

# RÉFÉRENTIEL PASSIVHAUS POUR LES CLIMATS CHAUDS EUROPÉENS

Partie 1.

Confort et basse consommation d'énergie  
5 propositions de maisons bioclimatiques et  
recommandations



Passive-On  
project



# RÉFÉRENTIEL PASSIVHAUS POUR LES CLIMATS CHAUDS EUROPÉENS

## Partie 1.

Confort et basse consommation d'énergie  
5 propositions de maisons bioclimatiques  
et recommandations



Textes rédigés et rassemblés par : Brian Ford, Rosa Schiano-Phan et Duan Zhongcheng, School of the Built Environment, Université de Nottingham.

Traduction : Anne Attali, Sophie Attali ICE/sowatt, Dominique Maigrot DoMEEnE.

Le travail présenté dans cette étude a été réalisé dans le cadre du projet Passive-On soutenu par la Communauté Européenne ("Marketable Passive Homes for Winter and Summer Comfort" IEE-2003-091). Le contenu de ce document n'engage que la responsabilité de ses auteurs et ne représente pas nécessairement l'opinion de la Communauté européenne. La commission européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y figurent

## REFERENTIEL PASSIVHAUS POUR LES CLIMATS CHAUDS EUROPEENS

Partie 1. Confort et basse consommation d'énergie  
5 propositions de maisons bioclimatiques et recommandations

Juillet 2007

### PARTENAIRES

Politecnico di Milano, Italia  
Dipartimento di Energetica (e-ERG)  
Piazza Leonardo da Vinci 32  
20133 Milano  
*Andrew Pindar (Coordinateur)*  
*Lorenzo Pagliano*

University of Nottingham, Royaume-Uni  
School of the Built Environment  
University Park  
Nottingham NG7 2RD  
*Brian Ford*  
*Rosa Schiano-Phan*

AICIA, Espagne  
Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía  
Escuela Superior de Ingenieros. Camino de los Descubrimientos s/n  
E-41092, Sevilla  
*Servando Alvarez*  
*Jose Manuel Salmeron Lissen*

Natural Works, Portugal  
Projectos de Engenharia  
Calçada Marques de Abrantes N48 2D  
1200-719 Lisboa  
*Maria Malato Leifer*  
*Guilherme Carrilho da Graça*

INETI, Portugal  
National Institute of Engineering Technology and Innovation  
Estrada do Paço do Lumiar  
1648-038 Lisboa  
*Helder Gonçalves*  
*Luisa Brotas*

ICE, France  
International Conseil Énergie  
6 rue de Verdun  
93450 Ile-Saint-Denis  
*Sophie Attali - sowatt*  
*Dominique Maigrot - DoMEne*

### CONSULTANT TECHNIQUE

Passivhaus Institut  
Rheinstraße 44/46  
D-64283 Darmstadt  
*Juergen Schneiders*

### REMERCIEMENTS

Ce document a été établi à partir des travaux des différents partenaires du projet Passive-On. Nous voudrions également remercier les partenaires industriels pour leur précieuse contribution à ce projet : Nicola Agnoli, Rockwool Italia; Daniela Origi, BASF; Massimo Gattolin, Province de Venise.

Nos remerciements vont également à nos collègues relecteurs qui ont bien voulu partager leurs commentaires sur les précédentes versions de cette étude : Simos Yannas, Architectural Association; Mark Brinkley; Gavin Hodgson, BRE; Julian Marsh; Derek Taylor.

**TABLE DES MATIERES**

INTRODUCTION..... 6

1 LE RÉFÉRENTIEL PASSIVHAUS POUR LES CLIMATS CHAUDS ..... 7  
 1.1 QU'EST-CE QUE L'ARCHITECTURE PASSIVE ..... 7  
 1.2 LE REFERENTIEL PASSIVHAUS ..... 8

2 CONFORT INTÉRIEUR..... 10  
 2.1 MODELES DE CONFORT D'ÉTÉ ..... 10  
 2.2 CONFORT INTÉRIEUR ET REFERENTIEL PASSIVHAUS ..... 11

3 PROPOSITIONS PASSIVHAUS ..... 13  
 3.1 INTRODUCTION..... 13  
 3.2 PASSIVEHAUS : PROPOSITION ANGLAISE ..... 14  
 3.3 PASSIVHAUS : PROPOSITION ESPAGNOLE ..... 17  
 3.4 PASSIVHAUS : PROPOSITION PORTUGAISE ..... 20  
 3.5 PASSIVHAUS : PROPOSITION ITALIENNE ..... 23  
 3.6 PASSIVHAUS : PROPOSITION FRANCAISE ..... 26

4 APPLICABILITÉ CLIMATIQUE ..... 29  
 4.1 INTRODUCTION..... 29  
 4.2 APPLICABILITÉ CLIMATIQUE..... 29  
 4.3 INDICE DE SÉVÉRITÉ CLIMATIQUE ..... 31  
 4.4 CARTES DE GISEMENTS D'ÉNERGIE ..... 32

5 COÛT D'UNE PASSIVHAUS..... 34  
 5.1 INTRODUCTION..... 34  
 5.2 COÛTS D'INVESTISSEMENT ET COÛTS ADDITIONNELS..... 34  
 5.3 ANALYSE DES COÛTS SUR LA DURÉE DE VIE..... 35

6 BIBLIOGRAPHIE ..... 36

## INTRODUCTION

L'Institut Passivhaus a rencontré un grand succès dans le développement et la mise en œuvre d'une architecture non seulement très économe en énergie mais qui assure également un très bon niveau de confort tout au long de l'année dans les pays de l'Europe Centrale. Ce succès nous a naturellement conduits à nous interroger sur les possibilités d'application de ces mêmes méthodes à d'autres pays et d'autres climats

Cette question est au centre de deux projets récents de recherche et de diffusion, financés par le programme IEE de la Commission Européenne (les projets "Passive-On" et "PEP"). Le projet "Passive-On" (voir [www.passive-on.org](http://www.passive-on.org)) traite principalement de la question de l'application de ces critères à l'Europe du Sud (Portugal, Espagne et Italie), mais concerne aussi le Royaume-Uni et la France, dont les climats sont "en voie de réchauffement".

Sous les climats chauds du Sud de l'Europe, les besoins en chauffage sont généralement plus faibles que dans les pays du Nord de l'Europe, même si ce n'est pas seulement le nombre de "degrés-jours" pour un endroit spécifique qui entre en jeu, mais aussi la quantité de rayonnement solaire. Ce point a été étudié dans la définition de "l'Indice de Sévérité du Climat" (développé au chapitre 4), indice qui peut servir de base pour cartographier et comparer les bénéfices de l'augmentation des niveaux d'isolation ou des caractéristiques thermiques des vitrages dans les différentes parties d'Europe.

Les termes "passif" et "Passivhaus" pouvant prêter à confusion, les pays partenaires du projet (Italie, France, Allemagne, Espagne, Portugal et Royaume-Uni) ont établi une distinction entre les approches "passives" d'une conception architecturale (bioclimatique), et le référentiel "Passivhaus" (voir Chapitre 1). D'autre part, puisque dans le concept Passivhaus, le confort thermique est un point aussi essentiel que l'efficacité énergétique, une analyse succincte du confort intérieur tel qu'il est défini par le référentiel Passivhaus est fournie au chapitre 2.

Chaque partenaire du projet présente une proposition de maison à prix "raisonnable" (voir chapitre 3), conçue pour atteindre le niveau de performance du référentiel Passivhaus, à la fois du point de vue de la consommation prévisionnelle en énergie, et de celui du confort thermique. Bien que les propositions des différents partenaires soient liées à leur pays

d'origine, on ne doit pas pour autant en conclure que ces propositions soient applicables partout dans ce pays. Les variations climatiques peuvent être importantes au sein d'un même pays, ce qui renforce l'intérêt des cartes représentant l'Indice de Sévérité Climatique (ISC), cartes qui nous permettent d'établir des comparaisons significatives.

Bien sûr, les différences au sein de l'Europe ne sont pas seulement d'ordre climatique, mais concernent également la nature du marché du bâtiment, les coûts et les pratiques de construction. Néanmoins, il peut être utile de faire des comparaisons entre les coûts des différentes approches de conception dans les différents pays partenaires (chapitre 5). On peut généralement en conclure que lorsqu'on évalue un projet en fonction du coût sur la durée de vie, les critères du référentiel Passivhaus d'efficacité énergétique et de confort thermique peuvent être atteints de manière rentable, dans les pays européens concernés (fig. 1.0).

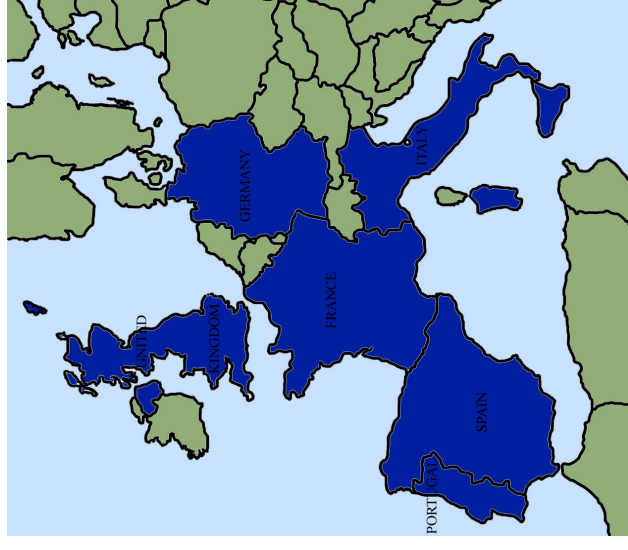


Fig. 1.0 - Pays partenaires du projet "Passive-On"

# 1 LE RÉFÉRENTIEL PASSIVHAUS POUR LES CLIMATS CHAUDS

## 1.1 QU'EST-CE QUE L'ARCHITECTURE PASSIVE

L'ère des énergies fossiles bon marché, qui aura duré environ 100 ans, est presque terminée. Durant cette époque, de nombreux systèmes mécaniques et électriques ont été développés pour chauffer, rafraîchir, ventiler et éclairer l'intérieur de nos bâtiments. Un nouveau métier, celui d'ingénieur en fluides des bâtiments, a vu le jour afin de concevoir et de dimensionner les systèmes "actifs" (mécaniques) appropriés aux différents types de bâtiments. Le développement du traitement mécanique des ambiances intérieures a eu pour conséquence que l'enveloppe du bâtiment a cessé d'être le régulateur principal de l'impact du climat sur l'environnement intérieur, et que les architectes se sont ainsi déchargés de leurs responsabilités environnementales sur l'ingénieur. Cependant, après le choc pétrolier de 1973, beaucoup d'architectes et d'ingénieurs ont pris conscience de la nécessité d'une réduction de notre dépendance aux énergies fossiles et ont montré un regain d'intérêt pour une architecture riche, subtile et conçue pour contrôler l'environnement intérieur en fonction des saisons et des variations climatiques. Ceci a conduit à une redécouverte des principes du contrôle environnemental, à travers le choix de la forme même des bâtiments, leur orientation, la disposition des ouvertures et la performance thermique des matériaux : c'est à dire l'emploi de solutions "passives".

Les solutions passives cherchent à optimiser les bénéfices thermiques et environnementaux qui peuvent être obtenus grâce à une prise en compte précise de la performance thermique des composants et systèmes des bâtiments, de manière à minimiser les déperditions de chaleur en hiver et l'excès de chaleur en été. Une conception strictement "passive" ne comprendrait aucune intervention mécanique. Cependant cette solution n'est généralement pas la meilleure, car l'intégration de dispositifs mécaniques et électriques (en particulier ceux qui exercent une fonction de contrôle) est souvent souhaitable, afin de permettre aux éléments passifs de fonctionner correctement.

L'Architecture Passive est donc un terme générique, utilisé pour définir une approche stratégique de conception architecturale - approche ouverte aux diverses interprétations que peuvent en faire des gens différents vivant à

des endroits et sous des climats différents - et dont l'objectif est de réduire la consommation de combustibles fossiles pour le chauffage, la ventilation, l'éclairage et la climatisation. En Europe du Nord, la demande en chauffage est toujours la priorité, tandis qu'en Europe du Sud les besoins en chauffage sont très faibles, mais par contre la demande concernant la climatisation mécanique ne cesse d'augmenter. Il y a donc un intérêt croissant pour les stratégies permettant d'atteindre à la fois un objectif de "chauffage passif" et de "climatisation passive".

Les réponses architecturales concernant le chauffage passif et la climatisation passive se basent sur l'exploitation des sources de chaleur et de rafraîchissement ambiantes (par exemple le soleil et la fraîcheur de la nuit). La plupart des recherches dans ce domaine ont été menées aux États-Unis dans les années 70, sous l'administration Carter. Elles ont ensuite été reprises (et poursuivies) en Europe pendant les années 80, grâce au financement des programmes R&D de la Commission Européenne. C'est dans ce contexte que le concept de "Passivhaus" a été développé.



Fig. 1. 1 - Une Passivhaus en Allemagne



Fig. 2. 2 - Maisons blanches à la chaux et rues étroites dans le quartier de Santa Cruz à Séville, Espagne. Deux des nombreuses stratégies utilisées par l'architecture traditionnelle pour conserver les maisons fraîches en été.

## 1.2 LE REFERENTIEL PASSIVHAUS

En 1991, Wolfgang Feist et Bo Adamson ont appliqué le concept "d'architecture passive" à une maison à Darmstadt, dans le but de pouvoir présenter au public un exemple de maison économe en énergie à un prix raisonnable et conçue pour le climat allemand. Cette conception originale s'est révélée très efficace, à la fois en termes de consommation d'énergie et de confort, à tel point que les mêmes systèmes passifs ont de nouveau été employés pour une seconde construction en 1995 à GroßUmstadt. Depuis cette date, en se basant sur l'expérience de ces premières constructions, Feist a décrit les critères utilisés pour les maisons de Darmstadt et GroßUmstadt afin d'en tirer le **référentiel "Passivhaus"**. Celui-ci consiste en 3 éléments essentiels:

1. une limite maximale de consommation d'énergie (pour le chauffage et la climatisation)
2. une exigence de qualité (confort thermique)
3. la définition d'une série de systèmes passifs privilégiés, répondant efficacement aux exigences de qualité, de limite énergétique et de coût de construction.

Cet ensemble de critères présentait déjà toutes les caractéristiques de ce qui est aujourd'hui connu comme le référentiel allemand Passivhaus : une très bonne isolation, y compris le traitement des ponts thermiques et la mise

en œuvre de fenêtres bien isolées, une bonne étanchéité à l'air, et un système de ventilation couplée à un système de récupération de chaleur très efficace. Dans le cas des climats d'Europe Centrale, on s'est rendu compte que ces améliorations en efficacité énergétique rendaient même possible la simplification du système de chauffage. En effet, il est devenu possible compte tenu des très faibles besoins en chauffage de se contenter de chauffer l'air neuf nécessaire à la qualité de l'air intérieur, pour assurer le confort thermique d'hiver. Tout le système de distribution de chaleur peut ainsi être réduit à un système de réchauffement de l'air neuf, associé à une récupération de chaleur sur l'air extrait. C'est ce qui permet de rendre l'opération rentable : si l'on considère le coût sur la durée de vie d'un bâtiment, il n'y a pas de raison qu'une Passivhaus soit plus chère qu'un logement neuf classique (voir chapitre 5).

Au total, jusqu'à présent plus de 8 000 maisons se conformant au référentiel Passivhaus ont été construites en Allemagne et ailleurs en Europe Centrale (par exemple en Autriche, Belgique, Suisse, Suède). Pour la plupart des professionnels en Allemagne ainsi que pour une bonne partie du grand public, une Maison Passive coïncide aujourd'hui rigoureusement avec le référentiel Passivhaus, même si, pour le reste de l'Europe, ce référentiel doit encore faire ses preuves.

