiment en air frais et expulse l'air vicié. Grâce à un piquage pour l'arrivée d'air neuf (2) et à l'aide d'un ventilateur centrifuge (3), l'air frais est expulsé par un puits provençal (4). Cet échangeur géothermique assure le réchauffement de l'air frais en hiver et le refroidissement de l'air chaud en été. L'air frais (7) pénètre à l'intérieur du bâtiment par le canal d'arrivée d'air. En été, la valve de bypass (8) dans le canal d'arrivée d'air bypass est régulée en fonction de l'air frais conduit dans l'échangeur

Solarkollektoren	Capteurs solaires
Nieder-temperaturheizung	Chaudière à basse température
Raumtemperatur-Feinregelung und Erfassung incl. Stosslüftungstaster	Régulateur de température, captage et palpeur thermique
Wohnräume	Locaux d'habitation
Zuluft	Air frais
Abluft	Air vicié
Brauchwasser	Eau chaude sanitaire
Zuluft-Temperaturbegrenzer	Régulateur de température
Zuluft-Nachheizregister	Chauffage d'appoint
Fortluft	Air rejeté
WP-Pumpe	Pompe à chaleur
Haustechnikzentrale	Installations techniques du bâtiment
Heizkreispumpe	Pompe de chauffage
Solarpumpe	Pompe solaire
Kaltwasser	Eau froide
500 L Wärmespeicher	Accumulateur de chaleur (500 litres)
Aussenluft	Air frais
Luftwärmung-Defrostierheizung	Chauffage à air antigel pour échangeurs géothermiques
Alternativ für EWT	Géothermie
Erdwärme	
Haustechnikzentrale	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	

à contre-courant. Avec l'échangeur géothermique bypass (9), l'arrivée d'air peut être changée, l'air frais entrant directement par l'échangeur géothermique ou par le raccordement prise d'air extérieur. En effet, l'air extérieur est toujours aspiré à une bonne température.

La pompe à chaleur: L'air vicié est aspiré à travers l'évaporateur (10) (échangeur thermique air / liquide caloporteur) de la pompe à chaleur par le ventilateur centrifuge (11). La chaleur de l'air vicié est transmise depuis l'évaporateur au fluide caloporteur de la pompe à chaleur.

Pour assurer le besoin énergétique complet (pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire), c'est-à-dire l'utilisation de l'énergie supplémentaire à celle que contient l'air vicié, l'air extérieur (14) est aspiré directement et conduit à travers l'évaporateur. L'air extérieur transmet alors de la chaleur au fluide caloporteur de

la pompe à chaleur. Au cas où les moteurs de ventilateurs (15) ne seraient pas en service, ils aspireraient le débit-volume nécessaire à l'activité de la pompe à chaleur. Le débit-volume optimal serait alors conduit à travers l'évaporateur, assurant ainsi un rendement optimal de la pompe à chaleur pour chaque position de fonctionnement du système de ventilation.

L'accumulateur de chaleur : L'accumulateur de chaleur (16) est chauffé à l'aide d'une pompe à chaleur ou éventuellement par une installation solaire. Si l'énergie produite par la pompe à chaleur ou par l'installation solaire (17) ne suffit pas, on utilise en plus une chaudière électrique directe (18). L'énergie produite dans la pompe à chaleur est transmise au niveau du condensateur (12) (échangeur thermique air / liquide caloporteur) à l'eau accumulée (13). L'énergie produite dans l'installation solaire est amenée à travers le fluide caloporteur des capteurs solaires (19). La chaudière (20) transmet sa chaleur au point de puisage du bâtiment. L'énergie émise par le circuit d'eau chaude sanitaire (21) est transmise au registre d'aération (22) ou à la surface de chauffe statique du bâtiment.

Pour plus d'information: www.effizienzo.com

4 Le contrôle de qualité

Plus de 90 % des maisons individuelles en Allemagne sont construites par un constructeur/promoteur qui a pour objectif d'optimiser ses profits. Les familles, elles, ne participent pas à la conception ni à la construction de la maison, mais elles l'aménagent une fois les travaux terminés. L'idée de base d'une maison passive est d'optimiser la qualité de vie. Malheureusement, il est difficile aujourd'hui d'harmoniser les deux objectifs, les promoteurs agissant trop en fonction de leur intérêt. En tout état de cause, il manque un contrôle de qualité externe indépendant par un architecte expérimenté par exemple. Si l'on compare avec d'autres standards de construction, la réalisation d'une maison passive exige un effort supplémentaire pendant la phase de conception du projet. Le contrôle de qualité joue un rôle déterminant pour l'élaboration des plans de construction, la réalisation des calculs et l'exécution des travaux. Le projet de construction ne commence pas avec les travaux de construction, mais bien avant, c'est à dire pendant l'étude générale du projet. En premier lieu, on élabore un concept en tenant compte des particularités de ce type de maison. On peut difficilement se rattraper sur le chantier de construction si quelque chose a été oublié !

Pour réaliser une conception complète, les détails suivants sont particulièrement importants pour garantir une bonne qualité :

- l'enveloppe étanche
- la construction sans pont thermique
- l'étanchéité à l'air
- une ventilation mécanique contrôlée hautement efficace
- le contrôle de qualité

Les exigences découlent du positionnement, de la taille et de la forme du bâtiment, des habitants et de leurs habitudes.

4.1 La qualité d'une enveloppe étanche

L'idée principale de l'isolation est une enveloppe étanche du bâtiment qui tient compte des raccordements pouvant l'interrompre.

Dans le chapitre 1, on a développé l'un des critères les plus importants d'une maison passive. La consommation annuelle d'énergie de chauffage ne doit pas dépasser les 15 kWh/a par rapport à la surface habitable. En effet, le bien-être ne peut pas être garanti sans l'utilisation d'un système de chauffage centralisé si le besoin énergétique excède les 15 kWh/a. Une bonne isolation des fenêtres est particulièrement importante car celles-ci laissent pénétrer le rayonnement solaire qui participe au réchauffement du bâtiment. D'autre part, la plus grande partie de la chaleur se perd à travers les fenêtres, car d'un point de vue thermique, la fenêtre est le maillon faible de l'enveloppe du bâtiment. Par conséquent, il faut assurer le plus grand confort thermique par un haut standard d'isolation en réduisant les déperditions thermiques par transmission et en assurant un bon niveau d'étanchéité à l'air. La théorie semble facile ; cependant la conception de projets de construction (décrise dans le chapitre 2) et sa mise en pratique sans faille est très complexe. La qualité des matériaux, ainsi que celle des travaux à effectuer est une condition préalable à la construction d'une maison à faible consommation énergétique. Les plus grands problèmes d'isolation sont causés par les fenêtres, l'installation de cloisons et de faux-planchers, ainsi que l'isolation entre la maçonnerie externe et la toiture.

4.1.1 Construire sans pont thermique

À quoi sert une bonne isolation si les éléments de construction présentent partiellement des flux thermiques élevés causant des déperditions de chaleur et des dégâts de construction ?

Plus le règlement sur l'isolation d'une construction est strict, meilleure est la qualité de la construction sans pont thermique. Trop de ponts thermiques ont pour conséquence l'inefficacité d'une enveloppe thermique. À l'aide des couleurs sur la coupe du débord de toit ci-dessous on peut voir l'évolution de la température. La couleur correspond à la température, le rouge représentant la température la plus élevée et le bleu la moins élevée. Plus l'évolution est homogène et régulière, meilleure est la qualité de la construction quant à l'absence des ponts thermiques. La représentation graphique 4-2 (p. 80) représente la distribution thermique d'un détail du débord de toit. En considérant l'épaisseur de l'isolant du mur extérieur et du chaînage, on constate que l'isolation est bien réussie. Plus l'isolant de chaînage par rapport à l'isolation extérieure est épais, moins il y a de pont thermique et de déperdition de chaleur.

(tab. 4-1, p. 80 ; fig. 4-1 à 4-17)

4.1.2 Ponts thermiques et règles pour les éviter

Les ponts thermiques sont la conséquence d'une conductivité de chaleur différée des éléments de construction, tels que la paroi, le toit et le sol. Il y a plusieurs types de ponts thermiques (ex : linéaires et ponctuels). Les ponts thermiques ponctuels sont plutôt rares, autant dans la construction passive que dans la construction conventionnelle. Ils sont donc sans grande importance.

On différencie également les ponts thermiques dûs à des contraintes géométriques (angles et rebords) et ceux dûs au choix de matériaux, de percements et de branchements.

Alors qu'il est difficile d'éviter les ponts thermiques dûs aux contraintes géométriques, il est possible de réduire la conductivité thermique des matériaux. Les ponts thermiques dûs aux matériaux désignent, entre autres, les dalles du balcon, les raccordements de fenêtres, les appuis de dalle ainsi que les percements, les poteaux et les poutres métalliques. Les quatre règles suivantes permettent de réduire le risque de pont thermique :

I RÈGLE DE PRÉVENTION :

Dans la mesure du possible, ne pas interrompre l'enveloppe thermique ;

I RÈGLE DE PÉNÉTRATION :

Là où une interruption est inévitable, la résistance thermique dans le plan d'isolation doit être aussi haute que possible ;

I RÈGLE D'ARTICULATION :

Aux articulations entre les éléments du bâtiment, les couches d'isolation doivent se rejoindre sans interruption ni décalage ;

I RÈGLE DE GÉOMÉTRIE :

Préférer autant que possible les angles obtus ; les angles aigus favorisent en effet la dispersion de la chaleur.

4.1.3 Exigences en matière de pont thermique

Le coefficient de déperdition de chaleur Ψ (psi) est le calcul de base pour détecter un pont thermique. Il indique la quantité de chaleur en watt qui se propage à travers un matériau épais d'un 1 m, lorsque la différence de température entre les deux faces est de 1 K ($1\text{ K} = 1^\circ\text{C}$). λ tient compte seulement des ponts thermiques linéaires. Les ponts thermiques ponctuels sont négligeables et sont désignés par un χ .

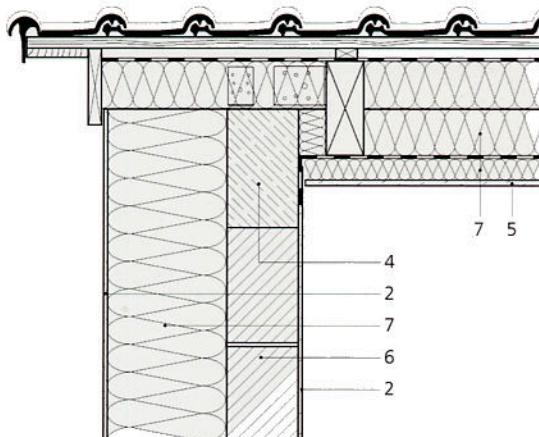


fig. 4-1 Détail : coupe verticale d'un débord de toit

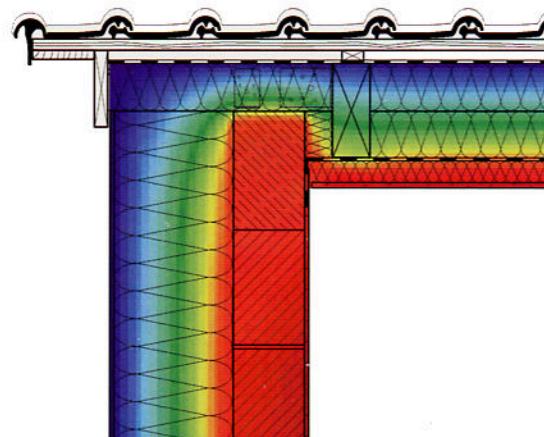


fig. 4-2 Flux thermiques : débord de toit

Les déperditions thermiques totales par transmission d'un bâtiment entier résultent du calcul suivant :

$$\frac{1}{k} = \sum \frac{e}{\lambda} + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad \text{ou} \quad \frac{1}{k} = \sum R + \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right)$$

Équation 4-1 Déperditions thermiques totales par transmission

U ou K Coefficient de transmission thermique ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$)

e/λ Représente la somme des rapports des différentes couches

e Épaisseur du ou de chaque matériau (m)

λ Conductivités thermiques utiles du ou de chaque matériau de construction ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)

1/h_i, 1/h_e Résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs et extérieurs ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)

R Résistance thermique du ou de chaque matériau ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)

T₁ Température intérieure du local chauffé ($^\circ\text{C}$)

T₂ Température extérieure ($^\circ\text{C}$)

T_{w1}, T_{w2} Température de contact sur la paroi à l'intérieur et à l'extérieur du local ($^\circ\text{C}$)

Une construction ne comporte pas de pont thermique si la valeur suivante est :

$$\Psi_a < 0,01 \text{ W/mK}$$

tab. 4-1 Matériaux de construction, fig. 4-1 à 4-17

Matériau de construction	Densité apparente [kg/m ³]	Conductivité thermique [W/mK]
1 Crépi synthétique armé	1100	0,7
2 Enduit plâtre	700	0,35
3 Chape	2000	1,4
4 Béton	2400	2,1
5 Plaque de plâtre cartonné	700	0,21
6 Maçonnerie en brique silico-calcaire	2000	0,99
7 Isolant	30	0,04
8 Sol		
9 Couche d'assise		0,33

Ψ_a est le coefficient de transmission thermique de la chaleur à travers une paroi en partant du principe que le calcul sur les déperditions de chaleur porte sur les murs extérieurs. Par conséquent, afin d'éviter les ponts thermiques, l'isolation extérieure est particulièrement importante. Dans certaines circonstances, les angles extérieurs isolés à l'aide d'un système d'assemblage étanche peuvent présenter un coefficient Ψ_a négatif, réduisant davantage les déperditions thermiques.

Les éléments de construction avec une longueur supérieure à 1 m² présentent des défaillances régulières qui doivent être prises en considération lorsque l'on

détermine le coefficient de transmission thermique U. Voici les exigences du EnEV 2002 quant aux ponts thermiques et au coefficient U :

ponts thermiques $\varnothing U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$:
approche globale

ponts thermiques $\varnothing U = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$:
conformément aux normes DIN 4108
(fiche technique 2)

En comparaison, le coefficient U, conforme au standard maison passive, est relativement faible.

$\varnothing U < 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$
(déperditions thermiques supplémentaires de l'enveloppe thermique par m^2)

$$\varnothing U = \sum (\Psi * L * F) / A$$

Ψ coefficient de déperdition thermique

L longueur de la liaison

F facteur de réduction

A enveloppe thermique

Le facteur de réduction prend en considération la situation des ponts thermiques. Pour les ponts thermiques extérieurs, on applique le facteur 1,0 ; pour ceux en souterrain, le facteur 0,5.

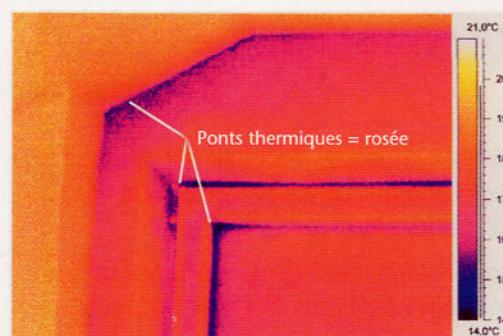


fig. 4-3 Thermographie d'un pont thermique

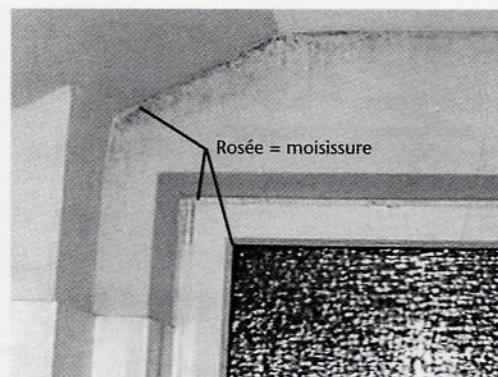


fig. 4-4 Formation de moisissures dans un angle de bâtiment

4.1.4 Conséquences en cas de formation de ponts thermiques dans l'enveloppe du bâtiment

La formation de ponts thermiques peut causer d'importantes pertes de chaleur ainsi que des dégâts dans une construction. Les ponts thermiques linéaires ou ponctuels sur les éléments de construction mal isolés provoquent de faibles températures de surface. Un taux d'humidité de l'air ambiant trop élevé peut occasionner des problèmes de condensation sur la paroi extérieure qui est bien plus froide que la température ambiante. Dans la représentation 4-3, les surfaces froides sont marquées en bleu.

Le problème de moisissure est encore plus important. Le risque de formation et de prolifération de spores de moisissure sur les zones humides est plus dangereux que la formation de condensation (voir la figure 4-4).

4.1.5 Détails pour la minimisation des ponts thermiques dans une maison passive

Pour éviter la formation d'humidité et de moisissure, il est indispensable de construire sans pont thermique, condition à prendre en considération dès la conception d'un projet de construction. Il existe de nombreux détails à respecter pour éviter les ponts thermiques. En réalité, le terme « pont thermique » est inapproprié car il nous invite à croire que le coefficient de déperdition thermique de tous les éléments est toujours inférieur à 0,01 W/mK.

- Avec une isolation extérieure de 300 mm, le coefficient de déperdition thermique est de $\Psi \sim 0,1$ W/mK, la conductivité thermique de la couche d'assise (béton cellulaire) de $\lambda = 0,33$ W/mK ; l'isolation intérieure de 250 mm.

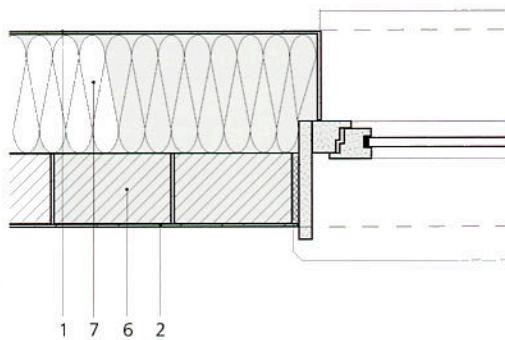


fig. 4-5 Détail de construction : coupe verticale d'un détail de fenêtre

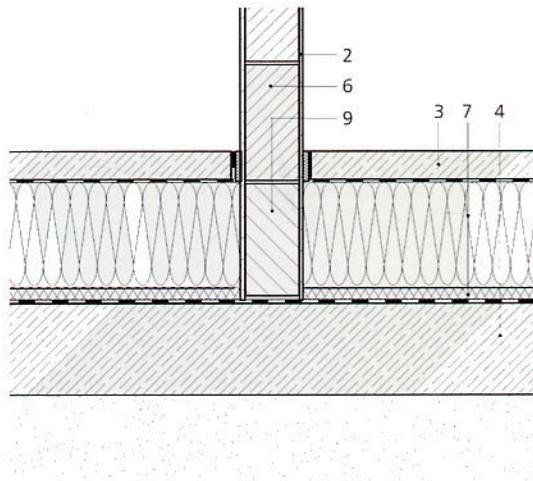


fig. 4-7 Détail de construction : coupe verticale de la liaison entre un plancher et une paroi intérieure

- Les fenêtres : le coefficient de déperdition thermique est de $\Psi \sim 0,1$ W/mK avec une isolation extérieure de 300 mm.
- Les briques silico-calcaires avec un coefficient de déperdition thermique de $\Psi \sim 0,059$ W/mK et la couche d'assise de $\lambda = 0,33$ W/mK
- L'avant-toit : le coefficient de déperdition thermique est de $\Psi \sim 0,052$ W/mK ; l'isolation extérieure de 300 mm ; 250 mm d'isolation de toiture
- Le débord du toit : le coefficient de déperdition thermique est de $\Psi \sim 0,003$ W/mK, l'isolation extérieure de 300 mm ; 250 mm d'isolation du toit, 100 mm de chaînage armé.

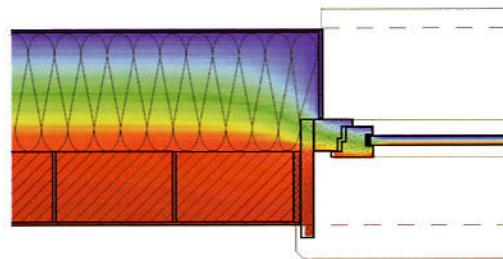


fig. 4-6 Flux thermique : détail de fenêtre

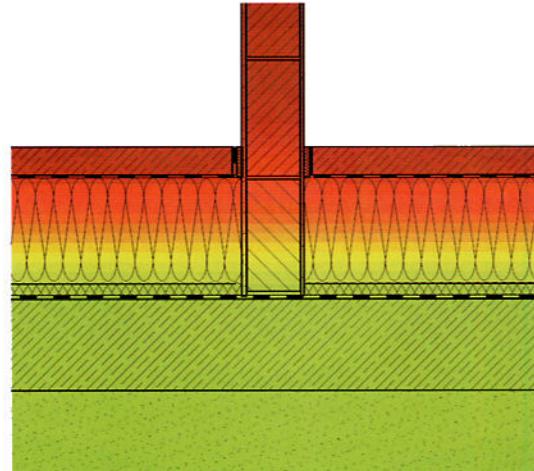


fig. 4-8 Flux thermique : liaison entre un plancher et une paroi intérieure

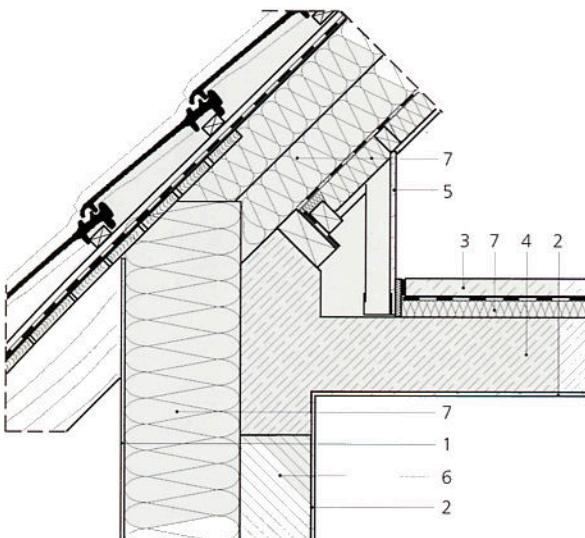


fig. 4-9 Détail de construction : coupe d'un avant-toit et d'un débord du toit (toit élevé)

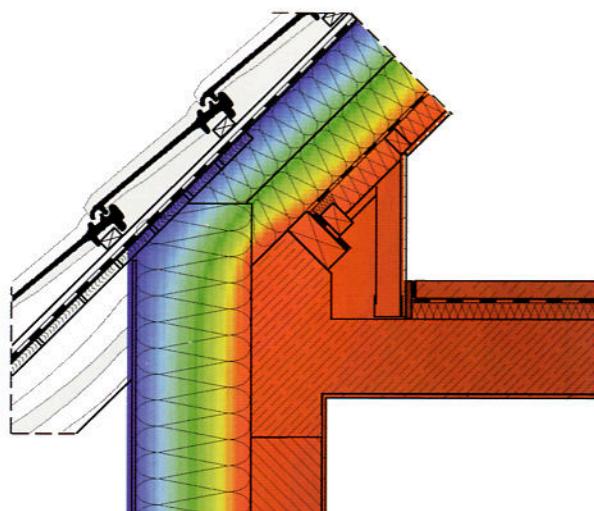


fig. 4-10 Flux thermique : coupe d'un avant-toit et d'un débord du toit (toit élevé)

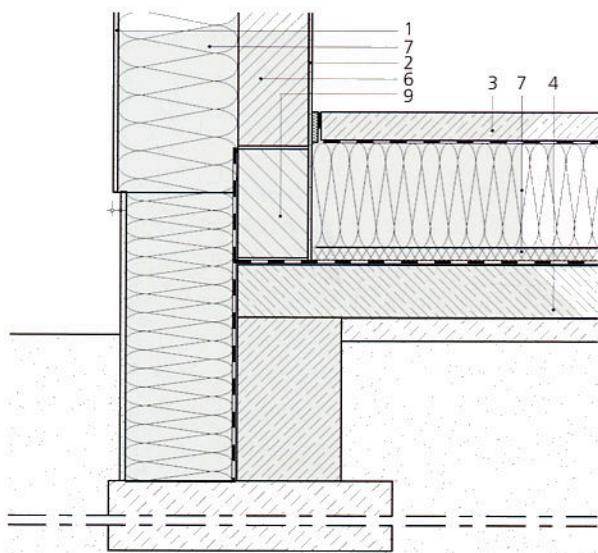


fig. 4-11 Détail de construction : coupe du fondement et du plancher isolé à l'intérieur

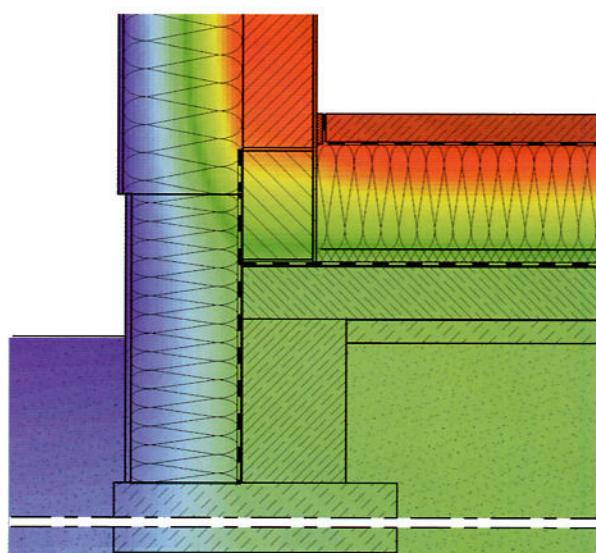


fig. 4-12 Flux thermique : coupe du fondement et du plancher isolé à l'intérieur

4.2 Étanchéité à l'air

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment est une condition préalable du standard maison passive. Jusqu'à présent, la consommation annuelle d'énergie était très élevée à cause des déperditions thermiques des éléments de construction (déperditions de chaleur par transmission). Les déperditions de chaleur par ventilation à travers les fenêtres et les jointures étaient plutôt insignifiantes par rapport à la consommation excessive d'énergie. Grâce aux nouveaux matériaux de construction qui ont une conductivité thermique plus faible, ces déperditions thermiques diminuent énormément. Une maison à basse consommation énergétique ne consomme plus qu'un quart de ce que consomment les immeubles anciens en terme de chauffage. En effet, la maison passive consomme seulement un 16^{ème} par rapport aux immeubles anciens ayant un besoin annuel en chauffage de 250 kWh/m²a. Si les déperditions thermiques par transmission diminuent de la même façon, les déperditions thermiques par ventilation augmentent. Si le taux d'étanchéité d'un bâtiment est constant, les déperditions thermiques par ventilation augmentent par rapport aux déperditions thermiques par transmission.

