

envirobat **bcdm**

Mastère Spécialisé®

Construction et Habitat Durables

2017-2018

Mémoire de thèse professionnelle

**Comment construire un bâtiment
bioclimatique pour que son
comportement passif soit adapté au
climat méditerranéen
à l'horizon 2050-2100 ?**

Thèse présentée par : **Lionel Mallet**

Tuteur pédagogique : **Gabrielle Raynal**

Tuteur professionnel : **Nicolas Guignard**

Entreprise : **envirobat **bcdm****

Accès libre

Notice bibliographique

Années : 2017-2018

Formation : Mastère spécialisé® Construction et Habitat Durables

Centre de rattachement : École Nationale Supérieure des Arts et Métiers – Aix-En-Provence

Auteur : Lionel MALLET

Titre : Comment construire un bâtiment bioclimatique pour que son comportement passif soit adapté au climat méditerranéen à l'horizon 2050-2100 ?

Encadrement professionnel : Nicolas GUIGNARD

Encadrement pédagogique : Gabrielle RAYNAL

Nombre de pages : 96 (avec annexes)

Nombre de références bibliographiques : 27

Résumé : Toute maîtrise d'œuvre concevant aujourd'hui un bâtiment durable doit forcément se poser la question des modes constructifs et matériaux à choisir pour que le confort des occupants soit assuré pendant toute la durée de vie du bâtiment, dans un contexte de réchauffement climatique global. Sur une base de 30 ans, celle-ci s'étend jusqu'à l'horizon 2050, mais elle pourrait aller jusqu'à 2100 pour les constructions les plus durables. Cette question est encore plus pertinente pour une construction passive où les systèmes techniques sont réduits au maximum. Cette étude a pour vocation de donner des pistes de solutions en réponse à cette question.

Mots clés : INERTIE THERMIQUE / CONFORT D'ETE / PASSIF / FRUGAL / OSSATURE BOIS / PAILLE / MONOMUR / VERNACULAIRE / RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE / CLIMAT MEDITERRANEEN / VENTILATION NATURELLE / ENERGIE GRISE / BDM

Accessibilité du mémoire

✓ **Classe 0 :** Accès libre

Classe 1 : Confidentiel jusqu'au ___ _ _

Classe 2 : Hautement confidentiel jusqu'au ___ _ _

Date :

Nom du signataire :

Signature :

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à ma compagne qui a accepté que je quitte une position professionnelle confortable pour me lancer dans l'aventure d'une reconversion aux conditions financières hasardeuses. C'est elle aussi qui m'a patiemment écouté et soutenu pendant mes moments de doute, et fait les premières relectures de ma thèse.

Je remercie ensuite Dominique Farhi, Sarah Guémené et Robert Célaire pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour mon étude et leur accord pour l'utilisation de leur projet.

Je remercie également ma tutrice, Gabrielle Raynal, qui m'a aidé à définir mon sujet de thèse et apporté, sans s'en douter, un réconfort certain.

Merci aussi à Frédéric Bœuf pour ses retours critiques sur mes premières idées et ses éclairages sur la simulation thermique dynamique. Je dois également à Benjamin Rulens les conseils pour la modélisation de la treille végétalisée.

Merci à tous les intervenants du Mastère Spécialisé Construction et Habitat Durables pour les connaissances qu'ils ont sues me transmettre et l'esprit critique qu'ils ont su développer en moi, parfois sans même le savoir puisque c'était la multiplicité des intervenants qui le permettait. Pour cela je dois d'ailleurs aussi féliciter Bénédicte Humblot qui a concocté un menu tout à fait savoureux !

Et enfin merci à envirobatBDM qui m'a permis de consacrer un jour par semaine à mon travail de thèse professionnelle et m'a donné l'accès à l'ensemble de leur réseau de professionnels et de leurs projets.

Table des matières

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE.....	1
REMERCIEMENTS.....	2
TABLE DES MATIERES.....	3
INTRODUCTION.....	5
ENVIROBATBDM.....	7
1 CONTEXTE DE L'ETUDE.....	9
1.1 LA CONSTRUCTION BIOCLIMATIQUE.....	9
1.1.1 LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE.....	9
1.1.2 LA CONSTRUCTION PASSIVE.....	12
1.2 LE COMPORTEMENT PASSIF DU BATIMENT.....	21
1.3 L'INERTIE.....	23
1.4 LE CONFORT.....	26
1.4.1 LE CONFORT ADAPTATIF.....	26
1.4.2 LE CONFORT EN MILIEU VENTILE.....	28
1.5 HORIZON 2050-2100 : LES EVOLUTIONS DU CLIMAT MEDITERRANEEN.....	29
2 METHODE D'ETUDE.....	33
2.1 METHODOLOGIE GENERALE.....	33
2.2 ADEQUATION DES OUTILS.....	34
2.3 LE CHOIX DU BATIMENT.....	35
2.4 LES MODES CONSTRUCTIFS ETUDIES.....	37
2.5 LES HYPOTHESES DE MODELISATION.....	40
2.5.1 FICHER METEO.....	40
2.5.2 USAGES.....	42
2.5.3 VENTILATION NATURELLE.....	42
2.5.4 ÉCLAIRAGE.....	45
2.5.5 TREILLE.....	45
2.5.6 ÉTANCHEITE A L'AIR / INFILTRATIONS.....	46
2.5.7 CONSIGNES.....	47
2.6 LES RESULTATS DEMANDES.....	47
3 ANALYSE DES RESULTATS.....	49

3.1 ANALYSE DU CONFORT.....	49
3.1.1 SIGNATURES BIOCLIMATIQUES.....	49
3.1.2 STATISTIQUES DE CONFORT.....	55
3.1.3 SENSIBILITE AUX EVOLUTIONS CLIMATIQUES	56
3.1.4 ÉTUDE DE VARIANTES.....	57
3.1.5 CONCLUSIONS.....	60
3.2 ANALYSE DES BESOINS	62
3.2.1 BESOIN DE CHAUFFAGE.....	62
3.2.2 BESOIN DE CLIMATISATION.....	63
3.2.3 CONCLUSIONS.....	64
3.3 ÉTUDE DE VARIANTES.....	65
3.3.1 AUTRE CONCEPTION ARCHITECTURALE : TOITURE 2 PENTES SUR ESPACE TAMPON	65
3.3.2 IMPACT DE L'ÉTANCHEITE A L'AIR	66
3.4 CRITERES SUPPLEMENTAIRES	68
3.4.1 ÉNERGIE GRISE	68
3.4.2 DEMARCHE BDM	69
<u>4 CONCLUSIONS</u>	<u>72</u>
<u>5 POUR ALLER PLUS LOIN.....</u>	<u>75</u>
<u>6 BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>76</u>
<u>7 ANNEXES.....</u>	<u>79</u>
ANNEXE 1. EXTRAITS DU CARNET DE DETAILS DE L'ÉCOLE STEINER WALDORF	79
ANNEXE 2. MODES CONSTRUCTIFS DE BASE.....	82
ANNEXE 3. MODES CONSTRUCTIFS DES VARIANTES	87
ANNEXE 4. REPARTITION DES TEMPERATURES.....	89
ANNEXE 5. ANALYSES COMPARATIVES DES VARIANTES CONSTRUCTIVES.....	91
ANNEXE 6. MODES CONSTRUCTIFS DU PLANCHER DES COMBLES.....	93
ANNEXE 7. RESULTATS DE L'ÉTUDE DE LA VARIANTE COMBLE SOUS TOITURE 2 PENTES.....	94