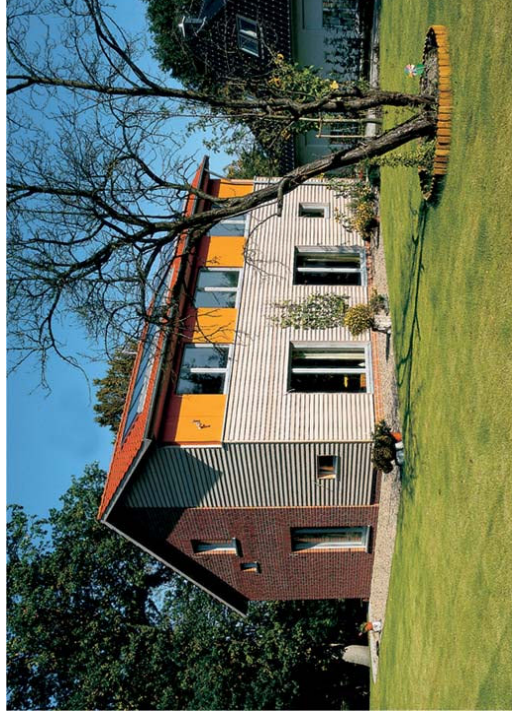


Fig 1.3 une Passivhaus pour une famille à Ganderkesee, Allemagne du Nord (architecte : team 3, Oldenburg)



Définir un référentiel pour les logements à basse consommation présente de nombreux avantages, que ce soit pour l'industrie du bâtiment en général et le marché allemand en particulier. C'est d'ailleurs essentiellement pour cette raison que la construction de ce type de logements a littéralement explosé en Allemagne. Les cinq points suivants constituent le **cahier des charges du référentiel Passivhaus allemand pour les pays d'Europe Centrale** :

- Chauffage : la demande en énergie utile pour le chauffage ne doit pas excéder 15 kWh par m<sup>2</sup> de surface habitable nette, par an.
- Énergie primaire : la consommation en énergie primaire pour tous les usages énergétiques, comprenant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires et l'électro-domestique ne doit pas excéder 120 kWh par m<sup>2</sup> de surface habitable nette, par an.
- Étanchéité à l'air : le test d'étanchéité (50 Pa) de l'enveloppe du bâtiment selon la norme EN 13829 doit avoir un résultat de 0.6 h-1 maximum
- Confort pour la température intérieure hivernale : les températures résultantes des pièces sont maintenues au-dessus de 20°C en hiver, sans dépasser la quantité d'énergie consommée mentionnée ci-dessus.
- Toutes ces valeurs de demande en énergie sont calculées selon le "Passive House Planning Package" (PHPP), le logiciel de conception du Passivhaus Institut. Elles se réfèrent à la surface habitable nette, c'est à dire à la somme des surfaces nettes de toutes les pièces habitables.

Cependant, si en Europe Centrale (par exemple en Allemagne, Autriche, Italie du Nord, etc.) l'architecture passive est de plus en plus souvent associée au référentiel Passivhaus, ce n'est pas forcément le cas en Europe du Sud (par exemple en Espagne, Italie, Portugal et Grèce). Dans ces pays, pour la plupart des architectes, le terme Maison Passive désigne n'importe quelle maison construite suivant les principes génériques d'une conception bioclimatique. De plus, un grand nombre de professionnels exerçant dans ce domaine n'aime pas beaucoup l'idée que le terme générique "passif" soit associé à un référentiel spécifique de construction, qui propose un système de ventilation mécanique.

**Le consortium Passive-On a donc proposé un référentiel Passivhaus modifié, de façon à l'adapter aux climats chauds européens**, en prenant en compte les spécificités climatiques et tenant compte des positions évoquées plus haut. Les six points qui définissent cette proposition de référentiel Passivhaus pour les climats chauds européens sont les suivants :

- Chauffage : la demande en énergie utile pour le chauffage ne doit pas excéder 15 kWh par m<sup>2</sup> de surface habitable nette, par an.
- Climatisation : la demande en énergie utile sensible pour la climatisation ne doit pas excéder 15 kWh par m<sup>2</sup> de surface habitable nette, par an (cette valeur n'est pas définitive et pourra être abaissée après des tests sur le terrain)
- Énergie primaire : la consommation en énergie primaire pour tous les usages énergétiques, comprenant le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires et l'équipement électrodomestique, ne doit pas excéder 120 kWh par m<sup>2</sup> de surface habitable nette, par an. La consommation d'électricité spécifique dépend également de la conception des logements. Par exemple, des espaces à l'intérieur et à l'extérieur de la maison devraient être prévus pour le séchage naturel des vêtements.
- Étanchéité à l'air : si un système de ventilation mécanique assure le renouvellement hygiénique de l'air intérieur, tout en garantissant un confort thermique élevé, le test d'étanchéité (50 Pa) de l'enveloppe du bâtiment selon la norme EN 13829 doit avoir un résultat de 0.6 h-1 maximum. Pour les endroits où la température ambiante hivernale ne descend pas en dessous de 0° C, un résultat au test de 1.0 h-1 est en général suffisant pour respecter la limite énergétique énoncée ci-dessus pour le chauffage.
- Confort pour la température intérieure hivernale : les températures résultantes des pièces sont maintenues au-dessus de 20°C en hiver, sans dépasser les consommations d'énergie mentionnées ci-dessus.
- Confort pour la température intérieure estivale : pendant les saisons chaudes, les températures résultantes des pièces doivent se maintenir dans la fourchette de températures de confort définies par la norme EN 15251. De plus, si un système de climatisation actif est utilisé pour la climatisation, la température résultante de la pièce peut être maintenue en dessous de 26°C.

## 2 CONFORT INTÉRIEUR

Si l'on n'y porte pas attention, le débat sur les bâtiments à faible consommation d'énergie peut négliger certains points importants concernant la conception même des bâtiments. Nous devons garder à l'esprit, en effet, que l'énergie est un moyen et non une fin. Le plus important est que les bâtiments procurent un environnement confortable dans lequel travailler, se reposer et jouer.

Si les logements de l'Europe du Sud doivent malgré tout être chauffés en hiver, ils doivent également assurer un certain confort pendant l'été, ce qui peut même parfois devenir la préoccupation prédominante. Comme nous l'avons observé au chapitre précédent, le référentiel Passivhaus a été récemment modifié afin d'être adapté aux besoins spécifiques des climats plus chauds. L'un des changements majeurs par rapport à la définition précédente qui concernait les climats d'Europe Centrale a donc été l'ajout de conditions requises explicites concernant le confort d'été.

Pour satisfaire aux exigences du référentiel Passivhaus, il faut à présent que les températures intérieures d'été, et plus spécifiquement les températures résultantes, se maintiennent en dessous des températures maximales définies par la norme EN 15251.

Selon cette norme, c'est en fait le type de système utilisé qui induit le niveau de confort d'été acceptable. Si la climatisation est obtenue par un système actif, alors les températures intérieures doivent respecter les niveaux déterminés par le modèle de Fanger. Si au contraire le confort d'été est obtenu par des stratégies passives de climatisation, alors la limite supérieure acceptable de température est définie par le modèle de Confort Adaptatif.

Les différences entre les modèles de Fanger et de Confort Adaptatif sont brièvement expliquées dans le chapitre suivant et plus amplement détaillées dans la troisième partie de ce document (en anglais). Le point sans doute le plus important, si l'on exclue les températures réelles de confort intérieur établies par les différents modèles, est que les températures de confort intérieur d'été sont à présent une condition requise explicite du référentiel Passivhaus modifié. En conséquence, ce référentiel apporte une garantie de qualité générale pour les logements bioclimatiques, ce qui n'est pas le cas

des autres référentiels portant sur l'efficacité énergétique ou la qualité environnementale.

### 2.1 MODÈLES DE CONFORT D'ÉTÉ

Les modèles de confort décrivent de manière quantitative (en se basant sur des sondages effectués auprès d'un large public) les conditions aux limites desquelles les gens se sentiront confortables, du point de vue thermique, dans leur logement. Le fait d'établir des conditions aux limites dans un intervalle trop étroit peut conduire à une consommation inutile d'énergie.

Pour évaluer le confort thermique apporté par un bâtiment, on peut utiliser au choix :

- le modèle de confort proposé à l'origine par Fanger, ou modèle de vote moyen prévisible (indice VMP)
- le modèle prenant en compte la faculté d'adaptation des occupants d'un bâtiment aux variations du climat suivant les saisons et le lieu (modèle de Confort Adaptatif).

On appliquera l'un ou l'autre de ces modèles selon les conditions rencontrées. Pour résumer, le modèle de Fanger s'appliquera aux bâtiments utilisant un système de ventilation mécanique (pour une fourchette déterminée de températures, d'humidité, vitesse de l'air...), et le modèle de Confort Adaptatif s'appliquera aux bâtiments n'ayant pas de ventilation mécanique ou étant naturellement ventilé. La limite entre les deux modèles fait encore l'objet de recherches, certaines études ayant testé le modèle de Confort Adaptatif dans des bâtiments équipés de ventilation mécanique.

Une correction importante doit cependant être faite dans les deux cas concernant l'évaluation des conditions de confort d'été, afin de prendre en compte l'accroissement du confort dû à l'augmentation de la vitesse de l'air obtenue grâce à la ventilation naturelle ou à des brasseurs d'air.

Pour le modèle de Fanger, les conditions de confort optimal d'un bâtiment (c'est à dire celles que les occupants indiquent comme confortables) sont exclusivement liées aux paramètres se rapportant aux conditions internes du bâtiment (par exemple la température et la vitesse de l'air, la température moyenne rayonnante, l'humidité de l'air), aux caractéristiques vestimentaires des occupants et à leur niveau d'activité (métabolisme). Le modèle de Fanger est basé sur des corrélations entre la sensation de confort thermique des occupants et les conditions thermiques (la température de l'air, les températures rayonnante et résultante, l'humidité relative, le niveau d'activité

et les caractéristiques vestimentaires), observées dans des conditions de test (environnement clos et contrôlé). Bien que le modèle de Fanger utilise des variables concernant le métabolisme et l'habillement des occupants, dans la pratique des "valeurs types" sont fixées pour ces variables, ce qui peut conduire les concepteurs de bâtiments à définir un intervalle trop étroit et statique de températures ambiantes "confortables", appliqué uniformément dans l'espace et dans le temps. Ces températures statiques ne favorisent pas les technologies passives, qui contribuent à limiter les effets des fluctuations de la température extérieure mais ne sont en général pas à même de découpler complètement l'environnement intérieur de l'environnement extérieur du bâtiment.

On doit donc faire attention à n'appliquer le modèle de Fanger que dans certaines limites de validité, ainsi que le recommande la norme ISO 7730 (établie en 1994 et révisée en 2005).

Le modèle de Confort Adaptatif est en revanche basé sur une corrélation entre la température ambiante de confort pour les occupants d'un bâtiment et la température extérieure. Le concept qui sous-tend cette proposition est le processus étudié selon lequel le corps humain s'adapte aux variations du climat (y compris grâce à des changements d'ordre métabolique) suivant les saisons et les lieux. En conséquence, le niveau de température perçue comme confortable par les occupants sera différent en fonction des saisons et des endroits. Le modèle de Confort Adaptatif est établi sur la base des corrélations mesurées (pour des centaines de bâtiments dans des conditions réelles) entre la sensation des gens concernant le confort et la température intérieure et la température extérieure.

Comparé au modèle de Fanger, le modèle de Confort Adaptatif considère comme confortable un intervalle plus étendu de températures (puisque'il tient compte du fait que les occupants s'adaptent aux conditions externes aux bâtiments), et permet donc une meilleure prise en compte des technologies passives de climatisation.

Cependant, le fait de prendre en compte un intervalle plus large de températures ne doit pas être interprété comme une absence totale de contrôle ; les températures maximales de confort prévues par le modèle de Confort Adaptatif restent relativement basses. Par exemple, si l'on applique l'algorithme de Confort Adaptatif défini par la norme EN15251 aux données climatiques annuelles, on prévoit des températures maximales neutres de confort d'été (correspondant à une séquence de jours à très fortes

températures externes) pour Frankfurt, Milan, Lisbonne et Séville de respectivement 26,1°C, 27,2°C, 26,7°C, et 28,7°C. En comparaison, un bâtiment climatisé par un système actif sera considéré comme confortable jusqu'à une limite prédéterminée, fixée entre 23°C et 26°C.

Bien que le modèle de Fanger soit moins restrictif en ce qui concerne les températures maximales, dans la pratique il est difficile d'établir le confort induit par les vêtements et les changements de métabolisme des occupants en situation réelle. En conséquence, les concepteurs de bâtiments se basent souvent sur des hypothèses générales et conservatrices qui les conduisent à déterminer des températures maximales trop basses.

Le modèle de Confort Adaptatif a été révisé au fil des années, et testé au cours de nombreuses études de terrain (Humphreys, 1975; 1978; 1979; Nicol, 1993; de Dear, 1998; Nicol & McCartney, 2001). Bien que la plupart des normes suggère son utilisation pour les bâtiments naturellement ventilés, McCartney et Nicol (2002) ont testé avec succès un algorithme pour les bâtiments climatisés, utilisant le modèle de Confort Adaptatif pour le contrôle de la température intérieure.

Dans la plupart des réglementations thermiques en vigueur, la définition du confort thermique suit la norme ISO 7730, basée sur le modèle statique de Fanger. Cependant, récemment, des normes internationales (par exemple la norme américaine ASHRAE 55 2004 et la norme européenne EN 15251) ont proposé des modèles de Confort Adaptatif établis à partir d'enquêtes de terrain sur le confort. Elles se sont substituées aux normes de températures basées sur le modèle de Fanger pour la température intérieure des bâtiments naturellement ventilés.

## 2.2 CONFORT INTÉRIEUR ET REFERENTIEL PASSIVHAUS

La demande en rafraîchissement correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir pendant l'été des conditions données de température ambiante et d'humidité. Les conditions ambiantes attendues conditionnent le niveau de demande en rafraîchissement, et de ce fait plus les températures intérieures d'été requises sont basses, plus la demande en rafraîchissement est élevée (plus les besoins en énergie sont élevés pour maintenir le bâtiment à la température fixée).

Comme nous l'avons déjà souligné, le modèle de Confort Adaptatif établit généralement des températures de confort plus élevées et plus variables que celles calculées selon le modèle de Fanger. Souvent, on peut atteindre le niveau de "température neutre" tel que défini par le modèle de Confort Adaptatif grâce à des stratégies de climatisation passives, telles que les protections solaires ou l'utilisation de la ventilation nocturne. Quand c'est le cas, la demande en climatisation est effectivement réduite à zéro, et il n'est pas nécessaire d'avoir recours à un système mécanique.

Dans certaines zones climatiques, de l'énergie est toutefois nécessaire pour garantir les températures maximales de confort définies selon le modèle de Confort Adaptatif. A Palerme en Sicile, par exemple, il y a de faibles écarts de température entre le jour et la nuit, la température de l'air extérieur la nuit descendant seulement de quelques degrés par rapport celle de la journée. Dans ce cas, les stratégies de ventilation nocturne ne sont pas très efficaces pour rafraîchir les bâtiments. En conséquence, une Passivhaus à Palerme a des besoins en rafraîchissement d'environ 2 kWh/m<sup>2</sup>/an, ce qui entraîne l'utilisation d'un système actif mécanique de climatisation, afin de diminuer les températures de pointes (bien que le dispositif principal de rafraîchissement reste passif). Cependant, même si cette Passivhaus a des besoins en climatisation, ceux-ci sont tellement faibles que la consommation totale annuelle requise pour le chauffage et la climatisation ne dépasse pas la limite de 15 kWh/m<sup>2</sup>/an fixée par le référentiel Passivhaus.

Puisque le modèle de Fanger conduit généralement à des températures neutres de confort plus basses que celles prévues par le modèle de Confort Adaptatif, les besoins en rafraîchissement des bâtiments sont plus élevés. Il y a donc un avantage évident à favoriser les stratégies passives de rafraîchissement.

Cependant, l'utilisation de solutions passives performantes pour le rafraîchissement peut se révéler problématique dans certaines zones climatiques. Dans les villes, en particulier, la mise en œuvre de stratégies de ventilation nocturne (utilisant l'air frais de la nuit pour refroidir la masse thermique des bâtiments) peut être difficile, à la fois parce que les habitants ferment parfois les fenêtres la nuit pour réduire le bruit et parce que les écarts de température entre la nuit et le jour sont faibles à cause des effets d'îlots de chaleur. Pour ces situations, d'autres techniques de rafraîchissement peuvent être essayées (voir troisième partie), ou bien des systèmes actifs de climatisation peuvent être installés de manière à fournir des conditions intérieures acceptables pour les occupants durant l'été.