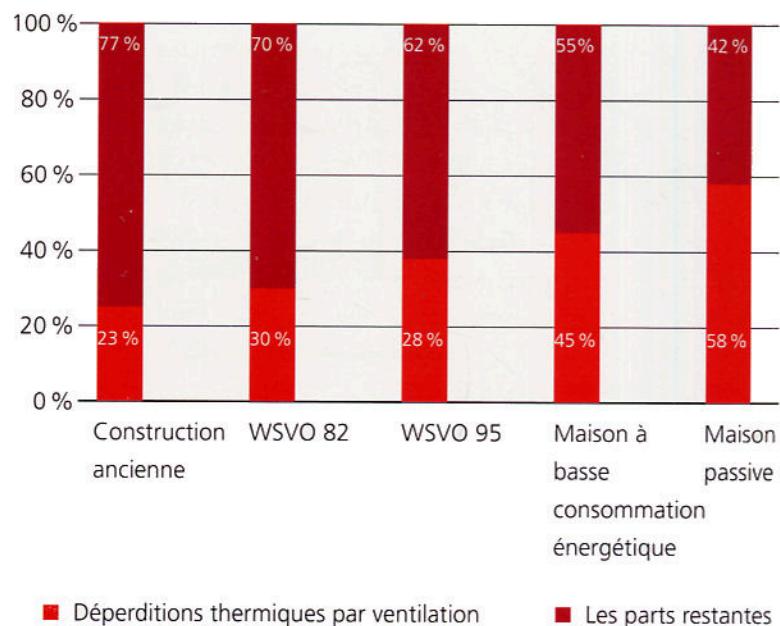
La figure 4-13 montre une augmentation presque linéaire des déperditions thermiques par ventilation (réglementation relative à la performance énergétique des logements).

Dans une maison passive, la part des déperditions par ventilation est relativement élevée malgré la minimisation des fuites et la ventilation mécanique contrôlée adaptée aux besoins spécifiques.

4.2.1 Causes et conséquences d'une isolation inappropriate

Une cause supplémentaire qui favorise la formation de ponts thermiques est l'effet des flux thermiques sur l'enveloppe du bâtiment. Il est impossible de ramener

fig. 4-13 L'évolution des déperditions thermiques par ventilation selon le règlement sur l'isolation thermique (WSVO) 1995 en %



à température ambiante l'air extérieur froid qui pénètre constamment à l'intérieur des éléments de construction (infiltration). De plus, il est possible que l'air intérieur chaud fuit vers l'extérieur, toute la quantité ne pouvant être remplacée. La totalité des déperditions de chaleur ventilée se calcule par rapport aux joints dans l'enveloppe et à l'aération, c'est-à-dire la ventilation par ouverture des fenêtres et les pertes par le système de ventilation.

Dans une maison passive avec ventilation mécanique contrôlée à double flux, les fentes peuvent occasionner un court-circuit dans la ventilation, tout écart de pression générant un courant d'air. Ce courant d'air gêne la pression artificielle du système de ventilation. Un court-circuit est donc la conséquence de fentes dans l'enveloppe de la pièce chauffée qui laissent entrer de l'air frais, ce qui trouble l'équilibre de la ventilation. La conséquence d'un tel trouble est l'in-

efficacité partielle ou totale (selon le coefficient de transmission thermique) de l'installation de ventilation.

Même si le système dispose d'un échangeur thermique, celui-ci ne peut pas assurer totalement la récupération de chaleur car l'air intérieur fuit en trop grande quantité à travers les fentes.

La situation empire quand les éléments extérieurs ne disposent pas de auvents ou que ceux-ci engendrent une inefficacité thermique. Il en résulte un flux d'isolants poreux et une augmentation du coefficient de transmission thermique. Même les toutes petites fentes dans le joint d'étanchéité à l'air multiplient le coefficient U.

Une conséquence néfaste de ces pertes de chaleur par convection est la formation d'humidité quand l'air intérieur chaud refroidit en traversant l'isolation.

Plus il y a de fentes, plus le bien-être et le confort dans la maison diminuent : quand une masse d'air froid entre dans un bâtiment, la masse volumique de l'air humide est plus élevée, ce qui provoque un courant d'air au dessus du sol.

Le taux d'humidité de l'air froid est plus faible que celui de l'air chaud. Par conséquent, quand les masses volumiques pénètrent à l'intérieur d'un bâtiment, l'air froid est asséché par l'air chaud. Le taux d'humidité de l'air intérieur est alors faible et extrêmement désagréable. Pour créer une température ambiante agréable (20°C), le taux d'humidité doit être compris entre 40 et 60 % (la température étant de 20°C). Les bâtiments mal isolés présentent un taux d'humidité relatif de 30 %.

Le moindre défaut d'étanchéité entraîne la pénétration de moisissures, de particules, de poussières et de mauvaises odeurs. Quand il fait chaud, des masses d'air chaud entrent par les fentes de l'enveloppe du bâtiment, ce qui diminue la protection contre la chaleur. De plus, les fentes dans l'enveloppe occasionnent la pénétration des nuisances sonores, ce qui affecte la qualité de vie de l'habitant.

4.2.2 Exigences en matière d'étanchéité à l'air

Pour éviter les pertes de chaleur, il est indispensable de construire une enveloppe étanche. Le EnEV 2002 requiert, pour les bâtiments avec une ventilation mécanique contrôlée, un taux de ventilation de $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}$, la différence de pression étant de 50 Pa. Pour la maison passive, on vise des valeurs de $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}$.

Une étanchéité à l'air performante exige une conception à grande échelle et la prise en considération minutieuse des détails de construction. Déjà pendant la phase de conception, il faut choisir les matériaux et définir les détails de connexion. Pour éviter la formation de vapeur et en même temps garantir l'étanchéité à l'air, il faut appliquer une couche isolante. Il faut alors s'assurer que les éléments sont installés devant la couche isolante. Il ne faut pas interrompre l'isolation thermique dans la mesure du possible. Voir les détails dans le chapitre 2 "Enveloppe du bâtiment".

Il est important de sensibiliser les ouvriers à cette problématique, c'est-à-dire de leur faire comprendre l'importance de leur travail pour la bonne qualité du résultat final. Une bonne fixation du ruban adhésif garantit un fonctionnement à long terme.

4.2.3 Le test « blower-door » pour mesurer l'étanchéité à l'air

Le test simple et efficace « Blower-Door ». (pressurisation du bâtiment) permet de mesurer l'étanchéité à l'air des bâtiments (fig. 4-14).

Un ventilateur réglable est calé de façon hermétique dans une ouverture du bâtiment et crée une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, toutes les portes et fenêtres étant fermées. L'air

qui s'échappe alors par les trous dans l'enveloppe du bâtiment est constamment aspiré par le Blower-Door. Le rapport entre le débit d'air, établi à une différence de pression de 50 Pascal (calculé par interpolation des mesures), et le volume de la pièce, donne l'indice de renouvellement de l'air n_{50} . Cette valeur correspond au nombre de renouvellement total du volume d'air de la pièce en une heure, pour une différence de pression de 50 Pa. 50 Pa correspond à une colonne d'eau de 5 mm ou encore à une vitesse relative du vent de 9,1 m/s.

Le meilleur moment pour faire ce test dépend de l'avancement des travaux de la construction neuve. Il convient de le faire quand tous les éléments qui ont une influence sur l'étanchéité sont mis en place. Il est préférable de faire le test avant de poser le revêtement intérieur afin de pouvoir isoler les éventuelles fuites. Pour faire le test "Blower-Door", les conditions suivantes doivent être réunies :

- l'enduit intérieur est complètement appliqué,
- la chape est terminée,
- les plaques de plâtre cartonné et le lambrisage ne sont pas encore installés,
- les volets roulants ne sont pas complètement installés,
- les fenêtres et portes sont complètement installées et isolées,
- les matériaux de construction et raccordements sont installés,
- les barrières contre la vapeur sont fixées et isolées,
- la lucarne et d'autres ouvertures sont installées,
- les colliers de passage des tuyaux sont isolés,
- les ajours entre deux pièces sont provisoirement isolés.

Pour plus d'info :

www.Blower-Door-Messungen.de

Plusieurs techniques permettent de détecter les fuites dans l'enveloppe du bâtiment, par exemple la thermographie infrarouge ou encore la fumée artificielle et inoffensive qui s'infiltra aux endroits perméables.



fig. 4-14 Test Blower-Door en état d'installation

4.2.4 Détection de fuites et mesure des fuites

Il existe plusieurs techniques pour détecter les fuites. La plus simple, une fois le « Blower-Door » installé, est de tâter les murs extérieurs et intérieurs avec la main. En règle générale, cette technique est suffisante pour détecter les fuites. Si l'on veut visualiser les flux thermiques, on applique ou injecte du brouillard artificiel à l'intérieur du bâtiment. Depuis l'extérieur, on peut alors observer à quels endroits le brouillard s'échappe du bâtiment. La mesure quantitative se fait avec un thermo-anémomètre (fig. 4-15).

Sur l'image, on a détecté un flux thermique à travers la prise électrique. Ensuite on a mesuré la vitesse du courant d'air à l'aide d'un thermo-anémomètre.

Une autre méthode efficace pour la détection de fuites est la thermographie infrarouge. Elle visualise les ponts thermiques représentés sur l'image par une couleur sombre. Sur l'image on voit une chaudière à

gaz installée à la cave. On mesure des flux de courant d'air très élevés au niveau des installations des tuyaux. La mauvaise isolation des colliers de passage pour tuyau occasionne la fuite incontrôlée d'air chaud. Au second plan on voit, d'une part l'angle de la maison qui occasionne un pont thermique géométrique et, d'autre part, la fenêtre et des ponts thermiques dûs au matériaux.



fig. 4-15 Mesure des fuites sur la prise électrique

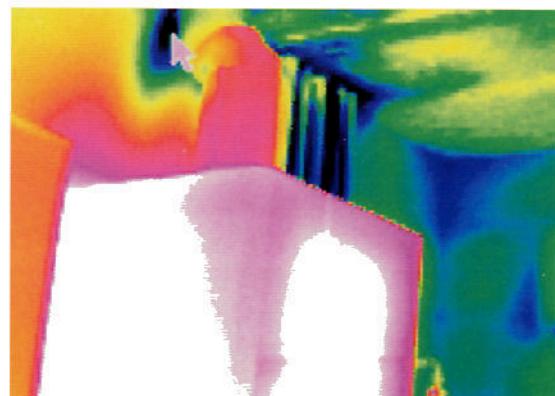


fig. 4-16 Photo thermographique d'une chaudière à condensation gaz

4.3 Un système de ventilation hautement efficace

Nous avons déjà évoqué la ventilation. Le degré d'efficacité dépend des paramètres d'étanchéité à l'air et de l'isolation des systèmes. De plus, il faut adapter le renouvellement d'air au contexte de la maison si c'est nécessaire.

Une installation réagit aux changements de ces paramètres de manière extrêmement sensible. Ainsi, un ventilateur à double flux d'une connexion d'un mètre peut diminuer le rendement du système de récupération de chaleur de plus de 10 %. Par conséquent, il se peut que le besoin annuel en énergie de 15 kWh/m²a soit dépassé.

Le renouvellement de l'air du système de ventilation doit être parfaitement adapté au logement. Si le taux de renouvellement d'air est trop élevé, la quantité de chaleur requise ne pourra pas être récupérée. Dans ce contexte, il faut souligner l'importance d'une installation modulaire bien dimensionnée pouvant réagir aux changements (les flux volumiques ne doivent ni être trop importants ni trop faibles). Par conséquent, une maison passive doit disposer d'une ventilation contrôlée qui détermine le dimensionnement de l'installation et des tuyauteries en se basant sur les flux volumiques. Un taux trop élevé du renouvellement d'air peut occasionner une émission de CO₂ et un taux d'humidité excessifs, diminuant fortement le confort.

Comme déjà expliqué, l'étanchéité à l'air et le taux requis de la récupération de chaleur ne peuvent pas être atteints si, par endroits, l'air froid entre à l'intérieur sans passer par l'échangeur thermique. Le contrôle mural est à installer dans un endroit bien accessible, tel que la cuisine ou la salle de séjour. On peut ainsi réguler le renouvellement de l'air selon la charge, c'est-à-dire le nombre de personnes et l'utilisation de la pièce. Normalement on utilise l'aération de base lors d'une période d'absence (ex. vacances) et

l'aération maximale en cas de présence d'un grand nombre de personnes. Lors de l'installation du système de ventilation, il est particulièrement important que son bon fonctionnement soit contrôlé. De plus, la ventilation doit être réglée une première fois par le fournisseur et son réglage doit être bien expliqué aux usagers.

4.4 Réalisation et historique du projet

4.4.1 L'étude générale du projet

Les plans d'exécution doivent être mesurés et notés correctement ; ils doivent indiquer la conductivité thermique et la résistance à la pression des éléments et des matériaux de construction (voir tab. 4-1).

Les plans de ventilation s'établissent parallèlement pour éviter la formation de fentes et de ponts thermiques.

Il faut également spécifier l'application de membranes imperméables telles que les films pare-vapeur (voir chapitre 2 "l'enveloppe du bâtiment").

Le déroulement des travaux et les échéances sont à respecter pour éviter que les différents travaux ne coïncident, ce qui entraînerait le cas échéant une isolation ou des raccordements négligés ou mal effectués.

Les travaux doivent correspondre exactement à ce qui a été convenu pendant l'étude générale du projet. Au tout début de la conception d'un projet, il faut établir des calculs et un bilan énergétique à l'aide du logiciel PHPP. Puisque le logiciel réagit de façon extrêmement sensible aux changements des paramètres, ces calculs doivent être identiques lors de la construction pour atteindre une consommation énergétique maximale de 15 kWh/m²a. En effet, il peut y avoir des divergences entre le maître d'œuvre et l'ingénieur B.T.P., ce dernier exigeant toujours une plus grande résistance à la pression. Ces problématiques doivent être analysées et résolues au préalable. Après l'étude générale, les plans sont munis de spécifications conformes.

Beaucoup de problèmes surgissent lors de l'exécution car certains points ne peuvent pas se visualiser en trois dimensions sur les plans. Même dans une représentation en trois dimensions, les différents travaux peuvent se superposer, empêchant ainsi la bonne identification de tous les détails. Par conséquent, en plus des plans détaillés, les discussions entre ingénieurs spé-

cialisés et ouvriers du bâtiment sont particulièrement importantes. Il faut sensibiliser ceux-ci à la problématique, car toutes les techniques et les installations mentionnées dans le plan ne sont pas forcément évidentes pour eux. D'autre part, le contrôle de qualité (ex : test Blower-Door) effectué par un urbaniste indépendant, est indispensable. Le moment approprié pour faire le contrôle de qualité est par exemple celui qui précède la construction, les éventuelles modifications étant moins chères que des réparations à effectuer après la livraison ou lorsque les aménagements sont déjà faits.

4.4.2 Les fondations

La première phase de construction est la fondation du bâtiment. C'est le moment de la pose des fondements et du radier en béton. Le risque de commettre les premières erreurs est présent dès cette étape.

La représentation 4-11 montre un détail de fondement d'un mur porteur. Lors de la construction, les détails suivants sont à respecter :

- Au niveau des socles, on applique une isolation périphérique hydrofuge qui est appliquée sur le coffrage du radier.
- La première couche de la maçonnerie est la couche d'assise qui présente une conductivité thermique plus faible par rapport au reste de la maçonnerie. Cette couche doit avoir la même épaisseur que celle de l'isolation intérieure.
- Le radier en béton est isolé avec un isolant thermique d'une épaisseur de 22 à 24 cm.
- Pour garantir l'étanchéité l'air, l'enduit intérieur étanche est appliqué sur toute la surface jusqu'au radier.
- Il ne faut pas oublier que le plancher est plus haut après avoir appliqué l'isolant. Par conséquent, il se peut qu'il n'atteigne pas la hauteur requise de 2,75 m. La même problématique est à considérer en posant les escaliers.

Dans la construction de murs intérieurs porteurs, l'étanchéité est indispensable. Par conséquent, on applique, soit une couche d'assise ou alors on la remplace par un isolant périphérique posé au-dessous du plancher. Cependant, cet isolant est plus cher par rapport aux panneaux isolants conventionnels qui présentent une forte résistance à la pression.

4.4.3 Les murs porteurs

Dans un immeuble à plusieurs étages, les murs porteurs sont interrompus par les plafonds des étages. Ici, le problème ne vient pas des ponts thermiques, l'isolation extérieure étant appliquée sans interruption.

- L'enduit extérieur que l'on applique sur l'isolant doit être étanche pour éviter qu'il ne soit traversé par le vent. Un échange thermique diminuerait fortement sa propriété d'isolation (échange thermique par convection).
- L'enduit étanche du mur doit se raccorder aux plafonds en béton armé de manière à ce que la couche étanche ne soit pas interrompue.

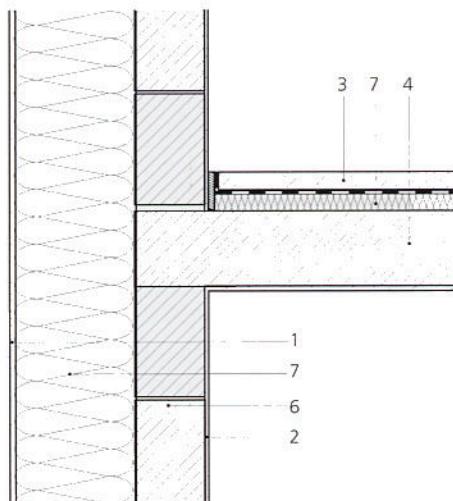


fig. 4-17 Coupe du mur extérieur - dispositif d'appui en béton armé

4.4.4 Débord de toiture

Il est important d'appliquer l'isolant extérieur jusqu'au bord supérieur du chevron du toit pour qu'il n'y ait pas de fente dans l'isolation du toit. Le raccordement étanche se fait entre la charpente en béton armé et la sablière, ainsi qu'entre la sablière et le film de protection du toit élevé. Le radier doit également être isolé avec un enduit d'étanchéité. Le deuxième niveau isolant du côté intérieur sert de surface d'installation. Le niveau étanche se trouve entre les couches isolantes.

- Appliquer l'isolant sur les angles sans faire de joints.
- Fixer le auvent sur le chevron.
- Réaliser un raccordement étanche entre le radier et les dalles de béton.
- Prévoir une surface d'installation. Cette surface est remplie d'un isolant et détachée hermétiquement par un pare-vapeur.
- Isoler le couronnement (chaînage en béton armé) de façon à former une enveloppe.
- Poser le chevron du mur extérieur dans la mesure du possible à l'intérieur et isoler les espaces.
- Le auvent dépasse fortement du mur extérieur pour empêcher une aération.
- Poser l'isolation sans joint.

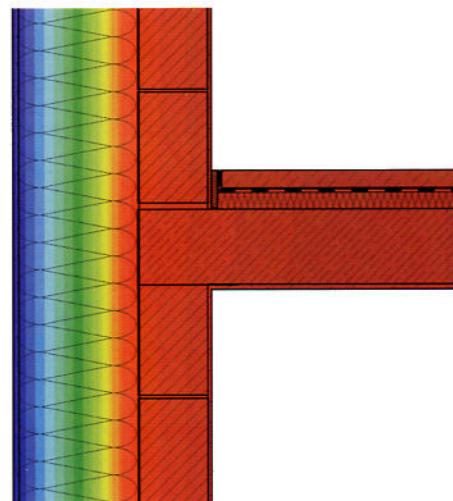


fig. 4-18 Flux thermiques du mur extérieur - dispositif d'appui en béton armé

4.4.5 Châssis de fenêtre

L'installation parfaite des fenêtres est prépondérante dans la construction d'une maison passive. Il est conseillé d'isoler particulièrement bien le châssis de fenêtre. Le châssis représente un point faible dans un bâtiment, occasionnant des pertes de chaleur importantes. Contrairement à la fenêtre, le châssis ne contribue pas aux apports de chaleur solaire. Par conséquent, les points suivants sont à considérer :

- une bonne isolation,
- l'installation des vitres dans l'isolation du châssis,
- l'enduit d'étanchéité doit s'appliquer en couche régulière et sans épafrure sur la surface entière de la maçonnerie,
- assurer des raccordements étanches entre le châssis et l'enduit intérieur.

L'isolation du châssis de fenêtre provoque des ponts thermiques négatifs car l'isolation est plus performante que ce que l'on a estimé auparavant.

Dans la construction massive, l'installation de fenêtres est problématique, les isolants présentant une adhérence insuffisante sur les surfaces râpeuses. De ce fait, on applique une sous couche d'un enduit universel pour reboucher et lisser les zones inégales. Il faut également tenir compte des zones qui ne sont pas à enduire (pièces métalliques de la fenêtre).

4.4.6 Enduit intérieur, chape, film de protection : installation et isolation thermique

Systèmes d'isolation thermique : Le mastic d'étanchéité est appliqué sur la surface totale des panneaux rigides en polystyrène expansé du système d'isolation thermique. Ainsi, chaque panneau est isolé, ce qui empêche l'aération arrière. Ensuite on remplit les joints à l'aide d'une colle spéciale. Ne pas utiliser de mortier ! Si l'on utilise la laine de roche comme isolant, il est important de s'assurer de l'absence de joint, car à cause de l'écoulement rotationnel de l'air, le coefficient d'isolation est nul. En cas de recours à l'isolation thermique par injection, il faut toujours contrôler le remplissage.

L'enduit intérieur : Comme l'enduit intérieur a une fonction d'étanchéité, il doit s'appliquer sur la surface entière et sans joint. Toute la surface, c'est-à-dire du bord supérieur du plancher en béton armé jusqu'à la face inférieure du plafond, est à enduire. Même si l'on encastre des installations dans les murs, l'enduit doit s'appliquer derrière l'installation pour empêcher la formation de ponts thermiques.

Les films protecteurs : Les films protecteurs sont principalement utilisés dans la construction de maison à ossatures bois et pour les travaux de plâtrerie dans l'aménagement à sec des combles. Les jonctions des films protecteurs sont desserrées pour que le film puisse se déformer sans se déchirer en cas de mouvement. En cas de déchirure, il faut recoller le film immédiatement. Les manchettes thermo-rétractables permettent de protéger l'isolant contre les infiltrations d'eau ou d'air.

La chape : Le rôle de la chape est d'assurer la mise à niveau de la dalle et la régularité de la surface. Elle constitue généralement le support du revêtement étanche du sol. Après avoir lissé la surface, on colle les dalles de béton de manière étanche dans la zone d'entrée. La chape est séparée de l'isolation accoustique par un isolant en laine de verre ou un isolant thermo-réflecteur, afin d'empêcher la formation de ponts thermiques ou accoustiques lors de la pose sur chape fraîche.

Installations et systèmes de ventilation : Les installations sont intégrées dans la construction murale pour des raisons esthétiques. Il est important d'assurer deux surfaces d'installation pour câbler les prises électriques, les câbles et les tuyaux sans pour autant détruire la couche étanche de la paroi. En perforant les murs pour l'installation de prises électriques, il arrive d'entrechoquer un joint, ce qui peut occasionner des fuites. De ce fait, il est conseillé d'utiliser des prises étanches.

Les canaux du système de ventilation sont à isoler pendant la construction pour éviter la pénétration de poussière, que l'on ne peut pas toujours éliminer. L'application de canaux faciles à nettoyer serait une autre possibilité. La disposition correcte des silencieux de ventilation est importante et doit correspondre exactement au plan de ventilation. Les puits provençaux sont transportés hermétiquement à travers la maçonnerie à l'aide de pièces de raccord. Les tuyaux de ventilation détachés sont à isoler.

Contrôle de qualité : Une des tâches principales pendant la phase de construction est le contrôle de qualité, constitué principalement d'une bonne surveillance des travaux. Le directeur de chantier doit former ses ouvriers et leur expliquer, parfois à plusieurs reprises, les différentes techniques et précautions mentionnées au préalable. Une supervision continue des différentes tâches est idéale car elle permet d'agir vite et de remédier immédiatement à d'éventuels problèmes.

Le test "blower-door" est une mesure de contrôle supplémentaire qui permet de mesurer l'étanchéité à l'air des bâtiments. Comme déjà expliqué dans la section 4.2.3, ce test s'effectue une fois la maison scellée hermétiquement. Les fenêtres et portes sont installées et intégrées dans la couche étanche. Les surfaces d'installation n'existent pas encore, ce qui facilite la détection d'éventuelles fuites. À l'aide du test "blower-door", on peut calculer le débit d'air qui correspond exactement au volume d'air s'échappant par les trous dans l'enveloppe du bâtiment. En cas de fuite lors des travaux de montage, le rebouchage et l'isolation sont immédiats.

La thermographie infrarouge sert également à mesurer l'étanchéité à l'air en rendant les fuites visibles et ceci durablement. Elle est la preuve visuelle d'une fuite. Elle permet aussi de voir les nids d'oiseaux posés dans les isolants (par exemple en béton cellulaire ou en laine de mouton).

À la fin de la construction, le système de ventilation doit être réglé une première fois par les installateurs spécialisés avant d'expliquer toutes les fonctions et le réglage de l'installation au maître d'ouvrage. Il est important pour le maître d'ouvrage de connaître la fréquence des changements de filtres ainsi que celle du nettoyage du puits provençal.

4.5 Conclusion

Dans la construction d'une maison passive, le contrôle de qualité est plus présent que dans la construction conventionnelle. Économiquement parlant, les coûts supplémentaires du contrôle de qualité semblent démesurés aux yeux des investisseurs et des maîtres d'ouvrage. Cependant, après une approche plus approfondie, on constate que la bonne qualité en vaut la peine. Il est plus rentable d'assurer la meilleure qualité dès le début, même si cela exige des dépenses supplémentaires, que de remédier aux dégâts ultérieurement car cela coutera cher et est souvent pénible.

À notre point de vue, les maîtres d'ouvrage ont trop tendance à accepter des réparations coûteuses au lieu de charger des experts du contrôle de la qualité.

5 Exemples de maisons passives

5.1 Maison passive Grobe à Ottbergen (Allemagne)

5.1.1 Description du projet de construction

La maison passive à Ottbergen est construite selon les principes de conception "forme compacte" et "orientation sud". Son toit plat soutenu par de fines colonnes empêche le rayonnement solaire direct en été ; alors que le soleil d'hiver, plus bas, rayonne dans les chambres et les chauffe. La maison n'a pas besoin d'une grande quantité énergétique : 11,6 kWh/m²a sont suffisants pour atteindre une température ambiante et garantir ainsi le bien-être. Un chauffage électrique additionnel (2,1 kW) et un sol chauffant dans la salle de bain (env. 2 kW) fournissent le chauffage additionnel de l'air intérieur. Cependant, ces chauffages supplémentaires ne sont utilisés que si les panneaux solaires installés sur le côté sud, les sources de chaleurs internes et l'échangeur géothermique ne peuvent pas assurer l'approvisionnement énergétique de la maison.

La surface habitable de la maison est de 323 m², appartement (éclairé naturellement et qui aujourd'hui sert de bureau) inclus. C'est au sous-sol que se trouve le système de ventilation centralisé avec un échangeur géothermique intégré. Il s'agit d'un échangeur à contre-courant qui récupère 92 % de la chaleur évacuée pour ensuite la transmettre à l'air frais aspiré à travers un conduit sous terrain.

Grâce à l'isolant StoTherm Classic (300 mm) pour la construction du mur en béton cellulaire (15 cm), le coefficient U des murs extérieurs est de 0,127 W/m²K, et celui du toit végétal de 0,097 W/m²K. Avec le panneau de toiture en acier massif (épaisseur : 25 cm) complètement détaché, le toit est thermiquement déconnecté de la maçonnerie, et est doté d'un isolant en laine de mouton. L'avant-toit semi-circulaire (côté



fig. 5-1 Maison passive à Ottbergen - Façade sud



fig. 5-2 Façade nord-ouest - abris de voiture "carport"

nord) qui s'étend de l'entrée jusqu'au garage n'a pas de connexion thermique avec le mur extérieur du bâtiment.