Introduction

La thèse développée ci-après prend naissance dans mon intérêt pour les bâtiments passifs et leur critique récurrente à propos de leur inadéquation au climat méditerranéen du fait de l'inconfort que leur trop forte isolation provoquerait en période estivale. La critique se fait d'autant plus marquée lorsque l'on évoque des modes constructifs passifs légers, comme par exemple celui de Popup House™. Qu'en est-il réellement ? Faut-il absolument beaucoup d'inertie (de lourdeur) pour se prémunir des surchauffes estivales dans les régions méridionales ?

Les premières idées envisagées furent d'étudier la nécessité de l'inertie dans le confort d'été pour les bâtiments passifs mais il s'est avéré que ce sujet avait déjà fait l'objet de nombreuses études et publications : (Baruch Givoni 1994), (Aste, Angelotti, et Buzzetti 2009), (Di Perna et al. 2011), (Munaretto 2014). Ainsi il semble qu'il n'y ait plus rien à démontrer dans ce domaine et le consensus général est que l'inertie joue un rôle dans le confort, en été comme en hiver. Cependant il est également acquis que pour que l'inertie apporte du confort en été il faut que l'on soit capable de décharger l'énergie thermique stockée dans la masse inerte du bâtiment avant un nouveau cycle solaire, par exemple la nuit. Après réflexion, il reste donc une question ouverte et elle prend encore plus de sens si l'on envisage le réchauffement climatique et l'impact qu'il pourrait avoir sur cette capacité de déstockage : avec quelle inertie faut-il construire un bâtiment passif pour préparer les évolutions du climat méditerranéen à l'échelle de la durée de vie du bâtiment, donc à l'horizon 2050, mais également à l'horizon 2100 qui marque le début d'une stabilisation du taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère selon les scénarios des experts du GIEC (GREC PACA 2016)?

En se plaçant dans une démarche de construction durable, c'est-à-dire de durabilité de la capacité à construire, la question de base englobe également une autre question : quels matériaux choisir pour cette construction afin de préserver les ressources pour les générations futures ? On peut voir que la réponse à cette question, portée sur la disponibilité des ressources utilisées dans la construction, a potentiellement un effet secondaire permettant de minimiser la contribution de la construction au réchauffement climatique :

moins de transport et moins de besoins énergétiques pour fabriquer les matériaux de construction impliquent nécessairement moins de rejet de gaz à effet de serre qui sont la cause, unanimement reconnue dans la communauté scientifique, du réchauffement global.

C'est ainsi que nous avons décidé d'étudier la question suivante : Comment construire un bâtiment bioclimatique pour que son comportement passif soit adapté au climat méditerranéen à l'horizon 2050-2100 ?

La projection à l'horizon 2050-2100 pose une question de résilience, c'est-à-dire de capacité du bâtiment à rester fonctionnel pour ses occupants en les accueillant avec un niveau de confort acceptable dans les conditions dégradées que le réchauffement climatique générera à la fin du XXI^{ème} siècle.

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons choisi d'étudier le comportement d'un bâtiment en anticipant ce que seront les données météorologiques en 2050 et 2100. L'outil le plus adapté pour observer ce comportement par anticipation est la simulation thermique dynamique. Il nous permet de faire varier différents paramètres, météorologiques bien sûr, mais également constructifs, pour étudier leur influence.

Nous avons choisi de nous baser sur un bâtiment tertiaire, de taille et d'usages volontairement réduits, comme par exemple une crèche ou une école, pour permettre une modélisation simple peu coûteuse en temps dans notre outil de simulation thermique dynamique.

Le bâtiment est localisé dans un environnement climatique méditerranéen difficile avec des hivers aussi marqués que les étés, pour accentuer les exigences passives de chaud et de froid.

Pour répondre à notre première question, comment construire, nous avons étudié différents modes constructifs ayant chacun des caractéristiques différentes en termes d'inertie et d'isolation, et correspondants à des courants bien définis de la construction passive.

La réponse à la seconde question est donnée par une analyse des coûts en énergie grise des différentes constructions et de leur score selon le référentiel d'évaluation de la démarche BDM.

Ce travail rejoint le travail qu'Angela Chelala a mené en 2016-2017 lors de sa thèse professionnelle au sein de la société Transsolar SAS, dont l'intitulé était « Peut-on concevoir des bâtiments bas carbone en région méditerranéenne, en offrant un confort d'été aujourd'hui et en pensant au réchauffement climatique de demain ? » (Chelala 2017). Nous nous sommes référés à son mémoire concernant tous les aspects liés au climat méditerranéen et au confort d'été.

envirobatBDM

Cette thèse professionnelle a été réalisée dans le cadre d'une mission dans l'association envirobatBDM, association loi de 1901 qui œuvre pour la promotion de la construction, et plus récemment de l'aménagement, durables par l'animation et la formation d'un réseau de professionnels de la construction (maîtrise d'ouvrage publique ou privée, maîtrise d'œuvre, entreprises de réalisation, ...) et par la définition d'une démarche de labellisation ayant vocation à guider les porteurs de projet pour faire les choix les plus pertinents en matière de construction et d'aménagement durables : la démarche Bâtiments (ou Quartiers) Durables Méditerranéens (BDM ou QDM). Cette démarche est reconnue régionalement et l'association est ainsi financée par la région Sud PACA, l'ADEME et l'État.