En conséquence, pour être conformes à la proposition de référentiel Passivhaus adapté aux climats chauds Européens, les logements doivent à présent satisfaire aux conditions suivantes :

Si le rafraîchissement est obtenu principalement par des solutions passives :

- Conditions requises de confort intérieur : conformes au modèle de Confort Adaptatif de l'annexe A.2 de la norme EN15251 ("températures intérieures acceptables pour la conception des bâtiments sans systèmes de climatisation mécanique").
- Demandes en chauffage et climatisation : < 15 kWh/m<sup>2</sup>/an (énergie utile)
- Consommation totale en énergie primaire : < 120 kWh/m<sup>2</sup>/an

Si la climatisation est obtenue par des systèmes actifs :

- Conditions requises de confort intérieur : conformes au modèle de Fanger de la norme EN 15251 (pour les bâtiments avec climatisation mécanique)
- Demande en chauffage : < 15 kWh/m<sup>2</sup>/an (énergie utile)
- Demande en climatisation : < 15 kWh/m<sup>2</sup>/an (énergie utile) (Cette valeur n'est pas définitive et pourra être abaissée après des tests sur le terrain)
- Consommation totale en énergie primaire : < 120 kWh/m<sup>2</sup>/an

Cette proposition de référentiel recommande cependant que les systèmes mécaniques ne soient utilisés que dans le cas où l'emploi généralisé de solutions passives est impossible, du fait de limitations techniques.

## 3 PROPOSITIONS PASSIVHAUS

### 3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente un certain nombre d'exemples d'application du référentiel Passivhaus dans les 5 pays partenaires (France, Espagne, Portugal, Italie et Royaume-Uni), et donc dans des conditions climatiques et socio-économiques différentes du contexte original allemand. Cet exercice a été entrepris par les différents partenaires, dans le but d'appliquer ce référentiel (détaillé dans les chapitres 1 et 2), conçu comme un cahier des charges fixant des objectifs à atteindre plutôt que comme une liste de prescriptions.

Les propositions nationales ont été élaborées à partir du modèle de base d'un logement individuel en bande. Il a ensuite été adapté et optimisé d'un point de vue de la conception, pour atteindre le niveau de confort requis tout en consommant le moins d'énergie possible. Une analyse des performances des diverses options a été entreprise par simulation thermique dynamique – même s'il n'a pas été possible d'utiliser le même outil de simulation dans tous les pays partenaires - afin d'évaluer les différents niveaux de besoins en chauffage et climatisation pour les différents lieux, et la faisabilité de mise en œuvre du nouveau référentiel Passivhaus.

Cet exercice a révélé que le besoin en chauffage est relativement peu élevé dans beaucoup de pays d'Europe du Sud, et se maintient généralement en dessous du seuil de 15 kWh/m<sup>2</sup>. Ce niveau de reste faible comparé à d'autres consommations en énergie des ménages, tels que l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et certains appareils électroménagers. Il a également montré que, dans bien des cas, des besoins en rafraîchissement doivent être pris en compte, mais qu'ils peuvent souvent être entièrement satisfaits grâce des solutions passives.

Cette approche a permis d'aboutir à un large éventail solutions pour la conception, que l'on retrouve dans les propositions nationales décrites ci-dessous. Elles montrent qu'il est possible d'éviter l'utilisation de systèmes mécaniques de climatisation dans beaucoup d'endroits tout en aboutissant à des logements à basse consommation d'énergie et confortables.

Nous présentons ci-dessous un résumé de chaque proposition nationale ; les hypothèses et résultats détaillés de l'analyse des performances de chacune des propositions nationales se trouvent dans la deuxième partie de ce document ; des stratégies passives génériques sont présentées plus en détail dans la troisième partie.

et les ouvertures automatisées équipées de bouches d'entrée d'air contrôlées qu'on trouve dans toute la maison. L'isolation du toit est d'environ 300 mm et celle des murs d'environ 200 mm. L'espace tampon vitré sur le côté Sud est équipé de stores vénitiens pour le contrôle solaire en été et de volets isolés contre les déperditions de chaleur en hiver. Le coût additionnel de cette proposition de Passivhaus anglaise, par rapport à une maison standard, est de 49£/m<sup>2</sup> avec un temps de retour de 19 ans.



Fig.3.1 - Logements n'utilisant aucune énergie fossile à Bedzed, Royaume-Uni

### 3.2 PASSIVEHAUS : PROPOSITION ANGLAISE

#### 3.2.1 La maison

Le point de départ de la proposition anglaise de Passivhaus présentée par the School of Built Environment (SBE) de l'Université de Nottingham est une maison moyenne traditionnelle de trois pièces conforme aux réglementations de construction de 2006. Les exigences en terme de consommation d'énergie et de confort du référentiel Passivhaus allemand ont été adaptés au contexte britannique de manière à prendre en compte le climat local, les standards de construction, le cadre technique et économique ainsi que les différences de styles de vie et d'attentes des acheteurs anglais concernant l'utilisation de l'espace et le rapport au bâtiment. L'une des principales caractéristiques de la version allemande, par exemple, est le système de ventilation mécanique avec récupérateur de chaleur. Pour que cela fonctionne (c'est à dire apporte une économie d'énergie nette), l'enveloppe de la maison doit être très étanche à l'air. Au Royaume-Uni, cependant, les constructeurs de maisons sont pour la plupart extrêmement sceptiques quant à la nécessité d'une très bonne étanchéité à l'air, et à l'utilisation d'une ventilation mécanique. Cela est dû, d'une part, au climat d'hiver relativement doux, et d'autre part à la crainte de ne pas pouvoir garantir un taux d'infiltration très bas. C'est pourquoi, SBE propose le recours à une ventilation naturelle, obtenue au moyen d'ouvertures contrôlées soit par les occupants soit automatiquement quand celles-ci sont en hauteur. Grâce à cela, les habitants évitent le coût d'investissement et d'entretien d'un système mécanique, et ont également un meilleur contrôle sur l'ouverture des fenêtres. L'étanchéité à l'air reste importante, mais le renouvellement minimum en air neuf se fait à travers un espace tampon, grâce à des ventilateurs automatisés et des bouches d'entrée d'air.

La Passivhaus anglaise est agencée selon la disposition générale d'une maison de 3 pièces traditionnelle. Le plan du rez-de-chaussée comprend 2 "espaces tampons", situés sur les côtés Nord et Sud. Bien qu'ils empiètent sur l'espace habitable du rez-de-chaussée, ils peuvent aussi être utilisés comme rangement, serre ou buanderie pour sécher le linge. Celui du côté Nord sert également de hall d'entrée, tandis que celui du côté Sud forme une sorte de serre intégrée au volume du bâtiment. Les autres caractéristiques de la Passivhaus anglaise sont l'ouverture en toiture, au dessus de la cage d'escalier qui permet l'extraction d'air par tirage naturel,



Fig. 3.2 - Représentation 3D de la Passivhaus proposée par SBE

### 3.2.2 La stratégie

La stratégie de conception environnementale présentée par la SBE diffère de celle de la Passivhaus allemande en ce qu'elle combine ventilation naturelle avec très forte capacité thermique intérieure. En hiver, l'air entrant est préchauffé dans l'espace tampon au Sud, où la température peut dépasser les 20°C. Là où il y aura suffisamment d'espace, un puits canadien pourra être installé dans le jardin pour fournir à l'espace tampon de l'air préchauffé (ou pré-rafraîchi). La demande résiduelle de chauffage est tellement faible qu'elle pourrait être obtenue grâce à des sources d'énergies renouvelables comme par exemple une chaudière à bois, qui pourrait également fournir l'eau chaude. En été, pendant les jours les plus chauds, l'espace tampon s'ouvre sur l'extérieur pour éviter les excès de température et sert également d'extension au salon. Pendant les nuits d'été, le contrôle automatique des ventilateurs placés en hauteur favorisera le rafraîchissement du bâtiment et de la masse thermique. La sécurité est assurée par l'utilisation d'ouvertures en hauteur automatisées et de bouches d'entrée d'air automatisées placés plus bas.

La capacité thermique élevée peut être obtenue par l'utilisation de dalles de béton préfabriqué apparentes, ou bien, là où des constructions plus légères sont plus appropriées, par l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) encapsulés dans des panneaux de plâtre. La haute capacité thermique permet d'éviter la surchauffe et l'utilisation de la climatisation, ce qui va devenir avec le réchauffement climatique une priorité grandissante. La Passivhaus anglaise évite donc le recours à la climatisation active grâce à des protections solaires et l'utilisation de la ventilation naturelle, associées à la masse thermique intérieure.

Afin de minimiser les déperditions de l'enveloppe et par infiltration, les murs et le toit ont un très haut niveau d'isolation, avec des coefficients U allant respectivement de 0.2 W/m<sup>2</sup>K à 0.15 W/m<sup>2</sup>K. Un double-vitrage basse émissivité est proposé pour la surface vitrée intérieure de l'espace tampon (et non pas un triple-vitrage comme dans les Passivhaus allemandes) alors que sa surface extérieure utilisera un simple vitrage. La surface extérieure pourrait aussi être constituée d'un double-vitrage, ce qui améliorerait encore les performances, mais les simulations ont indiqué qu'en utilisant le vitrage décrit plus haut, on respecterait le référentiel en ce qui concerne le chauffage. Les coefficients U types pour les fenêtres sont de 1.8 W/m<sup>2</sup>K, tandis que le taux de perméabilité de 3 ach à 50 Pa est respecté.

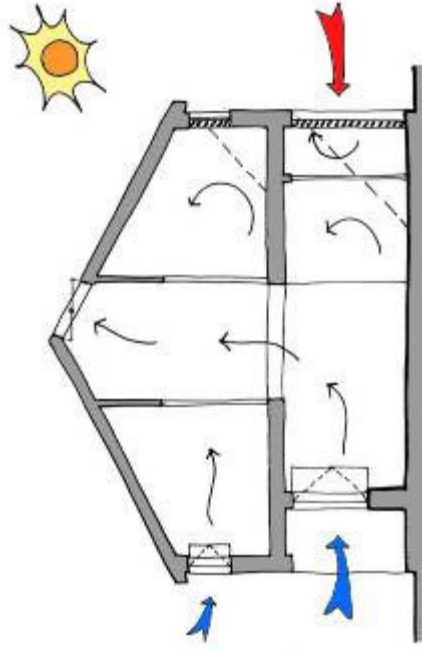


Fig. 3.3 - Été : stratégie de ventilation

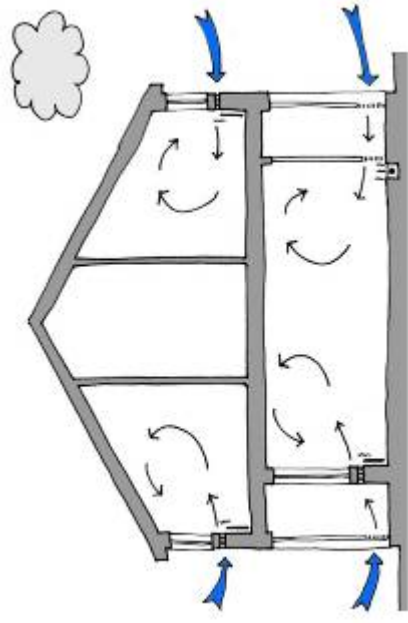


Fig. 3.4 - Hiver : stratégie de ventilation pendant la journée

### 3.2.3 Performance : énergie et confort

La demande en énergie annuelle de la Passivhaus anglaise présentée par SBE a été estimée à un total de 13.8 kWh/m<sup>2</sup>. Cela est conforme à la limite de 15 kWh/m<sup>2</sup> fixée par le référentiel Passivhaus, et doit être comparé avec la demande annuelle type, pour la même maison, selon la réglementation thermique en vigueur qui établit une limite de 55 kWh/m<sup>2</sup>. L'utilisation des stratégies passives décrites plus haut suffit à éviter le recours à la climatisation active. On peut noter que cette maison présente un mur pignon, et que donc une maison réellement mitoyenne (insérée dans une rangée de maisons) ayant le même plan de conception pourrait atteindre le même niveau de performance avec des caractéristiques thermiques légèrement réduites.

Les critères de confort d'été ont été établis sur la base du calcul des indices de confort (voir troisième partie). Ces indices cumulent l'écart entre la température résultante de la pièce et les températures neutres, à pas horaire, pendant toute l'année. L'indice de Confort Adaptatif (A12), appliqué à des bâtiments autonomes, sans apport externe d'énergie pour le chauffage et le rafraîchissement, se rapporte à une température de confort neutre, définie à partir des modèles de Confort Adaptatifs mensuels établis dans la norme ASHRAE 55. Quand on utilise cet indice pour évaluer le degré de confort, un faible indice indique une meilleure performance, la performance optimale étant ainsi indiquée par une valeur nulle. Pour la proposition anglaise de Passivhaus, l'indice A12 était de zéro. Si l'on prend en compte les conditions estivales de température, la température résultante, c'est à dire la moyenne entre la température de l'air et la température rayonnante, est maintenue en dessous de 25°C pendant 96% du temps d'occupation (pour plus de détails sur les questions de confort, voir chapitre 2). En hiver, la température de l'air intérieur est maintenue à 20°C au moyen d'un système de chauffage conventionnel permettant de déterminer la demande résiduelle en chauffage. Cependant, sans aucun système de chauffage, la température résultante est au-dessus de 18°C pendant 68% du temps. Dans les parties habitées, les températures résultantes s'évaluent généralement entre 10 et 24°C, dépassant les températures ambiantes de 5 à 15°C.

Ceci démontre que la stratégie adoptée pour la conception de la maison a atteint son objectif et répond aux exigences du référentiel Passivhaus en termes de demande en chauffage/climatisation et en termes de confort

thermique. Cela prouve également que les mesures requises pour atteindre ces critères de performance ne doivent pas forcément être des prescriptions fixes. Cela donnera plus de flexibilité à la fois aux architectes et aux constructeurs pour jongler avec les différentes priorités nécessaires au développement de logements passifs à prix raisonnable.

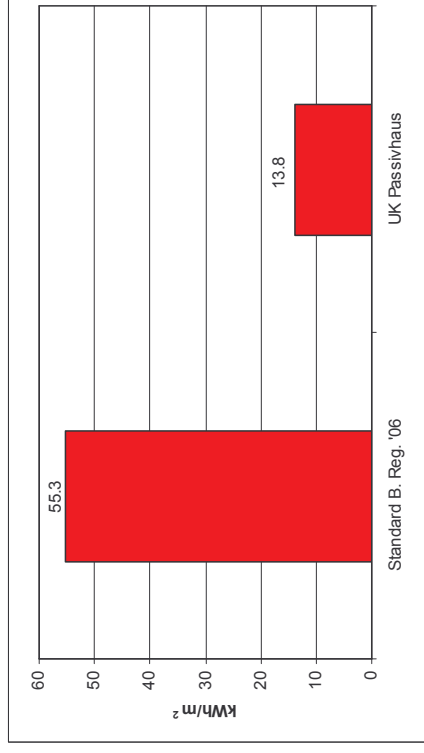


Fig.3.5 - Demande annuelle prévisionnelle en chauffage pour une maison standard et pour une Passivhaus

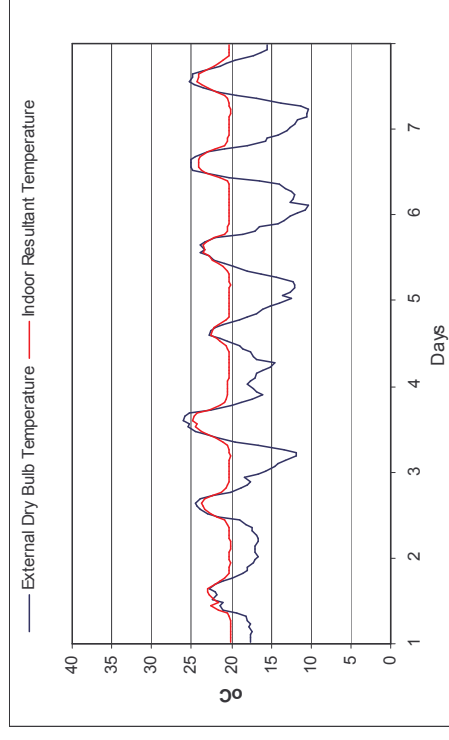


Fig. 3.6 - températures résultantes sèches types en été, sans climatisation supplémentaire (Température extérieure sèche – Température intérieure résultante)



particulière dans le tissu urbain peut se révéler problématique car elle est peu fréquente, mais c'est la meilleure solution d'un point de vue énergétique.

Le surcoût de la Passivhaus espagnole est d'environ 25 €/m<sup>2</sup> - cela représente un supplément de 5% par rapport aux coûts de construction standard - et le temps de retour actualisé moyen est d'environ 5 ans. Si ces chiffres sont plus bas que dans d'autres pays, c'est parce que notre proposition est basée sur une conception générale de la maison plutôt que sur l'utilisation de systèmes innovants ou sur un niveau élevé d'étanchéité à l'air.