Une caractéristique supplémentaire importante de cette maison est l'exclusion des ponts thermiques et l'étanchéité à l'air de son enveloppe. De ce fait, une installation appropriée de fenêtres et de volets roulants est particulièrement importante. Cependant la façade sud assure des gains de chaleur plus importants. La maison est conçue (en quart de cercle) vers le sud de façon à ce que la façade vitrée soit toujours exposée au soleil. L'efficacité énergétique et l'application minimale d'un chauffage ne signifient pas qu'on doit renoncer au style ou au confort d'une maison, au contraire, avec les nouvelles technologies on arrive à concilier toutes les exigences. L'isolation couvre entièrement les fenêtres et les châssis, empêchant ainsi la formation de pont thermique sur les bords de fenêtre. Le vitrage présente un coefficient de transmission de chaleur de $0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$. Les balustrades devant les fenêtres orientées vers le sud-ouest sont spéciales : elles sont dotées d'éléments TWD StoTherm Solar et chauffent le mur absorbeur qui se trouve derrière.

StoTherm Solar: Le système d'isolation thermique extérieur par enduit sur isolant StoTherm Solar transforme les rayons solaires en chaleur. La maçonnerie massive retient la chaleur et la transmet après six à huit heures à l'intérieur de la maison. Alors que la température intérieure en hiver s'élève à $+20^\circ\text{C}$ et que la température extérieure est de -10°C , celle de l'absorbeur peut atteindre jusqu'à $+60^\circ\text{C}$.

StoTherm Solar travaille de manière sélective. En hiver, le degré d'efficacité est le plus élevé, et le plus faible en été. Quand le soleil est bas, l'angle d'incidence est plus bas qu'en été et le rayonnement solaire nettement plus intense. Pendant la période estivale, le soleil est plus haut et les rayons solaires n'accèdent qu'en partie à la paroi absorbante Sto Solar. Une grande partie de la lumière solaire est reflétée sur la surface. Il en résulte des températures agréables pendant la période estivale.

Pour plus d'informations : www.sto.com

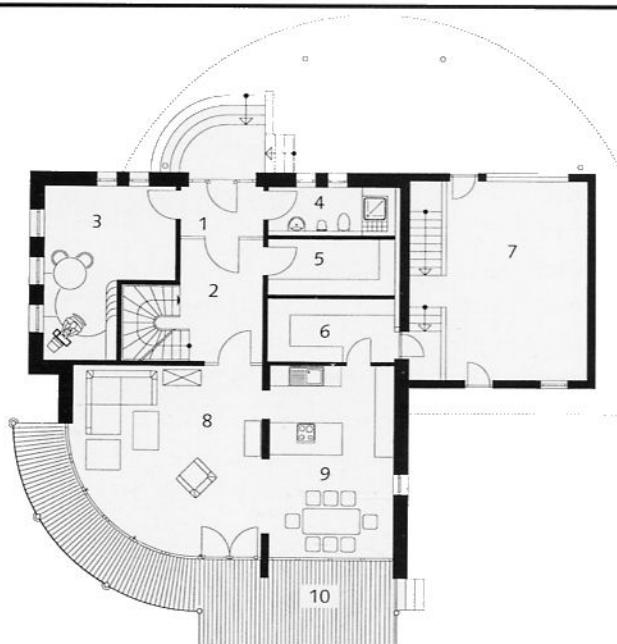


fig. 5-3 Rez-de-chaussée

1 entrée	5 débarras	8 séjour
2 vestibule	6 garde-manger	9 cuisine
3 bureau	7 sellerie ou garage	10 terrasse
4 WC		

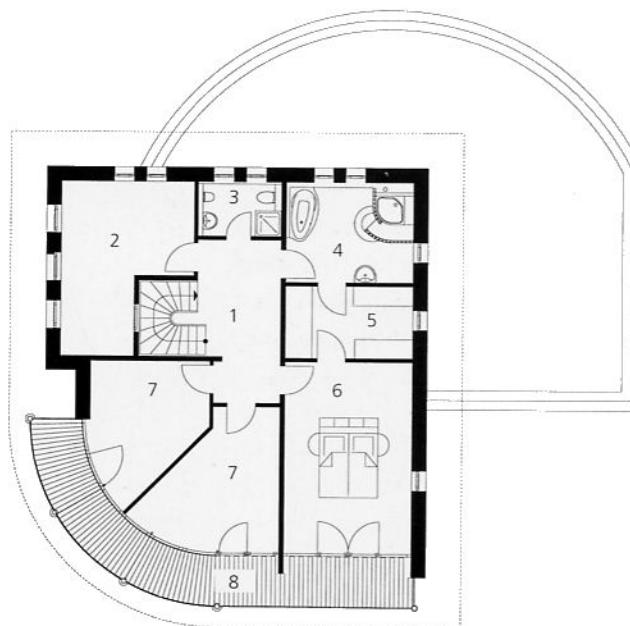


fig. 5-4 Premier étage

1 couloir	4 salle de bain	7 chambre d'enfant
2 atelier	5 placard	8 balcon
3 WC	6 chambre	

5.1.2 Ombrage de grandes baies vitrées orientées au sud

Les grandes baies vitrées font partie de la conception particulière d'une maison passive. Leur ombrage est indispensable pour des raisons de confort et d'économie énergétique car il protège les habitants du sur-échauffement de la pièce, mais aussi de l'éblouissement par le soleil. Il est conseillé de choisir un vitrage avec un coefficient g élevé afin de garantir des gains solaires importants. Le danger du sur-échauffement du bâtiment est risqué en particulier au printemps et en automne. En s'approchant de l'été, le besoin en énergie diminue, pourtant le soleil reste bas et les rayons entrent directement dans le bâtiment. L'installation d'un débord de toiture ou de balcons en saillie (fig. 5-6) est une possibilité pour éviter le sur-échauffement.

Une autre possibilité pour ombrager la maison est l'installation de volets roulants ou de stores, jusqu'à présent plus utilisés dans les bureaux ou la construction industrielle. L'inconvénient du volet roulant est que la pièce doit être complètement ombragée afin d'éviter son sur-échauffement pendant les journées ensoleillées. Le store extérieur empilable est plus pratique car il laisse passer la lumière en position horizontale sans transmettre trop de chaleur (fig. 5-12, p. 99).

Les stores extérieurs de l'entreprise Hüppe s'avèrent particulièrement appropriés pour ce type de construction. Ils bloquent le rayonnement solaire avant qu'il n'inonde la fenêtre et empêche un éblouissement de la pièce. Les lamelles orientables du store se règlent dans n'importe quelle position (fermé jusqu'à grand ouvert). Il s'oriente en fonction de la position du soleil à l'aide d'une commande automatique.

Le nouveau store empilable hautement résistant de Hüppe Form est un produit spécial avec un avantage supplémentaire : il peut orienter la lumière du jour. Les lamelles dans la partie haute sont positionnées horizontalement et reflètent ainsi la lumière incidente contre le plafond, et ensuite dans la pièce entière (fig. 5-13, p. 99).



fig. 5-5 Façade sud-est

Ainsi, on économise jusqu'à 50 % d'éclairage artificiel, la lumière naturelle reflétée par le plafond produisant une atmosphère agréable. Les lamelles du bas s'orientent indépendamment selon l'incidence de la lumière et la position du soleil, protégeant ainsi les habitants de la chaleur et de l'éblouissement (par exemple de la réflexion gênante sur l'écran de téléviseur ou de l'ordinateur).

Pour plus d'informations : www.hueppeform.de

5.1.3 Projet d'installation et bilan annuel du budget énergétique

Les besoins annuels en chauffage de cette maison sont nettement inférieurs aux 15 kWh/m² requis par le EnEV. Ce résultat est possible grâce au faible rapport surface/volume, une isolation thermique excellente et une construction sans pont thermique. Le puits provençal (échangeur géothermique de 32 mètres) est

enterré à 1,80 mètres et assure la fonction de pré-chauffage hivernal de l'air ventilé. L'échange thermique se fait grâce à une ventilation mécanique contrôlée à récupération de chaleur double flux. Si le besoin en chauffage est supérieur à la quantité énergétique produite, un chauffage additionnel électrique est activé afin de chauffer l'air ventilé. La production d'eau chaude est en grande partie assurée par un collecteur solaire sur une surface de 8 m². Un ballon d'eau chaude stocke la chaleur produite et la transmet, selon les besoins, au réseau d'eau chaude. Si les besoins en thermie solaire ne sont pas couverts, on applique une chaudière additionnelle. L'installation solaire a des effets positifs sur l'énergie finale. Le chauffage et la chaudière additionnels n'engendrent pas de coûts supplémentaires excessifs. En hiver 2001/02, la consommation énergétique s'élevait à seulement 3735 kWh pour une surface habitable et utile de 323 m². Après un calcul en appliquant les tarifs spéciaux de 10 centimes par kW, on arrive à un coût de 373,50 € pour le chauffage. Malgré le coût élevé de l'électricité et la taille de la maison, les coûts totaux sont moins élevés que le forfait annuel pour le compteur de gaz naturel, le ramassage et les frais de maintenance d'une installation de chauffage conventionnelle.



fig. 5-6 Ombrage constructif par le balcon et la toiture



fig. 5-7 Parois portes pivotantes dans l'appui de fenêtre

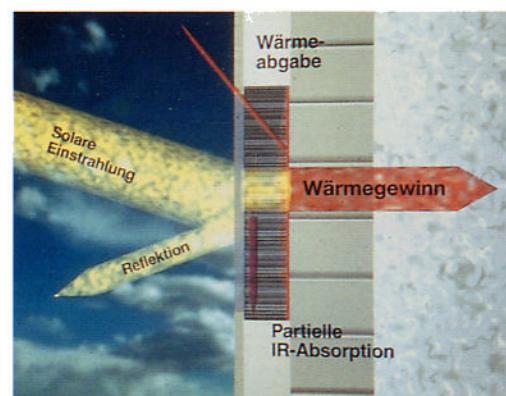


fig. 5-8 Irradiation solaire en hiver

Wärmeabgabe:	transmission de chaleur
Wärmegewinn:	gains de chaleur
Solare Einstrahlung:	irradiation solaire
Reflektion:	réflexion
Partielle IR-Absorption:	absorption partielle

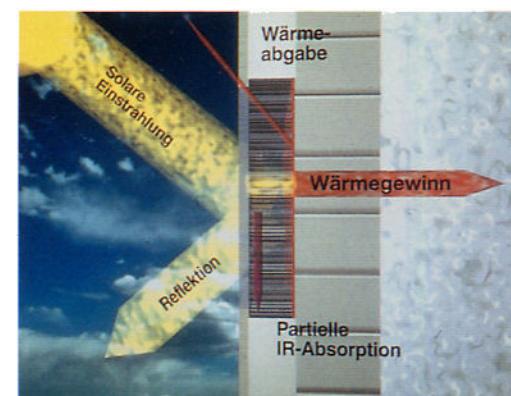


fig. 5-9 Reflexion solaire en été

Cependant, la solution la plus rentable à long terme serait le chauffage de la maison à l'électricité directe. Si l'on renonce à un système de chauffage, le capital économisé peut être investi dans une éolienne, système plus écologique et économique. En effet, le système de chauffage s'use plus rapidement et engendre des frais de maintenance énormes, tout cela pour produire une très petite quantité d'énergie. Vous pouvez trouver plus d'informations sur les principes du calcul de rentabilité dans le chapitre 7.

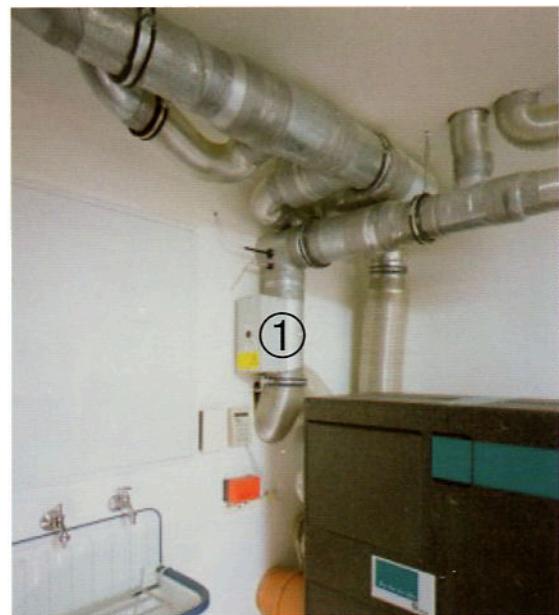


fig. 5-10 Installation de ventilation et chauffage additionnel électrique (1)

fig. 5-11 Bilan énergétique et eau chaude en kWh/m²A- maison passive Grobe

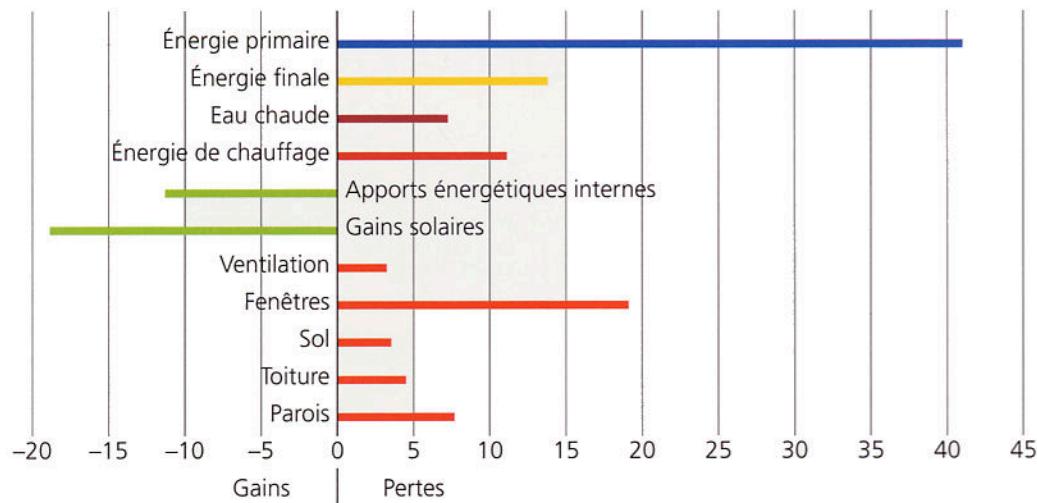


fig. 5-12 Protection contre le soleil grâce au store extérieur empilable

- 1 Système d'isolation thermique
- 2 Store électrique empilable
- 3 Panneaux de support de crépi
- 4 Profils de crêpissage
- 5 Enduits extérieurs
- 6 Joint d'étanchéité au silicone
- 7 Elément de châssis
- 8 Isolation thermique
- 9 Support de crépi
- 10 Colle pour l'étanchéité à l'air
- 11 Fenêtre isolée au standard maison passive
- 12 Briques en silicate de calcium (15 ou 17,5 cm)
- 13 Enduits intérieurs
- 14 Bande de protection
- 15 Chape

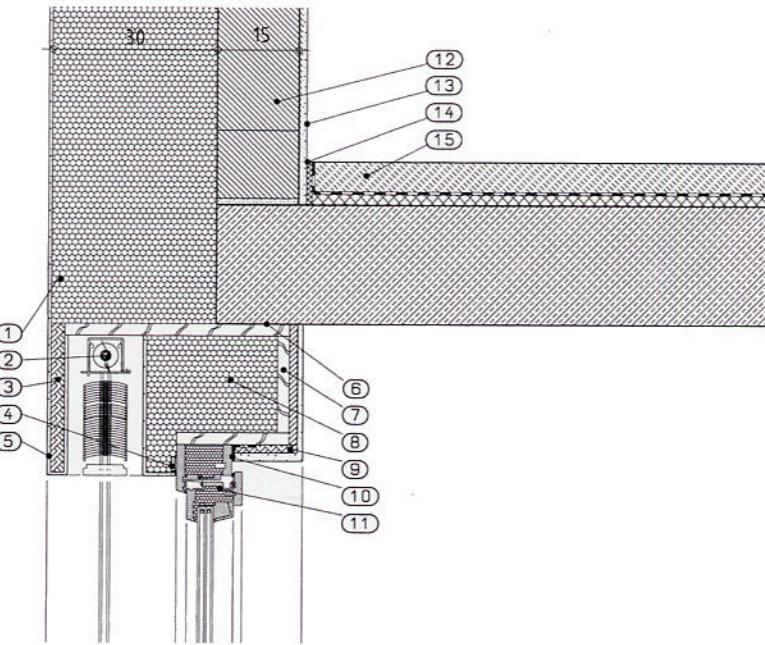


fig. 5-13 Store extérieur empilable permettant de régler la direction de la lumière

5.1.4 Données importantes sur la maison passive Grobe

Concepteur et habitant: L'ingénieur diplômé et architecte Carsten Grobe Ottbergen/Schillerten (canton de Hildesheim)

Date de finition: Décembre 1999

Surface habitable: 228 m²

Surface utile: 323 m²

Enveloppe de la maison: 1225 m³

Surface chauffée: 323 m²

Construction: Construction massive avec système d'isolation thermique

Mur extérieur: blocs de béton cellulaire (15 cm), masse volumique initiale 2,0 kg/dm³, 30 cm d'isolant thermique WLG 040, enduit à base de résines siloxanes de l'entreprise Sto, coefficient U 0,127 W/m²K.

Mur de cave: blocs de béton cellulaire (30 cm), masse volumique initiale 2,0 kg/dm³, 26 cm d'isolant thermique WLG 035, enduit à base de résines siloxanes (Sto), coefficient U 0,126 W/m²K

Sol de la cave: 8 cm de chape, 23 cm d'isolant thermique WLG 035, panneaux en béton armé, coefficient U 0,151 W/m²K.

Toit plat: Isolation en laine de mouton (40 cm) de SHWL (www.SHWL.de), 25 cm de béton armé, coefficient U 0,097 W/m²K.

Fenêtres: Triple vitrage isolant, bande de protection TPS, châssis presque entièrement couvert d'un isolant, coefficient g 0,60, coefficient UF 0,77 W/m²K.

Ventilation: Conditionneur d'air avec échangeur thermique à écoulement transversal (Fa. Paul) et échangeur géothermique, 32 lfm tuyaux de tout-à-l'égout Ø 200 mm (degré de récupération de chaleur 92 %).

Eau chaude: Système d'eau chaude sanitaire solaire, surface absorbante 6 m², capacité du réservoir d'eau sanitaire 500 litres (Fa. Consolar).

Chauffage: Les besoins en chauffage sont couverts par un petit chauffage d'appoint, et par un sol chauffant dans la salle de bain.

Extras: Application d'une isolation thermique transparente de StoTherm Solar d'env. 8 m² dans l'appui de fenêtre, système de commande pour les installation et appareils électroniques.

Besoins en énergie de chauffage calculés: 11,1 kWh/m²a

Besoins en énergie de chauffage mesurés: 11,6 kWh/m²a

Coefficient d'énergie primaire (électricité et eau chaude sanitaire): 94,5 kWh/m²a

Etanchéité à l'air: 0,42 h⁻¹

Panneaux photovoltaïque: env. 50 m² prévu

Pour plus d'informations sur ce bâtiment : www.Passivhaus.de

5.2 Maison passive à Celle (Allemagne)

- Projet de recherche en collaboration avec le Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Institut Fraunhofer de physique du bâtiment)

5.2.1 Description du projet de construction

Les deux architectes Sabine Gabriel et Carsten Grobe ont prévu une consommation annuelle d'énergie primaire de 34 kWh/m². Par conséquent, cette maison ne correspond pas seulement au standard de la maison passive avec moins de 15 kWh/m²a, mais aussi à la maison "à 3 litres", c'est-à-dire avec une consommation de fioul de trois litres (34 kWh) selon le "Frauenhofer Institut". La consommation d'énergie primaire comprend l'énergie de chauffage et l'énergie de propulsion, la production d'eau chaude en moins. Malheureusement, il arrive qu'on propose la vente d'une maison "à 3 litres" en se référant seulement à la consommation de chauffage et non à la consommation d'énergie primaire. Dans ce cas on assimile trois litres d'énergie de chauffage à trois litres d'énergie primaire.

Avec le coefficient 3,0, la consommation passe à 9 litres d'énergie primaire, ce qui correspond tout au plus au standard du règlement sur les énergies. Selon les experts, ce coefficient de conversion et de déperditions énergétiques est nettement plus élevé.

Cette maison dispose de deux étages et d'une surface habitable de 159 m², dont 18 de balcon et terrasse. L'une de ses particularités est le type de construction de la toiture, très peu conventionnel. On s'est décidé pour un toit en courbe qui s'achève par un avant-toit sur la façade sud. Cet avant-toit sert de protection contre le soleil et permet d'éviter la surchauffe de la maison.

La dalle: Le terrain dans cette zone de construction est très humide pendant toute l'année. De ce fait, on applique une isolation en matériaux naturels, avec une couche de 28 cm d'isolation à verser en vrac (mélange de laine de mouton et chanvre). Ce mélan-



Abb. 5-14 Passivhaus in Celle – Südansicht

ge au coefficient U 0,138 W/m²K s'applique au sous-plancher de la maison (voir l'isolation thermique de la dalle du sol dans le chapitre 2).

Murs extérieurs: Les murs massifs de la maison sont en béton cellulaire. Leur maçonnerie se compose d'une couche de 15 cm de béton cellulaire et d'une isolation thermique d'une épaisseur de 30 cm. Le coefficient U s'élève à 0,12 W/m²K en comptant les blocs de coffrage isolants en polystyrène et la maçonnerie.

Toiture: La charpente est en bois lamellé-collé (dimension : 12/20), elle forme la charpente des balcons sur la façade sud. Pour isoler les combles perdus entre les chevrons des rampants du grenier, on utilise une isolation thermique en laine de mouton et en chanvre à injecter (voir www.SHWL.de). Cela donne un coefficient de transmission thermique faible de 0,088 W/m²K.

Fenêtres: Les fenêtres sont orientées plein sud. Malgré la faible transmission thermique des fenêtres, l'infiltration d'énergie solaire est garantie. Le coefficient G (déperdition volumique d'un logement) est de 53 % et le coefficient UF (vitrage) de 0,7 W/m²K (selon le journal officiel allemand). Le châssis, grâce à sa bonne

performance thermique ($0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$), fait que le coefficient total de la fenêtre atteint $0,79 \text{ W/m}^2\text{K}$. Par conséquent, la fenêtre correspond aux exigences énergétiques et garantit un haut confort et bien-être. En principe, les fenêtres devraient être installées dans un châssis avec joints d'étanchéité pour éliminer les ponts thermiques.

Ponts thermiques: La construction est quasiment sans pont thermique, elle présente seulement de faibles déperditions au niveau des raccordements des fenêtres et du châssis ouvrant de fenêtre à deux vantaux. Au niveau de la jonction mur-plancher, on applique du béton cellulaire, ayant un coefficient de conductivité thermique λ faible de $0,09$ malgré une forte résistance à la pression. Même dans les angles extérieurs, le haut standard d'isolation du bâtiment permet des gains de chaleur appelés ponts thermiques négatifs. Ces ponts thermiques négatifs se déterminent grâce aux surfaces qui conduisent la chaleur et aux surfaces extérieures selon le calcul sur la déperdition de chaleur. Les angles sont des géométries à trois dimensions et ils interfèrent dans les courants thermiques. Alors que les enveloppes mal isolées présentent un grand nombre de ponts thermiques, la maison passive enregistre des gains thermiques. Cela est pris en considération lors de la conception d'une maison passive.

L'étanchéité à l'air: L'étanchéité à l'air est garantie grâce à un enduit intérieur. Il existe un risque de joint dans le mur seulement dans les zones où se trouvent des prises électriques ou des interrupteurs. Une autre zone délicate est la jonction mur-plancher. Pour cela, l'enduit intérieur s'étend jusqu'au plancher de manière hermétique. Pour garantir l'étanchéité de la charpente du toit, on installe des panneaux préfabriqués au plafond pour répandre l'enduit de manière hermétique. L'enduit extérieur assure déjà un maximum d'étanchéité à la construction. Les raccordements de fenêtres sont isolés à l'aide de l'enduit.

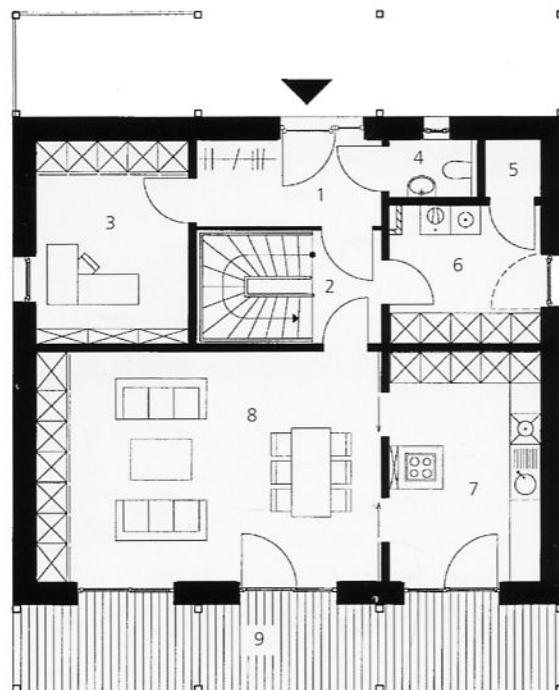


fig. 5-15 Plan du rez-de-chaussée

- | | | |
|-------------|----------------------------|------------------------------------|
| 1 entrée | 5 installations techniques | 8 salle de séjour / salle à manger |
| 2 vestibule | 6 buanderie | 9 terrasse |
| 3 bureau | 7 cuisine | |
| 4 toilettes | | |

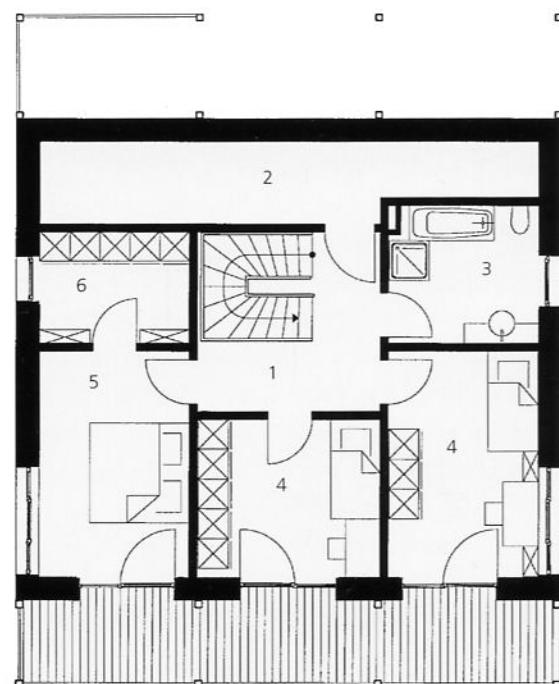


fig. 5-16 Plan de l'étage supérieur

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| 1 vestibule | 4 chambre des enfants |
| 2 débarras | 5 chambre des parents |
| 3 salle de bain | 6 buanderie |

Le système compact: Le système compact de Aerex se charge dans cette maison de toutes les fonctions électriques, tel que le chauffage, la ventilation et la production d'eau chaude sanitaire. Avec un système de récupération de chaleur et une consommation énergétique extrêmement faible, on atteint le confort le plus haut. Tout ce système est combiné à une installation solaire. Le système comprend deux unités parfaitement accordées qu'il est possible de combiner de manière flexible : le module de ventilation et de ballon d'eau chaude sanitaire.