La démarche exige l'accompagnement du projet par un professionnel compétent, formé et agréé par l'association, jouant le rôle d'un Assistant à Maîtrise d'Ouvrage en qualité environnementale. Les critères d'évaluation de la démarche sont adaptés au territoire où elle s'applique. Elle prône une évaluation participative des projets par l'organisation de commissions d'évaluation en présence de pairs issus du réseau interprofessionnel de l'association et ouvertes au public, qui donnent souvent lieu à de riches débats.

Par sa régionalisation, la démarche a inspiré d'autres structures qui ont créé des démarches similaires en Occitanie, Bourgogne, Ile de France, ... et même à l'étranger en Italie.

La démarche est organisée autour de sept thématiques qui sont :

- ⇒ Le territoire et le site
- ⇒ Les matériaux
- ⇒ L'énergie
- ⇒ L'eau

- ⇒ Le confort et la santé
- ⇒ Le social et l'économie
- ⇒ La gestion de projet

Cette couverture très large permet d'adresser toutes les facettes du développement durable.

Selon le niveau visé (Cap, Bronze, Argent ou Or), des prérequis viennent définir des objectifs qualitatifs et quantitatifs dans les catégories suivantes :

- ⇒ Bioclimatisme
- ⇒ Performance énergétique
- ⇒ Espaces extérieurs
- ⇒ Confort d'été
- ⇒ Chantier propre
- ⇒ Coût global
- ⇒ Suivi des consommations d'énergie
- ⇒ Matériaux éco-performants
- ⇒ Étanchéité à l'air

On voit apparaître ici des notions qui sortent du seul champ de la conception. En effet tout projet engagé dans la démarche BDM est évalué durant les trois phases de conception, réalisation et usage.

Le projet retenu pour cette étude est inscrit dans la démarche BDM et a passé avec succès son évaluation de conception avec le label Or (85 points).

Contexte de l'étude

Dans ce chapitre nous allons analyser tous les éléments sémantiques de notre problématique pour définir précisément le contexte de l'étude et ses limites.

1.1 La construction bioclimatique

L'intitulé de la problématique s'appuie sur la notion de construction bioclimatique. La première chose à faire est donc de définir ici ce que recouvre cette notion qui sert de préambule à cette étude.

La construction bioclimatique a fait l'objet de nombreuses publications qui édictent des principes de base de conception d'un bâtiment pour tirer le meilleur parti de son environnement. En réalité il faudrait effectivement plutôt parler de conception bioclimatique, la construction bioclimatique n'étant alors qu'une réalisation concrète d'un bâtiment conçu en suivant les principes de la conception bioclimatique.

1.1.1 La conception bioclimatique

La conception bioclimatique, ou bioclimatisme, est une école de conception architecturale des bâtiments datant des années 1970 qui invite à créer une enveloppe bâtie en relation directe avec le climat et le lieu où elle s'implante. On parle alors souvent d'architecture solaire, passive ou même naturelle (Wright 1978), (Wright 2004). Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva la définissent, dans leur ouvrage dédié à ce sujet (Courgey et Oliva 2006) comme « un processus de conception globale du bâtiment considéré comme un organisme vivant situé dans son environnement et réagissant avec lui ». Ce processus a pour but d'optimiser les apports climatiques, et de diminuer leurs effets négatifs afin de limiter au maximum le recours aux systèmes actifs de production de chaud et de froid, de ventilation et à l'éclairage artificiel.

Cependant, comme ils le relèvent également, cette vision centrée sur la composante thermique du bâtiment est incomplète si elle ne prend pas en compte les occupants et leur implication plus ou moins active et plus ou moins volontaire dans leur propre confort. C'est une composante essentielle de l'approche écologique de l'habitat mais elle ne peut suffire

et un équilibre plus global est à rechercher entre ces trois composantes que sont le climat, l'habitat et l'occupant (cf. Figure 1).

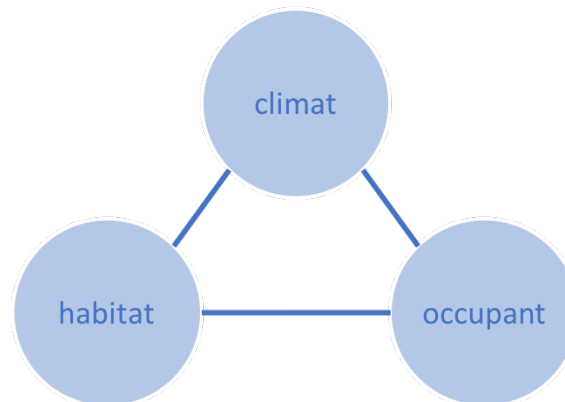


Figure 1 - équilibre climat-habitat-occupant, source (Courgey et Oliva 2006)

La conception bioclimatique tend à rechercher des principes architecturaux qui permettent de tirer le meilleur parti du climat et de l'environnement du bâtiment en considérant l'action que peut avoir l'occupant sur son propre confort, autant négatif que positif. Elle vise à satisfaire les objectifs apparemment contradictoires des stratégies liées aux deux saisons extrêmes que sont l'hiver et l'été, notamment sous nos climats tempérés où ces deux saisons sont bien marquées :

- ⇒ Stratégie hivernale : optimiser le bénéfice des apports solaires gratuits et puissants et se protéger efficacement des effets du vent,
- ⇒ Stratégie estivale : s'abriter du soleil pour se protéger des surchauffes et profiter de la capacité de rafraîchissement des vents en été.

Les deux stratégies convergent cependant sur le besoin d'une enveloppe performante permettant de limiter les pertes thermiques en hiver et les apports thermiques extérieurs en été. Cependant, cette enveloppe performante peut également se révéler contre-productive pour le confort d'été en bloquant également à l'intérieur les apports internes générés par les occupants. C'est notamment un des arguments avancés à l'encontre de la construction passive dans les régions méditerranéennes.

Ces deux stratégies se traduisent par des grands principes architecturaux sur lesquels nous ne nous étendrons pas ici. Mais il convient d'en citer les principaux :

- ⇒ Orientation du bâtiment, par rapport aux relief, vents dominants, masques proches et lointains,
- ⇒ Positionnement et surface des ouvertures en fonction de leur type et l'orientation de la façade (aussi appelé taux de percement),
- ⇒ Positionnement et orientation des protections solaires en fonction de l'orientation de la façade,
- ⇒ Efficacité thermique des parois opaques et vitrées de l'enveloppe,
- ⇒ Utilisation de l'inertie des parois, à moduler suivant leur type et orientation,
- ⇒ Utilisation intelligente de la végétation.