Fig.3.7 - Logements basse consommation à Séville, Espagne

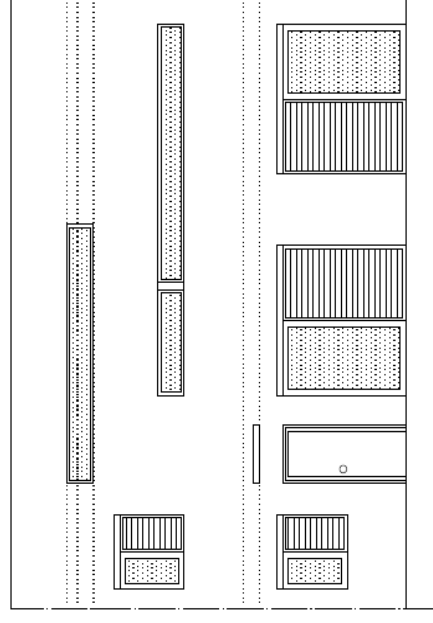


Fig. 3.8 - Façade nord de la proposition Passivhaus espagnole

### 3.3 PASSIVHAUS : PROPOSITION ESPAGNOLE

#### 3.3.1 La maison

Le point de départ de la proposition est une habitation espagnole traditionnelle en bande, située près d'une grande ville. C'est une maison de 3 ou 4 pièces, avec une surface totale chauffée de 100 m<sup>2</sup>. Elle est conforme à la réglementation espagnole en vigueur ("Code Technique du Bâtiment") obligatoire depuis 2007, et en particulier à la partie concernant la limitation de la demande en énergie.

L'objectif était d'appliquer les principes du référentiel Passivhaus en partant d'une maison donnée et en prenant en compte les caractéristiques du climat espagnol. L'analyse est centrée sur le climat régional d'Andalousie, et plus particulièrement de Séville et Grenade. Ces deux villes ont un climat méditerranéen mais avec des spécificités qui rendent leur climat plus complexe et plus extrême que celui d'autres villes comme Cadix et Almería. L'été à Séville est particulièrement rude, alors qu'à Grenade c'est l'hiver qui est extrêmement rigoureux.

Cette proposition a aussi pour but d'étudier des logements qui atteignent, dans le cadre de la réglementation sur l'étiquetage des bâtiments (le DPE en France), la meilleure classe énergétique en utilisant des techniques passives de chauffage et de climatisation à bas prix et répondant aux exigences de confort requises par la norme EN 15251.

Le plan de la maison et la distribution des pièces ne correspondent pas à une maison typique espagnole. En effet, dans les maisons en bande la surface des murs extérieurs reste plus limitée que celle des murs mitoyens. Cette option optimise la compacité (voir la stratégie passive "compacité" dans la troisième partie), ce qui est bien adapté aux climats ayant un hiver très rigoureux et où le rayonnement solaire n'est pas très élevé. A Grenade et à Séville cependant, cela vaut la peine de renoncer à la compacité pour obtenir plus de surface orientée au Sud, augmenter la surface de transfert de chaleur selon cette orientation et en conséquence diminuer les besoins en énergie de chauffage. Ce prototype présente donc une plus grande surface de murs extérieurs. Les façades sont principalement orientées au Sud - là où il y aura le plus de surface vitrée (environ 50%) - et au Nord - là où il y en aura moins (environ 10%). L'intégration de cette conception

### 3.3.2 La stratégie

La stratégie environnementale de la proposition de Passivhaus espagnole est composée des éléments détaillés ci-dessous :

- Préchauffage de l'air entrant  
Nous n'avons pas envisagé l'utilisation d'un système de ventilation mécanique (avec de très hauts niveaux d'étanchéité à l'air), car cela n'est pas compatible avec les caractéristiques des bâtiments espagnols.
- Surfaces vitrées  
La grande quantité de surfaces vitrées au Sud optimise les apports solaires en hiver. L'avantage principal d'une orientation au Sud est que le rayonnement solaire y est moins important en été, par rapport à une orientation à l'Est ou à l'Ouest - c'est à dire au moment où il n'est pas désiré. On peut aussi y contrôler plus facilement les apports solaires, grâce à l'utilisation de protections solaires mobiles (voir la stratégie "surfaces vitrées et énergie solaire", dans la troisième partie). Pour la façade Nord, il est recommandé d'en limiter les surfaces, tout en les optimisant pour les besoins en éclairage naturel. Dans les endroits où les hivers sont rigoureux, il est conseillé d'améliorer le coefficient U des surfaces vitrées exposées au Nord.

- Masse thermique et inertie  
Deux solutions sont proposées : une faible inertie traditionnelle obtenue en utilisant des briques de 6 cm sur la face interne du mur, et une forte inertie utilisant des briques de céramique, de faible densité. Cette dernière solution n'est pas réalisable à Grenade, pour des questions de structure. Une solution à forte inertie doit, dans tous les cas, être utilisée avec :
  - une ventilation qui mette en contact l'air entrant avec des murs intérieurs à forte inertie (forte masse thermique), les autres parois n'ayant pas forcément besoin de présenter une forte inertie,
  - une distribution correcte de la masse, afin de permettre au rayonnement solaire d'être absorbé au maximum par les murs ayant une forte masse.

- Ventilation nocturne  
L'orientation au Nord des escaliers agit comme une cheminée à tirage thermique permettant à l'air chaud d'être évacuée, durant les nuits d'été.

- Éclairage

Une longue fenêtre orientée au Sud a été prévue au sommet des escaliers, permettant ainsi l'éclairage naturel de cette zone exposée au Nord.

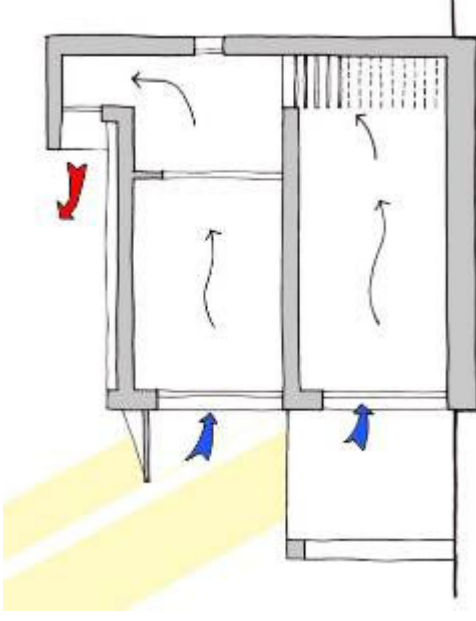


Fig.3.9 - Stratégie d'éclairage / ventilation en été

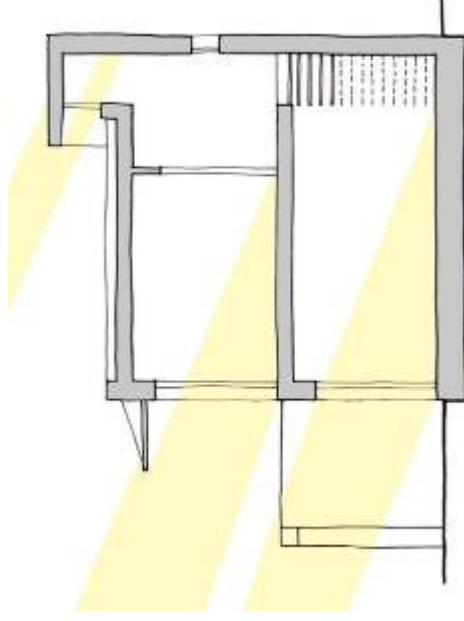


Fig. 3.10 - Stratégie d'éclairage / utilisation des apports solaires en hiver

### 3.3.3 Performance : énergie et confort

La demande totale en énergie de la maison de Séville est de 24,5 kWh/m<sup>2</sup> (2,8 kWh/m<sup>2</sup> de demande en chauffage et 21,7 kWh/m<sup>2</sup> de demande en climatisation); ces résultats ne parviennent pas au niveau du référentiel Passivhaus concernant l'été. Cependant, nous avons conçu à Séville une Passivhaus qui est bien classée sur diagnostic de performance énergétique national (classe A en chauffage - B en climatisation). La demande totale moyenne en énergie pour une maison neuve standard étant de 57,3 kWh/m<sup>2</sup>, nous avons obtenu une réduction de 57 % dans ce domaine.

La demande totale en énergie de la maison de Grenade est de 16,6 kWh/m<sup>2</sup> (8,7 kWh/m<sup>2</sup> pour la demande en chauffage et 7,9 kWh/m<sup>2</sup> pour la demande en climatisation); nous remplissons donc ici les critères Passivhaus. La demande totale moyenne en énergie pour une maison neuve standard étant de 69,0 kWh/m<sup>2</sup>, nous avons obtenu une réduction de 76 % dans ce domaine. Cette Passivhaus obtiendrait sur une étiquette énergétique un classement A en chauffage et B en climatisation.

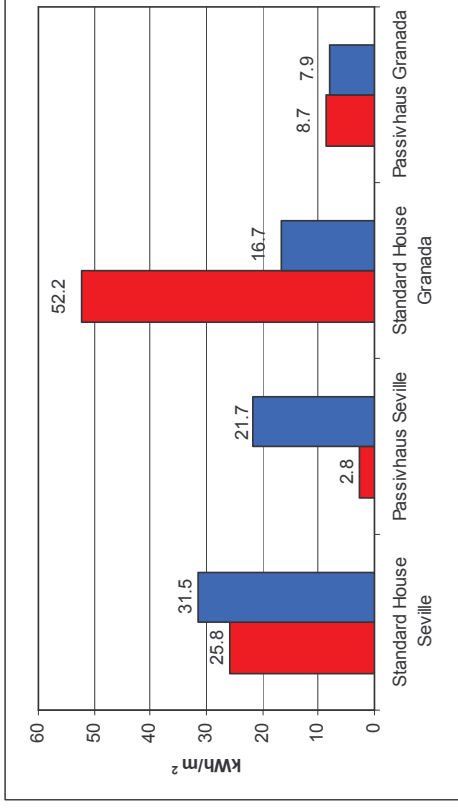


Fig.3.11 – Estimation des besoins en chauffage pour une maison standard et pour une Passivhaus à Séville et à Grenade (Maison standard, Séville Passivhaus, Séville Maison standard, Grenade Passivhaus, Grenade)

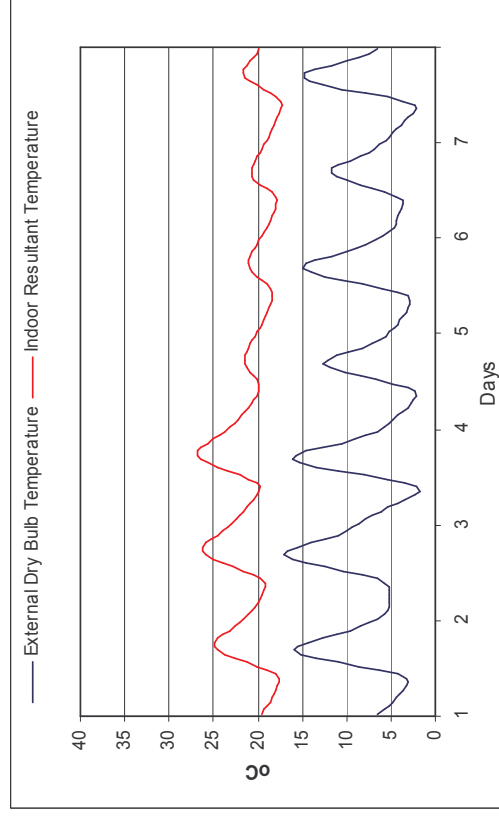


Fig.3.12 - Températures calculées durant une semaine d'hiver pour la Passivhaus de Grenade, (Température sèche extérieure – Température intérieure résultante selon les Jours)

### 3.4 PASSIVHAUS : PROPOSITION PORTUGAISE

#### 3.4.1 La maison

Le point de départ pour la proposition portugaise de Passivhaus était une maison de plein pied de deux pièces, conforme aux réglementations nationales du bâtiment 2006 (RCCTE, DL 80/2006). Les stratégies concernant les exigences de la Passivhaus pour le chauffage et l'énergie ont été adaptées au contexte portugais, particulièrement en ce qui concerne la durée de la saison chaude susceptible d'entraîner l'utilisation de la climatisation. Cette proposition tient compte du climat local (données climatiques de Lisbonne), des normes locales de construction ainsi que du cadre technique et économique local.

Un prototype simple est proposé, afin de laisser aux architectes une certaine liberté concernant la conception de la maison. Elle suit un plan rectangulaire, avec deux pièces avec un toit terrasse, pour une surface totale de 110 m<sup>2</sup>. Cette disposition permet d'envisager facilement un agrandissement de la maison afin de pouvoir bénéficier de plus de pièces et / ou d'une plus grande surface habitable.

Le niveau d'isolation des murs et du toit dépasse celui fixé par les réglementations nationales, et l'infiltration de l'air est contrôlée (environ 0,8 ach à 50 Pa). L'isolation et l'étanchéité à l'air ne sont cependant pas les priorités de cette proposition. Les 3 éléments principaux étudiés dans ce projet de maison sont : la relation avec le soleil, la ventilation utilisée pour le rafraîchissement et la forte masse thermique pour contrôler les variations de température.

Au Portugal, le niveau d'ensoleillement est très élevé, même pendant la saison de chauffe. L'un des facteurs clés pour cette maison est donc la relation au rayonnement solaire, capturé soit directement (fenêtres) soit indirectement (système solaire thermique). Les grandes fenêtres sont principalement orientées au Sud, de manière à augmenter les apports solaires utiles pendant l'hiver. Les ouvertures plus petites sont orientées à l'Est et à l'Ouest, et les ouvertures minimales au Nord. Les protections solaires sont choisies en fonction de l'orientation : casquettes pour les fenêtres au Sud, réduisant ainsi le rayonnement incident direct pendant l'été, et des stores vénitiens extérieurs pour toutes les autres fenêtres.

L'une des caractéristiques essentielles de cette proposition est l'utilisation d'un système solaire thermique. La nouvelle réglementation thermique des bâtiments a rendu obligatoire l'utilisation d'un système solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire (sauf si l'exposition au soleil est insuffisante). La proposition étend l'utilisation du système solaire au chauffage, afin de couvrir une part significative des besoins, en augmentant la surface des panneaux solaires et en utilisant un réseau de distribution basse température (par exemple un plancher chauffant). La puissance active de chauffage et de climatisation est limitée à 10 W/m<sup>2</sup>, ainsi que le recommande le référentiel Passivhaus. Le surcoût de la proposition de Passivhaus portugaise est de 57 €/m<sup>2</sup>, avec un temps de retour de 12 ans.



Fig.3.13 - Maison basse consommation au Portugal (Maison Janas)

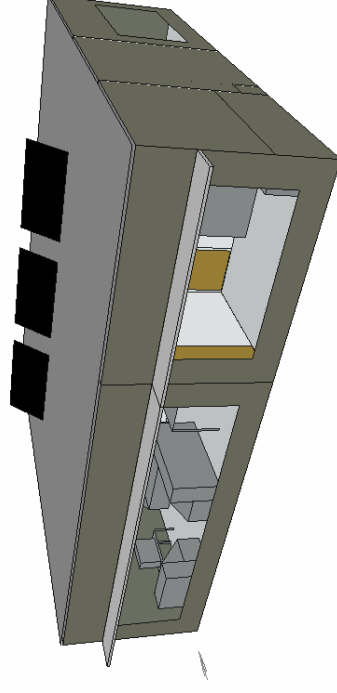


Fig.3

Représentation 3D de la proposition Passivhaus portugaise

### 3.4.2 La stratégie

La maison combine la capacité d'emmagasiner la chaleur du soleil (par de grandes fenêtres au Sud) et celle de réguler la température intérieure grâce à sa grande inertie thermique.

Afin de réduire les apports et les déperditions de chaleur, le toit et les murs bénéficient respectivement d'une épaisseur d'isolant de 150 mm et 100 mm, avec des coefficients U de 0,23 W/m<sup>2</sup>.K et de 0,32 W/m<sup>2</sup>.K. L'isolation du plancher (80 mm) est intéressante pour des climats plus froids. Cependant là où les besoins en rafraîchissement sont plus importants que ceux en chauffage, l'isolation du plancher est limitée à bande d'isolation d'une largeur de 1m en périphérie, afin de permettre le plus possible de transfert de chaleur entre le plancher et le terre plein pendant l'été. Les fenêtres exposées au Sud représentent 60 % de la surface vitrée totale ; environ 20 % de cette surface est exposée à l'Est et 20 % à l'Ouest. La maison possède environ 1,2 m<sup>2</sup> de surfaces vitrées exposés au Sud pour 10 m<sup>2</sup> de surface nette (total de 2.1 m<sup>2</sup> de surface vitrée pour 10 m<sup>2</sup> de surface nette). L'utilisation de double-vitrage basse émissivité peut s'avérer très efficace pour les climats les plus froids du Portugal, mais dans la plupart des cas un double-vitrage standard est suffisant et plus économique (on a pris en compte des coefficients U de 2,9 W/m<sup>2</sup>K pour un double-vitrage classique et de 1,9 W/m<sup>2</sup>K pour un vitrage basse émissivité).