Le système de ventilation comprend les composants suivants :

- Le modèle de base avec ventilation à double flux. Ces ventilateurs à réglage continu présentent un débit d'aspiration d'air de 80 à 210 m³/h. La récupération de la chaleur se fait à l'aide d'un échangeur à contre-courant.
- La commande assure toutes les fonctions nécessaires au bon fonctionnement de l'installation. Le système de ventilation consiste en un appareil de ventilation et en une console de commande.
- Le module d'échangeur de chaleur sert à récupérer la chaleur. L'échangeur à contre-courant se caractérise par un bon rendement thermique et des pertes de charge extrêmement faibles.
- La pompe à chaleur permet le chauffage de l'air et de l'eau selon le besoin des utilisateurs. Avec un coefficient de performance annuel de 3,5, la pompe à chaleur produit jusqu'à 1410 watt, son degré de récupération de chaleur se réduisant à 78 %. La pompe à chaleur dépend de la température de l'appareil.
- L'objectif principal reste de réduire au minimum la consommation d'électricité, car 1 kWh exige trois fois le besoin en énergie primaire (coefficient 3,0 pour le courant pulsateur).
- En cas de très grand besoin calorifique, même le groupe électrogène ne peut pas couvrir le besoin énergétique. Pour cela, on a prévu une chaudière électrique supplémentaire, intégrée au réservoir d'eau.

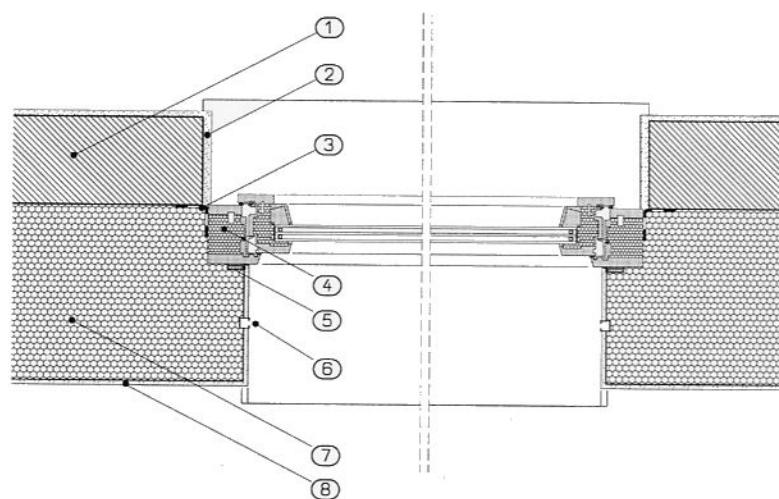


fig. 5-17 Raccordement de fenêtre et sa position dans la construction murale

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1 maçonnerie en béton cellulaire | 5 profilés d'arrêt de crépissage |
| 2 enduit intérieur | 6 rail du store pour protection solaire |
| 3 joints d'étanchéité | 7 système d'isolation |
| 4 châssis de fenêtre isolé | 8 enduit extérieur |

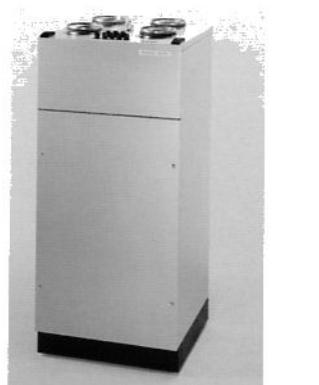


fig. 5-18 Système de chauffage d'air, d'eau et de ventilation pour maisons à faible consommation énergétique et maisons passives - Aerex

Le module d'eau sanitaire est placé dans un habitecle étanche séparé. Il comporte un ballon d'eau chaude sanitaire avec un débit de 190 à 400 litres. Le réservoir d'eau est alimenté en grande partie par le système solaire d'une surface de 6 m². L'énergie restante est fournie par une pompe à chaleur et une chaudière électrique. La pompe à chaleur fournit la chaleur pour le chauffage de l'air et la production d'eau chaude sanitaire. Les sources d'énergie sont l'air ventilé, la chaleur récupérée et un raccordement électrique.

Un puits provençal d'env. 40 m, enterré à 1,20 m, assure la fonction de préchauffage hivernal de l'air ventilé. Il en résulte deux avantages. Les tuyaux du système de ventilation ne gèlent pas, malgré des températures inférieures à zéro. Non seulement l'application d'un dégivreur n'est pas nécessaire, mais en plus on gagne de la chaleur sans consommer d'énergie supplémentaire.

Selon la différence de température et la qualité du sol et des tuyaux, la température moyenne annuelle augmenterait de 8 kelvins. En été, le puits provençal assure la fonction de rafraîchissement.

Pour plus d'information :

www.fiabitat.com

5.2.2 Bilan annuel de la consommation énergétique

Le besoin annuel en chauffage est inférieur au coefficient requis de 15 kWh/m²a grâce au faible rapport volume/surface, à une bonne isolation thermique, aux apports solaires des fenêtres très performantes et au système de récupération de chaleur. Les ponts thermiques ainsi que les ponts thermiques négatifs sont considérés dans le calcul des besoins énergétiques :

La consommation énergétique est relativement basse grâce à la pompe à chaleur. Il en résulte une consommation d'énergie primaire faible, malgré l'utilisation de l'électricité comme source de chaleur.

Les déperditions thermiques par transmission ainsi que le haut standard d'isolation des éléments de

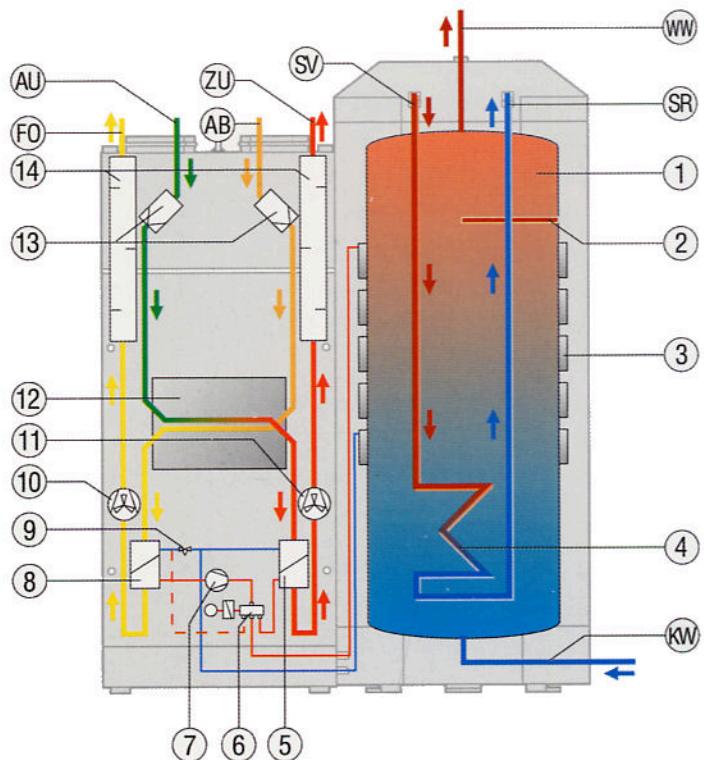
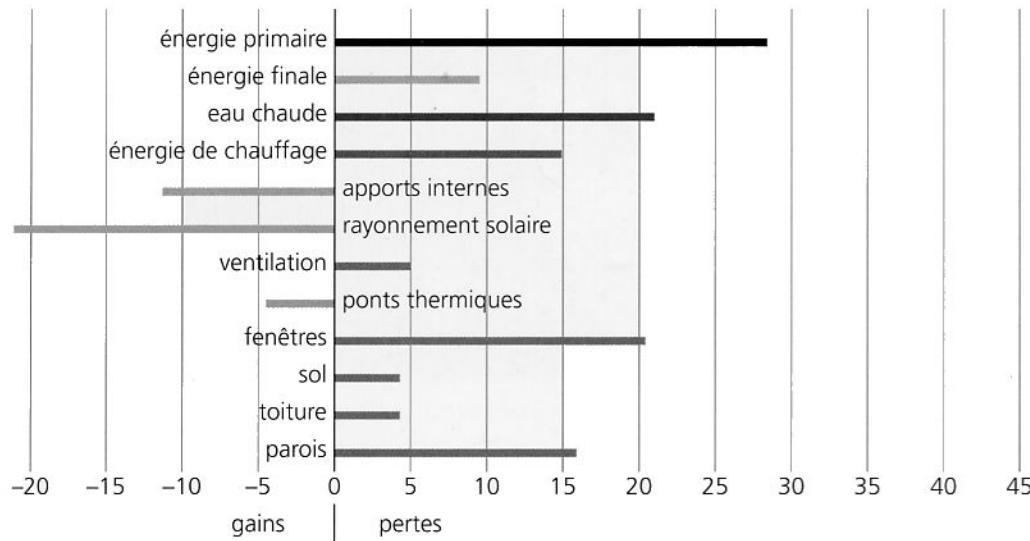


fig. 5-19 schéma du groupe électrogène compact du fabricant Maico Aerex

1	réservoir d'eau	12	échangeur à double flux
2	chaudière électrique	13	filtres
3	ballon d'eau chaude	14	silencieux
4	échangeur de chaleur solaire	AU	air frais
5	arrivée d'air frais	FO	air extrait
6	vanne d'inversion	AB	air vicié
7	compresseur	ZU	arrivée d'air
8	évaporateur	SV	aller solaire
9	vanne d'expansion	SR	retour solaire
10	ventilateur axial	WW	eau chaude
11	ventilateur air frais	KW	eau froide

fig. 5-20 Bilan énergétique - eau chaude sanitaire et chauffage en kWh/m²A- Maison passive à Celle

construction font que les ponts thermiques sont négatifs. Ils diminuent les déperditions thermiques par transmission. Par conséquent, le coefficient de transmission thermique est encore inférieur aux valeurs limites requises par le standard maison passive. Les éléments de construction transparents tels que les fenêtres présentent un coefficient de transmission thermique plus élevé que l'enveloppe opaque (les murs); alors que la surface vitrée présente seulement 21 % de la surface totale.

Les frais supplémentaires pour le standard énergétique sont fixés à 100 €/m² de surface habitable. Ces coûts peuvent vite s'amortir grâce aux subventions, aux économies d'énergie et aux faibles frais supplémentaires. Le besoin en chauffage QH de cette maison a été estimé à 2115 kWh/a (selon le PHPP). À en croire le compteur monophasé à double tarif, l'énergie totale pour le chauffage et l'eau chaude coûte 3 € par semaine, avec un coefficient de performance de 3,5.

5.3 Approche décorative de la maison passive

Le standard maison passive est issu de la construction écologique, son ossature est donc très souvent en bois. Cependant, comme vous avez pu le constater dans ces deux exemples, il est devenu tout à fait commun de réaliser une telle construction avec une architecture plus moderne, en béton ou en acier. Pour bien respecter les critères d'une maison passive, il faut qu'elle comporte des installations solaires. Les deux figures 5-12 et 5-22 montrent que les maisons à toit en pente peuvent également se réaliser au standard maison passive. Cependant, je tiens à faire remarquer que le rapport surface/volume est très élevé dans ce type de construction. Si cette maison n'était pas si grande (presque 200 m² de surface habitable plus une cave chauffée), il serait impossible d'arriver à un coefficient U de 15 kWh/a par m².

Pour plus d'exemples de constructions :

www.passivhaus.de
www.maisonpassive.be
www.lamaisonpassive.fr

5.4 Expériences faites lors de la réalisation du projet de construction

Pour les maîtres d'ouvrage et les promoteurs, il est souvent plus rentable de rénover des bâtiments pour lesquels il existe déjà des plans d'exécution, des détails de construction ou encore des systèmes de ventilation. Plusieurs adaptations d'un même objet de construction permettent d'atteindre une meilleure qualité et une estimation efficace et réelle des coûts. L'industrie automobile est une bonne comparaison car la fabrication en série permet également une amélioration de la qualité et une minimisation des coûts. Pour la réalisation d'une maison passive, le contrôle de qualité indépendant est particulièrement important. La plupart du temps, pour une construction conventionnelle, il est à la charge du promoteur, ce qui permet d'économiser des frais. Les hautes exigences de qualité du standard maison passive ne sont souvent pas compatibles avec une minimisation des coûts visée par le maître d'ouvrage. Il en résulte un gros manque d'investissement technique de la part des concepteurs professionnels du bâtiment, et un contrôle de qualité inappropriate. Dans beaucoup de cas, cela occasionne une redistribution des dépenses car en dehors d'une consommation énergétique plus importante, des frais supplémentaires sont à envisager et, même si la construction de la maison est moins chère, les défauts et dégâts dans le bâtiment peuvent être plus nombreux. En fin de compte, il en résulte une perte d'investissement à long terme. Pour cela, les constructeurs/promoteurs et les architectes doivent travailler plus étroitement ensemble pour mieux affronter le défi de la maison énergiquement économique. Il est hors de question que les principes si intéressants de la maison passive, élaborés et popularisés depuis plus de dix ans par Dr. Feist du Passivhaus-Institut à Darmstadt, soient remis en cause pour des raisons purement économiques.



fig. 5-21 Maison passive avec avant-toits en saillie vitré et balcon - construction traditionnelle



fig. 5-22 Avant-toits avec encorbellement vitré et véranda

6 Vivre dans une maison passive : un plus grand confort et une meilleure qualité de vie

Les coutumes humaines s'installent, se développent et se maintiennent pendant plusieurs générations et les changer demande parfois des décennies. En ce qui concerne un mode de vie plus écologique et plus proche de la nature, nous avons changé d'état d'esprit : l'homéopathie, une alimentation équilibrée, le recyclage des déchets ou encore le pôt d'échappement catalytique sont de plus en plus courants, voire obligatoires.

Habiter une maison passive est une démarche écologique de plus, qui exige certains changements d'habitudes. Malheureusement il y a encore beaucoup de scepticisme quant à ce nouveau type de construction et le standard maison passive doit encore lutter contre de nombreux préjugés.

6.1 La ventilation mécanique contrôlée à double flux

Il existe de nombreux préjugés quant à la ventilation mécanique contrôlée (VMC) à double flux, indispensable pour le standard maison passive. Pendant des millénaires, l'Homme a vécu sans se préoccuper de l'installation d'une ventilation automatique. Aujourd'hui, nous avons des préjugés, les mauvais impacts d'une telle installation étant le résultat de notre ignorance à ce sujet. Les gens confondent ventilation contrôlée avec récupération de chaleur et air conditionné comme celle utilisée dans les hôpitaux et les hôtels. Nombreux sont les exemples qui témoignent de la mauvaise qualité de l'air et de la formation de moisissure.

Cependant, ce genre de problème ne surgit pas dans les systèmes de ventilation utilisés dans une maison passive. En effet, il ne s'agit pas d'une climatisation qui humidifie l'air avec l'eau directement injectée dans le climatiseur (pour l'expliquer de façon simplifiée), un taux d'humidité d'env. 60 % ainsi que des températures élevées favorisant la formation de bactéries et de germes dans une climatisation. L'examen du système de ventilation d'une maison passive, en service depuis plusieurs années, a révélé que la qualité de l'air était meilleure que celle d'un bâtiment de la même région avec une aération par ouverture des fenêtres. Dans de nombreuses régions, l'air frais est pollué par différents pollens, spores et bactéries, et cette pollution peut être fortement réduite grâce aux filtres de protection de l'appareil de ventilation d'une maison passive. Dans une maison conventionnelle, l'air pollué pénètre directement par les fenêtres. Certes, pour prouver que la qualité de l'air est nettement meilleure avec la ventilation contrôlée à double flux de la maison passive, il faudrait faire des recherches plus approfondies. Si l'on filtre l'air frais avant de pénétrer à l'intérieur à l'aide des filtres G4 et G7 (voir chapitre, 3.2.2), on constate une forte amélioration de la qualité de l'air, bénéfique en particulier aux personnes allergiques. En Allemagne, une personne sur trois est allergique et la tendance va croissante. Les causes peuvent être génétiques, mais elles peuvent aussi être liées à nos conditions de vie : les cellules du système immunitaire qui doivent défendre le corps contre les parasites, les vers et autres agents pathogènes, sont "au chômage" dans notre civilisation moderne. C'est pourquoi elles attaquent les éléments inoffensifs pour notre corps, par exemple le pollen. Les éléments qui contaminent l'appareil respiratoire entrent dans notre organisme surtout par l'air frais. Les moisissures font également partie des allergènes redoutés de notre environnement car ils évoluent particulièrement bien dans un milieu chaud-humide. Par conséquent, les murs, tapisseries et textiles humides, ainsi que les humificateurs d'air, représentent des sources d'allergies importantes. Le taux d'humidité dans l'air ne devrait pas dépasser 40-60 %, surtout

dans les chambres. Voilà l'avantage déterminant du type de construction de la maison passive : dans les chapitres précédents, on a démontré que les murs humides, ponts thermiques et moisissures qui en résultent ne peuvent pas apparaître si l'on exécute bien le montage des installations. Une maison passive offre une amélioration de la qualité de l'air aux personnes allergiques, ce qui est un critère à ne pas sous estimer. En dehors de cet aspect, l'appareil de ventilation offre plus d'avantages aux habitants, par exemple une qualité de l'air et un taux d'humidité atmosphérique constants.

Cette température constante présente des effets positifs également sur les plantes, qui évoluent visiblement mieux que dans une ambiance poussiéreuse avec radiateur. Depuis notre déménagement à la maison passive, elles poussent plus rapidement et sont plus denses.

L'expérience que nous avons fait avec notre fils de quatre ans n'est pas à sous-estimer non plus. Dans notre appartement antérieur en ville, il avait une toux constante et faisait des bronchites aigües chroniques. Après avoir emménagé dans la maison passive, il a arrêté de tousser. Comme tous les enfants, il tombe malade mais ce ne sont plus des maladies aigües, le traitement médical n'étant plus nécessaire. Nous pensons que c'est grâce à la meilleure qualité de l'air.

6.2 Taux d'humidité de l'air constant et meilleure qualité de l'air

Selon la nouvelle loi sur les énergies (EnEV), la construction de maison doit être plus étanche afin éviter un échange thermique naturel et incontrôlé (pont thermique dans l'enveloppe), ce qui garantit l'approvisionnement en air frais d'env. 30 m³ par per-



fig. 6-1 Aspiration centralisée avec l'installation centrale à la cave



fig. 6-2 Acariens de poussière sous un microscope

sonne. L'humidité s'évapore également par les fentes dans la paroi (l'homme expire env. 90 g d'eau par heure). Avant de quitter la maison, on a parfois l'habitude de fermer les fenêtres pour éviter les cambriolages. Si une personne s'est douchée juste avant et qu'elle a mis les serviettes de bain humides à sécher dans la salle de bain, toute cette humidité ne peut pas s'échapper assez vite par les murs. C'est pour cela que l'on n'utilise plus de film de protection sur le toit et la paroi. Comme nous l'avons déjà expliqué, l'humidité se pose sur les surfaces froides à l'intérieur du bâtiment pour se condenser, ce qui cause des moisissures sur les bords des fenêtres. Avec un système de ventilation à double flux, ce problème n'existe pas car il s'agit d'un système qui échange l'air de manière continue. Cette ventilation à double flux continue est nettement plus agréable pour les habitants. Personne ne pense à aérer sa maison toutes les deux heures durant sept à huit minutes. On ouvre de temps en temps une fenêtre, mais cela ne suffit pas pour une aération continue.

Un autre avantage de la maison passive est l'absence de courants d'air causés par les fenêtres ouvertes. Une ventilation contrôlée ne crée pas de courant d'air car la vitesse de l'air est inférieure à 0,2-0,3 m/s. En plus, la qualité de l'air est continuellement bonne, elle ne se dégrade pas avec le temps. La plus haute qualité de l'air est ainsi garantie 24H/24 et 7J/7.

6.3 Optimisation de la qualité d'air grâce aux installations d'aspiration centralisée

Pour optimiser la qualité de l'air intérieur de la maison passive, on a de plus en plus tendance à installer des aspirateurs centraux. L'avantage de ces installations consiste en un filtre nettement plus performant que le

filtre d'un aspirateur conventionnel. La poussière contient des acariens, moisissures, bactéries et virus qui sont aspirés. Dans le filtre de l'aspirateur, ils trouvent les conditions optimales pour se multiplier. Ainsi, les micro-organismes se dispersent par millions à travers les pores du papier-filtre. En outre, l'air expiré par l'aspirateur soulève la poussière des meubles. Ces particules de saleté se répandent pendant plusieurs heures dans toute la maison et sont respirées par ses habitants. Ceci est fortement nocif pour les personnes allergiques et présente un danger énorme pour les personnes asthmatiques. Les excréments des acariens déclenchent chez l'homme des réactions allergiques et parfois même de l'asthme bronchique. En outre, on a pu constater qu'une ventilation contrôlée à double flux permet de faire beaucoup moins souvent la poussière, au moins en hiver, à condition que les fenêtres restent constamment fermées pour éviter la pénétration de poussière. Même en été, l'installation centrale présente un avantage, bien que moins important qu'en hiver. Cette installation consiste en un tuyau de 10 mètres qui évite de se promener avec un aspirateur pouvant abîmer les encadrements de portes. Ce tuyau dispose d'une force aspiratoire qui est environ trois fois plus forte que celle d'un aspirateur conventionnel.

Pour plus d'information :

www.france-air.com

6.4 Les fenêtres fermées

L'une des idées reçues de la maison passive est que les fenêtres doivent être fermées pendant toute l'année. Ce n'est pas le cas : en printemps et en été, on profite de la maison passive comme d'une maison conventionnelle, car la ventilation est éteinte et l'aération se fait à travers les fenêtres. Les fenêtres sont à fermer en cas de grand impact de pollen, en cas de bruit, etc. Quand on laisse les fenêtres ouvertes pendant la nuit,

l'air est souvent plus froid que frais. Il est bien de dormir avec de l'air frais mais pas forcément froid. Il est important qu'il y ait un échange d'air pour compenser les 2 à 3 litres d'humidité évaporée expirés par une personne qui dort. Cet échange est garantit par l'installation d'une ventilation.

6.5 Un plus grand confort grâce à la chaleur rayonnante

Quand on est assis à côté d'une fenêtre, le corps perd de sa chaleur qu'il transmet à la vitre froide. Dans une maison passive, la température de surface des parois et plafonds augmente énormément à cause de l'application d'isolants plus épais ; et la température des surfaces vitrées grâce aux températures plus élevées du côté intérieur. Selon le EnEV, la différence de température peut varier entre 4 et 5 kelvins par rapport à une surface vitrée. La température intérieure de la paroi et de la vitre s'élève à 17°C. Le problème des fenêtres mal isolées est le refroidissement de l'air sur la surface froide de la vitre. L'air froid est plus lourd que l'air chaud et longe la vitre jusqu'au sol, produisant l'effet désagréable d'un courant d'air. Pour créer un effet antagoniste dans les maisons conventionnelles, les radiateurs sont installés sous les fenêtres, ce qui crée un nouveau problème : l'air est brûlé sur le radiateur qui a une température de 50 à 55°C. La poussière est soulevée et dispersée par l'air chaud dans toute la pièce. Cela nuit aux muqueuses, car la poussière sèche extrêmement l'air de la maison. L'effet de courant d'air sur la vitre, ainsi que le sur-échauffement par les radiateurs, sont des problèmes qui n'existent pas dans une maison passive. La température de l'air préchauffé par l'installation de ventilation est d'env. 24 à 28°C, seulement quelques degrés de plus que la température ambiante ; et une vitesse d'air inférieure à 2,0 m/s. L'énergie de chauffage pourrait donc être

fournie par un radiateur d'appoint qui chauffe la pièce seulement de quelques degrés pour ne pas soulever la poussière et la disperser partout comme un radiateur à 50-55°C. Il est donc possible de maintenir une température ambiante agréable sur toute la surface habitable de la maison, sans pour autant chauffer à des températures excessives. Enlevant les radiateurs, les surfaces vitrées sont complètement libres, ce qui augmente encore plus le confort et le bien-être.

6.6 Le réchauffement de la maison grâce au rayonnement solaire à travers de grands espaces vitrés

Avec l'installation d'un avant-toit calculé selon la position du soleil, comme dans l'exemple de Grobe, le réchauffement supposé ne se produit pas. Pendant la journée et lors de températures extrêmes, on peut fermer les fenêtres et l'air extérieur chaud ne peut pas pénétrer dans la maison. S'il y a un échangeur géothermique intégré dans l'installation, l'air chaud peut se refroidir en passant par un tuyau enterré. Quand la température estivale est de 30 à 35°C, la température terrestre s'élève à seulement 8°C et il en résulte une température ambiante de 20°C. Le puits provençal peut donc refroidir les températures jusqu'à un certain point ; pour refroidir et amener encore plus



fig. 6-3 Façade avant de la salle de séjour/salle à manger dans la maison passive Grobe

d'air frais pendant la nuit on peut toujours ouvrir les fenêtres. Cependant, on n'atteindra jamais des températures aussi fraîches qu'avec une climatisation, ceci n'étant pas souhaité pour des raisons de santé.

Nos expériences nous ont montré que malgré une grande surface vitrée orientée vers le sud, le réchauffement de ces pièces est plus faible que dans la construction conventionnelle (voir chapitre 5 "exemples"). Les grandes surfaces vitrées augmentent le bien-être des habitants, car en été comme en hiver, la lumière joue de manière très positive sur l'organisme humain. En ce qui concerne le type de construction, on peut le comparer à une véranda, sauf que son enveloppe se fond dans l'enveloppe du bâtiment pour que l'on puisse en profiter pendant toute l'année à des coûts réduits.

6.7 Le standard maison passive et l'écologie

Le concept de la maison passive est tout d'abord conçu d'un point de vue technique et n'a rien à voir avec la maison écologique quant au choix des matériaux de construction. Cependant, il est judicieux de construire la maison avec des matériaux écologiques, ce qui est faisable pour la construction massive mais aussi l'ossature bois sans problèmes considérables.

Pour augmenter le bien-être et suivre l'idée écologique, il y a plusieurs possibilités, par exemple l'application de glaise comme crépi intérieur. La glaise est un matériau très bénéfique pour les personnes allergiques car elle assure un taux d'humidité idéal dans les pièces d'habitation.

Une couche de 2 cm à peine régule de manière optimale l'humidité et absorbe les odeurs et en partie les toxines de l'air intérieur. Les surfaces en crépi de glaise colorée présentent un atout de décoration et les couleurs ocres un charme méditerranéen.