En complément de ces grands principes, la conception bioclimatique peut adjoindre des dispositifs architecturaux passifs permettant de répondre à des besoins précis de chauffage, climatisation ou encore ventilation : murs capteurs, serres bioclimatiques, puits canadiens ou encore tour à vent.

Les deux stratégies ne sont pas forcément opposables dans la mesure où les conditions correspondantes ne sont pas identiques. Par exemple, on peut mentionner l'altitude du soleil, mesurée en hauteur angulaire qui détermine l'angle d'incidence du flux solaire, qui passe de $\sim 25^\circ$ en hiver à $\sim 75^\circ$ au solstice d'été à Aix-en-Provence (cf. Figure 2).

Quoi qu'il en soit, on peut observer ici que l'équilibre recherché entre les deux stratégies différera de façon substantielle selon la localisation du bâtiment. Si dans les régions continentales ou montagneuses on privilégiera surtout la stratégie hivernale, dans les régions plus chaudes du sud de la France en retrait de la bande côtière, un soin plus important sera probablement apporté à la stratégie estivale.

Cet équilibre sera également largement influencé par les évolutions climatiques dues au réchauffement de l'atmosphère en raison de l'activité humaine et c'est précisément l'objet de cette étude. Le chapitre 1.5 détaille ces évolutions.

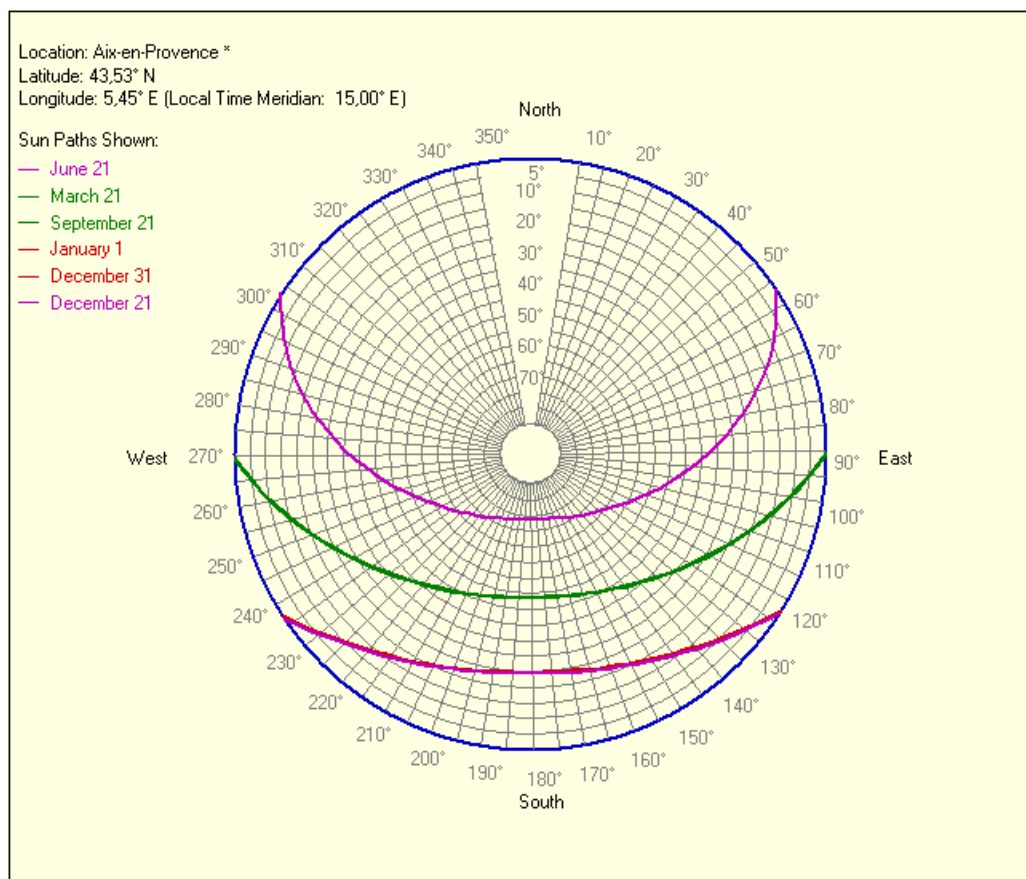


Figure 2 - course du soleil à Aix-en-Provence

1.1.2 La construction passive

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, la construction bioclimatique se réfère à une école d'architecture dite solaire, passive ou naturelle. Or plus récemment, depuis ces dix dernières années en France, on parle aussi de plus en plus de construction passive. Il est nécessaire de s'interroger pour savoir si on parle de la même chose. Nous allons donc ici faire un tour d'horizon de tout ce qui a trait à la construction passive pour en comprendre les différentes acceptions.

1.1.2.a L'architecture passive

Les premières références, nous l'avons vu précédemment, datent des années 1970 et prennent naissance principalement sur le continent américain, probablement en liaison avec le mouvement hippy qui prônait un retour à la nature, mais également avec le premier choc pétrolier de 1973 qui a mis en exergue l'importance de la question énergétique et la nécessité de diminuer la dépendance aux énergies fossiles. C'est ainsi qu'ont été menés à

cette époque de nombreux travaux sur l'utilisation de l'énergie solaire et où le terme passif commence à apparaître, comme par exemple dans le titre d'une conférence en 1976 à l'université du Nouveau Mexique à Albuquerque : « *Passive solar heating and cooling conference and workshop* » (Passive Solar Heating and Cooling Conference et al. 1977), ou encore la « *National Passive Solar Conference* » à Kansas City en 1979 (National Passive Solar Conference et al. 1979). Ces travaux donnent lieu à l'écriture de nombreux ouvrages d'architecture et de son lien avec le climat. On peut citer notamment l'ouvrage de l'architecte David Wright paru initialement en 1978 (Wright 1978) : « *Natural Solar Architecture : a passive primer* ». L'Europe n'est pas en reste avec le « *Colloque solaire international : expérimentation de maisons solaires passives* » à Nice en 1980 (Colloque solaire international et Solar Energy Symposium 1980) et l'ouvrage d'Edward Mazria et Pierre Bazan : « *Le guide de l'énergie solaire passive* », paru en 1981 (Mazria et Bazan 1981).