Le système solaire thermique suffit à couvrir la plupart des besoins en chauffage de la maison. Les panneaux solaires sont exposés au Sud, inclinés de 50° par rapport à un plan horizontal, afin d'augmenter leur efficacité pendant l'hiver.

Afin d'éviter la surchauffe pendant la saison chaude, il est important d'utiliser des protections solaires (stores et casquettes) et de combiner une grande inertie thermique avec la ventilation, en particulier dans les pièces exposées au Sud et à l'Ouest, principalement la nuit (la température de l'air extérieur baisse considérablement pendant la nuit.). Cette grande inertie thermique peut être obtenue en utilisant des dalles de béton apparentes pour le plancher, des murs intérieurs en briques et en réalisant une isolation par l'extérieur du toit et des murs. Cependant, certains constructeurs portugais restent sceptiques quant à la tenue mécanique de l'isolation par l'extérieur. Nous proposons donc d'utiliser le double mur traditionnel en briques, comprenant l'isolant entre les deux parois.

Une stratégie performante de ventilation traversante peut libérer la chaleur emmagasinée dans les murs et le sol. Dans les chambres, la ventilation devrait se faire dans la soirée afin d'éviter les courants d'air pendant le sommeil. Dans tous les autres espaces de la maison, on pourra ventiler pendant la nuit. Un contrôle solaire efficace ainsi qu'une stratégie de ventilation nocturne qui dissipe les apports solaires et internes, peut réduire la puissance d'un système actif de climatisation, voire même rendre inutile son installation.

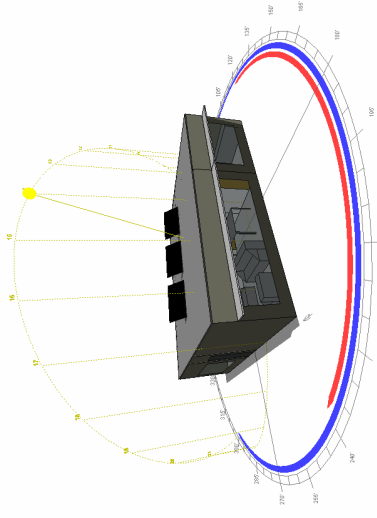


Fig. 3.15 - Impact solaire d'été, vue Sud-Ouest

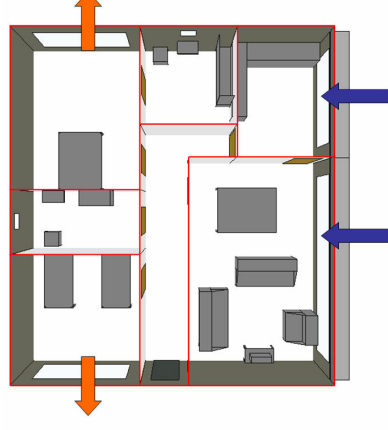


Fig.3.16 - Stratégie de ventilation d'été

### 3.4.3 Performance : énergie et confort

La demande annuelle pour le chauffage de la Passivhaus portugaise est estimée à 16,9 kWh/m<sup>2</sup>, dont 11 kWh/m<sup>2</sup> fournis par le système solaire (dans cette étude le système solaire assure en priorité les besoins en chauffage, et la part de l'installation dédiée à la production d'ECS est de 48 %). La demande annuelle en rafraîchissement est de 3,7 kWh/m<sup>2</sup>. La somme de la demande nette en chauffage et climatisation est de 9,6 kWh/m<sup>2</sup>.an. En ce qui concerne le chauffage et la climatisation, les limites fixées par la réglementation thermique sont respectivement de 73,5 et 32 kWh/m<sup>2</sup>.an, pour cette maison construite à Lisbonne.

L'analyse du confort thermique est basée sur la température résultante, c'est à dire la moyenne entre la température de l'air et la température de rayonnement. Les critères de confort adoptés pour l'analyse d'été sont basés sur le calcul des indices de confort (voir troisième partie). Ces indices cumulent pour toute la période "l'écart" entre la température résultante calculée de la pièce et les températures neutres, pour chaque heure. Un indice bas indique donc une meilleure performance.

Cette maison, avec un système actif de climatisation, a un indice Fanger de confort de 811 (elle est pénalisée par la forte influence de la température de rayonnement des importantes surfaces vitrées). S'il n'y a pas de climatisation active, on appliquera l'indice de Confort Adaptatif (A12) (ASHRAE 55). Pour cette proposition de Passivhaus portugaise le A12 est de 16 ; la température résultante est maintenue sous les 25°C pour 71 % du temps d'occupation et sous les 28°C pendant 98 % du temps d'occupation. Si aucune climatisation active n'est installée, la taille des fenêtres et l'isolation thermique des murs devront être réduite (bien que cela puisse augmenter les besoins en chauffage).

En hiver, on a recours à un système de chauffage à faible puissance de 10 W/m<sup>2</sup>, ce qui fait que la température résultante ne descend en dessous de 19,5°C que pendant 8 % seulement du temps d'occupation (la température résultante la plus basse mesurée est de 18°C.).

L'analyse ci-dessus montre que les stratégies choisies pour la conception d'une Passivhaus adaptée au climat de Lisbonne peuvent parfaitement fonctionner, à la fois du point de vue de la limitation des besoins énergétiques et de celui des niveaux de confort requis.

Bien que d'autres solutions puissent être appliquées, très différentes de la conception assez simple que nous avons présentée, les stratégies adoptées se sont révélées efficaces par rapport aux conditions climatiques données.

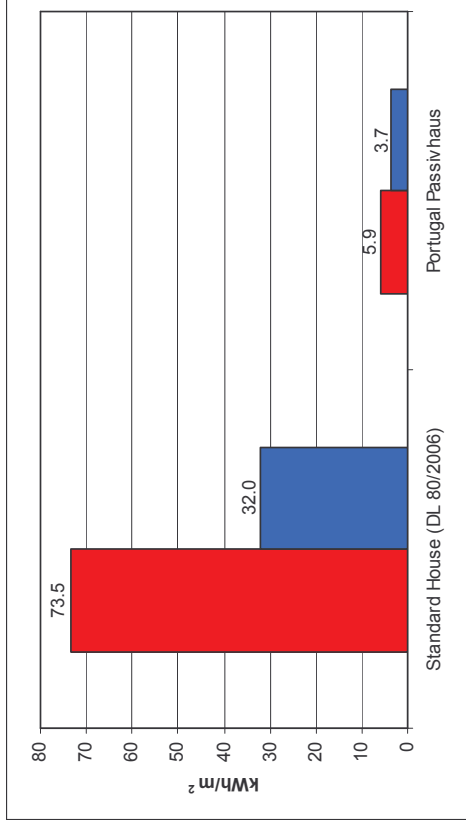


Fig.3.17 – Estimation des besoins annuels en chauffage (rouge) et en climatisation (bleu) pour une maison standard et pour une Passivhaus

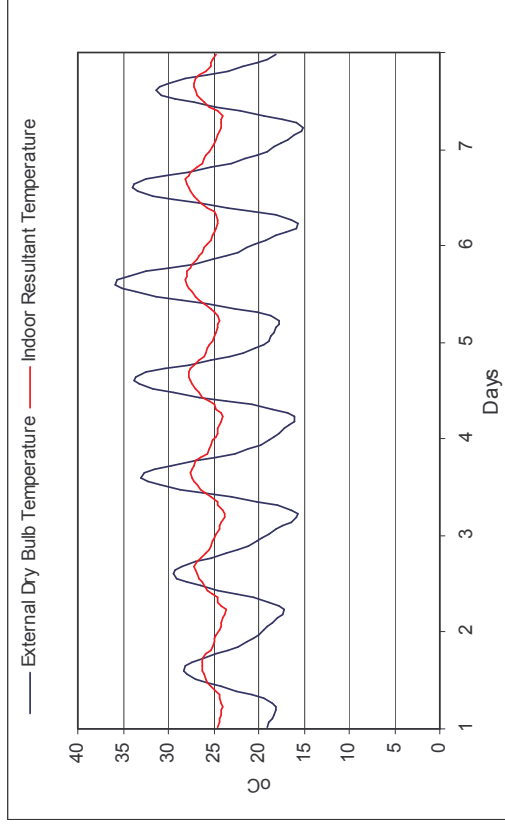


Fig. 3.18 - Températures résultantes pendant une semaine très chaude, sans climatisation active (température sèche extérieure – Température intérieure résultante selon les Jours)

(comme par exemple des changements dans les niveaux d'isolation), on obtient des maisons confortables tout au long de l'année à Milan, Rome et Palerme. Les caractéristiques techniques de la Passivhaus récemment construite à Cherasco se conforment pour la majeure partie aux spécifications détaillées dans ce document.

Pour Milan, le surcoût de la Passivhaus a été évalué à 84,00 Euro/m<sup>2</sup> c'est à dire à peu près 7 % de plus qu'un logement construit selon la réglementation actuelle du bâtiment. Si l'on tient compte des économies d'énergie qui sont de 924 euros/an, on obtient un temps de retour d'environ 12 ans.



Fig.3. 19 - Passivhaus construite à Cherasco, Cuneo, Italie du nord

### 3.5 PASSIVHAUS : PROPOSITION ITALIENNE

#### 3.5.1 La maison

La Passivhaus italienne a été élaborée en partant du principe que les solutions passives généralement mises en oeuvre pour les maisons passives d'Europe Centrale - c'est à dire une forte isolation de l'enveloppe du bâtiment, l'absence de ponts thermiques, une ventilation mécanique avec récupération de chaleur - sont applicables à de nombreuses régions d'Italie où les hivers, même s'ils sont courts, sont relativement rudes (par exemple à Milan et dans le Nord en général), ainsi qu'aux régions montagneuses plus au Sud. L'hypothèse suivante est que ces solutions, si elles sont complétées par des mesures additionnelles, peuvent devenir des stratégies performantes pour la climatisation passive d'été. La Passivhaus italienne adopte donc des stratégies additionnelles qui lui sont propres, comme par exemple des protections solaires telles que des casquettes ou des persiennes, réduisant ainsi l'apport solaire des fenêtres. Cette Passivhaus utilisera également la stratégie de ventilation naturelle nocturne, complétée par une climatisation active utilisant une pompe à chaleur réversible de faible puissance pour les journées particulièrement chaudes.

L'avantage de partir de la version d'Europe Centrale pour élaborer la proposition italienne est que les concepts Passivhaus peuvent être aisément intégrés à des logements ayant une esthétique et un plan général traditionnels et bien acceptés. Une Passivhaus récemment terminée (2006) à Cherasco, près de Cuneo en Italie du Nord, confirme visuellement ce point (voir photo). Il n'y a pas particulièrement besoin, par exemple, de grandes fenêtres exposées au Sud ou de serres pour fournir des apports de chaleur pendant l'hiver.

La proposition de Passivhaus que nous présentons dans ce document est donc dans le style de la "villa rustique", style qui représente une part importante des nouvelles constructions provinciales en Italie ces dernières années, tout au moins au Nord de Rome. La maison est la dernière d'une rangée de maisons, exposée au Sud, avec 120 m<sup>2</sup> de surface nette et un coefficient de forme S/V de 0.8 m<sup>-1</sup>. Les maisons de cette rangée sont disposées en quinconce, de telle sorte que 50 % du mur Ouest de la maison est protégé par le mur est de la maison mitoyenne. La simulation thermique dynamique a montré qu'en faisant quelques modifications appropriées

### 3.5.2 La stratégie

Bien que la Passivhaus italienne emprunte à l'allemande beaucoup de ses concepts passifs, il y a néanmoins des caractéristiques qui diffèrent. D'un point de vue général, le climat italien permet d'atteindre les limites de consommation d'énergie et les niveaux de confort requis par le référentiel Passivhaus en utilisant des mesures moins radicales concernant les points suivants :

- Niveaux d'isolation : une Passivhaus allemande aura besoin de 25 cm d'isolation pour les murs extérieurs et de 40 cm pour le toit. A Rome cependant, 10 cm d'isolation pour les murs et 15 cm pour le toit suffisent.
- Étanchéité à l'air de l'enveloppe : pour la Passivhaus d'Europe Centrale, l'enveloppe du bâtiment doit avoir un taux de perméabilité maximum de 0.6 h-1 à 50 Pa ; cela rentre effectivement dans les limites fixées par le référentiel Passivhaus ( $n_{50} < 0.6 \text{ h-1}$ ). Cependant, à Rome et à Milan une valeur de 1 h-1 à 50 Pa est acceptable, et, à Palerme, on acceptera un taux encore plus élevé.

- Performances spécifiques de la Passivhaus italienne pour le confort d'hiver :
  - Elle réduit les déperditions de chaleur pendant l'hiver grâce à une enveloppe du bâtiment très bien isolée et à l'élimination des ponts thermiques.
  - Elle fournit une ventilation active comprenant la récupération de chaleur de l'air vicié sortant.
  - Elle répond à ses besoins en chauffage en utilisant une pompe à chaleur géothermale (puissance thermique maximum en hiver et en été = 1,5 kW).
  - Elle favorise les apports thermiques solaires en utilisant 30 % de surfaces vitrées sur la façade Sud, et réduit les déperditions en limitant ces surfaces sur la façade Nord.
- Pour le confort d'été :
  - Elle réduit les apports solaires grâce à une enveloppe très bien isolée et aux protections solaires pour les fenêtres.
  - Elle libère les gains solaires et internes de la journée de l'enveloppe du bâtiment, en utilisant une ventilation naturelle et active la nuit.

En ce qui concerne ce dernier point, le choix d'une structure lourde bien isolée représente un bon point de départ, qui permettra d'utiliser l'air frais de la nuit pour rafraîchir la masse thermique du bâtiment. L'air de la nuit peut circuler à travers le bâtiment soit grâce au vent ou à la convection naturelle, soit par l'utilisation des ventilateurs mécaniques. Cette stratégie fonctionne déjà à Milan, mais elle est encore plus performante à Rome.

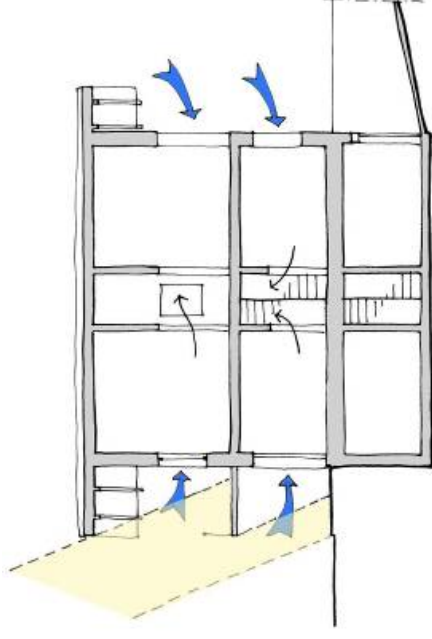


Fig. 3. 20 - Stratégies d'été

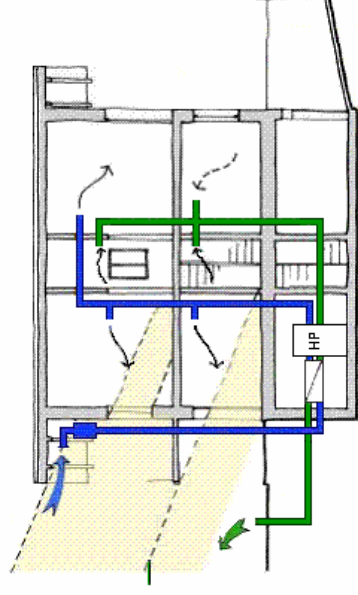


Fig. 3. 21 - Stratégies d'hiver



### 3.5.3 Performance : énergie et confort

À Milan et Rome, on peut obtenir les conditions requises de confort d'été en utilisant uniquement des solutions passives. Plus précisément :

- À Milan, les limites supérieures de températures du Confort Adaptatif (selon la norme 15251) ne sont jamais dépassées, bien que la température neutre le soit parfois, au mois d'août.
- À Rome, les limites supérieures de températures du Confort Adaptatif ne sont jamais dépassées, bien que la température neutre le soit, pendant la plus grande partie du mois d'août.