La laine de mouton est un matériau naturel excellent pour l'isolation, en plus d'être une ressource végétale renouvelable. On l'utilise pour filtrer les explosifs toxiques tels que le formaldéhyde ou encore des odeurs désagréables à l'intérieur de la maison, pour obtenir un bon assainissement de bâtiment. Beaucoup d'entre nous passent presque 90 % de leur temps dans des espaces clos et sont exposés à de nombreuses substances nuisibles, parfois très malaises. En plus du toxique formaldéhyde, certains matériaux de construction contiennent du pentachlorophénol (pcp) et du biphenyle polychloré (pcb). Des expériences scientifiques du ECO-Institut à Cologne démontrent que le formaldéhyde est très bien absorbé par la laine de mouton, qui a une capacité de rétention de plusieurs décennies. Par conséquent, les toxiques restent durablement dans la fibre. La fibre de la laine de mouton peut absorber et garder l'humidité jusqu'à 40 % de son propre poids (à l'intérieur), sans même être humide au toucher, ni perdre de sa qualité d'isolation. Dès que les conditions climatiques changent, l'humidité s'en va. La laine de mouton représente un régulateur optimal du climat dans le bâtiment. Elle assure le parfait équilibre entre la température ambiante et le taux d'humidité.



fig. 6-4 Outre ses bonnes propriétés d'isolation, la laine de mouton assure un équilibre idéal entre la température ambiante et l'humidité atmosphérique

La capacité thermique de la fibre est également très importante. Elle détermine l'aptitude d'isolation thermique en été, est prépondérante dans l'aménagement des combles et est très importante pour assurer le confort.

Pour plus d'informations :

www.eco-bio.info

6.8 Bilan

L'on discute beaucoup des soi-disant inconvénients du standard maison passive. Pour nous utilisateurs, après avoir habité une maison passive pendant deux ans, ces préjugés s'avèrent sans fondement. Le seul inconvénient connu d'une maison passive est la capacité restreinte de sa cave par rapport à celle des caves conventionnelles, qui peut être un problème pour stocker la nourriture au frais. Pour les amateurs de bière et de vin, une solution serait la construction d'une cave supplémentaire.

Une considération objective nous montre non seulement que le confort est beaucoup plus élevé mais qu'en plus nous contribuons activement à la protection de l'environnement.

7 La rentabilité

Il y a quelques années encore, on considérait impossible l'économie énergétique de 90% de la maison passive par rapport à celle d'une maison conventionnelle. Aujourd'hui, après l'avoir prouvé à l'aide de nombreux exemples pratiques, nous savons que le concept maison passive est fiable.

Cependant, il existe toujours des préjugés tenaces, surtout par rapport aux maisons individuelles. Les doutes qu'ont les maîtres d'ouvrage privés concernent surtout les coûts de construction plus élevés. Ceux-ci ne prennent pas en compte que la construction passive est moins chère à long terme, ni que la valeur immobilière de leurs maisons est bien supérieure. Un maître d'ouvrage qui paye 180 000 € à son promoteur, mais seulement 179 000 € à la concurrence, pense avoir économisé 1 000 €. Cela s'avère incorrect si l'on considère tous les coûts à long terme. En effet, les économies initiales peuvent parfois se transformer en une grosse perte.

Le maître d'ouvrage hésite beaucoup à construire une maison passive car les fenêtres notamment sont bien plus chères à cause de leur fabrication longue et coûteuse. Certains composants d'une maison passive ne se produisent pas encore en série et sont quasiment des pièces uniques. Si la demande augmente, ces pièces seront produites en série et les prix baisseront.

En outre, on dit, par erreur, que les installations de ventilation sont ajoutées aux coûts d'approvisionnement. Cependant, l'idée de base de la maison passive est que les besoins énergétiques sont tellement faibles qu'il n'y a pas besoin d'un système de chauffage conventionnel et que les ponts thermiques négatifs couvrent la plus grande part de l'énergie de chauffage. Par conséquent, les coûts qui en résultent (différence de coûts de ventilation et de chauffage) baisseront fortement si la demande augmente.

En effet, les économies faites grâce à une maison passive sont énormes. Dans une maison conventionnelle, on paye des frais supplémentaires pendant toute l'année, tels que le gaz, la maintenance du chauffage et le ramonage. Toutes ces dépenses n'existent pas dans une maison passive.

D'autant plus que les coûts énergétiques étant constamment en hausse, il est judicieux de construire des maisons innovantes et efficaces. De plus en plus de promoteurs ont pour objectif de construire en conciliant le confort, le bien-être et l'efficacité énergétique. Cependant, en considérant les coûts et les données souvent inexactes et contradictoires quant aux dépenses à effectuer pour une maison passive, les personnes auparavant intéressées hésitent fortement. Les programmes de subventions ne sont pas très clairs, car il n'y a pas de bilan à long terme pouvant servir de fondement pour une évaluation fiable de la maison passive.

7.1 Le principe économique de la maison passive

Si l'on veut faire des économies énergétiques, on doit d'abord s'attendre à une augmentation des frais. Après un certain temps, ces frais excessifs sont amortis et on commence à économiser. Les observations impressionnantes du Passivhaus-Institut à Darmstadt ont démontré, il y a quelques années, que les coûts de construction montent quand il s'agit d'une maison à basse consommation énergétique avec chauffage conventionnel. C'est seulement à partir du moment où un système de chauffage conventionnel n'est plus nécessaire, et en installant une VMC à double flux avec récupération de chaleur, que les coûts diminuent énormément.

7.2 Analyse économique lors de la conception de logements

Il est important d'avoir une vue plus large lors de la conception de la maison. Il n'est pas suffisant de considérer seulement les coûts d'investissement, c'est-à-dire uniquement les dépenses pour la construction de la maison. L'achat d'une maison est un investissement pour la vie et requiert une considération de tous les facteurs coût. Pour l'analyse à long terme, il faut considérer les facteurs suivants :

- la consommation énergétique,
- les coûts de réinvestissement,
- la durée de vie de tous les composants (installations techniques, éléments de construction),
- le besoin additionnel en chauffage,
- les taxes de bases et charges,
- les subventions publiques,
- l'augmentation des coûts énergétiques,
- le financement.

Quant aux installations et leurs éléments de construction, la maison passive remplit toutes les exigences de qualité. Les différents éléments de construction ont une durée de vie extraordinaire. Les installations techniques (par exemple la ventilation) ne montrent pas de d'usure. Le système de chauffage conventionnel s'use plus facilement et doit être réparé régulièrement. N'ayant pas besoin d'un tel système de chauffage, la maison passive économise les coûts de réparation. Le système de ventilation a une très longue durée de vie et économise ainsi les coûts de réinvestissement.

Pour respecter les principes de la maison passive, la qualité de la construction est particulièrement importante. La construction sans pont thermique, une enveloppe étanche pour garantir une ventilation optimale et la connexion des fenêtres, ainsi que d'autres éléments de construction, contribuent à l'augmentation

des coûts. Cependant, tout cela améliore énormément la qualité et la durée de vie de la construction. Selon les statistiques, une construction de maison individuelle conventionnelle va, pendant les premières huit années, présenter des dégradations dans la construction, dont la réparation coûte en moyenne 20 000 €. La conception et la planification plus rigoureuse d'une maison passive permettent d'éviter ce genre de problèmes.

En comparaison avec une maison à basse consommation énergétique, la maison passive consomme 50 kWh/m²a de moins par rapport à un immeuble ancien, sa consommation étant inférieure à 200 kWh/m²a. Voici un calcul de consommation de chauffage pendant 30 ans d'un immeuble sans assainissement énergétique :

$$\frac{200 \text{ kWh/m}^2\text{a} \times 150 \text{ m}^2 \times 30 \text{ ans} \times 0,50 \text{ €/l de fioul}}{10 \text{ kWh/l de fioul}} = 45 \text{ 000 €}$$

La somme de 45 000 € ne tient pas compte des intérêts. Avec les intérêts de 5 % sur une somme annuelle de 1 500 €, le total s'élèverait après 30 ans à 100 000 €.

Il y a de nombreux programmes de subvention qui financent des projets sous certaines conditions (voir annexes pages 136-142). En tenant compte de tous ces facteurs et des subventions publiques, le besoin mensuel de financement est dès le début inférieur pour une maison passive que pour une construction traditionnelle. Un calcul mathématique exact est très coûteux et exige de bonnes connaissances en finance. Il existe des logiciels informatiques pour calculer la rentabilité d'un projet, par exemple le "Conseiller de consommation énergétique". Ce logiciel rassemble tous les facteurs mentionnés avec divers petits calculs et un calcul de rentabilité.

Dans le prochain chapitre, j'explique ce logiciel à l'aide de certains exemples autour de la maison passive pour obtenir un meilleur aperçu du calcul complexe des dépenses.

7.3 Exemples de calcul

7.3.1 Comparaison entre la maison passive et la maison conventionnelle à l'aide d'un logiciel de gestion énergétique

Aperçu du programme : Il s'agit d'un logiciel pour les architectes, ingénieurs, constructeurs/promoteurs, maîtres d'ouvrage et conseillers en énergie ainsi que pour les investisseurs, qui veulent calculer les dépenses énergétiques d'une maison. Ce logiciel permet de comparer des bâtiments ou encore des composants de bâtiments. Le logiciel propose, selon le besoin, la méthode de la valeur actualisée nette et le calcul "cash-flow" (trésorerie disponible).

La méthode de la valeur actualisée nette se base sur l'évolution des économies pour l'acquisition ou le réinvestissement des composants de construction. Le calcul du flux de trésorerie sert au maître d'ouvrage d'outil pour contrôler le taux d'intérêt, le remboursement à l'établissement de crédit ainsi que les dépenses énergétiques et les charges.

Le conseiller en énergie électronique fournit des résultats calculés dans un laps de temps défini. Il calcule soit en détail ou dans l'ensemble les coûts de financement, les charges et les dépenses énergétiques :

- Les coûts d'acquisition, les dépenses mensuelles et totales ;
- Le rendement et le surcroît d'approvisionnement ;
- La période d'amortissement et des informations sur les gains et pertes économiques ;
- Les coûts absolus ;
- Les coûts relatifs, c'est-à-dire en comparaison avec l'objet de référence ;
- L'amortissement avec ou sans intérêt.

En plus de la possibilité de comparer une maison au standard énergétique conventionnel avec une maison à basse consommation énergétique ou une maison passive, on peut également comparer différents composants tels que les installations techniques, l'isolation ou la qualité des fenêtres. Cependant, mon expérience professionnelle m'a démontré l'utilité de considérer le bâtiment dans son ensemble. Si l'on compare les coûts énergétiques et les frais supplé-

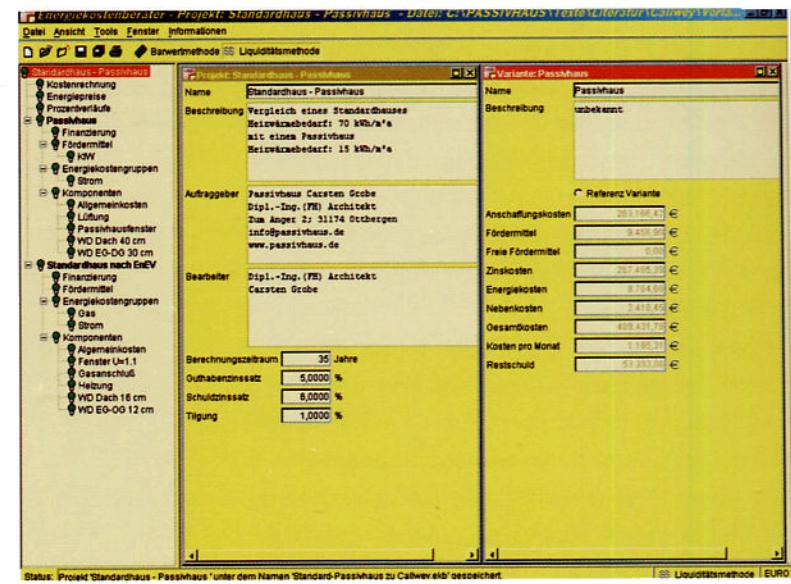


fig. 7-1 Écran de saisie du projet (à gauche) / total des coûts - type de construction (à droite)

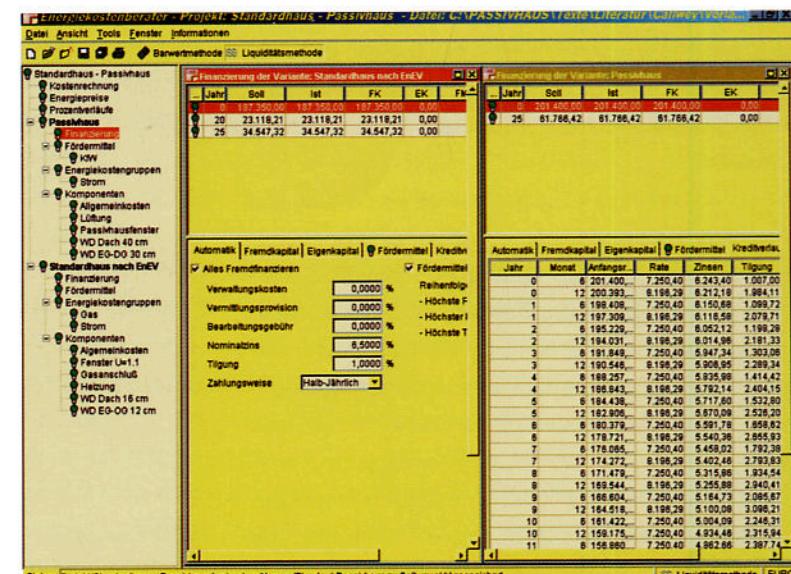


fig. 7-2 Écran de saisie du financement (à gauche) / dépenses et évolution du prêt

mentaires pour les deux standards de construction, on peut conclure que la maison passive est plus économique que la construction conventionnelle.

Structure des données: La période de référence, le taux d'intérêt débiteur et créditeur, ainsi que le montant de l'amortissement doivent se définir auparavant et de manière libre. Pour le calcul, on a besoin des définitions de base suivantes pour chaque type de construction :

- La définition des composants de construction (fenêtres, isolation, chauffage etc.)
- La définition des coûts énergétiques (électricité, fioul, gaz, bois)
- La définition des subventions
- La définition des modalités de financement (taux d'intérêt, remboursement, taxes)
- La définition du taux d'intérêt débiteur et créditeur pour le "compte d'épargne imaginaire"
- La définition du taux d'inflation prévu

Une fois un standard de construction choisi, on définit différents composants qui se subdivisent en prix d'approvisionnement, résistance, frais supplémentaires (frais pour le ramonage, entretien du chauffage, coûts de base) et consommation énergétique. Selon le standard des bâtiments à comparer (par exemple standard de construction), on introduit les valeurs caractéristiques des composants pour ensuite les attribuer à une des différentes catégories de coûts énergétiques. Ces catégories analysent les prix et leur hausse éventuelle. Ensuite, différentes subventions sont attribuées aux différents types de construction qui sont intégrées automatiquement dans le processus de financement et de facturation.

Les maîtres d'ouvrage qui veulent apporter leurs propres moyens financiers pour observer les dépenses mensuelles réelles, peuvent définir les capitaux externes, les capitaux et avoirs propres et les subventions, pour obtenir ainsi un aperçu de l'évolution complète du crédit. En choisissant le mode de paiement (mensuel, trimestriel, semestriel ou annuel), on contrôle la totalité des calculs.

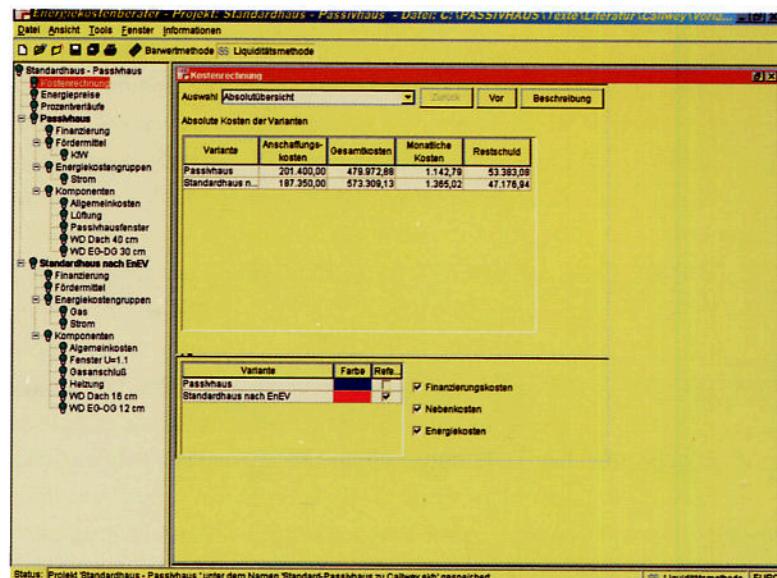


fig. 7-3 Aperçu : coûts d'acquisition, coûts totaux, coûts mensuels et solde restant dû

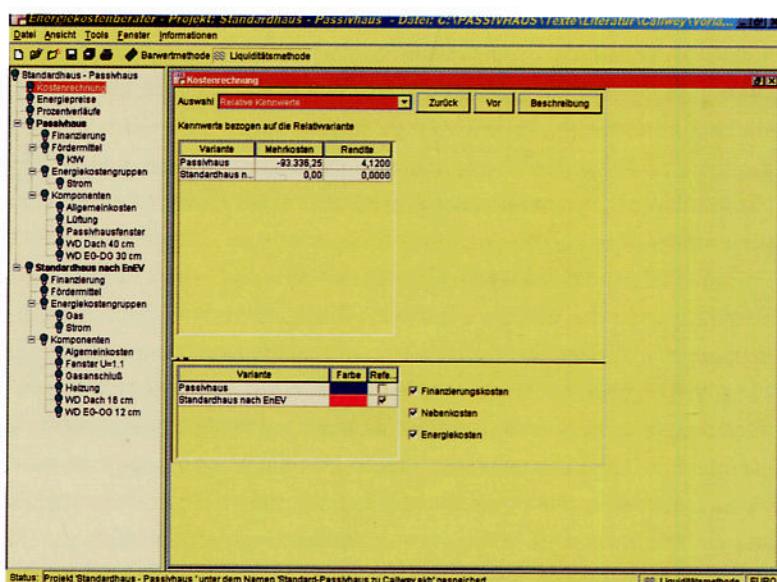


fig. 7-4 Valeurs relatives : surcoûts, moins-value et rendement

Selon le standard de construction, à un moment ou à un autre surgit le besoin d'investissement. Les données sont enregistrées dans la catégorie "composants" et les coûts de réinvestissement sont représentés pendant plusieurs années dans un graphique. Par conséquent, une somme venant à échéance au bout de 20 ans est répartie sur chaque année dans le livret d'épargne imaginaire et épargné (en touchant des intérêts).

Une analyse détaillée et fiable de la rentabilité d'un projet exige une considération de toutes les dépenses sur une période convenable à l'aide du logiciel PHPP. Il faut prendre en compte les coûts d'acquisition, les coûts de réinvestissement, la résistance des composants et le financement au taux d'intérêt conventionnel tout en considérant les subventions, les frais supplémentaires et les dépenses énergétiques.

On peut ainsi consulter l'ensemble de tous les coûts et les coûts en détail. L'exemple de la comptabilisation des coûts reflète l'idée de base suivante :

Malgré les coûts d'acquisition élevés, la maison passive enregistre de grandes économies grâce aux coûts énergétiques et aux frais supplémentaires moins élevés, tout cela avec un taux d'inflation conventionnel et en profitant de toutes les subventions possibles. En étant investisseur, on veut exactement connaître le rendement annuel de son investissement pour voir s'il est positif. Il est alors indispensable d'effectuer un calcul du rendement d'un projet. En effet, ce calcul se base sur les coûts relatifs et s'exprime en pourcentage, les dépenses étant nulles au bout de quelques années. Les coûts relatifs se composent de la différence annuelle entre le standard de construction de référence et le standard de construction en question. Par conséquent, le logiciel de gestion énergétique propose la représentation suivante des valeurs relatives.

Pour l'observateur, le moment est particulièrement intéressant quand l'évolution relative des coûts arrive au point mort(ou point d'amortissement) pour ensuite tomber dans le négatif. C'est à ce moment là qu'on parle d'amortissement. On peut choisir une analyse avec ou sans intérêts. En imposant les coûts d'un projet, on paye des intérêts débiteurs et créditeurs. Par conséquent, en général, sans paiement d'intérêt, le temps d'amortissement est plus court. En effet, dans notre exemple, il diminue en trois ans. On voit également particulièrement bien le rendement réel de différents standards de construction et la relation évidente entre les surcoûts d'acquisition et les coûts totaux. Pour une meilleure vue globale, les gains sont représentés dans le tableau de rendement annuel.

Avec un taux d'intérêt courant, les charges et les frais de maintien ainsi que les subventions (KfW, prime écologique), on constate une rentabilité au bout d'un an. Cette rentabilité existe malgré le surcoût prévu de 14 000 € dans notre exemple et même s'il n'y avait pas d'augmentation du coût énergétique dans l'avenir. À première vue, cela semble inimaginable.

Cependant, en considérant les dépenses totales mensuelles pour la construction, les intérêts, les coûts de réinvestissement après déduction des subventions, le résultat est clair. En examinant plus en profondeur les bénéfices grâce aux économies plus les intérêts créditeurs, on constate un rendement au bout de 35 ans qui correspond à plus de la moitié des coûts d'acquisition.

Les charges sont toujours des facteurs sous-estimés provoquant des coûts importants. Il est surprenant que les économies faites par la maison passive quant aux frais supplémentaires liés à la construction représentent bien plus de la moitié des économies grâce aux coûts énergétiques moins élevés.

En appliquant cet exemple à la réalité, c'est-à-dire en supposant une hausse des coûts énergétiques de 3 % par rapport au taux d'inflation, la maison passive enregistre d'énormes bénéfices.

Conclusion : Un surcoût d'environ 14 000 € peut s'amortir déjà au cours de la première année, en comptant les économies de gaz, d'énergie et de frais supplémentaires ainsi que les subventions.

Il est déterminant de prévoir à long terme et de ne pas oublier que les économies d'énergie et de frais supplémentaires se font durant toute une génération.

Si le maître d'ouvrage construit une maison à 30 ans et qu'il est à la retraite à 65 ans, on part d'une période de calcul de 35 ans. Les économies d'énergie s'élèvent à 93 000 € en supposant un taux d'inflation de 3 % sans augmentation des coûts énergétiques et avec un intérêt créditeur de 5 %.

Selon mes expériences, seulement 25 % des dépenses totales concernent la construction du bâtiment, plus de 75 % correspondant aux dépenses ultérieures à la construction. Si l'on prend en compte toutes les dépenses pendant la phase de construction, il en résulte une valeur immobilière plus importante.

Personne ne peut prévoir les augmentations des coûts, les taux d'intérêt et le taux d'inflation avec exactitude. Les calculs peuvent varier par rapport aux exemples, mais il est clair que les produits de longue vie avec des coûts de réinvestissement et de frais supplémentaires moins élevés, tels que les isolants et l'échangeur géothermique, sont nettement plus rentables. Nous devons considérer le projet de construction d'une maison passive sur le long terme. La maison passive est la maison écologique et économique du futur, malgré les surcoûts au début, surtout dans le secteur des maisons individuelles. En analysant les dépenses totales mensuelles quant au prêt, aux subventions, aux charges et aux dépenses fixes, on se rend compte que les dépenses d'une maison passive peuvent être inférieures à celles d'une maison à basse consommation énergétique.

Pour plus d'informations concernant le calcul des coûts et le logiciel de gestion économique : www.Energiekostenberater.de

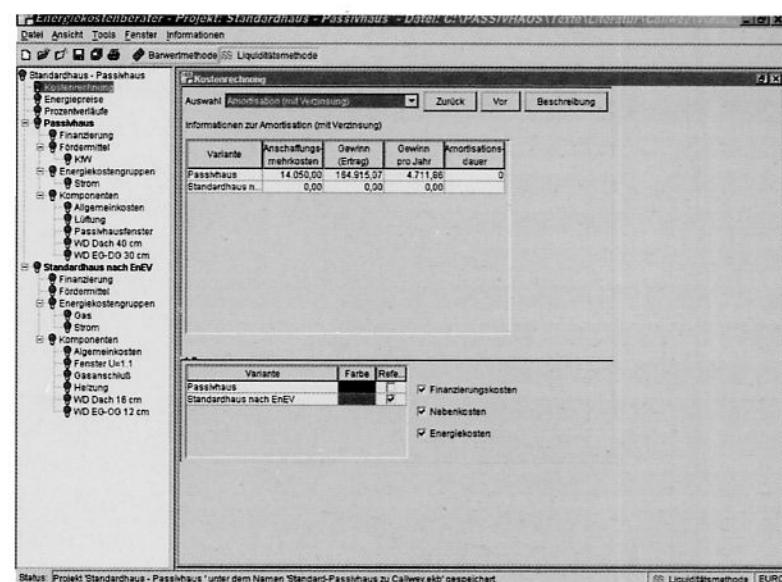


fig. 7-5 Amortissement et intérêts :
surcoûts d'acquisition, bénéfices

7.3.2 Comparaison de différentes installations de chauffage d'une maison passive

Dans l'ensemble on compare huit installations différentes pour deux tailles de maison. Premièrement, on analyse une maison passive avec une surface habitable de 120 m², ensuite on augmente la surface à 180 m². L'installation de chauffage est la même. Cependant, il y a une différence dans les dépenses énergétiques et d'installation.

Tous les composants se caractérisent par les coûts, la durée de vie et l'âge, et doivent être échangés en cas de besoin selon la résistance. Les calculs sont faits à l'aide du logiciel de gestion énergétique.

Période de calcul : La période de calcul est de 35 ans. Pendant ce laps de temps on calcule toutes les dettes avec un taux d'intérêt de 6 % et les économies avec un taux d'intérêt de 5 %.

Hausse de prix : On constate une hausse générale des prix ainsi qu'une augmentation constante des coûts énergétiques de 3 %.

Les coûts énergétiques : Toutes les énergies utilisées doivent s'acheter ou se produire. Les coûts énergétiques sont les suivants :

- | | |
|---------------------------------|----------------------------|
| – gaz (8,8 kWh/m ³) | env. 0,36 €/m ³ |
| – électricité de nuit | 0,082 €/ kWh |
| – électricité (jour) | 0,143 €/ kWh |
| – chauffages à pellets | env. 100 €/m ³ |

Financement : Le taux d'intérêt nominal est de 6,0 %, le crédit s'amortissant avec un taux d'intérêt de 1,0 %. Pour créer des conditions égales, tous les coûts afférents sont cofinancés. À cause du grand nombre de données, on renonce à une évaluation explicite de celles-ci. Par conséquent, on constitue un tableau qui résume les coûts des différents chauffages. Un deuxième tableau montre le rendement et l'amortissement des systèmes de chauffage, un troisième confronte les frais supplémentaires et les coûts énergétiques aux charges financières.

Tous les modèles de chauffage disposent d'une ventilation mécanique contrôlée à double flux.