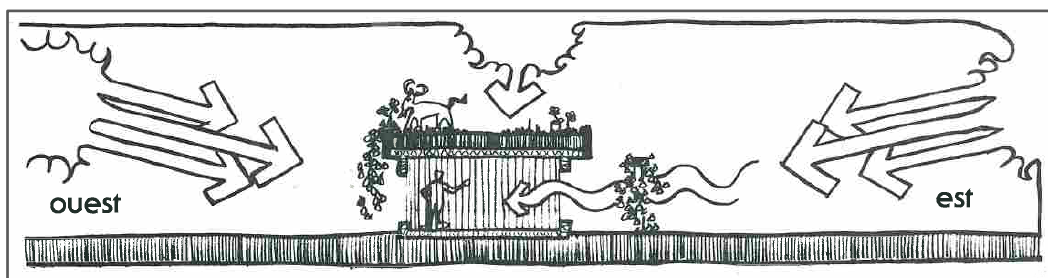


Figure 3 - approche bioclimatique de David Wright, source (Wright 2004)

L'objectif visé est celui que nous avons vu précédemment : utiliser au maximum l'énergie solaire disponible gratuitement par des dispositifs passifs, c'est-à-dire ne nécessitant pas d'apport énergétique autre. L'architecture passive étant à l'origine de la conception bioclimatique, on y retrouve tous les principes listés au paragraphe précédent. Dans la mesure où un bâtiment conçu selon les principes de l'architecture passive doit apporter du confort à ses occupants en toute saison en priorité à partir des apports solaires gratuits, il doit alors permettre d'accepter ou rejeter la chaleur solaire à la demande et selon les besoins. Il doit ainsi être conçu pour capter et conserver la chaleur solaire en hiver, mais doit aussi permettre de s'en protéger pour conserver la fraîcheur intérieure en été.

Il est intéressant de remarquer que David Wright, dans son ouvrage, mentionne également l'adéquation des critères de confort aux conditions climatiques du lieu d'implantation du bâtiment. On peut regretter que ce principe ait été largement oublié pendant de nombreuses

années au profit d'équipements techniques toujours plus perfectionnés qui permettent de gommer les différences climatiques pour uniformiser le confort et les habitudes des occupants. A contrario l'architecture passive se place dans un contexte d'utilisation impliquant une certaine conscience et attitude des occupants, que l'on retrouve dans l'adage : « construction passive, occupants actifs ». Cette conscience n'est pas sans évoquer celle qui est appelée pour lutter contre le réchauffement climatique et qui est maintenant d'une évidente nécessité.

1.1.2.b Le label Passivhaus

Dans la mouvance de la construction passive, en 1988, Bo Adamson, de l'université de Lund en Suède, et le Docteur Wolfgang Feist, de l'Institut pour l'Habitat et l'Environnement de l'université de Darmstadt en Allemagne, définissent le label Passivhaus. Ils s'appuient bien sûr sur les principes de la construction passive mais imaginent également une solution technique particulièrement performante pour assurer le complément de chauffage nécessaire sous leurs latitudes et en même temps garantir un renouvellement de l'air intérieur conforme aux exigences sanitaires.

Leur principe de base est que le bâtiment ne doit comporter aucun système de chauffage traditionnel, mais celui-ci doit pouvoir être assuré par le réchauffement de l'air neuf insufflé. Connaissant la capacité calorifique de l'air et à partir des standards de construction de l'époque et encore actuels en termes de hauteur sous plafond, ils en déduisent que la puissance de chauffage doit être limitée à 10 W/m².

A partir de là ils définissent d'autres principes :

- ⇒ une ventilation mécanique double-flux à échangeur de chaleur,
- ⇒ une enveloppe très isolée sans ponts thermiques,
- ⇒ et une étanchéité à l'air très performante (0,6 volume par heure sous une dépression de 50 Pascal)

La combinaison de tous ces principes permet d'assurer un besoin de chauffage ou de climatisation très faible, mais également une fréquence de surchauffe, définie au-delà de 25°C, très limitée.

Ainsi le label Passivhaus se traduit principalement par 4 exigences formelles (« La Maison Passive Définition de la construction passive » s. d.) :

- ⇒ un besoin de chauffage et de climatisation inférieur à $15 \text{ kWh}_{\text{eu}}/\text{m}^2/\text{an}$,
- ⇒ une consommation d'énergie primaire, tous usages confondus donc incluant les usages spécifiques de l'électricité, inférieure à $120 \text{ kWh}_{\text{ep}}/\text{m}^2/\text{an}$,
- ⇒ une perméabilité à l'air inférieure à 0,6 volume par heure,
- ⇒ une fréquence de température intérieure $> 25^\circ\text{C}$ inférieure à 10% du temps de l'année sans climatisation.

Pour assurer de telles performances, un certain nombre de recommandations **non impératives** ont été formulées, comme par exemple :

- ⇒ un coefficient de transmission thermique de toutes les parois opaques déperditives inférieur à $0,15 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$,
- ⇒ un coefficient de transmission thermique des menuiseries inférieur ou égal à $0,8 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$, avec un coefficient lié à la mise en œuvre inférieur ou égal à $0,85 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$,
- ⇒ un facteur solaire des vitrages supérieur à 50%,
- ⇒ un coefficient de pont thermique linéique inférieur ou égal à $0,01 \text{ W}/\text{m}/\text{K}$.

Il ne s'agit que de recommandations car seules les exigences, validées par un calcul avec le logiciel Passivhaus Planning Package (phpp) sont vérifiées pour la labellisation. Cela permet notamment de prendre en considération les différences de localisation des projets qui peuvent permettre d'assouplir certaines contraintes. Ainsi un bâtiment labellisé Passivhaus ne sera potentiellement pas conçu de la même façon pour une région froide (très forte épaisseur d'isolant, triple vitrage et très larges ouvertures au sud) ou pour une région chaude (moindre épaisseur d'isolant, triple vitrage seulement au nord, ouvertures plus réduites au sud avec un facteur solaire plus faible).

Ce label présente de nombreux points positifs tant sur le plan énergétique que celui du confort des occupants. Au niveau énergétique, la prise en compte de tous les usages de l'électricité pour le calcul du critère de consommation d'énergie primaire est assez révolutionnaire pour un label établi il y a près de 30 ans. Ce point n'est toujours pas

d'actualité sur les dernières réglementations thermiques françaises (RT2012) et commence à peine à être abordé pour le label E+C- en cours d'expérimentation. Il incite à l'utilisation d'équipements domestiques très peu consommateurs et implique l'occupant dans la performance du bâtiment. Sur le plan du confort des occupants, on retrouve les exigences de limitation de surchauffe, ou plus récemment d'humidité de l'air (proportion d'heures où l'humidité absolue de l'air dépasse les $12 \text{ g/kg} \leq 20\%$ sans climatisation), mais également l'utilisation d'une ventilation mécanique double-flux permettant d'assurer un bon renouvellement de l'air intérieur et l'étanchéité à l'air accrue du bâtiment permettant d'éviter la sensation de courant d'air froid.