Dans tous les cas, la climatisation passive apporte des températures maximales intérieures d'environ 30°C, à Rome et à Milan.

Bien que la stratégie de ventilation nocturne soit efficace, les températures intérieures peuvent être réduites en utilisant une pompe à chaleur réversible de faible puissance. De faibles consommations d'énergie peuvent ainsi servir à maintenir de manière régulière les températures intérieures d'été en dessous du niveau de température neutre défini par le modèle de Confort Adaptatif (température maximale autour de 27.5°C).

À Palerme, la stratégie de ventilation naturelle est moins efficace et on devra recourir à un système actif de climatisation afin d'obtenir des conditions de confort d'été acceptables. En s'appuyant uniquement sur des solutions passives, les températures atteignent valeurs de l'ordre de 32,5°C, ce qui est supérieur aux températures maximales de confort acceptables du modèle de Confort Adaptatif concernant la plus grande partie du mois d'août. En effet, les écarts de température entre le jour et la nuit sont seulement de 3°C en juillet, août et septembre, ce qui rend la stratégie de ventilation nocturne inopérante. À Palerme, même en ayant recours à la climatisation active (9 kWh/m<sup>2</sup>/an), la température neutre de confort est dépassée pendant plusieurs jours en août, bien que les températures intérieures restent toujours nettement inférieures à la température acceptable maximale. Une étude a également été entreprise sur le comportement des bâtiments pendant les étés particulièrement chauds, observant la situation si l'on augmentait les températures d'été de 3°C. Les bâtiments à Rome et à Milan continueraient de fournir des conditions de confort acceptables. À Palerme cependant, les températures intérieures

seraient nettement au-dessus de la température neutre, même en utilisant un système actif de climatisation.

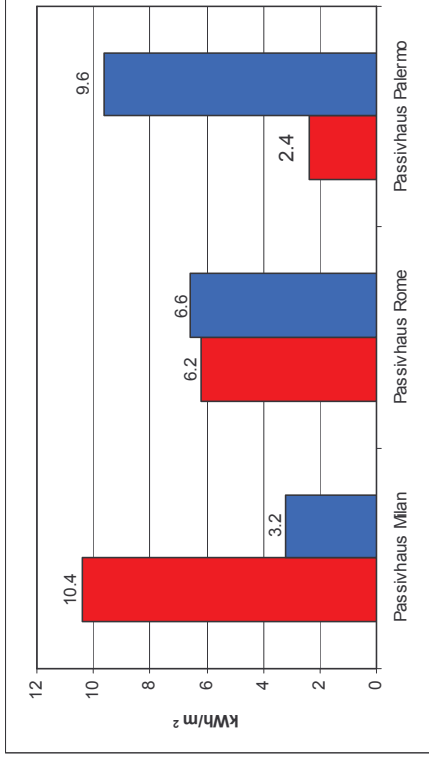


Fig.3 22 - Besoins en chauffage et climatisation de la Passivhaus italienne pour les 3 villes étudiées

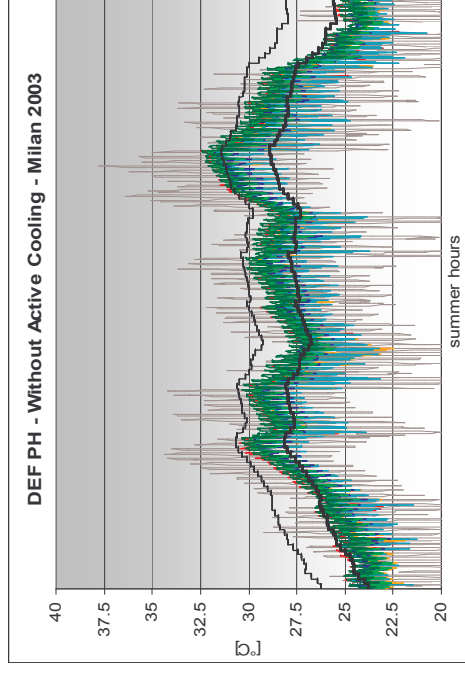


Fig.3 23 - La température du salon en été à Milan, avec une stratégie passive de climatisation. Sont aussi représentées la température neutre (en gras) et les températures de confort les plus élevées selon la norme EN 15251

celui de Carpentras, des épaisseurs d'isolant de plus de 300 mm et des menuiseries isolées.

### 3.6 PASSIVHAUS : PROPOSITION FRANCAISE

#### 3.6.1 La maison

Le climat du Nord de la France est relativement similaire au climat allemand, bien qu'un peu plus doux à cause de l'influence de l'océan Atlantique. Une Passivhaus du Nord de la France peut donc être relativement semblable à une Passivhaus d'Allemagne : une très bonne isolation de la totalité de l'enveloppe du bâtiment (généralement entre 25 et 40 cm d'isolation) quasiment sans ponts thermiques, une perméabilité réduite au maximum, une ventilation mécanique avec échangeur de chaleur, et des menuiseries bien isolées équipées de triples vitrages (avec du gaz ou à basse émissivité). Cela permet une simplification du système de chauffage qui peut être limité à un système central de chauffage de l'air entrant, pour toute l'habitation.

Nous avons développé des propositions de Passivhaus pour deux climats méditerranéens du Sud de la France, précisément à Nice et Carpentras, en adaptant ce concept aux climats plus chauds du Sud. Le plan général correspond à une maison en bande à un étage classique, comme on en construit beaucoup un peu partout à travers l'Europe, avec un sous-sol non chauffé, un espace ouvert au rez-de-chaussée et trois chambres au premier étage. On suppose que les maisons sont orientées au Sud, et que la rangée de maisons suivante est à une distance de 23 m.

À Carpentras, le niveau d'isolation peut être réduit à 15 cm pour les murs et le toit, et à 8 cm pour la dalle donnant sur le sous-sol. Pour le climat plus doux de Nice, on se satisfera du niveau d'isolation fixé par la réglementation en vigueur. On traitera partout les ponts thermiques, sauf pour les liaisons entre le plancher bas du rez-de-chaussée et les refends du sous-sol. Le meilleur moyen pour y parvenir est l'utilisation de l'isolation par l'extérieur, de telle sorte que les refends et les planchers hauts ne créent quasiment pas de ponts thermiques. Un double-vitrage basse émissivité avec des menuiseries classiques s'est révélé approprié aux deux climats. On utilise également une ventilation mécanique avec récupération de chaleur associée à une réduction de la perméabilité. Pour les climats doux méditerranéens, on peut obtenir les mêmes besoins faibles de chauffage sans échangeur de chaleur, en utilisant un système de ventilation mécanique classique, mais cela nécessite alors, pour des climats comme



Fig.3 24 - Les rangées de Passivhaus de Hannovre-Kronsberg (au premier plan). Le volume général des bâtiments est semblable à celui de la proposition française. On peut noter que l'aspect visuel des bâtiments peut-être facilement adapté à diverses esthétiques locales

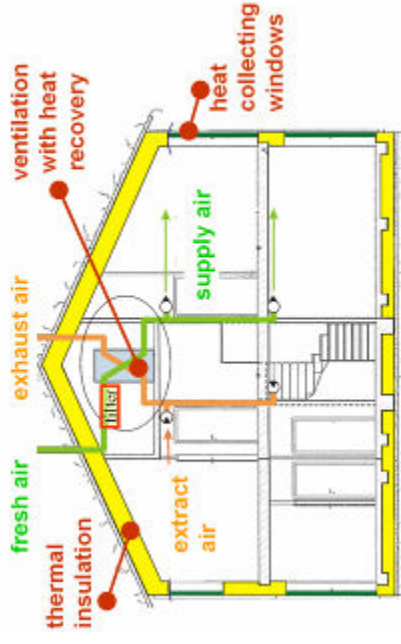


Fig. 3 25 - Section de la Passivhaus française (sans son sous-sol). L'aspect visuel des bâtiments peut-être facilement adapté à diverses esthétiques locales

### 3.6.2 La stratégie

En moyenne, les besoins quotidiens maximum en chauffage sont suffisamment faibles pour être couverts par un simple préchauffage mécanique de l'air entrant. Les radiateurs et le système de distribution de chaleur séparé ne sont plus nécessaires. Le choix du générateur de chaleur n'a pas d'importance, néanmoins le recours au chauffage électrique par effet joule ne doit pas être utilisé.

Compte tenu de la faible puissance nécessaire pour les besoins thermiques, les systèmes peuvent être extrêmement simplifiés. Cela permet de réduire considérablement les coûts de construction et justifie donc l'investissement additionnel que représente une enveloppe performante. Une réduction significative des coûts peut souvent être obtenue en utilisant une pompe à chaleur compacte. Ce type de système utilise l'air extrait, en aval de l'échangeur, comme source de chaleur pour la pompe à chaleur. Il sert aussi à chauffer un ballon d'eau chaude sanitaire. Tout le traitement climatique nécessaire au bâtiment (ventilation, chauffage et ECS) est assuré par le même système, comprenant un contrôle intégré et testé, qui peut être simplement branché sans manipulation de fluides frigorigènes sur site. Aucun raccordement extérieur n'est nécessaire, sauf pour l'électricité.

Pendant l'été, l'isolation des murs et de la toiture contribue à limiter les apports solaires pénétrant à l'intérieur du bâtiment. On doit également utiliser des protections solaires extérieures afin de diminuer le rayonnement solaire. Comme la température ambiante moyenne est, la plupart du temps, en dessous de 25°C, on ne se sert pas du récupérateur de chaleur du système de ventilation (système de by-pass).

Les autres stratégies de rafraîchissement diffèrent en fonction des endroits. À Carpentras, à cause des basses températures pendant la nuit et de niveaux acceptables du taux d'humidité, la ventilation nocturne obtenue par l'ouverture des fenêtres suffit au confort thermique. À Nice, comme les niveaux d'humidité sont plus élevés et les écarts de température entre le jour et la nuit sont moins marqués, l'air entrant est rafraîchi par des moyens actifs si nécessaire, permettant du même coup une déshumidification de l'air. Il est techniquement possible de construire des pompes à chaleur compactes qui peuvent également remplir ce rôle, bien qu'elles ne soient pas encore disponibles sur le marché.

Le taux de renouvellement d'air mécanique est toujours établi en fonction des conditions requises pour la qualité de l'air intérieure. On suppose un recours à une ventilation naturelle modérée, incluant l'ouverture des fenêtres par les occupants en cas de conditions ambiantes agréables.

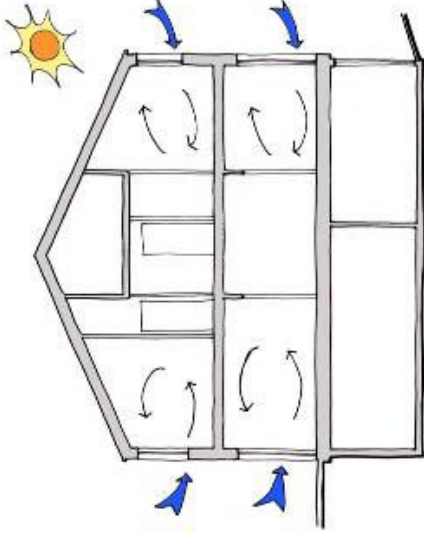


Fig. 3.26 - Stratégie d'été

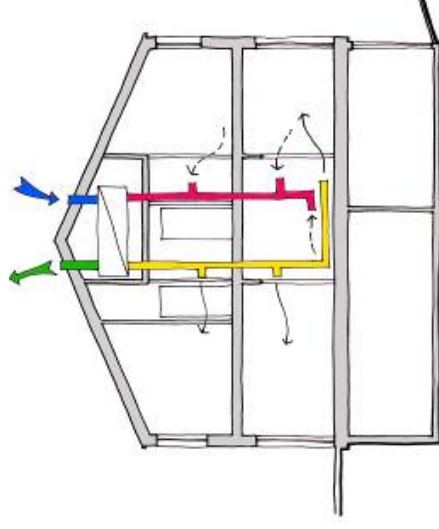


Fig. 3.27 - Stratégie d'hiver

### 3.6.3 Performance : énergie et confort

Que ce soit à Carpentras ou à Nice, les besoins annuels en chauffage du bâtiment sont légèrement en dessous des 15 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Occasionnellement, pendant les journées d'hiver ensoleillées, la température intérieure monte de 1 ou 2°C au dessus du point de référence de 20°C.

Comme nous l'avons décrit plus haut, les exemples de Nice et Carpentras présentent des approches différentes concernant le rafraîchissement d'été. À Carpentras, en raison de la mise en œuvre d'une climatisation passive, aucune énergie n'est nécessaire pour le confort d'été. Les protections solaires et une forte ventilation due à l'ouverture des fenêtres pendant les périodes favorables (principalement la nuit), suffisent à maintenir les températures en dessous de 25°C pendant plus de 99% de l'année dans toutes les pièces. À Nice, un résultat semblable est obtenu par un rafraîchissement de l'air entrant et par une ventilation supplémentaire et modérée due à l'ouverture des fenêtres. Dans les deux cas, les températures résultantes se maintiennent bien en dessous des températures maximales du Confort Adaptatif d'été.

Une autre question qui nécessiterait une plus grande attention est le problème de l'humidité. Au dessus d'un taux d'humidité de 12g/kg, les gens commencent à se sentir mal à l'aise, quelle que soit la température. De plus, l'humidité relative doit rester dans une fourchette de 30 à 70 %. Dans le cas de Carpentras, on a pu observer que ces critères pouvaient être atteints avec une stratégie passive de climatisation pendant une grande partie de l'année. La limite supérieure d'humidité relative est dépassée pendant moins de 4 % de l'année dans toutes les pièces ; la période durant laquelle la limite absolue d'humidité est dépassée est encore plus courte.

À Nice, au contraire, les taux d'humidité de l'air ambiant sont significativement plus élevés que loin du littoral. S'il était question des températures seules, la climatisation passive pourrait aisément être appliquée à ce climat, semblable à celui de Carpentras. Sans déshumidification cependant, les deux limites supérieures d'humidité seraient dépassées pendant 13 ou 15 % de l'année dans les deux zones. D'un autre côté, le rafraîchissement de l'air entrant et la déshumidification qui en résulte permettent d'atteindre des conditions confortables.

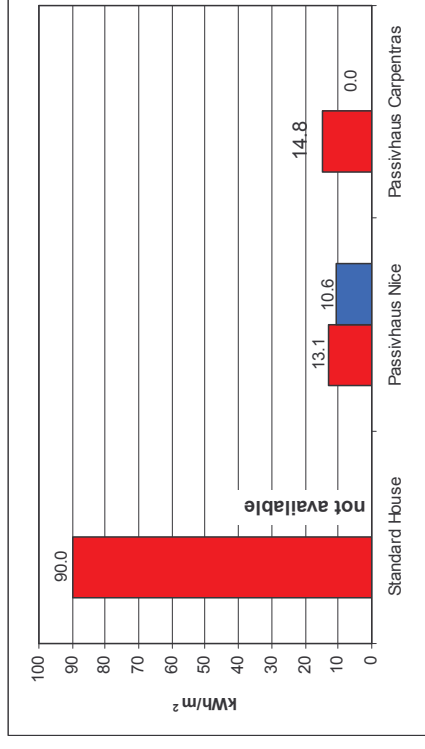


Fig. 3. 28 - Besoins annuels en chauffage pour une maison standard et pour une Passivhaus

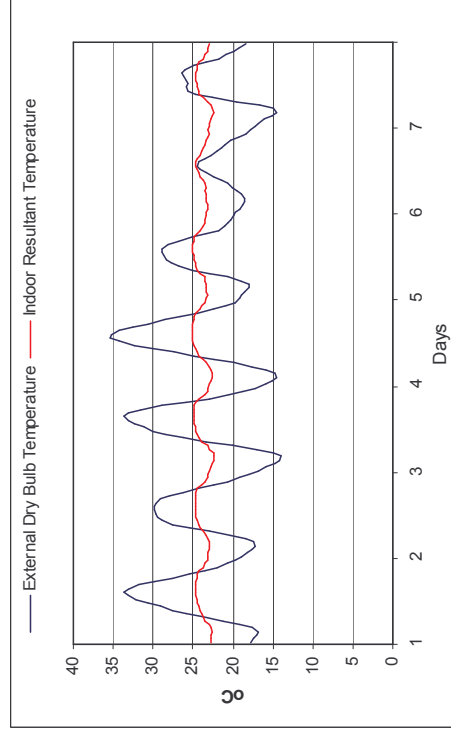


Fig. 3. 29 - Températures sèches résultantes types durant l'été, sans climatisation active (Carpentras, maximum de pièces habitées) (Température sèche extérieure – Température intérieure résultante selon les Jours)

degrés-jours d'été et d'hiver de deux endroits différents, si tous les facteurs sont égaux, alors une solution ou un système efficace pour l'un des endroits le sera aussi pour l'autre.