Système de chauffage A

- échangeur thermique à contre-courant
- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- collecteurs solaires sur 10 m² pour la production d'eau chaude avec des ballon tampon pour la préparation instantanée d'eau chaude (400 litres)
- système d'appoint électrique pour la production d'eau chaude

Système B

- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- chaudière électrique et solaire pour la production d'eau chaude
- production d'eau chaude sanitaire à l'aide de collecteurs solaires sur 20 m²
- production d'eau chaude sanitaire à l'aide du système de chauffage d'appoint électrique
- ballon stratifié de 100 litres

Système C

- pompe à chaleur avec chauffage additionnel électrique
- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- deux chauffages additionnels
- pompe à chaleur et pompe solaire électriques pour la production d'eau chaude sanitaire
- collecteurs solaires sur 10 m²
- ballon d'eau chaude sanitaire (400 litres)

Système D

- VMC à double flux avec groupe électrogène compact
- pompe à chaleur avec chauffage additionnel électrique
- échangeur géothermique DN 250 ; longueur : 40 cm
- chaudière électrique et solaire
- production d'eau chaude sanitaire avec pompe à chaleur + installation solaire électrique de 12 m²
- ballon stratifié de 100 litres

Système E

- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- poêle à bois avec une puissance nominale de 1,5/6,5 kW
- chauffage d'appoint pour la production d'eau chaude et le chauffage
- production d'eau chaude solaire (primaire en été et avec un poêle en hiver)
- collecteurs solaires sur 10 m²
- ballon d'eau chaude sanitaire (300 litres)

Système F

- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- poêle à bois avec une puissance nominale de 1,5/6,5 kW
- batterie d'eau chaude pour le réchauffement de l'air
- chaudière pour la production d'eau chaude (primaire en été et avec un poêle en hiver)
- ballon d'eau chaude sanitaire (300 litres)

Système G

- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- collecteurs solaires sur 10 m²
- ballon d'eau chaude (400 litres)
- chaudière à condensation pour l'énergie de chauffage restante
- chaudière à condensation pour la production d'eau chaude sanitaire restante

Système H

- échangeur géothermique DN 200 ; longueur : 45 cm
- ballon d'eau chaude (300 litres)
- chaudière à condensation gaz pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage

La configuration H correspond à celle de G sans l'installation de collecteurs solaires. Cela permet pour le moment d'éviter des coûts d'investissement trop élevés. Cependant, les coûts pour l'installation du réseau de distribution et les radiateurs conventionnels sont relativement élevés.

I COÛTS ABSOLUS POUR LA CONSTRUCTION D'UNE MAISON PASSIVE AVEC UNE SURFACE HABITABLE CHAUFFÉE DE 120 M²

L'ensemble de composants combinés avec les facteurs secondaires pour la construction d'une maison passive permet d'établir une évaluation des coûts. Il s'agit des facteurs suivants : prix énergétique, résistance, durée de vie, hausse de prix et capacités de financement.

fig. 7-1 Aperçu des coûts absolus (en €) d'une maison passive avec une surface habitable de 120 m²

Système de chauffage	Coûts d'acquisition	Dépenses totales	Dépenses mensuelles
A chauffage d'appoint électr./ECS coll. solaires+électr.	16 852,-	97 665,-	233,-
B chaudière/ ECS inst. solaire+électr.	24 020,-	110 458,-	263,-
C installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	24 000,-	107 391,-	256,-
D installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	37 334,-	110 059,-	262,-
E poêle à bois/coll. solaires + chauffage d'appoint électr.	26 623,-	112 028,-	267,-
F poêle à bois/chauffage d'appoint électr.	20 835,-	109 495,-	261,-
G chaudière à condensation gaz + coll. solaires	25 452,-	137 435,-	327,-
H chaudière à condensation gaz sans coll. solaires	19 879,-	120 659,-	287,-

Si l'on prend en compte tous les coûts d'investissement, les coûts supplémentaires et les coûts énergétiques, on peut constater que le système de chauffage **A** est le moins cher quant aux coûts d'acquisition, totaux et mensuels. Cela est dû à la faible consommation énergétique et à l'installation simple et peu coûteuse.

À long terme, le système **G** (système de ventilation avec chaudière à condensation et ballon d'eau) est très coûteux, alors que le coût d'acquisition n'est pas le plus élevé. Cependant, le coût d'acquisition, le coût

d'entretien, les frais supplémentaires et la consommation énergétique restent trop élevés sur une période de 35 ans. Certes, le fait de ne plus avoir besoin d'un chauffage conventionnel décentralisé provoque une surcharge technique, l'installation solaire causant un surcoût supplémentaire. D'un point de vue énergétique, les économies d'énergie ne sont pas suffisantes pour compenser l'installation de chauffage conventionnel. Sans système de chauffage et avec une pompe air/eau, l'approvisionnement énergétique par le réchauffement de l'air garantirait une meilleure rentabilité. En tout cas, une chaudière à condensation gaz (puissance thermique nominale de 11 kW) est surdimensionnée pour une maison passive.

I COÛTS ABSOLUS POUR LA CONSTRUCTION D'UNE MAISON PASSIVE AVEC UNE SURFACE HABITABLE CHAUFFÉE DE 180 M²

fig. 7-2 Aperçu des coûts absolu (en €) d'une maison passive avec une surface habitable de 180 m²

	Coûts d'acquisition	Dépenses totales	Dépenses mensuelles
Système de chauffage			
A chauffage d'appoint électr./ECS coll. solaires + électr.	19 076,-	112 246,-	267,-
B chaudière/ECS inst. solaire + électr.	26 245,-	123 849,-	295,-
C installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	26 224,-	117 377,-	280,-
D installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	26 558,-	120 537,-	287,-
E poêle à bois/coll. solaires + chauffage d'appoint électr.	26 623,-	114 805,-	274,-
F poêle à bois/chauffage d'appoint électr.	29 835,-	112 273,-	267,-
G chaudière à condensation gaz + coll. solaires	28 188,-	147 484,-	351,-
H chaudière à condensation gaz sans coll. solaires	22 614,-	130 709,-	311,-

Le système de chauffage le moins économique pour une maison passive avec une surface habitable de 180 m² est de nouveau le système avec la chaudière à condensation gaz avec l'installation solaire. Les raisons sont les mêmes que dans le tableau précédent, avec notamment un coût d'acquisition excessif.

Quant au système le plus économique, il y a des changements par rapport au premier tableau :

En augmentant la consommation énergétique, le poêle à bois sans collecteurs solaires enregistre un amortissement des coûts également plus élevé (**F**). Les coûts sont presque les mêmes que le système **A**. Cependant, si l'on considère les collecteurs solaires sur 10 m², l'amortissement d'un simple chauffage d'appoint avec une installation solaire commence à partir d'une surface de 200 m² dans une maison pas-

sive. Dans une maison passive avec une surface supérieure à 200 m², il est conseillé d'installer un poêle à bois pour couvrir le besoin total en énergie de la maison. Dans ce cas, l'installation d'un poêle indépendant de l'air intérieur et étanche en cas de non utilisation est raisonnable.

Au contraire, dans les maisons de petite ou de moyenne taille, il n'est pas judicieux d'installer un poêle, sauf pour des raisons purement écologiques. En brûlant le bois, seule la quantité de CO₂ que l'arbre transforme par la photosynthèse durant sa croissance, sera générée.

On a pu constater que les systèmes de chauffage compacts provoquent une surcharge technique, ce qui cause de mauvais résultats économiques. L'échangeur thermique, l'installation de ventilation, la thermie solaire, le chauffage d'appoint, le ballon d'eau et la pompe à chaleur sont très écologiques mais pas très économiques. Surtout le système de chauffage **D** avec son double échangeur géothermique, les collecteurs solaires sur 10 m² et le ballon tampon de 100 litres, engendre un déficit économique.

I RENDEMENT, AMORTISSEMENT ET PROFITS

- MAISON (SURFACE HABITABLE 120 M²)

Dans une analyse économique, le profit est très important, on l'appelle "rendement". Le rendement est le pourcentage nul de la somme des coûts relatifs au bout d'une période déterminée. On parle de coûts relatifs car ils dépendent des différents systèmes de chauffage. Par conséquent, il faut désigner un système de chauffage aux résultats négatifs. Il servira de point de comparaison. J'ai donc choisi le système **G** avec une chaudière à condensation gaz et une installation solaire.

*fig. 7-3 Profits et rendement sur une surface de 120 m²
dépenses / profits en €*

Système de chauffage	Coûts d'acquisition	Profits annuels	Rend.
A chauffage d'appoint électr./ECS coll. solaires + électr	8 600,-	2 712,-	5,34
B chaudière/ECS inst. solaire + électr.	1 432,-	1 800,-	5,36
C installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	1 452,-	2 124,-	5,50
D installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	1 882,-	1 653,-	4,74
E poêle à bois/coll. solaires + chauffage d'appoint électr.	1 171,-	1 632,-	5,00
F poêle à bois/chauffage d'appoint électr.	4 617,-	1 898,-	5,24
G chaudière à condensation gaz + coll. solaires	./ .	./ .	./ .
H chaudière à condensation gaz sans coll. solaires	5 573,-	1 047,-	4,82

Le système **A** présente un profit annuel de 2 700 € par rapport au système **G**. Ce système est déterminant quant aux coûts d'acquisition, les coûts d'entretien et de réparation étant quasiment inexistant. Par conséquent, il enregistre le plus grand profit. En comparant le système **F** et **H**, il est évident que le système **F** a un profit significatif, malgré le fait qu'il s'agisse dans les

deux cas d'un système de chauffage actif. L'investissement dans les radiateurs est particulièrement important, causant des dépenses très élevées. Dans la maison passive, on peut renoncer à un système de radiateurs conventionnel pour ce qui est de l'aspect économique, technique et de confort.

Quant au rendement, comparée à la chaudière solaire, l'installation solaire présente le meilleur résultat sur une période de 35 ans. Elle est plus bénéfique qu'un simple chauffage d'appoint du système **A**. L'autre installation solaire aurait démontré le même résultat si sa surface avait été plus petite. La raison du meilleur résultat du système **C** est la consommation énergétique plus faible. Malgré un investissement plus élevé et des frais supplémentaires égaux, la consommation énergétique du système **A** est deux fois plus élevée que celle du système de référence (**G**).

I RENDEMENT, AMORTISSEMENT ET PROFITS

- MAISON (SURFACE HABITABLE 180 M²)

Le temps d'amortissement de tous les systèmes, par rapport au système **G**, est de zéro. Dans le tableau suivant, on analyse le temps d'amortissement, qui ne dépend pas seulement du système **G**.

*fig. 7-4 Profits et rendement sur une surface de 180 m²
dépenses / profits en €*

Système de chauffage	Coûts d'acquisition	Profits annuels	Rend. en %
A chauffage d'appoint électr./ECS coll. solaires + électr	9 111,-	2 475,-	5,52
B chaudière/ECS inst. solaire + électr.	1 943,-	1 635,-	5,58
C installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	1 963,-	2 142,-	5,52
D installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	1 370,-	1 643,-	4,78
E poêle à bois/coll. solaires + chauffage d'appoint électr.	1 565,-	2 160,-	5,14
F poêle à bois/chauffage d'appoint électr.	7 352,-	2 426,-	5,34
G chaudière à condensation gaz+coll. solaires	./.	./.	./.
H chaudière à condensation gaz sans coll. solaires		1 047,-	4,82

C'est encore le système **A** qui montre des coûts d'acquisition faibles et le plus grand profit. Il est étonnant que le rendement du système **B** soit plus élevé. Il s'agit d'une aération centralisée, un chauffage d'appoint pour la préparation d'eau chaude sanitaire et l'installation de collecteurs solaires sur 20 m², plus un ballon tampon de 100 litres. Cet exemple de calcul montre la rentabilité d'un ballon d'eau chaude et d'une installation solaire de haute qualité. Malgré un coût supplémentaire de 7 158 € par rapport au système A, l'énergie solaire est plus rentable à long terme. C'est à dire que les coûts deviennent plus vite nuls par rapport aux autres systèmes.

Le grand profit du système **B** qui diffère légèrement avec **A**, prouve encore une fois la rentabilité économique d'un poêle dans une maison passive plus grande.

I COÛTS ÉNERGÉTIQUES

Il est particulièrement intéressant d'analyser la consommation énergétique et son coût. Dans la fig. 7-6, nous avons un aperçu du le coût énergétique pour une surface de 180 m². Cette surface est un exemple pour les deux tailles (120 et 180 m²) attestant un résultat qualitatif, car la consommation énergétique change en fonction du besoin énergétique par mètre carré. En changeant la taille de la surface, et en gardant le même paramètre kWh/m², le coefficient énergétique des différents types de construction augmente ou baisse, et les courbes se décalent parallèlement à l'axe de coûts.

Tous les systèmes sont dotés d'un ventilateur récupérateur de chaleur (VRC) et d'un puits provençal, l'installation périphérique étant différente :

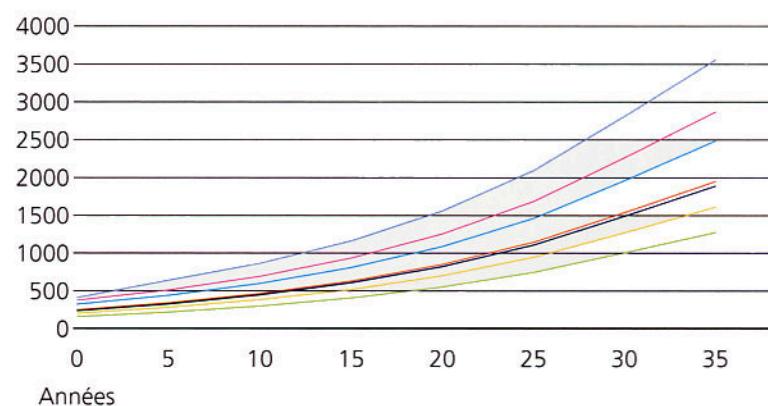
- A + chauffage d'appoint électrique + collecteurs solaires (10 m²) + réservoir d'eau.
- B + chauffage d'appoint pour la production d'eau chaude + collecteurs solaires (20 m²) + réservoir d'eau.
- C + installation compacte + chauffage d'appoint électrique + pompe à chaleur + collecteurs solaires (10 m²) + réservoir d'eau
- D + installation compacte + pompe à chaleur avec chauffage d'appoint électrique + pompe à chaleur avec réservoir + collecteurs solaires sur 12 m²
- E + poêle à bois + chauffage d'appoint pour production d'eau chaude sanitaire et le chauffage + collecteurs solaires (10 m²) + réservoir
- F + poêle à bois + chauffage d'appoint + réservoir sans système solaire
- G + chaudière à condensation gaz + chauffage d'appoint pour la production d'eau chaude sanitaire + radiateurs + collecteurs solaires (10 m²) + réservoir
- H + chaudière à condensation gaz + chauffage d'appoint pour production d'eau chaude sanitaire + radiateurs + réservoir sans système solaire

Le système avec le poêle à bois et les collecteurs solaires présente, comme supposé, le plus petit coût énergétique, car l'exploitation du soleil et du bois (matières premières naturelles) sont deux alternatives peu coûteuses. Le chauffage d'appoint électrique est la variante la plus chère, alors que dans l'ensemble, le

système A est économiquement plus profitable. Les systèmes C, D et H ne diffèrent pas beaucoup. C et D sont dotés d'un système compact de ventilation avec une pompe à chaleur, une installation solaire et un réservoir d'eau chaude sanitaire. Le système H dispose d'une chaudière à condensation gaz et d'un réservoir d'eau mais sans installation solaire. Ceci est lié au coût énergétique pour le gaz. Alors que le gaz coûte environ 4 centimes/kWh (condition du 1.1.2002), le prix d'électricité s'élève à 8 centimes/kWh et l'électricité de nuit env. 14 centimes/kWh. En répartissant les tarifs d'électricité (par exemple 2/3 jours et 1/3 nuits), le prix moyen s'élève à 12 centimes/kWh. En conclusion, on constate une différence de prix pour le gaz naturel et l'électricité qui sera compensée dans les installations compactes grâce aux panneaux solaires.

Énergétiquement parlant, on peut obtenir des améliorations en exploitant davantage l'énergie primaire, à condition que les prix de l'électricité soient favorables. Notre hypothese se base sur des tarifs plutôt élevés.

fig. 7-6 Comparaison des coûts énergétiques pour une surface de 180 m² en €



Système de chauffage : A B C D E F G H

**I PÉRIODE D'AMORTISSEMENT POUR
UNE MAISON PASSIVE AVEC UNE SURFACE
HABITABLE DE 120 M²**

La période d'amortissement (calculée à l'aide de la méthode du cash flow) représente le nombre d'années jusqu'à amortissement des coûts d'acquisition grâce au rendement énergétique, en comparaison avec le système de référence. Le tableau suivant montre la période d'amortissement en comparaison avec le système de référence de la première ligne.

20 m², plus le ballon tampon (100 litres) s'amortissent au bout de 26 ans, l'installation de ventilation compacte s'amortissant déjà au bout de 15 ans par rapport au poêle à bois sans installation solaire (système F).

tab. 7-5 Période d'amortissement d'une maison passive avec une surface habitable de 120 m²

Système de chauffage	Temps d'amortissement du système							
	A	B	C	D	E	F	G	H
A chauffage d'appoint électr./ECS coll. solaires + électr.	X	0	0	0	0	0	0	0
B chaudière/ECS inst. solaire + électr.		X	0	0	26	0	0	0
C installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	0	X	0	0	15	0	0	0
D installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires			X		0	0		
E poêle à bois/coll. solaires + chauffage d'appoint électr.	14	0	X		0	0		
F poêle à bois/chauffage d'appoint électr.	0	0	0	0	X	0	0	
G chaudière à condensation gaz + coll. solaires					X			
H chaudière à condensation gaz sans coll. solaires					0	X		

Les cases vides montrent l'impossibilité d'amortissement. Les cases grises n'ont pas de signification spéciale, car la comparaison s'applique sur la même référence.

Si le système **A** est notre système de référence, un poêle à bois et une installation solaire avec un réservoir d'eau chaude sanitaire s'amortissent au bout de 14 ans. La même installation mais sans panneau solaire s'amortit déjà à partir du premier jour.

Si l'on prend **F** comme référence, la grande installation solaire avec des collecteurs sur une surface de

I PÉRIODE D'AMORTISSEMENT POUR

UNE MAISON PASSIVE AVEC UNE SURFACE

HABITABLE DE 180 M²

Comme constaté dans les chapitres précédents, un simple poêle à pellets (**F**) s'amortit en peu d'années, le besoin énergétique étant en hausse par rapport à la surface. Sans ces conditions, tous les autres systèmes ne sont pas rentables, ils ne s'amortissent pas.

tab. 7-6 Période d'amortissement d'une maison passive avec une surface habitable de 180 m²

Système de chauffage	Temps d'amortissement du système							
	A	B	C	D	E	F	G	H
A chauffage d'appoint électr./ECS coll. solaires + électr.	X	0	0	0	0	0	0	0
B chaudière/ECS inst. solaire + électr.	X		0			0	0	0
C installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires	0	X	0	18		0	0	0
D installation compacte/pompe à chaleur + coll. solaires			X			0	0	0
E poêle à bois/coll. solaires + chauffage d'appoint électr.	0	0	0	X		0	0	0
F poêle à bois/chauffage d'appoint électr.	7	0	0	0	0	X	0	0
G chaudière à condensation gaz + coll. solaires						X		
H chaudière à condensation gaz sans coll. solaires					0	X		

I FRAIS SUPPLÉMENTAIRES

POUR LES COMPOSANTS

Les frais fixes tels que les taxes de bases ou les frais de ramonage ne dépendent pas de la consommation énergétique. Ici, on ne considère pas les éventuelles variations de prix (par exemple des tarifs de l'électricité). Cependant, les frais supplémentaires dépendent fortement du système de chauffage. Étant donné que la maison passive renonce à un système de chauffage conventionnel, il est nécessaire d'installer une ventilation contrôlée à double flux avec un récupérateur de chaleur efficace, comme un puits provençal et/ou une pompe à chaleur ou encore un réservoir tampon avec ou sans panneau solaire. En comparaison avec un chauffage à air électrique, les installations solaires et les pompes à chaleur économisent une grande part d'énergie primaire. En outre, ces systèmes occasionnent peu de frais supplémentaires. Alors qu'un système de chauffage actif ajoute des frais supplémentaires pour l'installation d'une cheminée, le ramonage et la maintenance de cette installation. Un système de ventilation à double flux a pour frais supplémentaire le changement des filtres uniquement. Seules les pompes à chaleur doivent se changer, occasionnant un coût de réinvestissement.

Le système de chauffage conventionnel de la maison passive, tel que le système A, engendre des frais supplémentaires annuels d'environ 10 % par rapport aux chauffages au fioul ou au gaz. Un grand potentiel d'économie consiste en la maintenance et au contrôle antipollution inutiles pour ce système. En conclusion, les frais supplémentaires ne sont pas à sous-estimer et ne doivent jamais être négligés dans un calcul économique.

I ÉVOLUTION DES COÛTS SUR PLUSIEURS ANNÉES

On analyse ensuite l'évolution des coûts totaux sur 30 ans à l'aide d'un graphique. Étant donné que les frais financiers représentent une contribution importante, ceux-ci sont intégrés dans le graphique.

En considérant les deux tableaux ci-contre, on constate que la courbe représentant le système de chauffage A se trouve au-dessous des autres courbes jusqu'à la 20^{ème} année, alors que ce système représentait une consommation énergétique trop élevée. Cependant, il y a pour ce système un besoin de réinvestissement, qui provoque une hausse de la courbe.

fig. 7-7 Évolution des coûts d'une maison passive de 120 m²

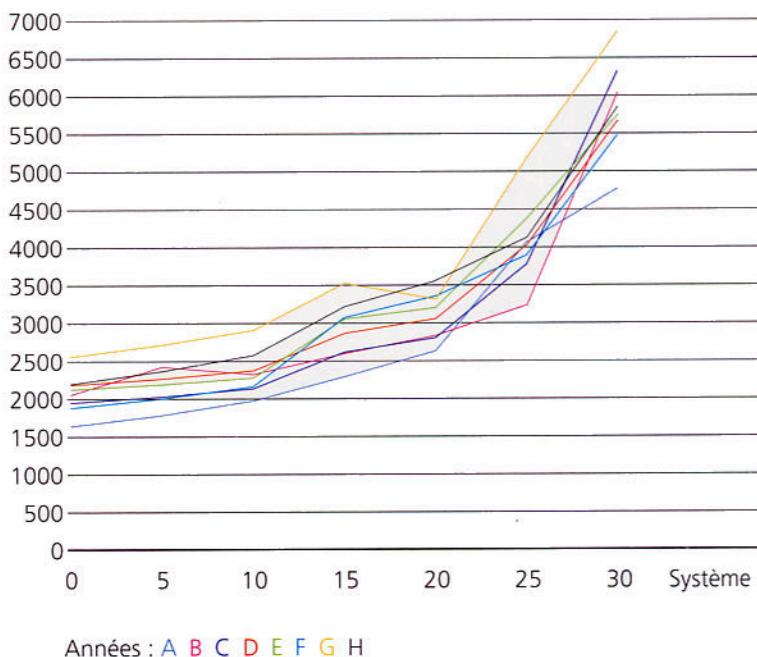
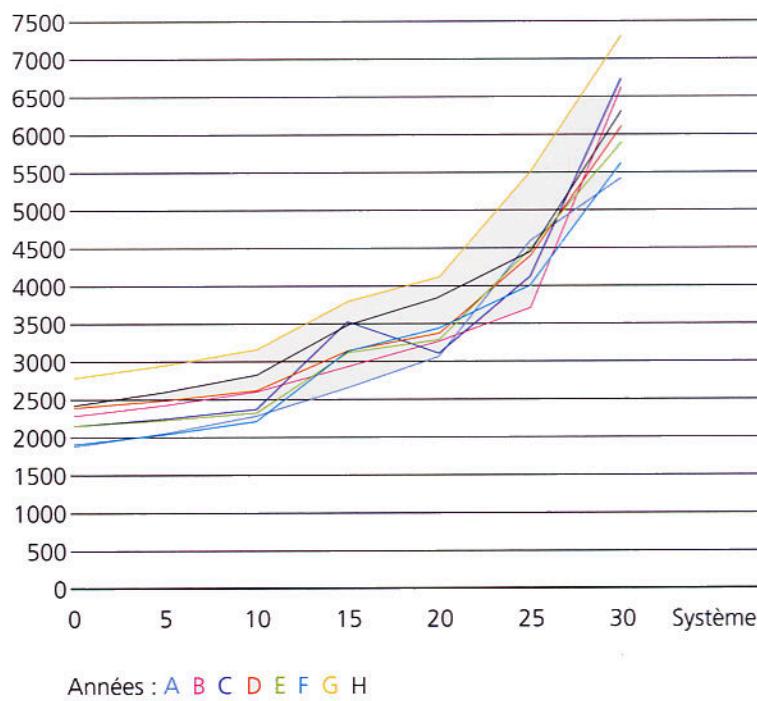


fig. 7-8 Évolution des coûts d'une maison passive de 180 m²



I ÉVALUATION DES COÛTS POUR L'INSTALLATION DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE

tab. 7-7 Aperçu des parts de financement en %

par rapport aux coûts totaux

Système de chauffage	Taille de la maison passive			Surface habitable 180 m ²		
	Surface habitable 120 m ²			Surface habitable 180 m ²		
	Acquisition	Énergie	Financement	Acquisition	Énergie	Financement
A chauffage d'appoint/WW solaire + électr.	17,3	46,6	51,2	16,9	49,0	49,0
B registre de réchauffage d'eau chaude/WW solaire + electr.	21,7	32,8	65,2	21,2	35,9	62,3
C installation solaire/WP + solaire	21,7	23,0	74,9	22,5	25,3	72,9
D installation solaire/WP + solaire	24,8	22,7	75,3	24,5	25,2	73,0
E poêle à bois/NHR solaire + électr.	23,8	15,3	79,7	23,2	17,4	77,8
F poêle à bois/NHR electr.	19,0	32,7	62,5	18,6	34,4	61,0
G chaudière solaire	18,5	15,8	59,1	19,1	17,0	59,6
H chaudière à condensation gaz	16,5	21,7	50,0	17,3	22,6	51,3

Le tableau ci-dessus donne un aperçu de différents systèmes de chauffage dans deux maisons de taille différente. Par rapport à la distribution de coût, on a pu constater les caractéristiques suivantes :

- Système **A**: Coûts d'acquisition faibles et part de financement minimal mais consommation énergétique élevée.
- Système **E**: Installation du poêle à bois avec financement relativement élevé, plus faible consommation énergétique.
- Système **H**: Coûts d'acquisition faibles, part de financement et consommation énergétique faibles.

Les coûts d'acquisition sont secondaires, pour le moment, et la résistance des différents composants est plus importante. Il est possible que les coûts d'acquisition soient faibles, cependant, la résistance du composant l'est encore plus. Dans ce cas ce composant doit être changé plus vite, ce qui cause une dépense supplémentaire. Par conséquent, la qualité des composants techniques est prioritaire, car au final les produits de haute qualité sont plus rentables.

I RÉSUMÉ ET CONCLUSION SUR LES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE DANS LA MAISON PASSIVE

Les calculs analytiques précédents sont extrêmement complexes et exigent la prise en compte d'un grand nombre de paramètres. Dans un premier temps, les calculs servent d'aperçu global. En ayant plus d'information à disposition, les résultats seront plus exacts. Les configurations des différents systèmes de chauffage forment seulement une partie de toutes les combinaisons de systèmes possibles. Elles servent seulement d'exemples. Dans des circonstances différentes, des changements de configuration peuvent avoir pour conséquence des économies énergétiques encore plus importantes que les combinaisons envisagées dans nos exemples. Il serait possible de combiner une installation de chauffage à distance ou encore une installation photovoltaïque, la pile à combustible, un système de climatisation du béton, ou un mélange de ces composants avec nos systèmes déjà présentés.