Mais le label présente également un point négatif majeur : cela concerne l'utilisation systématique de la ventilation mécanique double-flux qui implique donc un équipement actif nécessitant un entretien régulier et potentiellement générateur de pannes. Cette exigence éloigne un peu le label Passivhaus de l'esprit originel de la construction passive.

Il a également une conséquence négative du point de vue de la construction durable en ce sens que, s'il n'interdit pas l'usage des matériaux durables d'origine naturelle comme les isolants à base de fibre de bois par exemple, il n'en fait pas non plus la promotion et les exigences de performances très élevées qu'il requiert poussent à l'utilisation de matériaux plus performants mais moins écologiques (polystyrène expansé ou polyuréthane par exemple).

La réalité est cependant que de nos jours, lorsqu'on parle de construction passive, c'est à ce label que l'on fait référence, même si beaucoup de réalisations sont effectivement dites passives sans être labellisées Passivhaus.

1.1.2.c L'architecture frugale

L'architecture frugale est justement née de ces constats, du souhait de revenir à l'essence de la construction passive et de militer pour l'utilisation de matériaux plus adaptés au contexte local.

C'est un mouvement récent qui voit ses premières réalisations au début des années 2010, alors même que l'appellation de bâtiment frugal n'existe pas encore. Parmi les réalisations les plus emblématiques de ce mouvement, on peut citer le bâtiment « 2226 » de l'agence

Baumschlager & Eberle, construit en 2013 à Lustenau en Autriche (cf. Figure 4) et le centre œnologique Viavino de l'architecte Philippe Madec construit en 2012 à Saint-Christol dans le Gard (cf. Figure 5). Le bâtiment « 2226 » est ainsi nommé car sa température intérieure est comprise entre 22°C et 26°C toute l'année, sans aucun équipement de chauffage, de climatisation ou de ventilation mécanique. Le centre Viavino quant à lui, s'il inclut un système de ventilation naturelle assistée et contrôlée (VNAC), pousse en revanche l'utilisation de matériaux locaux à son maximum.



Figure 4 - immeuble 2226 : vue générale et des ouvertures, source E. Hueber (archphoto.com)



Figure 5 - vue générale du centre Viavino, source Go production

La première apparition du terme bâtiment frugal vient du document retranscrivant les conclusions d'un groupe de travail de l'Institut pour la Conception Écoresponsable du Bâti (ICEB) animé par l'ingénieur Alain Bornarel, fondateur du bureau d'études TRIBU, et l'architecte Sophie Brindel-Beth (Bornarel et al. 2016). Le groupe a précisément travaillé sur la notion de bâtiment passif et note que la définition actuelle du bâtiment passif fait l'impasse

sur un certain nombre de notions toutes aussi importantes que les aspects énergétiques et de confort du label Passivhaus : l'économie de ressources et l'énergie grise de la construction. C'est ainsi qu'il définit un nouveau concept englobant ces aspects en mettant en avant également les choix constructifs, les choix des matériaux, de leur origine, leur mode de production et leur mise en œuvre pour une réponse aux évolutions du climat, à la diminution des ressources et à la préservation de l'environnement. Le guide référence un certain nombre de réalisations pouvant être caractérisées de frugales, dont les deux mentionnées ci-dessus.

Le guide repositionne les différents modes de conception des bâtiments dans une nouvelle classification, en prenant en compte la sobriété des usages, l'efficacité du bâti puis des systèmes et les besoins en énergie, pour les systèmes et pour le bâti (énergie grise), assouvis par des énergies fossiles ou renouvelables. Le label Passivhaus est ainsi qualifié de « bâtiment presque passif », et le bâtiment frugal de « bâtiment passif durable » du fait de son faible besoin en énergie grise.

Le mouvement a très récemment gagné en visibilité avec le lancement en janvier 2018 d'un manifeste intitulé « Manifeste pour une frugalité heureuse : architecture et aménagement des territoires urbains et ruraux », par Philippe Madec, architecte et urbaniste, Dominique Gauzin-Müller, architecte, et Alain Bornarel, (Bornarel, Gauzin-Müller, et Madec 2018). Ce texte s'adresse aux bâtisseurs pour qu'ils prennent leur part du chantier de lutte contre le réchauffement climatique en appelant à :

- ⇒ Une frugalité en énergie : par la généralisation des solutions à base d'énergies renouvelables,
- ⇒ Une frugalité en matière : par l'utilisation des matériaux qui ne contribuent pas à la raréfaction des ressources : bois, matériaux biosourcés, terre crue...
- ⇒ Une frugalité en technicité : par l'apologie d'une approche *low tech* visant à réduire les besoins en entretien et maintenance, et impliquant plus les occupants,
- ⇒ Une frugalité en territoire : par l'emploi de matériaux locaux impliquant des savoir-faire locaux et le respect absolu du site d'implantation.

Désormais le concept d'architecture frugale est bien défini et une citation qui retranscrit assez fidèlement sa philosophie est celle de trois architectes, Daria Ardant, Paul-Emmanuel

Loiret, Serge Joly, qui ont écrit dans le n° 208 de juin 2018 de la revue Maisons Paysannes de France : « L'architecture frugale part de l'analyse de la ressource matérielle et sociale locale vers le dispositif constructif, puis l'architecture et non plus l'inverse. ». Autrement dit on ne peut plus concevoir un bâtiment sans prendre **avant tout** en considération tout le contexte matériel (les matériaux, bien sûr, mais aussi les ressources climatiques et du sous-sol, eau et énergie) et social (savoir-faire, tissu économique) du lieu de construction, qui vont ensuite déterminer les choix de conception depuis l'esquisse jusqu'aux modes constructifs. Par cette approche holistique, cette démarche est très proche de la démarche Bâtiments Durables Méditerranéens d'EnvirobotBDM.

1.1.2.d La construction vernaculaire

Selon la définition du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNTRL – www.cntrl.fr), le vernaculaire désigne ce qui est « propre à un pays, à ses habitants ». La construction vernaculaire désigne précisément l'ensemble des constructions traditionnelles populaires, c'est-à-dire celles qui étaient réalisées par les habitants d'un lieu sans l'intervention d'un architecte, en utilisant les connaissances des anciens et les matériaux disponibles sur place. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, ce mode de construction est devenu la source d'inspiration d'un courant d'architecture éponyme.