Les 4 cartes ci-dessous (fig. 4.1 à 4.4) vont nous permettre de comparer les paramètres climatiques de différents lieux, et, si ces paramètres sont égaux, d'appliquer l'ensemble des techniques utilisées dans une Passivhaus d'un de ces lieux à tous les autres.

## 4 APPLICABILITÉ CLIMATIQUE

### 4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif l'évaluation l'étude de l'applicabilité climatique des stratégies et scénarios présentés à travers les différentes propositions nationales Passivhaus. Bien que chacune d'entre elles présente une ou deux localisations climatiques par pays, on ne peut en conclure pour autant que ces exemples puissent être généralisés à tout le pays. Les différences climatiques au sein d'un même pays peuvent conduire à l'utilisation d'une conception ou d'une solution passive spécifique, adaptée à un contexte donné mais qui ne fonctionnerait pas dans un autre.

### 4.2 APPLICABILITÉ CLIMATIQUE

Les besoins en énergie d'un bâtiment varient en fonction du climat et des caractéristiques thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Les paramètres climatiques ayant une influence sur les besoins en énergie sont la température extérieure et le rayonnement solaire. On pourrait potentiellement évaluer les besoins en chaleur et rafraîchissement sur la base des "degrés-jours", mais cela ne tiendrait compte que des températures et ignorerait l'impact du rayonnement solaire. Afin de comparer deux climats différents, nous devons donc considérer à la fois la température extérieure et le rayonnement solaire. Il serait alors possible de déduire, à partir d'un lieu donné, quelle stratégie de conception passive appliquer à un autre lieu, lorsque les deux ont une température extérieure et des niveaux de rayonnement solaire semblables. Cependant, cela soulève deux nouvelles questions : Peut-on comparer des températures extérieures ? Est-il possible de comparer les niveaux de rayonnement solaire dans des endroits différents ?

On peut utiliser les degrés-jours d'été et d'hiver pour comparer les températures extérieures de différents endroits et déterminer ainsi les besoins en chauffage et rafraîchissement. Plus les degrés-jours de chauffage et de rafraîchissement sont élevés, plus ces besoins seront importants. Ainsi, en comparant à la fois le rayonnement solaire et les

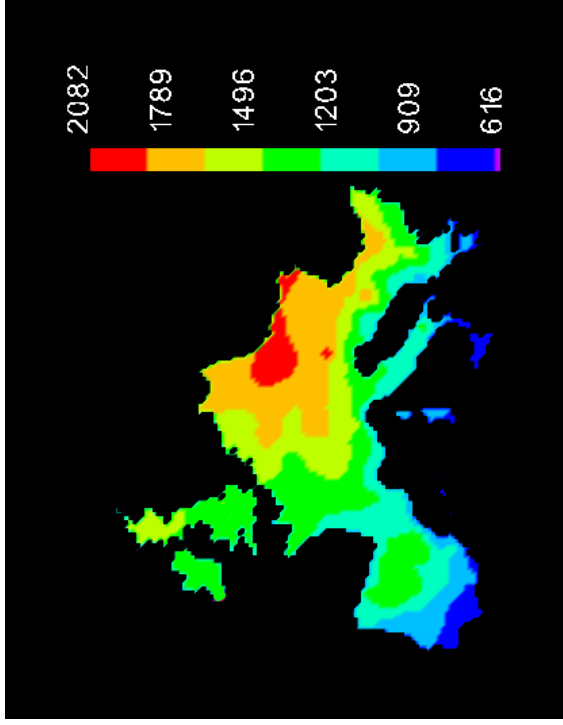


Fig. 4. 1 - Degrés-jours d'hiver

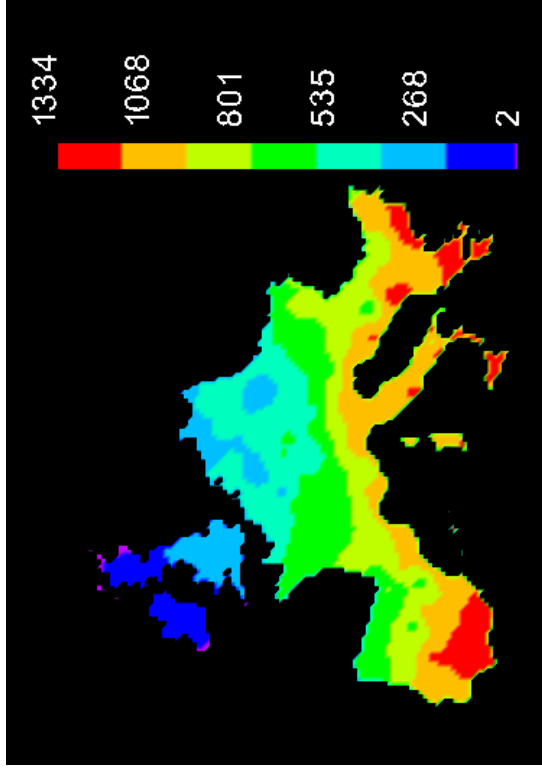


Fig. 4. 2 - Degrés-jours d'été

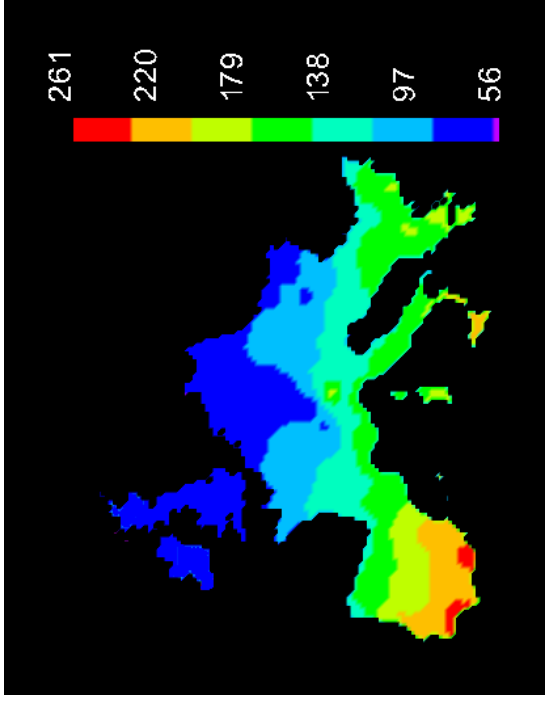


Fig. 4. 3 - Rayonnement solaire sur une surface horizontale en hiver (kW/m<sup>2</sup>)

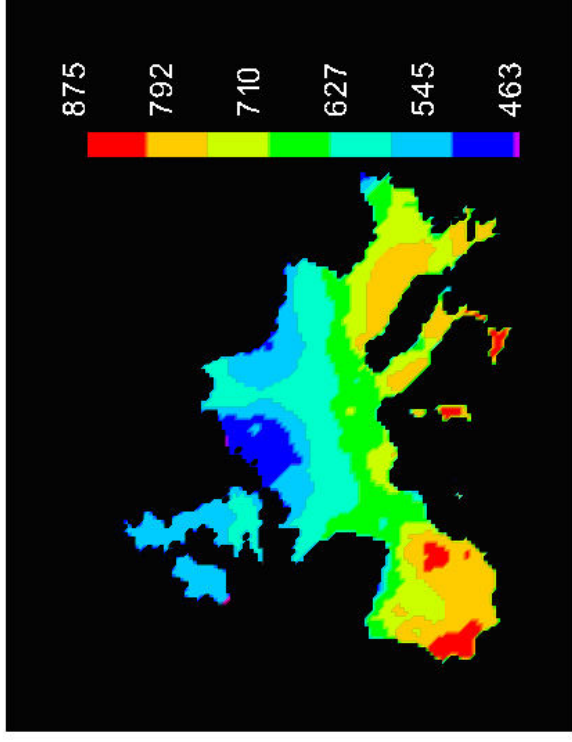


Fig. 4. 4 - Rayonnement solaire sur une surface horizontale en été (kW/m<sup>2</sup>)

### 4.3 INDICE DE SÉVÉRITÉ CLIMATIQUE

L'impact du climat sur les besoins en chauffage et rafraîchissement est parfois exprimé en nombre de "degrés-jours" pour un endroit donné. Cependant, cela ne tient compte ni de l'influence du rayonnement solaire, ni des caractéristiques thermiques d'un bâtiment spécifique.

L'Indice de Sévérité Climatique (ISC) a été élaboré afin permettre une caractérisation du climat par rapport à un bâtiment dont on connaît les spécificités de l'enveloppe (Markus et al 1984). Le ISC (une valeur sans dimension) est propre à chaque bâtiment et chaque lieu, et prend en compte à la fois la température et le rayonnement solaire. On a calculé un ISC différent pour les conditions d'été et celles d'hiver.

Deux conditions climatiques d'hiver différentes pour un bâtiment donné peuvent être considérées comme identiques si les besoins en chauffage sont les mêmes. Dans ce cas, on peut dire que ces deux conditions climatiques connaissent la même Sévérité Climatique d'Hiver (SCH). Cette définition peut également être appliquée aux besoins en rafraîchissement, et les termes utilisés seraient alors la Sévérité Climatique d'Été (SCE). On peut par exemple avoir deux conditions climatiques différentes qui auraient une sévérité climatique d'hiver (SCH) semblable, mais une sévérité climatique d'été (SCE) différente. On peut observer ce phénomène en comparant par exemple les villes de Brighton, Royaume-Uni, et de Milan, Italie, dans le tableau 1.

Les besoins en chauffage et rafraîchissement ont été déterminés pour 8 bâtiments dans 18 endroits différents, afin d'illustrer ces variations à travers l'Europe. On a défini un niveau de besoin en chauffage et un autre en rafraîchissement pour chaque lieu, en prenant la valeur moyenne de ces deux besoins pour tous les bâtiments dans chaque endroit, et l'on a divisé ces valeurs par les valeurs de Madrid. Les valeurs ainsi obtenues figurent dans le tableau 4.1, et sont illustrées dans les ISC d'hiver et d'été (fig. 4.5 et 4.6).

Cependant, bien que ces cartes soient utiles pour comparer les climats et pour identifier les différentes zones climatiques à l'intérieur d'un pays donné, elles ne permettent pas de vérifier l'applicabilité d'une solution spécifique pour un lieu donné. Pour arriver à ce résultat, on doit utiliser les cartes et la méthodologie expliquées au paragraphe 4.2.

Lieux	Sévérité Climatique d'Hiver (SCH)	Sévérité Climatique d'Été (SCE)
Allemagne (Dresde)	3.31	0.00
Allemagne (Braunschweig)	2.56	0.05
Allemagne (Fribourg)	2.14	0.10
Royaume-Uni (Brighton)	1.83	0.01
Royaume-Uni (Glasgow)	2.59	0.00
Royaume-Uni (Londres)	2.22	0.01
Royaume-Uni (Newcastle)	2.59	0.00
Royaume-Uni (Nottingham)	2.36	0.00
France (Agen)	1.44	0.19
France (Carcassonne)	1.24	0.37
Italie (Milan)	1.81	0.46
Italie (Rome)	0.83	1.19
Italie (Trapani)	0.32	1.87
Portugal (Lisbonne)	0.37	1.05
Espagne (Séville)	0.32	2.56
Espagne (Madrid)	1.00	1.00
Espagne (Grenade)	0.81	1.11
Espagne (Burgos)	1.96	0.05

Tableau 4.1 - Indices de Sévérité Climatique en Europe

#### 4.4 CARTES DE GISEMENTS D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIE

Les cartes suivantes (de 4.7 à 4.10), illustrent les économies moyennes escomptées en améliorant certains composants. Pour le toit et les murs, les économies sont exprimées dans tous les cas en kWh par m<sup>2</sup> de chaque composant, lorsque l'amélioration de leur coefficient U est de 0.10 W/m<sup>2</sup>K ; en ce qui concerne les fenêtres, les économies sont exprimées dans tous les cas en kWh par m<sup>2</sup> de surface vitrée lorsque les double-vitrage sont remplacés par des double-vitrage basse émissivité.

Un exemple est présenté ci dessous, afin d'éclaircir le propos. Pour un toit avec un coefficient U de 0,45 W/m<sup>2</sup>K, une réduction de 0,1 W/m<sup>2</sup>K (par l'amélioration de l'isolation) nous donnera un nouveau coefficient U de 0,35 W/m<sup>2</sup>K. Cela pourrait être facilement obtenu par 200 mm d'isolation avec une conductivité thermique de 0,031 W/m<sup>2</sup>K. Le fait d'ajouter 200 mm d'isolation à la solution initiale conduirait à une économie d'énergie moyenne de 6 kWh/h par m<sup>2</sup> de toit à Paris ou à Londres. On peut observer que ce chiffre peut monter jusqu'à 7 en Allemagne, et descendre jusqu'à 3 à Lisbonne (fig. 4.6).

Comme les économies d'énergies sont proportionnelles à la baisse du coefficient U, si celui-ci diffère de 0,1 W/m<sup>2</sup>K, l'économie d'énergie moyenne peut être calculée en divisant la baisse du coefficient U par 0,1 et en multipliant le chiffre obtenu par celui figurant sur la carte : si la réduction du coefficient U de l'exemple précédent était de 0,15, l'économie d'énergie moyenne escomptée serait de 9 kWh par m<sup>2</sup> de toit à Paris ou à Londres, c'est à dire le chiffre correspondant à la carte 4.7 multiplié par 1,5 (c'est à dire 0,15/0,10).

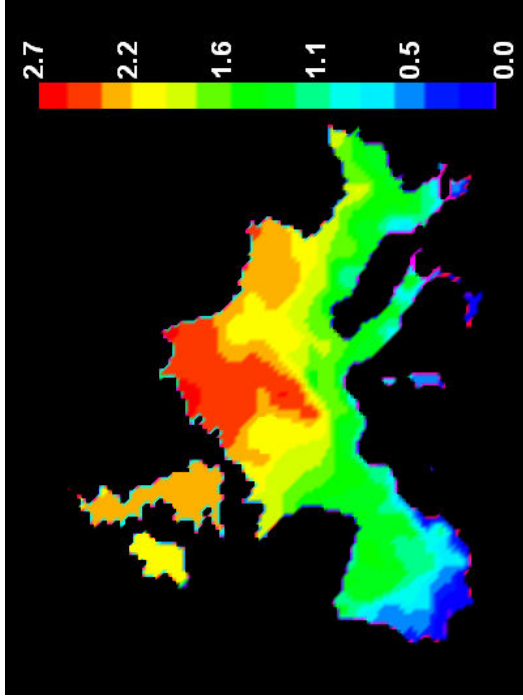


Fig. 4.5 - Indice de Sévérité Climatique d'Hiver (SCH)

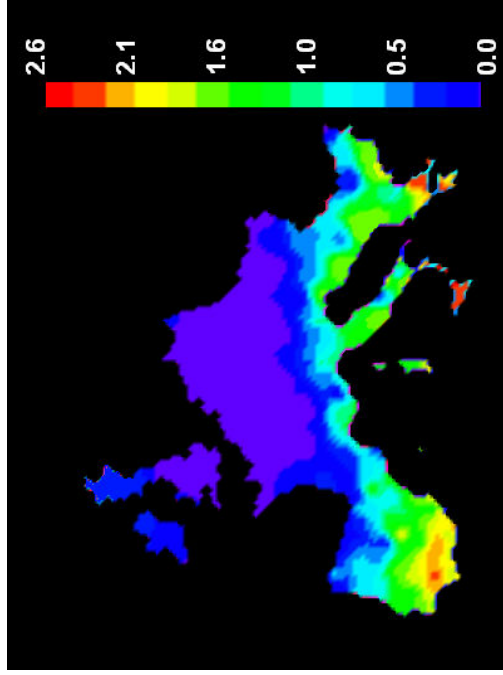


Fig. 4.6 - Indice de Sévérité Climatique d'Été (SCE)