On peut constater que les systèmes simples à un coût d'acquisition relativement bas sont plus rentables malgré leur consommation énergétique élevée. Les maisons passives qui disposent de beaucoup d'installations techniques coûtent plus cher à l'installation. Cependant, un poêle à granulés de bois ou à pellets, ou encore une installation solaire, sont, écologiquement parlant, nettement préférables, malgré leur coût d'acquisition élevé.

La répartition des coûts : Il est évident que l'analyse des coûts d'acquisition n'est pas suffisante. Chaque part, que ce soit les frais supplémentaires, le coût d'investissement, la consommation énergétique ou encore le coût de réinvestissement, influence le calcul analytique. La répartition peut différer énormément, les coûts absolus et les profits étant particulièrement importants.

Comme mentionné auparavant, on prend comme point de départ une hausse de prix énergétique de 3 %. L'intérêt débiteur s'élève à 6,0 % et l'intérêt créiteur à 5,0 %. Les éventuelles subventions ne sont pas intégrées.

Cette analyse n'a pas pour but de favoriser ou de rejeter certains systèmes, il s'agit juste d'une comparaison de systèmes différents. Ce calcul est à considérer comme une photographie instantanée. Au cours des changements et renouvellements dans le domaine d'installations techniques, de nombreux nouveaux systèmes seront développés. Ces changements peuvent s'enregistrer dans le conseiller électronique en énergie pour le maintenir à jour.

7.3.3 Calcul de la rentabilité d'un projet de rénovation de bâtiment

Les immeubles et bâtiments rénovés représentent la plus grande partie des logements habités en Allemagne. Par conséquent, les travaux de rénovation sont particulièrement importants. Dès lors, il y a de grands efforts à faire pour appliquer le standard maison passive aux anciens immeubles, une affaire très coûteuse à cause de problèmes d'isolation.

Cependant, l'idée est d'adapter les immeubles anciens énergétiquement inefficaces à un standard plus moderne et économique. Par conséquent, il est indispensable d'établir un calcul de rentabilité en confrontant les dépenses aux profits éventuels .

Nous avons choisi comme exemple une construction à consommation énergétique extrêmement élevée. Il s'agit d'un château situé 20 km au sud-est de Hildesheim (Basse-Saxe, Allemagne). La propriété sert d'exploitation agricole. À côté de l'activité forestière, il y a un élevage de cochons. Jusqu'à présent, pour chauffer le château, l'orangerie et les étables, le coût de la consommation énergétique s'élevait à 65 000 €. Différentes mesures d'assainissement ont été appliquées pour baisser les coûts énergétiques :

- Remplacement d'une partie des fenêtres pour réduire les déperditions thermiques par transmission et par ventilation
- Application d'isolants supplémentaires pour réduire les déperditions de chaleur par transmission

- Installation de chaudière pour bûches de bois pour réduire les coûts de combustible
- Échange des vieux ventilateurs contre de nouveaux équipements énergétiquement efficaces
- Installation d'un système de ventilation avec échangeur thermique à courant croisé
- Réchauffement en hiver ou refroidissement en été grâce au puits provençal
- Installation d'une mini centrale électrique de chauffage urbain pour couvrir le besoin en chauffage de base.

I COMPARAISON DE COÛTS ET DE PROFITS

L'investissement de 260 000 € pour l'assainissement énergétique du château Söder se transforme au bout de 25 ans en profit de 1,8 millions d'euros, tout en supposant une hausse du prix énergétique de 3 % supérieur au taux d'inflation. Si le coût énergétique augmentait de 6 % annuels, le profit s'élèverait à 3,1 millions d'euros. Le coût d'investissement de cette rénovation de bâtiment s'amortirait en un an grâce aux économies d'énergie et de frais supplémentaires. Les coûts d'acquisition pour les différents composants de construction sont totalement variables selon le développement du marché. On ne se porte pas garant pour d'éventuels changements, d'autant qu'il existe des différences de coût allant jusqu'à 30 % entre le nord et le sud d'Allemagne.

Conclusion

Nous espérons avoir aidé les maîtres d'ouvrage, les promoteurs et les architectes à réduire les préjugés contre le standard maison passive. Lors de la conception d'un projet, il faut considérer non seulement les coûts d'investissement d'une construction, mais aussi les facteurs souvent sous-estimés par les architectes et les maîtres d'ouvrage, tels que les charges et les coûts énergétiques. Désormais, l'objectif de plus en plus important lors de la construction d'une maison est la protection de l'environnement. Depuis ces dernières années, la pollution provoque de plus en plus de problèmes de santé. En plus d'être plus écologique et économique, la maison passive offre un plus grand confort à ses habitants et constitue ainsi le standard de construction du futur, autant pour la construction neuve que pour l'assainissement d'immeubles anciens. Pour promouvoir la protection de l'environnement, tous les participants à un tel projet de construction, architectes et promoteurs, doivent travailler en étroite collaboration. Trouvez désormais toutes les informations sur les nouveaux développements et les grands projets futurs au standard maison passive sur :

www.passivhaus.de
www.maisonpassive.be
www.lamaisonpassive.fr

Annexes

1 Types de construction « basse énergie » en Suisse et en Autriche

Outre le standard maison passive répandu dans toute l'Allemagne, il existe d'autres concepts dans les pays voisins, qui ont pour même objectif d'utiliser l'énergie de manière rationnelle. En Suisse, on a introduit le standard MINERGIE qui poursuit des objectifs semblables pour la construction de maisons à faible consommation énergétique. Le standard de construction MINERGIE, est également appelé MINERGIE-P ou MINERGIE Passiv car il ressemble au standard maison passive.

1.1 Minergie

Le terme MINERGIE décrit un projet de construction à faible consommation énergétique, qui concerne tout type de bâtiment d'habitat ou d'activités, par exemple dans l'industrie automobile. Le standard MINERGIE concilie la haute technologie, un meilleur confort, la pérennité et la conservation de la valeur du bâtiment. MINERGIE est un terme générique en Suisse pour en finir avec les différentes qualifications déconcertantes associées aux maisons écologiques, telles que maison à basse énergie, maison à énergie nulle, maison ultra basse consommation, maison solaire et maison passive. Cependant, cela crée des problèmes, car si l'on compare le standard MINERGIE aux autres standards, en tenant compte des calculs et des exigences, ils diffèrent énormément. En comparaison avec la maison MINERGIE, la consommation énergétique d'une maison passive est de 30 % inférieure à celle des constructions neuves et de 60 % à celle des constructions anciennes.

L'office fédéral pour l'énergie (OFEN) a examiné le standard allemand maison passive afin d'envisager la possibilité d'homologation du standard en Suisse. Par conséquent, les exigences, les paramètres et les procédures de calcul ont été adaptés afin de garantir une plus grande compatibilité avec les calculs conformes à la norme suisse SIA 380/1.

1.1.1 Principes de base de la construction MINERGIE

L'élément central de la construction MINERGIE est le haut confort offert à ses habitants. Pour cela, il y a plusieurs facteurs déterminants, tels qu'une température ambiante agréable, une bonne régulation du taux d'humidité, une amélioration de la qualité de l'air ambiant, une meilleure isolation acoustique et une manipulation facile des installations techniques. Outre ces facteurs de confort, la maison MINERGIE se veut esthétique.

La forte densité des logements exige une ventilation mécanique contrôlée, avec ou sans récupération de chaleur, dans l'espace habitable de la maison.

Cependant, le surcoût de construction ne doit pas dépasser 10 % par rapport à une construction conventionnelle.

1.1.2 Valeurs limites du standard de construction MINERGIE

Valeurs énergétiques pour la production énergétique* en rapport avec la surface brute chauffée conforme à la norme suisse :

Immeubles neufs	45 kWh/m ² a (160 MJ/m ² a)
Immeubles construits avant 1990	90 kWh/m ² a (320 MJ/m ² a)

Jusqu'au 30.06.2002 les valeurs limites suivantes s'appliquaient pour les cantons recourant à la "nouvelle" norme SIA 380/1.

I STANDARD MINERGIE POUR MAISON INDIVIDUELLE ET IMMEUBLES COLLECTIFS (CONFORME À LA NOUVELLE NORME SIA 380/1 : 2001)

Valeurs limites pour la production énergétique* :

Maison individuelle neuve	42 kWh/m ² a (150 MJ/m ² a)
Maison indi. construite avant 1990	80 kWh/m ² a (290 MJ/m ² a)

* *On inclut uniquement l'énergie de haute qualité (combustibles, chauffage centralisé). L'alimentation électrique pour la production énergétique, la ventilation et la climatisation comptent double.*

Valeur énergétique Énergie électrique, pour toutes les constructions électricité additionnelle	17 kWh/m ² a (60 MJ/m ² a)
---	---

Le standard MINERGIE varie entre résidences, bureaux et hôtels. Cependant, dans ce livre on parle uniquement d'habitats au standard MINERGIE.

1.1.3 Comparaison entre la maison passive et la maison MINERGIE passive

Le standard MINERGIE passive et le standard maison passive se différencient fondamentalement :

- Le standard MINERGIE considère la faisabilité du projet en relation directe avec les dépenses engendrées. Les circonstances difficiles d'un assainissement ont pour conséquence des valeurs limites inférieures à celle d'une construction neuve. La maison passive, par contre, fixe ses valeurs limites à l'aboutissement de son but final afin de renoncer à un système de chauffage conventionnel (en indiquant les avantages économiques d'un tel système). Il en résulte les mêmes exigences pour les bâtiments rénovés et neufs.

- Le standard MINERGIE mise sur l'augmentation de la valeur marchande de son label déposé.
- La maison passive fait plus grand cas de la qualité, de la conception, de la construction, des détails et de la certification.
- MINERGIE fixe les règles de base mais laisse une certaine liberté d'action aux concepteurs alors que le standard maison passive a des exigences très strictes quant à l'isolation de la construction. En considérant le même objet de construction selon les deux méthodes différentes, les valeurs ainsi que les résultats diffèrent énormément.

Alors que le standard allemand maison passive exige un besoin d'énergie de chauffage $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, le besoin d'énergie thermique d'une maison MINERGIE s'élève seulement à $10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

1.1.4 Valeurs limites du standard de construction MINERGIE passive

Besoin d'énergie de chauffage conformément à la norme SIA 380/1 (2001) :

$Q_h \leq 20\%$ de la valeur limite H_g

Valeur énergétique thermique $\text{kWh/m}^2\text{a}$ pour une maison individuelle et un immeuble collectif :

$\leq 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Coefficient de puissance de chauffage :

$\leq 10 \text{ W/m}^2$ de surface brute chauffée

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment :

$nL50 \leq 0,6/\text{h}$

La consommation d'électricité :

Les constructions MINERGIE-P offrent les meilleures conditions pour assurer une faible consommation d'énergie électrique. Cela exige d'une part des luminaires et des lampes très performantes, et d'autre part l'utilisation exclusive d'appareils électroménagers de la classe d'efficacité A conformément à la déclaration E de l'UE.

1.1.5 Subventions en Suisse

Les demandes de subvention sont à déposer à l'office fédéral de l'énergie (OFEN) à Berne, une copie sera remise au service cantonal de l'énergie.

Les programmes de subvention sont différents selon les cantons. En outre, il existe la possibilité d'obtenir un prêt hypothécaire à un taux d'intérêt favorable, différents selon les banques. Pour plus d'information sur les différents programmes de subvention en Suisse, s'adresser à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) :

Bundesamt für Energie (BFE)
CH- 3003 Bern
Tel.: 031 322 56 11
Fax: 031 323 25 00
Courriel: office@bfe.admin.ch
www.energieschweiz.ch

Pour plus d'informations :
www.minergie.fr

2 Subventions

2.1 Énergies renouvelables et économies d'énergie.

Les équipements qui ouvrent droit au crédit d'impôt

Depuis le 1^{er} janvier 2005, le crédit d'impôt pour les dépenses d'équipement de l'habitation principale est désormais ciblé sur les équipements les plus performants et soutient fortement les chauffe-eau solaires et autres équipements utilisant les énergies renouvelables.

L'arrêté du 9 février 2005 de la Loi de finance 2005 précise la liste des équipements, matériaux et appareils concernés ainsi que les caractéristiques techniques et les critères de performance minimale requis pour l'application du crédit d'impôt.

2.1.1 Des équipements performants ouvrant droit au crédit d'impôt

La vie quotidienne dans les bâtiments et la consommation d'énergie afférente est à l'origine de près de 25 % des émissions de gaz à effet de serre en France. S'il faut agir sur nos comportements quotidiens, il apparaît aussi que la mise en œuvre d'équipements performants lors de la rénovation ou à la conception permet de réduire les factures énergétiques et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi le crédit d'impôt est orienté pour privilégier exclusivement les produits les plus performants en matière d'économie d'énergie et de lutte contre le changement climatique. L'objectif est de promou-

voir les produits ayant les meilleures performances énergétiques et de faire évoluer la qualité des produits mis sur le marché.

La liste des équipements, matériaux et appareils qui ouvrent droit au crédit d'impôt est fixée par arrêté du ministre délégué au Budget.

Cet arrêté précise les caractéristiques techniques et les critères de performance minimale requis pour l'acquisition de matériaux répertoriés dans quatre grandes catégories :

I L'ACQUISITION DE CHAUDIÈRES

Le crédit d'impôt vise les chaudières basse température et les chaudières à condensation qui sont de plus en plus proposées par les fabricants.

– Les chaudières à basse température

individuelles ou collectives utilisées comme mode de chauffage ou de production d'eau chaude. Ces chaudières fonctionnent à une température plus basse que les chaudières classiques tout en apportant un confort au moins équivalent, elles permettent ainsi de réaliser des gains de consommation de l'ordre de 12 à 15 % par rapport à une chaudière moderne standard.

– Les chaudières à condensation.

En condensant la vapeur d'eau des gaz de combustion, elles récupèrent de l'énergie. D'où une économie de 15 à 25 % par rapport aux chaudières modernes standards mais aussi moins de gaz carbonique et moins d'oxyde d'azote produits.

I L'ACQUISITION DE MATERIAUX D'ISOLATION THERMIQUE

Les produits ci-dessous sont éligibles au crédit d'impôt. Ce sont les produits performants de leur catégorie tout en étant largement disponibles sur le marché.

Matériaux d'isolation thermique des parois opaques	Caractéristiques et performances
Planchers bas sur sous-sol, sur vide ou sur passage ouvert	
Toitures-terrasses	R ≥ 2,4 m ² K/W
Murs en façade ou en pignon	
Toitures sur combles	R ≥ 2,5 m ² K/W

Pour choisir un produit isolant, il est important de connaître sa résistance thermique R (aptitude d'un matériau à ralentir la propagation de l'énergie qui le traverse). Elle figure obligatoirement sur le produit. Plus R est important plus le produit est isolant. De plus les certifications permettent un choix de qualité.

La certification ACERMI pour les isolants (laine de verre, polystyrène expansé, liège expansé...), précise les caractéristiques suivantes : la résistance thermique et la conductivité thermique mais aussi le comportement à l'eau, le comportement mécanique et la réaction au feu.

Pour les matériaux de construction isolants (béton cellulaire, briques, monomur terre cuite...), les certifications CSTBat ou NF sont un gage de qualité.

Matériaux d'isolation thermique des parois vitrées	Caractéristiques et performances
Fenêtres ou portes-fenêtres	Uw < 2 W/m ² K
Vitrages à isolation renforcée (vitrage à faible émissivité)	Ug ≤ 1,5 W/m ² K
Doubles fenêtres (seconde fenêtre sur la baie) avec un double vitrage renforcé	Ug ≤ 2,4 W/m ² K
Volets isolants	
Volets isolants caractérisés par une résistance thermique additionnelle apportée par l'ensemble volet-lame d'airventilé	R > 0,20 m ² .K/W

Ug, Uw : coefficient de transmission surfacique

La performance thermique d'une paroi vitrée dépend de la nature de la menuiserie, des performances du vitrage et de la qualité de la mise en œuvre de la fenêtre. La nature des fermetures (volets, persiennes) intervient également en réduisant les déperditions, particulièrement la nuit.

Calorifugeage	Caractéristiques et performances
Calorifugeage de tout ou partie d'une installation de production ou de distribution de chaleur ou d'eau chaude sanitaire	R ≥ 1 m ² K/W

Le calorifugeage des tuyaux permet d'éviter des pertes d'énergie lors de la distribution d'eau chaude si les points d'eau sont loin de la chaudière ou lors de la distribution de chaleur s'ils passent dans des lieux non chauffé (garage, cave...)

I L'ACQUISITION D'APPAREILS DE RÉGULATION DE CHAUFFAGE

La régulation permet de maintenir la température intérieure à une valeur constante quelle que soit la température extérieure, quant à la programmation, elles permet de faire varier cette température de consigne en fonction des besoins et de l'occupation du logement. Ces appareils sont encore peu utilisés malgré une efficacité prouvée.

Parce qu'un degré en trop c'est près de 7 % de consommation supplémentaire, les fonctions de régulation et de programmation permettent de diminuer sensiblement les consommations d'énergie et donc les émissions de gaz à effet de serre sans nuire au confort du logement.

Appareils installés dans une maison individuelle ou dans un immeuble collectif :

- Systèmes permettant la régulation des installations de chauffage par thermostat d'ambiance ou par sonde extérieure, avec horloge de programmation ou programmateur mono ou multizone,
- Systèmes permettant les régulations individuelles terminales des émetteurs de chaleur (robinet thermostathiques),
- Systèmes de limitation de la puissance électrique du chauffage électrique en fonction de la température extérieure.

Appareils installés dans un immeuble collectif :

- Matériels nécessaires à l'équilibrage des installations de chauffage permettant une répartition correcte de la chaleur délivrée à chaque logement,
- Matériels permettant la mise en cascade de chaudières, à l'exclusion de l'installation de nouvelles chaudières,
- Système de télégestion de chaufferie assurant les fonctions de régulation et de programmation du chauffage,
- Systèmes permettant la régulation centrale des équipement de production d'eau chaude sanitaire dans le cas de production combinée d'eau chaude sanitaire et d'eau destinée au chauffage.

I L'INTÉGRATION À UN LOGEMENT NEUF OU L'ACQUISITION D'ÉQUIPEMENTS DE PRODUCTION D'ÉNERGIE UTILISANT UNE SOURCE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE ET DE POMPES À CHALEURS

Parce que les énergies renouvelables n'émettent pas de gaz à effet de serre, leur utilisation permet de lutter contre le réchauffement climatique mais aussi de contribuer à l'indépendance énergétique de la France, d'utiliser les ressources locales et de créer des emplois.

Que ce soit pour produire de la chaleur (chauffage ou eau chaude sanitaire) ou de l'électricité, des matériels performants et de qualité sont disponibles en France ainsi que des spécialistes pour les installer.

Matériels	Caractéristiques et performances
Equipements de chauffage et de fourniture d'eau chaude fonctionnant à l'énergie solaire : chauffe-eau et chauffage solaire	Certification CSTBat Certification Solar Keymark
Chauffage ou production d'eau chaude au bois ou autres biomasses :	Rendement $\geq 65\%$
– Poêle	Norme NF EN 13240
– Foyers fermés, inserts	Normes NF EN 13229 NF D 35376
– Cuisinières	Norme NF EN 12815
– Chaudières < 300 kW	Normes NF EN 303.5 EN 12809
Système photovoltaïque (fourniture d'électricité à partir de l'énergie solaire)	Normes EN 61215 NF EN 61646
Systèmes de fourniture d'électricité à partir de l'énergie éolienne, hydraulique ou de biomasse	
Pompes à chaleur géothermales	COP ≥ 3
Pompes à chaleur air/eau	

COP coefficient de performance : la performance énergétique d'une pompe à chaleur se traduit par le rapport entre la quantité de chaleur produite par celle-ci et l'énergie électrique consommée par le compresseur.

2.2 Le crédit d'impôt pour les équipements de la maison

Le crédit d'impôt pour les dépenses d'équipement de l'habitation principale est ciblé sur les équipements les plus performants (15 % à 40 %) et soutient fortement (50 %) les chauffe-eau solaires et autres équipements utilisant les énergies renouvelables. Tout le monde bénéficie du crédit d'impôt, que l'on soit imposable ou non.

Cette mesure est d'autant plus importante que la consommation d'énergie dans les logements est à l'origine de 25 % des émissions de gaz à effet de serre.

2.2.1 Crédit d'impôt, les nouveautés de la Loi de finance 2006

Pour les habitations principales achevées depuis plus de deux ans, le taux est de 15 % pour les chaudières à basse température individuelles et collectives et 25 % ou 40 %* pour les chaudières à condensations.

Sur les matériaux d'isolation thermique et les appareils de régulation de chauffage pour les habitations principales achevées depuis plus de deux ans, le taux est de 25 %, voire 40 %*.

Sur le coût des équipements de production d'énergie utilisant une source d'énergie renouvelable ou des pompes à chaleur pour les habitations principales neuves ou anciennes, le taux est de 50 %. Cette mesure remplace les subventions pour l'énergie solaire jusque là accordées par l'ADEME dans la limite des budgets.

	Montant des crédits d'impôt	Taux 2005	Taux 2006
Chaudières à basse température	15 %	15 %	
Chaudières à condensation	25 %	25 % ou 40 %*	
Matériaux d'isolation thermique	25 %	25 % ou 40 %*	
Appareils de régulation de chauffage	25 %	25 % ou 40 %*	
Équipements de production d'énergie utilisant une source d'énergie renouvelable	40 %		50 %

**Le taux est de 40 % si ces équipements sont installés dans un logement achevé avant le 01/01/1977 et que les installations sont réalisées au plus tard le 31 décembre de la deuxième année qui suit celle de l'acquisition du logement.*

I UNE EXIGENCE DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE.

La liste des équipements, matériaux et appareils qui ouvrent droit au crédit d'impôt est fixée par arrêté du ministre en charge du budget. L'objectif est de promouvoir les produits ayant les meilleures performances énergétiques.

Cette liste comprend :

- les chaudières basse température et les chaudières à condensation,
- les matériaux isolants thermiquement y compris les vitrages et les volets isolants,
- les appareils de régulations : thermostats d'ambiance, robinets thermostatiques...
- les appareils de chauffage au bois : inserts, poêles, foyers fermés, cuisinières spécifiques et chaudières,
- les pompes à chaleurs géothermiques et air/eau
- les équipements de chauffage ou de fourniture d'eau chaude sanitaire fonctionnant à l'énergie solaire,
- les systèmes de production d'électricité utilisant des sources renouvelables dont le solaire photovoltaïque.

Cet arrêté précise les caractéristiques techniques et les critères de performance minimale requis pour l'application du crédit d'impôt

2.3 Comment et combien ?

Même pour ceux qui ne sont pas imposables :

Accessible à tous, le crédit d'impôt est non limité en volume. Le crédit d'impôt est soustrait du montant de l'impôt sur le revenu dû. Mais contrairement à la réduction d'impôt, qui ne peut pas faire l'objet d'un remboursement, un crédit d'impôt peut être partiellement ou totalement remboursé. De plus, il ne dépend pas du niveau d'imposition : il est soit déduit directement de l'impôt à payer, soit remboursé - via l'envoi d'un chèque ou d'un virement si l'usager fournit un RIB - lorsque le niveau d'imposition est faible ou nul. Le crédit d'impôt est restitué s'il excède 8 euros.

I LES DOCUMENTS À FOURNIR

Le crédit d'impôt s'applique à l'habitation principale et est accordé sur présentation d'une facture de l'entreprise ayant réalisé les travaux ou d'une attestation fournie par le vendeur ou le constructeur du logement neuf.

I LE CALCUL DU CRÉDIT

Le crédit d'impôt s'applique au prix des équipements et des matériaux figurant sur la facture de l'entreprise ayant réalisé les travaux. Si la personne a bénéficié d'une autre aide publique pour l'achat des équipements et des matériaux (Conseil Général, ANAH, Commune...) le calcul se fera sur le coût de l'équipement déductions faites des aides perçues. Dans tous les cas, le coût de la main d'œuvre n'est pas pris en compte.

Il est égal à 15 %, 25 %, 40 % ou 50 % du montant des dépenses retenues dans la limite d'un plafond qui s'applique globalement à l'ensemble des dépenses effectuées du 1^{er} janvier 2006 au 31 décembre 2009.

I LE PLAFOND DES DÉPENSES

Pour une même résidence, le montant des dépenses pris en compte ne peut dépasser, pour la période du 1^{er} janvier 2005 au 31 décembre 2009, la somme de 8 000 euros pour une personne célibataire, veuve ou divorcée et de 16 000 euros pour un couple marié ou lié par un PACS soumis à imposition commune. Cette somme est majorée de 400 euros par personne à charge dont le premier enfant. Cette majoration est fixée à 500 euros pour le second enfant et à 600 euros par enfant à partir du troisième. (Ces majorations sont divisées par deux lorsque l'enfant est réputé à charge égale de l'un ou l'autre de ses parents).

2.3.1 D'autres aides publiques

Avant d'entamer tout investissement il est important de se renseigner pour bien connaître les aides dont chacun peut bénéficier.

En particulier pour développer les énergies renouvelables (solaire thermique, bois énergie, photovoltaïque...) de nombreux partenaires publics proposent des aides aux particuliers complémentaires au crédit d'impôt, portant par exemple sur la pose et l'installation des équipements.

2.3.2 Les subventions et primes attribuées par l'agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (ANAH)

Des subventions en matière de chauffage, d'isolation et d'énergies renouvelables :

Les propriétaires, occupants ou bailleurs d'un logement achevé depuis plus de 15 ans peuvent bénéficier d'une subvention, variant de 20 à 70 %, pour les aider à réaliser des travaux d'économie d'énergie contribuant à l'amélioration de l'habitat : chauffage, isolation, utilisation d'énergies renouvelables.

- Pour l'installation de fenêtres, portes-fenêtres ou fenêtres de toit, l'ANAH offre aux particuliers une prime forfaitaire de **80 euros par fenêtre**.
- Pour certains systèmes de chauffage individuel, les particuliers peuvent également obtenir une prime forfaitaire pouvant aller jusqu'à **1 800 euros** (pour l'installation de systèmes solaires combinés, par exemple).

I CONDITIONS D'ATTRIBUTION

L'attribution et le montant de l'aide sont soumis à certaines conditions.

- Pour les propriétaires occupants, le taux de la subvention dépend du type d'interventions. En outre, l'ANAH a déterminé des plafonds de ressources à ne pas dépasser.
- Pour les propriétaires bailleurs, l'aide est attribuée en fonction du type d'intervention, de la surface habitable, du nombre de logements subventionnables et de la situation géographique du logement.

Source : ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)

3 Glossaire de la technologie solaire et expressions concernant la maison passive

Absorbeur: L'absorbeur est la partie la plus importante d'un capteur solaire. Il capte le rayonnement solaire et le transforme ensuite en chaleur. Il est composé d'un système de tubes noirs en matériaux isolants tels que l'aluminium ou le cuivre. Ensuite la chaleur est transmise au fluide caloporteur. Des bons absorbeurs transforment 90 % du rayonnement du soleil en chaleur.