L'architecture passive, et plus récemment l'architecture frugale, s'appuient énormément sur les techniques traditionnelles de construction et les matériaux locaux. On retrouve effectivement ici les liens que l'on peut établir à partir de la construction vernaculaire vers l'architecture passive et la conception bioclimatique : les anciens savaient choisir les lieux où il fallait construire et en tirer le meilleur parti avec les techniques et technologies dont ils disposaient, et vers la construction frugale dans l'utilisation des ressources locales, matérielles et sociales. Cependant comme la construction vernaculaire est la construction des habitants, elle se limite au logement. L'architecture frugale quant à elle, s'attache à tous les types de bâtiments : logement, tertiaire, d'enseignement, ...

En France, l'architecte Jean-Luc Massot est celui qui a le mieux analysé l'habitat vernaculaire Provençal dans son ouvrage intitulé « *Maisons rurales et vie paysanne en Provence* » (Massot 2014). Il a réalisé un inventaire ethnographique et architectural étonnant de l'habitat rural en Provence, dans lequel il a analysé les typologies, implantations,

agencements et constructions de ce type d'habitat sur tous les territoires provençaux, de la Camargue aux collines de l'arrière-pays.

Son analyse relève quelques-uns des grands principes de la conception bioclimatique comme on peut le voir ci-dessous : protection contre le vent et la pluie, ouverture au soleil d'hiver et protection contre le soleil d'été.

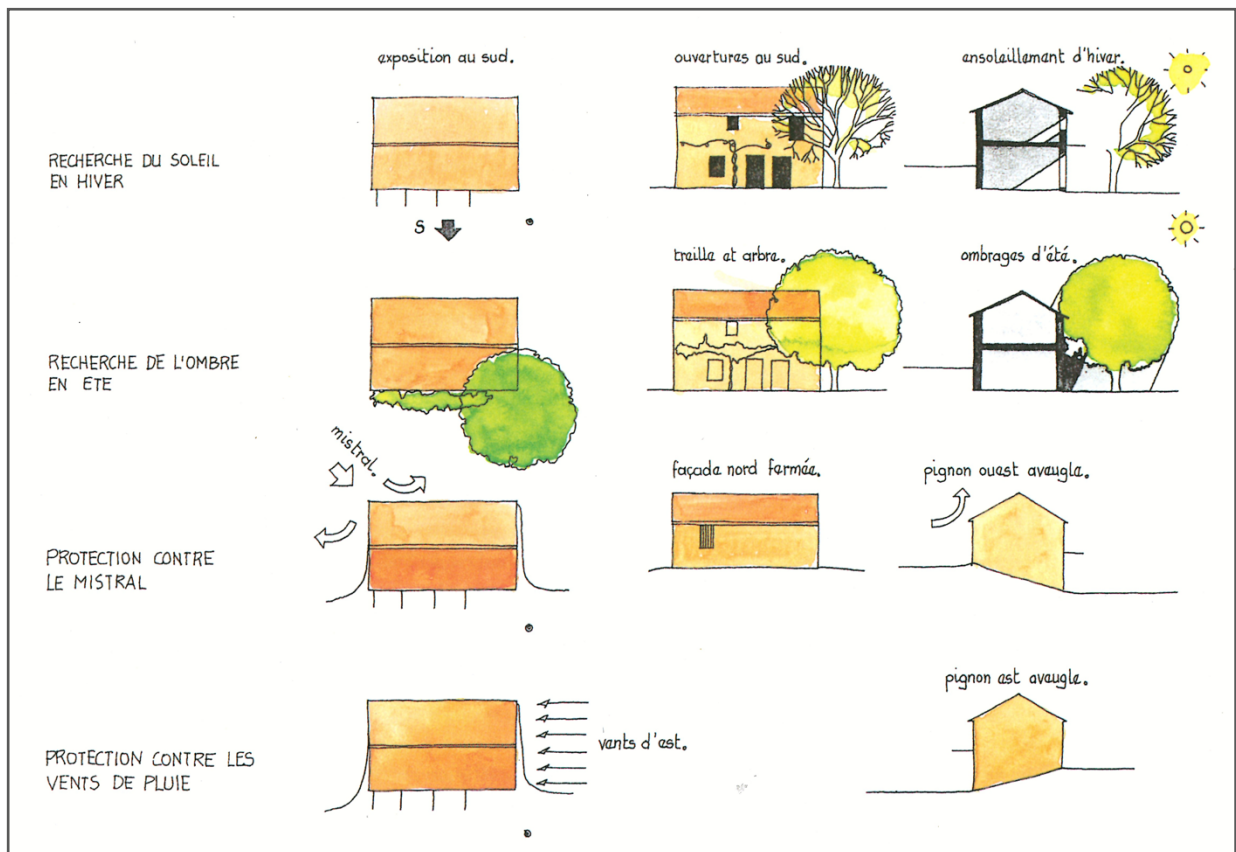


Figure 6 - application à l'habitat des généralités climatiques de la Provence,
source (Massot 2014)

Son inventaire lui permet de faire une synthèse de cet habitat vernaculaire provençal dont on peut relever les points suivants :

- ⇒ L'architecture est évolutive, c'est-à-dire qu'elle permet toujours aux bâtiments de s'agrandir ou s'ajuster aux nouveaux usages ;
- ⇒ L'orientation des bâtiments est au sud, sud-est pour se protéger du Mistral et de la pluie et s'ouvrir au soleil (cf. Figure 6) ;
- ⇒ Toutes les façades sont presque aveugles à l'exception de la façade sud ;

- ⇒ La toiture est à deux pentes d'inclinaison assez prononcée (30 à 40°), en tuiles canal d'argile disposées sur des poutres et chevrons en bois (sans charpente) ;
- ⇒ Les murs sont épais (entre 50 et 60 cm), en moellons des champs calcaires maçonnés au mortier de chaux et enduits à la chaux des deux côtés ;

Il ne faut pas se leurrer, l'habitat vernaculaire provençal n'était pas forcément des plus confortables surtout en hiver. En été, les occupants arrivaient à maintenir une certaine fraîcheur grâce aux principes bioclimatiques appliqués, à l'inertie très forte du bâtiment et la gestion fine des ouvertures des fenêtres et volets, ou alors par simple coïncidence opportuniste (Dutreix 2010).

L'architecture frugale s'appuyant sur les fondements de l'habitat vernaculaire pour l'utilisation de matériaux et savoir-faire locaux, il est intéressant d'étudier le comportement de ce type d'habitat en prenant en considération les capacités d'améliorations dont on dispose actuellement pour apporter du confort supplémentaire aux occupants.