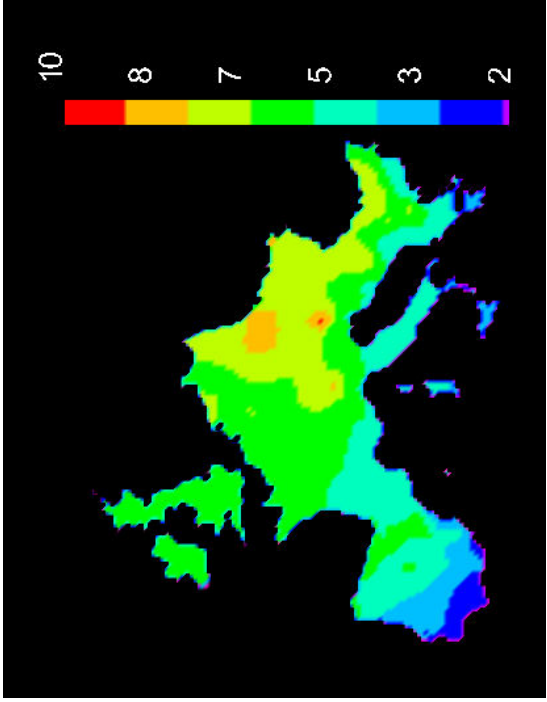


Fig 4.7 - Économie moyenne en kWh/m<sup>2</sup> de composant : amélioration du toit

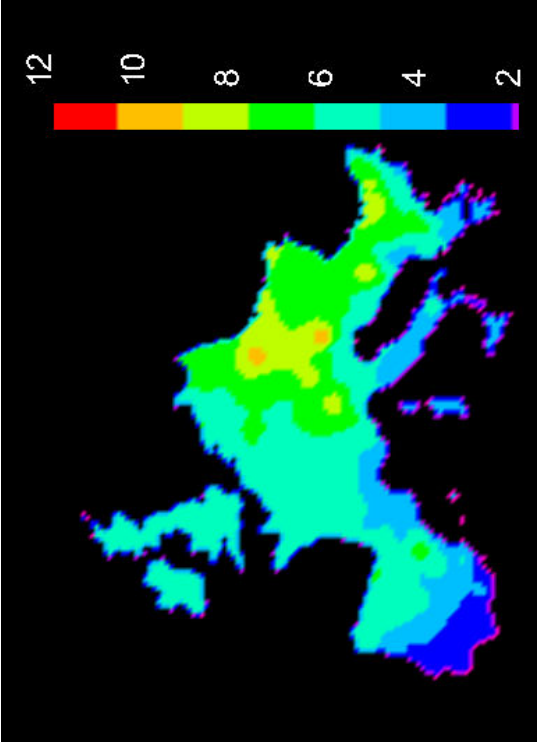


Fig 4.9 - Économie moyenne en kWh/m<sup>2</sup> de composant : amélioration des façades orientées au Nord

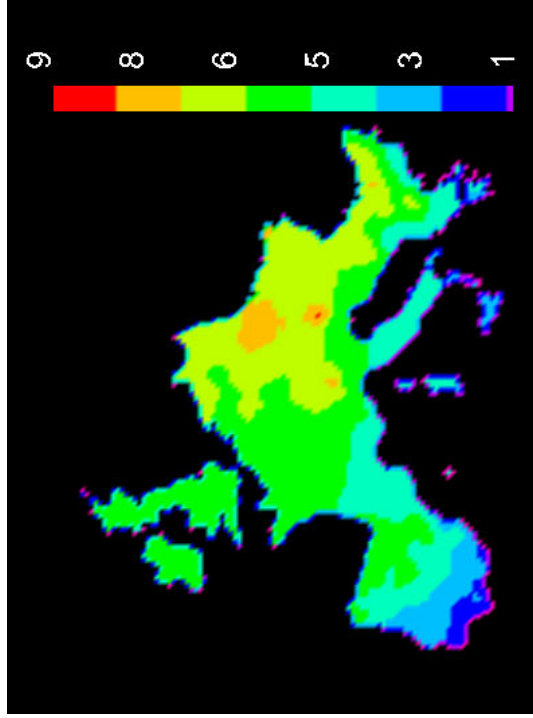


Fig 4.8 - Économie moyenne en kWh/m<sup>2</sup> de composant : amélioration des façades orientées au Sud

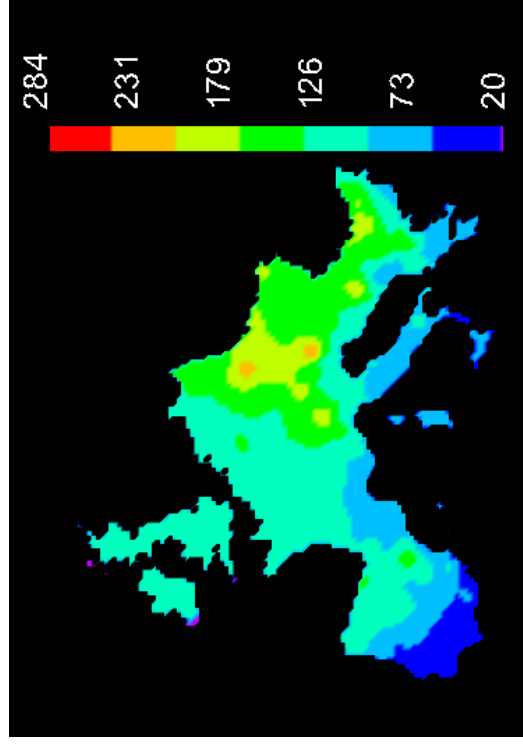


Fig 4.10 - Économie moyenne en kWh/m<sup>2</sup> de composant : amélioration des surfaces vitrées orientées au Nord, en passant du double-vitrage au double-vitrage basse émissivité

## 5 COÛT D'UNE PASSIVHAUS

### 5.1 INTRODUCTION

Pour chacune des Passivhaus nationales présentées dans ce document, on a analysé le coût sur la durée de vie des bâtiments. L'étude économique a été entreprise en collaboration avec tous les participants, car leur expertise, savoir-faire local et contacts avec l'industrie du bâtiment ont été des éléments précieux et essentiels à son élaboration.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les économies d'énergie et de maintenance concernant ces propositions de Passivhaus, selon des scénarios différents de durée de vie des bâtiments. On a évalué l'investissement lié à la construction pour des maisons standards et pour les propositions conformes au référentiel Passivhaus dans les différents pays partenaires, ainsi que les coûts additionnels liés aux options Passivhaus, afin de faire apparaître la différence de coût relative entre les deux, et d'entreprendre une analyse du coût sur la durée de vie.

Les coûts d'investissement ont été évalués sur la base de sources d'information accessibles au public, principalement des études statistiques institutionnelles et en provenance des industries du bâtiment, concernant les coûts de construction d'habitations standard. Les coûts d'investissement concernant les propositions passives ont été évalués sur la base des différentes stratégies proposées par chacun des partenaires, ainsi que sur l'estimation des coûts de leurs composants et matériaux respectifs.

Les coûts d'investissement additionnels liés à l'emploi de solutions passives ont été établis en identifiant les différentes stratégies adoptées, et en calculant pour chacune d'elles le coût des équipements, des matériaux et de la main-d'œuvre. L'estimation de ces coûts additionnels a été faite en référence à une habitation standard locale. Cette étude présente des chiffres concernant l'Allemagne, la France, l'Espagne (Grenade et Séville), l'Italie et le Royaume-Uni.

L'Analyse du Coût sur la Durée de Vie (ACDV) est une méthode d'évaluation économique qui détermine la totalité des dépenses associées à l'acquisition et le fonctionnement d'un logement pendant une période de temps donnée. Dans le cas présent, on utilise cette méthode pour analyser les bénéfices économiques de la Passivhaus nationale présentée par

chaque pays partenaire, en comparaison avec une maison standard de référence. L'objectif principal est d'évaluer les dépenses initiales et les dépenses futures liées au fonctionnement des habitations. Les bénéfices économiques escomptés sont analysés du point de vue d'un propriétaire-occupant, ou bien du point de vue d'un constructeur/promoteur qui transmettrait directement les bénéfices aux futurs propriétaires.

Les variables principales utilisées pour cette estimation sont : les dépenses initiales et futures des propriétaires (1 - 2%) ; la période de temps pendant laquelle ces coûts sont affectés ou bien une période de temps donnée (10 et 20 ans) ; et un taux d'actualisation de 3.5%.

### 5.2 COÛTS D'INVESTISSEMENT ET COÛTS ADDITIONNELS

Le tableau ci dessous présente les coûts de construction moyens pour des habitations standard, et les coûts de construction estimés de leurs équivalents respectant les exigences des Passivhaus nationales. Les surcoûts en investissement nécessaires pour transformer les maisons standard au niveau de qualité des habitations passives sont également présentés.

	Maison standard €/m <sup>2</sup>	Passivhaus €/m <sup>2</sup>	Surinvestissement €/m <sup>2</sup>	Surinvestissement (%)
France	1100	1203	103	9
Allemagne	1.400	1.494	94	6,71
Italie	1.200	1.260	60	5
Espagne (Grenade)	720	744,1	24,1	3,35
Espagne (Séville)	720	740,5	20,5	2,85
Royaume-Uni (€)	1.317	1390	73	5,54

Comme le montre ce tableau, les surcoûts en investissement s'échelonnent entre 2.85% (Séville) et 9% (France) des coûts de construction des maisons standard. Cet écart reflète les différentes réalités concernant les coûts et les habitudes de construction, ainsi que les réglementations du bâtiment.

### 5.3 ANALYSE DES COÛTS SUR LA DURÉE DE VIE

Les coûts sur la durée de vie liés aux solutions passives utilisées pour réduire les besoins en chauffage et climatisation des maisons standard afin qu'elles répondent aux critères du référentiel Passivhaus ont été calculés pour l'Italie, l'Espagne, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus grâce aux données fournies par les partenaires, et permet une comparaison directe entre les différents pays. Ces comparaisons doivent être faites avec précaution, en raison de l'impact significatif des réalités locales et des contraintes de marché sur les résultats présentés ci-dessous.

L'analyse a montré que les surcoûts en investissement pouvaient varier de 3 à 9% selon les différents endroits (l'Espagne nécessitant l'investissement additionnel le plus bas). La totalité des économies d'énergie, calculées par rapport à une maison standard de même surface, a été estimée entre 25 et 65%. Dans tous les cas, le coût sur la durée de vie sur une période de 20 ans est moins élevé pour la Passivhaus que pour la maison standard - En Espagne, c'est le cas après 10 ans de vie du bâtiment.

Le temps de retour actualisé varie de 4 à 19 ans selon les pays. Plus on va vers le Sud de l'Europe, plus le temps de retour actualisé diminue, allant de 19 ans au Royaume-Uni et en Allemagne à 8 ans en Italie et 4 à 5 ans au Sud de l'Espagne.

Tableau récapitulatif

	France	Allemagne	Italie	Espagne Grenade	Espagne Séville	Royaume-Uni
Surinvestissement (€/m <sup>2</sup> )	103	94	60	24,1	20,5	73
Surinvestissement (%)	9%	6,71%	5%	3,35%	2,85%	5,54%
Économies d'énergie totales (kWh/m <sup>2</sup> /an)	55	75,0	86,0	65,5	37,6	39,7
Économies d'énergie totales (%)	45%	50,0%	65,4%	57,3%	40,7%	26,4%
Surinvestissement par kWh/m <sup>2</sup> /an évité (€)	1,87	1,25	0,70	0,37	0,55	1,84
CDV sur 10 ans (€)	143.7 31	184.716	193.817	101.828	98.385	108.337
	Maison standard	Maison passive	Maison standard	Maison passive	Maison standard	Maison passive
CDV sur 20 ans (€)	160.3 43	204.942	221.148	117.928	108.689	117.875
	Maison standard	Maison passive	Maison standard	Maison passive	Maison standard	Maison passive
Rapport coûts/bénéfices sur 10 ans	-0,72	-0,48	0,39	2,13	0,93	-0,65
Rapport coûts/Bénéfices sur 20 ans	0,02	0,39	2,63	4,94	2,60	0,11
Temps de retour actualisé (années)	19,5	19	8	4	5	19

## 6 BIBLIOGRAPHIE

- A Green Vitruvius - Principles and Practice of Sustainable Architectural Design, James & James (Science Publishers) Ltd. For the European Commission, Directorate General XVII for Energy and the Architect's Council of Europe , London, 1999
- Allard, Francis (Editor): Natural Ventilation in buildings – a design handbook James & James (Science Publishers) Ltd. UK 1998
- Anderson, Bruce: Solar Energy: Fundamentals in Building Design, McGraw-Hill Book Company, USA 1977
- Anink, David; Chiel, Boonstra; Mak, John: Handbook of Sustainable Building, James & James, London, 1996
- Aulicciems, Andris; Szokloy, Steven V.: Thermal Comfort, PLEA Notes, note 3, 1997
- Burton, Simon (Editor): Energy efficient office refurbishment, James & James, London, 2001
- CIBSE: Energy efficiency in buildings, CIBSE Guide F, The Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2006
- CIBSE: Environmental design, CIBSE Guide A, The Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2006
- Cofaigh, Eoin O.; Olley, John A.; Lewis, J. Owen: The Climatic Dwelling: An introduction to climate-responsive residential architecture, James & James on behalf of the European Commission, 1996
- Daniels, Klaus: Advanced Building Systems, Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin, 2002
- DGGE / IP-3E: Reabilitação Energética da envolvente de edifícios residenciais, Lisboa 2004
- Flanagan, Roger; Norman, George: Life cycle costing for construction, Royal Institution of Chartered Surveyors, 1989
- Franklin Research Center: The First Passive Solar Home Awards, U.S. Department of Housing and Urban Development, in cooperation with the U.S. Department of Energy, Philadelphia 1979
- Gissen, David (Editor): Big & Green, Princeton Architectural Press, New York, 2002
- Givoni, Baruch: Climate considerations in building and urban design, Van Nostrand Reinhold, New York, 1998
- Givoni, Baruch: Passive and low energy cooling of buildings, John Wiley, New York, 1994
- Gonçalves, Helder; Graça, João Mariz: Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, INETI, 2004
- Gonçalves, Helder; Joyce, António; Silva, Luis (Editores): Forum Energias Renováveis em Portugal, ADENE / INETI, Lisboa 2002
- Goulding, John R.; Lewis, J. Owen; Steemers, Theo C.: Energy in Architecture: the European Passive Solar Handbook, Commission of the European Communities, 1992
- Goulding, John R.; Lewis, J. Owen; Steemers, Theo C.: Energy Conscious Design: A primer for architects, Commission of the European Communities, 1992
- International Energy Agency - IEA: Solar energy in building renovation, James & James, London, 1997
- Liddament, Martin W.: A Guide to Energy Efficient Ventilation, International Energy Agency, AIVC, Oscar Fager Plc, 1996
- Liébard, Alain and De Herde André, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, Editions Observ'et, Observatoire des énergies renouvelables, Paris, 2005
- Mazia, Edward: The Passive Solar energy Book – A complete guide to passive solar house, greenhouse and building design, Rodale Press, Emmaus, Pa. 1979
- Moore, Fuller: Environmental Control Systems: heating cooling lighting, McGraw-Hill International Editions, Singapore 1993

- Nascimento, Carlos; Gonçalves, Helder: Prémio DGE 2003 – Eficiência Energética em Edifícios, DGGE / IP-3E, Lisboa 2005
- Olgay, Victor: Design with Climate, Princeton University Press, Princeton 1973
- Ray-Jones, Anna (Editor): Sustainable Architecture in Japan: The Green Buildings of Nikken Sekkei, Wiley-Academy, 2000
- RCCTE: Regulamento das Características de Comportamento Térmico em Edifícios, Decreto-Lei N. 80/06 de 4 de Abril
- RCESE: Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, Decreto-Lei N. 79/06 de 4 de Abril
- Santamouris, M.; Asimakopoulis, D. (Editores): Passive Cooling of Buildings, James & James, London 1996
- Santamouris, Mat (Editor): Environmental design of urban buildings: An integrated approach, Earthscan, London, Sterling, VA, 2006
- SCE: Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, Decreto-Lei N 78/06 de 4 de Abril
- Szokolay, S. V.: Solar energy and building, The Architectural Press, London, Halsted Press, a Division of John Wiley & Sons Inc., New York, first published 1975 in Great Britain, second edition reprinted 1978
- Szokolay, Steven V.: Solar Geometry, PLEA Notes, note 1, 1996
- Szokolay, Steven V.: Environmental Science Handbook, The Construction Press, Lancaster 1980
- United Nations Development Programme: World Resources, World Resources Institute, Washington, 2000
- Watson, Donald: Designing & Building a Solar House, Garden Way Publishing, Vermont 1977
- Wines, James: Green Architecture, Taschen 2000
- Wright, David: Natural Solar Architecture: a passive primer, Van Nostrand Reinhold Company, New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1978
- Yannas, Simos: Solar Energy and Housing Design, Volume 1: Principles, Objectives, Guidelines, Architectural Association Publications, London, 1994
- Zöld, András; Szokolay, Steven V.: Thermal Insulation, PLEA Notes, note 2, 1997