Besoins annuels en énergie primaire: Quantité annuelle d'énergie nécessaire aux projets d'installation. Composé du contenu énergétique du combustible et des énergies auxiliaires. Pour calculer les besoins en énergie primaire il est indispensable de considérer les différentes sources énergétiques ainsi que leurs facteurs de consommation en énergie primaire et leur quantité d'énergie nécessaire pour l'approvisionnement, la conversion et la distribution des combustibles utilisés.

L'énergie primaire est également un facteur écologique du critère d'évaluation quant à l'émission de CO₂, car elle comprend la consommation énergétique complète pour chauffer un bâtiment. Le besoin annuel en énergie primaire fait l'objet principal de la loi fédérale sur les économies d'énergie.

Besoins en énergie de chauffage: Les besoins en énergie de chauffage dépendent du climat et des conditions d'utilisation du bâtiment ainsi que du système de chauffage et de son émission de chaleur (calculé à partir du coefficient de transmission de chaleur, des déperditions thermiques par ventilation, des sources d'énergie intérieures et des gains solaires). Les besoins énergétiques dépendent également du besoin en ventilation pour maintenir la température ambiante requise.

Besoins en énergie finale: Il s'agit de la quantité d'énergie nécessaire pour couvrir les besoins annuels en énergie et en eau potable, calculée sur la base de l'enveloppe du bâtiment.

Besoins en énergie primaire: Quantité d'énergie nécessaire pour couvrir les besoins annuels en chauffage et en eau sanitaire, considérant la quantité énergétique supplémentaire pour l'approvisionnement, la conversion et la distribution des combustibles utilisés.

Besoins énergétiques: C'est la quantité d'énergie nécessaire pour approvisionner un immeuble d'habitation en chauffage, ventilation et eaux sanitaires en considérant les règlements sur les données climatiques, le comportement des usagers, la température intérieure et les éventuelles sources énergétiques intérieures. Le coefficient qui en résulte permet la détermination de normes architecturales d'isolation thermique des bâtiments et des installations techniques de chauffage, de ventilation, d'eau chaude et de refroidissement. Grâce à ce coefficient, on peut également comparer la qualité énergétique de différents bâtiments. Cependant, la consommation réelle diffère du calcul des besoins à cause des conditions réelles locales (par exemple les conditions climatiques locales ou un comportement différent des usagers).

Besoins énergétiques en eau potable: L'énergie nécessaire pour produire la quantité requise d'eau potable.

Caloporteur: Ce sont des liquides ou de l'air transportants la chaleur du collecteur solaire jusqu'au réservoir d'eau. Dans les installations solaires, on applique un mélange d'eau et d'antigel pour que le capteur solaire ne gèle pas.

Chaudières à condensation: sont ainsi nommées les chaudières ayant une technique optimisée. Elles utilisent l'énergie émise par la combustion de manière très efficace. En effet, les gaz résiduels sont refroidis et la chaleur latente de condensation s'ajoute à la chaleur de combustion dont le facteur d'émission est particulièrement élevé.

Coefficient de performance énergétique: Le coefficient de performance énergétique décrit l'efficacité énergétique du système de chauffage. Il exprime la relation entre la consommation et le rendement énergétiques (consommation des combustibles et apports énergétiques). Plus petit est le coefficient, plus efficace est le système. Le coefficient de puissance thermique incluant également les énergies renouvelables peut être inférieur à 1,0. Pour un bâtiment d'habitation, on prévoit une bonne performance énergétique afin d'assurer l'approvisionnement en énergie de tous les appartements. Il est utilisé, comme d'autres coefficients, pour le calcul énergétique d'une maison.

Coefficient de transmission eq: C'est le coefficient des surfaces vitrées, tout en considérant le coefficient U_F , le coefficient g (coefficient de déperdition volumique d'un logement) et le gain de chaleur solaire.

Coefficient de transmission thermique: Voir coefficient U .

Coefficient g: Degré de transmission énergétique globale (rayons à ondes courtes et longues) au travers d'une surface vitrée, ainsi que les apports solaires secondaires par l'absorption des rayons solaires par les surfaces vitrées.

Coefficient-U: Ce coefficient caractérise le flux de chaleur en watt à travers un mètre carré de paroi pour une différence de température d'un degré (1 kelvin) entre les deux ambiances (extérieure et intérieure par exemple). Plus le coefficient est petit, plus l'élément concerné est isolant. Dans le cadre de l'harmonisation internationale des termes technique, le coefficient k est dès lors appellé coefficient U .

Coefficient U_F : C'est le coefficient de flux de chaleur à travers d'une fenêtre. Il dépend du coefficient U du vitrage et du châssis.

Cogénération: Système de production d'énergie électrique et thermique dans un même processus de fabrication.

Combustibles fossiles: Un combustible fossile est un combustible issu de résidus accumulés dans le sous-sol au fil des ères géologiques tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel. La combustion de ces matières premières énergétiques non renouvelables est la cause d'énormes pollutions environnementales. Le gaz naturel est le combustible fossile le plus propre.

Consommation d'énergie de chauffage: Consommation énergétique d'un système de chauffage considérant toute l'énergie consommée.

Couche d'assise: Première couche permettant d'éliminer les irrégularités du support avant de poser les blocs de pierre.

Degré d'efficacité: Le degré d'efficacité (mécanique) d'un engin thermique est le rapport entre performance mécanique et combustible utilisé. Ce degré d'efficacité (rendement de Carnot) dépend de la différence entre la température du processus de combustion et la température de la chaleur perdue. Le degré maximal d'efficacité thermique du processus circulaire de Carnot d'un moteur thermique est déterminé par les deux températures limites entre lesquelles se déroule le processus. Généralement il est inférieur à 100 %.

Le rendement thermique est surtout dépendant du niveau de température de l'exploitation de la chaleur : un niveau de température bas permet d'obtenir un degré d'efficacité plus élevé.

Dans une cellule à combustible, l'énergie et la chaleur ne sont pas générées dans une machine thermodynamique. L'électricité naît d'un processus électrochimique sous dégagement de chaleur perdue.

Le degré d'efficacité dans les installations solaires est calculé selon la performance électrique ou thermique et son flux de rayonnement.

Degré de couverture solaire thermique : Le degré de couverture solaire thermique indique la quantité énergétique nécessaire couverte par l'énergie solaire (par exemple dans une maison).

Déperditions par transmission de chaleur: Flux thermique traversant un mètre d'épaisseur de matériau pour une différence de température d'un Kelvin entre les deux faces de ce matériau. Plus faible est la conductivité thermique, meilleure est l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. Par conséquent, la surface de l'enveloppe et son coefficient de conductivité thermique détermine la qualité de l'isolation. Selon le règlement sur les économies d'énergie, le coefficient ne doit pas dépasser 1,55 (pour les bâtiments qui ne sont pas habités, avec une surface vitrée qui dépasse 30 %) et 0,44 W/m²K (pour les bâtiments plus petits).

Dioxyde de carbone : Le gaz carbonique (CO₂) est produit au moment du processus de combustion, en particulier des combustibles fossiles tels que le gaz naturel, le pétrole et le charbon. Le dioxyde de carbone représente un problème écologique majeur (effet de serre).

Effet de serre : L'atmosphère terrestre absorbe des rayons solaires de courtes ondes comme dans une serre vitrée, ensuite elle émet seulement une partie des rayons de longues ondes à l'espace. Il en résulte un équilibre entre la radiation solaire et thermique. Cela représente le procès naturel de l'effet de serre qui permet à la terre d'avoir une température moyenne de 15°C. Les gaz dits à effet de serre, émis par les activités humaines – surtout le dioxyde de carbone, les chlorofluorocarbures (CFC) et le méthane – perturbent l'équilibre, retenant prisonnier sur terre le rayonnement du soleil. La conséquences est le réchauffement de la terre ce qui présente un danger pour le climat global.

Énergie d'appoint nécessaire : Énergie nécessaire pour le système de chauffage d'une maison afin de couvrir les besoins non couverts par ailleurs en chauffage et en eau sanitaire (suivant les conditions standardisées).

Énergie auxiliaire : Énergie (sous forme de courant électrique) qui ne sert pas directement à couvrir les besoins en chauffage et à la production d'eau chaude. Il s'agit par exemple d'énergie pour actionner différents éléments du système, le circulateur du chauffage, différents réglages, etc., ainsi que de l'énergie des chauffages d'appoint pour la production d'eau chaude.

Énergie primaire : Le terme énergie primaire regroupe toutes les sources d'énergie disponibles dans la nature avant transformation. On les différencie entre énergies renouvelables (énergie éolienne, hydraulique et solaire) et énergies fossiles (pétrole, charbon, combustible nucléaire, gaz naturel).

Énergie solaire photovoltaïque : Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir du rayonnement solaire par des panneaux photovoltaïques. Lorsque l'on met les deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'ils puissent y avoir conduction), des électrons se libèrent, créent une tension électrique et ainsi un courant continu. Selon le matériau des cellules photovoltaïques on différencie les cellules en silicium cristallin ou encore en tellure de cadmium.

Flux solaire : Le flux solaire arrive sur une paroi, est à son tour, réfléchi, absorbé et transmis, suivant les caractéristiques du spectre, l'angle d'incidence, la surface et la couleur de la paroi.

Isolation transparente (TWD) : Elle est appliquée à l'extérieur sur les éléments de construction translucides, souvent en matière plastique. Les éléments TWD reprennent ainsi la fonction d'un poêle chauffant et réduit ainsi les besoins en chauffage.

Isotherme : Une ligne ou une surface fictive de température constante.

Légionnelles : Ce sont des bactéries qui peuvent surgir dans les systèmes d'eau chaude sanitaire (ECS) installés de manière inappropriée et provoquer une infection. Le montage correct d'une installation solaire exclut un risque d'infection par les légionnelles.

Pile à combustible: La pile à combustible est un générateur de courant qui transforme l'énergie d'une réaction chimique en courant électrique de façon continue. La réaction de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air ambiant produit de la vapeur.

Pompe à chaleur: Dispositif permettant de transférer la chaleur du milieu le plus froid (ce qui le refroidit encore) vers le milieu le plus chaud (et donc de le chauffer), alors que spontanément la chaleur se diffuse du plus chaud vers le plus froid jusqu'à l'égalité des températures.

Renouvellement d'air: Le coefficient « n » mesure la fréquence du renouvellement d'air (par heure) et la différence de température de l'air entre l'intérieur et l'extérieur.

Rayonnement diffus: Ce sont des rayons solaires qui proviennent de l'atmosphère, traversant les nuages, la brume, les montagnes, les bâtiments etc. qui se diffusent sur toute la surface de la Terre.

Rayonnement direct: C'est le rayonnement solaire directement recueilli par un capteur solaire. Le rayonnement direct est plus intense que le rayonnement diffus ; cependant, calculé sur toute une année, le capteur recueille la même quantité de rayons diffus que directs.

Rayonnement global: Ce sont tous les rayons directs et indirects (diffus) issus du Soleil.

Refroidissement nocturne: Le système de refroidissement utilise le froid nocturne estival d'une part pour refroidir les éléments de construction captants la chaleur et d'autre part pour retenir la chaleur pendant la journée (night flushing).

Réservoir solaire: Le réservoir solaire accumule plusieurs centaines de litres d'eau chaude. Un tel réservoir est indispensable car l'énergie solaire est suffisante pour couvrir les besoins en eaux chaudes sanitaires pendant plusieurs jours. Dans les pays du nord, le réservoir solaire doit disposer en plus de collecteurs solaires, d'un chauffage d'appoint. Un bon réservoir

d'eau se caractérise par sa haute résistance à la corrosion, des déperditions thermiques faibles et une bonne stratification des températures.

Solaire thermique: Le solaire thermique correspond est le terme technique pour la conversion du rayonnement solaire en énergie calorifique. Dans le langage populaire on parle également de "l'énergie solaire".

Surface d'enveloppe thermique: Limite entre le volume intérieur chauffé et l'air extérieur, les pièces non-chauffées et la terre. Habituellement l'enveloppe désigne les murs extérieurs, fenêtres, portes, plafond de sous-sol, plafond et toit. Une bonne isolation des éléments de construction est importante pour garantir un flux de chaleur équilibré.

Surface et volume utiles (données géométriques): La surface utile (S_u) est la superficie habitable du bâtiment. Elle est déterminée selon le volume chauffé tout en considérant la hauteur sous plafond (commune dans la construction de logements) en déduisant la surface des éléments de construction extérieurs et intérieurs (murs, cloisons, marches etc.). Ce calcul se base sur le règlement fédéral sur les économies d'énergie (EnEV).

Surface habitable chauffée: Elle comprend uniquement les superficies utiles à l'intérieur d'une maison. En général, elle est inférieure à la surface habitable selon les aspects physiques du EnEV.

Transmission thermique: Le coefficient de transmission thermique est la quantité de chaleur traversant une paroi.

Volume chauffé du bâtiment: Le volume chauffé du bâtiment désigne le volume de l'enveloppe thermique d'un bâtiment en considérant toutes ses mesures extérieures. Ce volume comprend toutes les pièces directement ou indirectement chauffées conformément au règlement. Par ce fait, il peut s'agir du bâtiment entier ou encore seulement de certaines zones chauffées.

sites à consulter

www.energies-renouvelables.org
www.demain-la-terre.net
www.prioriterre.org
www.minergie.fr
www.lamaisonpassive.fr
www.maisonpassive.be
www.ademe.fr
 (le site sur l'énergie renouvelable)
www.logement.gouv.fr
 (vous trouverez sur ce site gouvernemental toutes les mesures prises en faveur de l'aide au logement)
www.cah.fr
 (sur ce site tous les prêts et subventions pour l'amélioration de l'habitat)
www.habitat-developpement.tm.fr
 (toutes les aides à l'habitat)

bibliographie

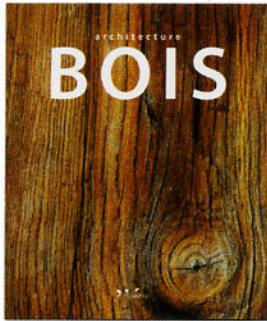
Cercle d'étude des maisons passives économiques
 Darmstadt : W.Ebel, W. Feist, K.-H. Fingerling, J. Grönegräs, K. Häuser, G. Pazen, E. Baffia, V. Sariri, J. Schneiders.
 Publication n° 14 : « La fenêtre de la maison passive ».
 E. Baffia, W. Feist, G. Horn, J. Schneiders.
 Publication n° 16 : « construire sans ponts thermiques ».
 E.-M. Bellingen, A. Bühring, H. Eisenbeis, M. Ewert, W. Feist, B. Mahler.
 Publication n° 20 : « Technique d'approvisionnement de la maison passive ».
 DWI, ECO- Umweltinstitut GmbH (l'institut de veille environnementale), Fritz Doppelmayr GmbH - absorption et rétention de toxiques (par exemple le formaldéhyde) par la laine de mouton.
 W. Feist. Informations professionnelles Phl- 1998/4 - « Installations domestiques pour la maison passive ».
 W. Feist. Bases pour la conception d'une maison passive, Darmstadt 1996.

W. Feist, F.D. Heidt, K. Michael, S. Peper, N. Stärz, Ing.-Ges. Heidemann, Sarmant et Amandes.
 Publication n° 18 : « Le contrôle de qualité d'une construction passive ».
 W. Feist (directeur), M. Nagel, V. Sariri, rapport de réunion - « 4^{ème} conférence sur le standard habitat passif » le 10./11.3.2000 à Kassel.
 W. Feist, J. Otte, N. Stärz, R. Pfluger, R. Waldschmidt, J. Werner.
 Publication n° 17 : « Le dimensionnement de systèmes de ventilation ».
 W. Feist. Circulaire informatif sur la maison passive n° 6.
 Kalksandstein-Informations GmbH + Co KG, Hannovre. Le calcaire « Détails d'une maison passive et propositions ».

crédit iconographique

La maison d'édition et l'auteur du livre remercient les constructeurs d'avoir mis à disposition les photos des maisons.
 Toutes les autres représentations sont de l'auteur lui-même à l'exception de :
 Falk, Stefan, Baubild, sto AG, Stühlingen : figure 2-1
 Gaentzsch, Julia, Fotostudio Schoepe, Ottbergen : figure 5-2
 Grün, Wolfgang, Grün & Partner Passivhaus, Löhnberg : figure 2-4
 Neuleben, Sva, Ottleben : figure 5-1
 Richters, Christian, Münster : figures 5-5, 5-6, 5-7, 5-9, 5-10, 6-3
 Rienass, Cristian, Architekturbüro Grobe, Ottbergen : figures 4-14, 4-15, 4-16
 Wörner, Agnes, Q-Wert, Hannover : figure 6-4

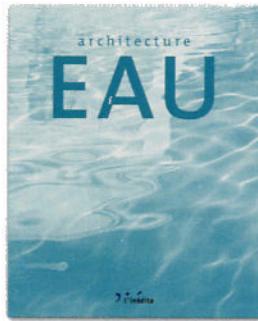
L'architecture aux éditions l'Inédite



Ce livre présente un large panorama de l'utilisation du bois autour de l'habitat. Les constructions mettent en valeur l'inventivité de l'architecture quand elle s'associe à ce matériau noble et chaleureux.

Les maisons présentées dans cet ouvrage se déclinent de la plus simple, une cabane dans les arbres, à la plus sophistiquée, une villa de bois précieux. Des propositions d'aménagement d'intérieur sont aussi présentées.

Trilingue: français, anglais, allemand.
Broché - 288 pages - Format : 19,5 x 24 cm
Prix : 25 €

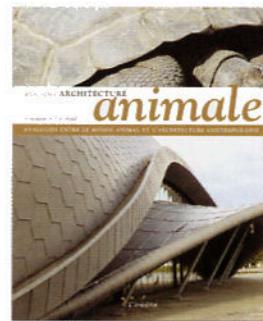


Dans le même esprit que le titre "Architecture bois". Ce livre fait une présentation de projets architecturaux à travers une quarantaine de réalisations d'appartements et de villas autour de l'eau, dans l'eau, au-dessus de l'eau ou entourées d'eau.

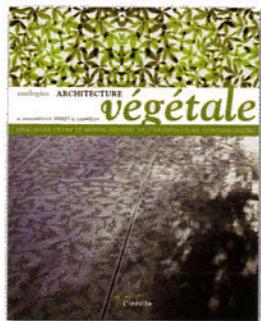
Livre d'exception où chaque réalisation de l'architecte est présentée avec de nombreuses photos et des plans.

Broché - 288 pages - Format : 19,5 x 23,5 cm
Prix : 25 €

Ce livre présente 25 réalisations architecturales contemporaines dont les techniques de construction, l'aspect ont une correspondance avec le monde animal. Chaque projet



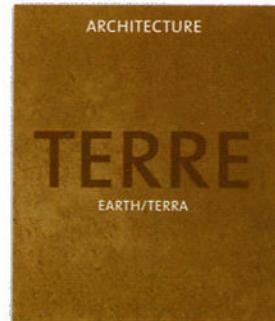
est présentée avec ses plans et un plan de situation.
Relié - 192 pages - Format : 20 x 24 cm
Prix : 28 €



Au-delà du raisonnement intellectuel, l'observation de la nature et l'expérimentation ont été essentielles à la conception des formes architectoniques. L'objectif de ce livre consiste à

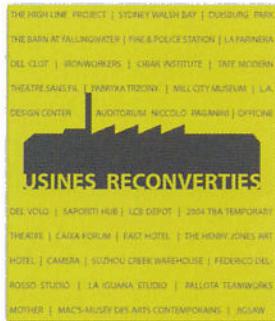
présenter les similitudes qui peuvent apparaître entre l'architecture contemporaine et le monde végétal, en montrant comment elles naissent d'une volonté ou d'une capacité d'adaptation au milieu.

Broché - 192 pages - Format : 20 x 24 cm
Prix : 28 €



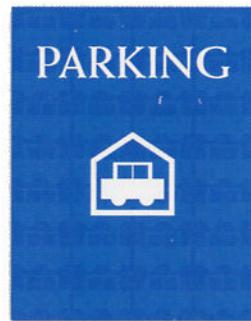
Le lien entre la terre et l'architecture est présenté ici de diverses façons. Le respect et la sensibilité à l'environnement inspirent les projets choisis. Les architectes et décorateurs d'intérieur ont décidé de renouer avec l'utilisation des matériaux naturels. Ils défient ici la topographie, le climat, le contexte énergétique et culturel auxquels ils sont confrontés.

Trilingue : italien - espagnol - français
Broché - 288 pages. Format : 19,5 x 23,5 cm
Prix : 28 €



Le seul livre sur la reconversion de bâtiments industriels. Le livre est divisé en quatre parties : Les espaces publics : salle de sports, centre de documentation, bibliothèques... Les espaces culturels : musées, galeries, théâtre... Les espaces commerciaux : hôtels, centre artisanal, garage... Appartements et studios. 34 réalisations sont présentées avec les plans d'architectes.

*Broché - 288 pages - Format : 19,5 x 23,5 cm
Prix : 25 €*



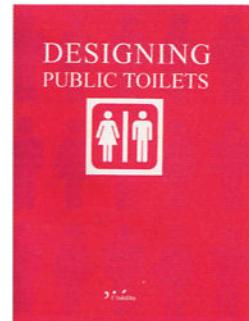
tures : musées, galeries, théâtre... Les espaces commerciaux : hôtels, centre artisanal, garage... Appartements et studios. 34 réalisations sont présentées avec les plans d'architectes.

*Broché - 288 pages - Format : 19,5 x 23,5 cm
Prix : 30 €*

Le problème du stationnement est prépondérant dans les grandes villes. Au fil des cinq thèmes de réflexion : nouvelles voies, sécurité, air, lumière et futur, ce livre présente une liste exhaustive

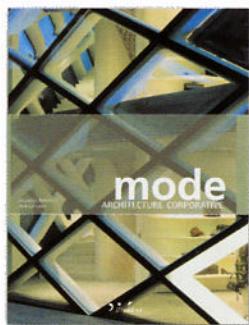
de parkings, qui donnent tous des réponses plausibles à nos soucis quotidiens et réussissent la prouesse de lier un besoin d'esthétique, de sécurité, de protection de l'environnement à l'usage du parking. 38 réalisations sont présentées avec leurs plans. En 5 langues : italien - français - anglais - espagnol - portugais

*Broché - 288 pages - Format : 19,5 x 23,5 cm
Prix : 30 €*



Ce livre présente une collection unique et originale de projets réalisés autour des bains publics. Stades, aéroports, cafés, restaurants, banques, galeries et bureaux représentent les étapes d'un itinéraire ample et curieux à la découverte des dernières tendances du design urbain. 80 projets réalisés dans les endroits publics les plus disparates. En 5 langues : italien - français - anglais - espagnol - portugais

*Broché - 288 pages - Format : 19,6 x 23,7 cm
Prix : 25 €*



Les grandes corporations de la mode (Hermès, Prada, Dior, Tod's, Vuitton...) ont récemment commencé à utiliser l'architecture pour diffuser leurs principes et capter l'attention des clients potentiels.

Les projets sélectionnés ici, représentent une nouvelle génération de constructions auxquelles nous devons porter une attention toute particulière puisque caractéristiques d'une nouvelle architecture corporative.

*Broché - 168 pages - Format : 21 x 27,5 cm
Prix : 29 €*



ses exigences propres qui prédomine. Le livre rassemble une bonne partie de cette nouvelle génération de sièges bancaires, en proposant des réalisations très diverses quand à leur taille ou leur prestige.

*Broché - 168 pages - Format : 21 x 27,5 cm
Prix : 29 €*

Il y a longtemps que les banques se servent de l'architecture pour diffuser leur image. Depuis, c'est l'idée de service et de flexibilité, plus proche de l'usager et de



Ce livre présente 30 exemples actuels de maisons individuelles construites en Allemagne, Autriche et en Suisse. Il montre la possibilité de construire des maisons à la fois fonctionnelles,

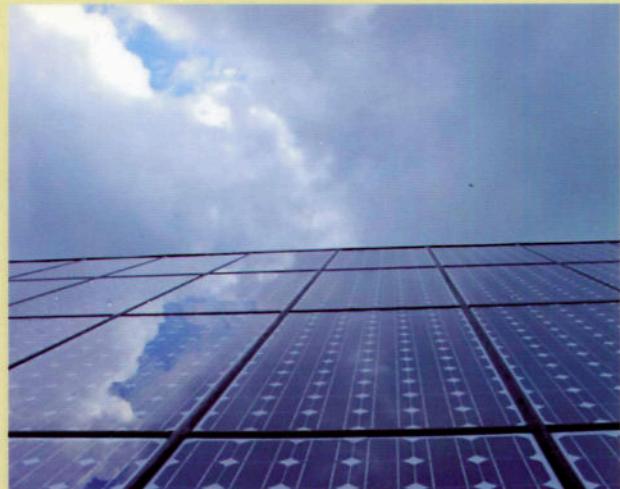
écologiques et créatives, à des prix très compétitifs. Que les maisons soient construites en bois, en acier ou construction traditionnelle, qu'elles soient classiques ou modernes, elles ont toutes en commun le fait de ne pas dépasser le coût de 1.500 € par m².

*Broché - 160 pages - Format : 21,4 x 28 cm
Prix : 39 €*

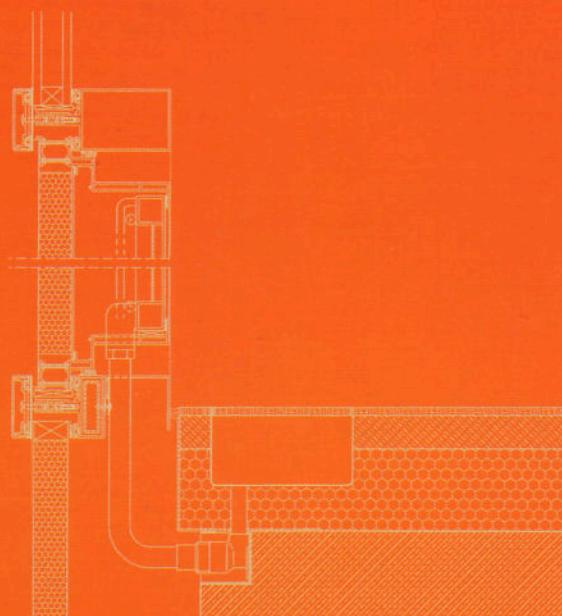
D'un point de vue énergétique, la maison passive représente un standard de construction de très haute qualité environnementale. Son enveloppe étanche ainsi que l'exploitation passive de l'énergie solaire et d'autres énergies réduisent considérablement le besoin énergétique. Elle offre une température ambiante agréable et saine, sans utiliser un système de chauffage au fioul ou au gaz.

Ce type de construction va devenir la nouvelle norme architecturale. Ce livre explique les détails de construction, les bases et les exigences à mettre en œuvre au moment de la conception et lors de la construction d'une maison passive.

Ce manuel est un guide de construction utile aux maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, mais est aussi à la portée d'un plus large public tenté par le sujet !



L'auteur : L'ingénieur diplômé Carsten Grobe travaille comme architecte libéral. Il a déjà conçu et construit plusieurs maisons passives et développé de nombreux détails de construction énergétiquement économiques. Le livre a été écrit en étroite collaboration avec l'ingénieur Christian Rienass.



isbn 978-2-35032-120-2

prix : 45 €



9 782350 321202

• •
l'inédite