1.2 Le comportement passif du bâtiment

Notre étude se propose de définir les modes constructifs dont le comportement passif sera le plus résilient face aux évolutions climatiques à l'horizon 2050-2100. Mais qu'entendons-nous par comportement passif ?

La réponse à cette question vient finalement du chapitre précédent dans lequel nous avons vu que le courant d'architecture bioclimatique des années 1970 s'attachait à concevoir des bâtiments pour lesquels le recours aux équipements actifs était minimisé. Si de tels bâtiments peuvent être conçus, alors il est possible de représenter leur adéquation passive en observant comment ils se comportent sans le moindre équipement technique apportant du chauffage ou de la climatisation.

Pour représenter ce comportement, nous avons choisi un indicateur utilisé par les auteurs du Guide ICEB « Le bâtiment frugal » (Bornarel et al. 2016) qui ont étendu le concept de signature énergétique à celui de signature bioclimatique. Il s'agit de la représentation « en ordonnée, [de] la température intérieure opérative d'un bâtiment en **évolution libre**, sans équipements de chauffage ou de rafraîchissement actifs, et en abscisse [de] la température extérieure ».

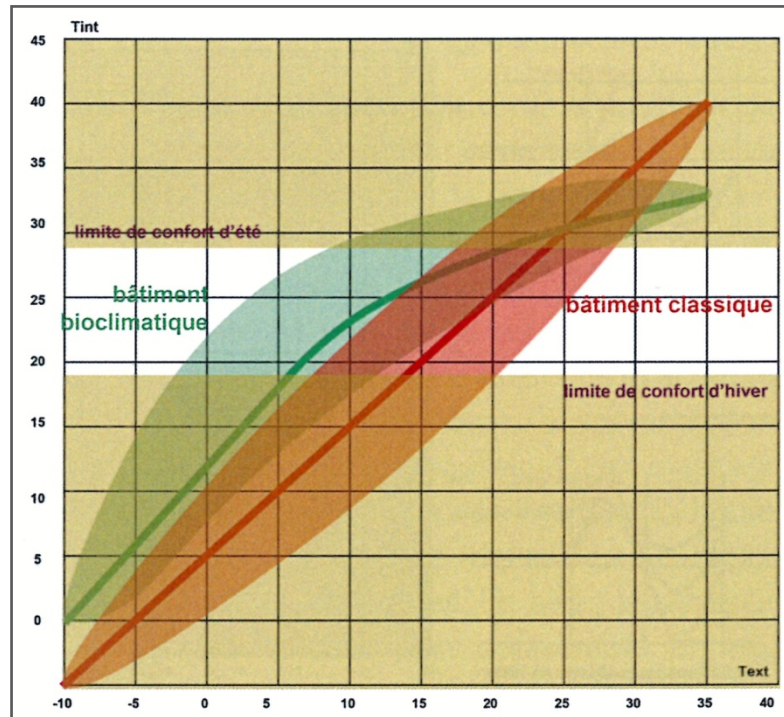


Figure 7 - signature bioclimatique, source (Bornarel et al. 2016)

Le résultat est un nuage de points représenté sur le Figure 7 par les zones verte, pour un bâtiment bioclimatique, et rouge, pour un bâtiment classique, dont on peut déterminer une courbe d'interpolation (traits vert et rouge). C'est cette courbe que Bornarel et son équipe ont appelé **signature bioclimatique** d'un bâtiment. Nous avons décidé de l'appeler **signature bioclimatique brute**, pour la différencier de la signature bioclimatique que nous observerons en prenant en compte la présence des usagers et leur comportement, notamment du point de vue de la ventilation naturelle, et que nous appellerons alors **signature bioclimatique nette**.

L'intérêt de la signature bioclimatique est de faire apparaître, lorsqu'on la superpose avec les limites de confort d'hiver et d'été comme c'est le cas ci-dessus, la capacité du bâtiment à fonctionner sans équipement de chauffage ou de refroidissement. Cela se traduit par la portion de la signature comprise entre les limites de chauffage et de climatisation. Plus celle-ci est importante, moins le bâtiment nécessitera d'utiliser des équipements actifs de chauffage ou climatisation. Et à l'extrême, si un bâtiment a une signature intégralement comprise entre les deux limites, il ne requerra aucun équipement.

L'autre intérêt de la signature bioclimatique est de permettre aisément la comparaison de bâtiments ou modes constructifs, à conditions climatiques identiques. C'est ce qui en fait son adéquation avec l'étude que nous menons ici.

Il faut noter que cette approche est assez différente des approches habituelles de mesure du confort basées sur une détermination statistique des durées de confort/inconfort. Ici rien ne nous dit à quelle proportion de temps correspondent les portions de la signature hors des limites de confort. On peut évaluer qualitativement cette proportion en observant la quantité de points dans le nuage en dehors de la zone de confort. Pour en avoir une évaluation quantitative, on pourrait se contenter de déterminer le nombre d'heures pendant lesquelles la température extérieure est inférieure ou supérieure aux points d'intersection de la signature avec les limites de confort. Mais cette mesure du *taux* de confort/inconfort ne tiendrait pas compte de la présence effective des usagers dans le bâtiment. Retenons donc que la signature nous donne rapidement et simplement une vue qualitative de la capacité d'un bâtiment à offrir du confort passif.

Notons enfin que la signature bioclimatique n'est pas indépendante des conditions météorologiques. L'évolution du bâtiment dépend fortement des évolutions de ces conditions et simuler une augmentation générale des températures ne peut pas simplement se traduire par un décalage vers la gauche de la signature du bâtiment.

1.3 L'inertie

L'inertie d'un bâtiment est une caractéristique **dynamique** qui tire son nom de son équivalent mécanique. Elle se définit comme la résistance à un changement de la température intérieure d'un bâtiment. Pierre Lavigne et Jean-Louis Izard ont décrit finement les phénomènes liés à l'inertie (Izard 2006; Lavigne 2010). Ils précisent qu'en réalité il faut distinguer l'inertie de transmission au niveau de l'enveloppe du bâtiment et l'inertie par absorption à l'intérieur de celui-ci. Et lorsqu'on parle couramment de l'inertie thermique d'un bâtiment, on fait généralement référence à la seconde.

Elle correspond à la capacité d'un bâtiment à accumuler de l'énergie thermique, notamment celle du soleil, captée par les parois et planchers, pour la restituer plus tard. L'inertie est

parfois assimilée à un barrage hydraulique, comme dans (Courgey et Oliva 2006), mais cette image est trop simpliste pour représenter un phénomène aussi complexe.

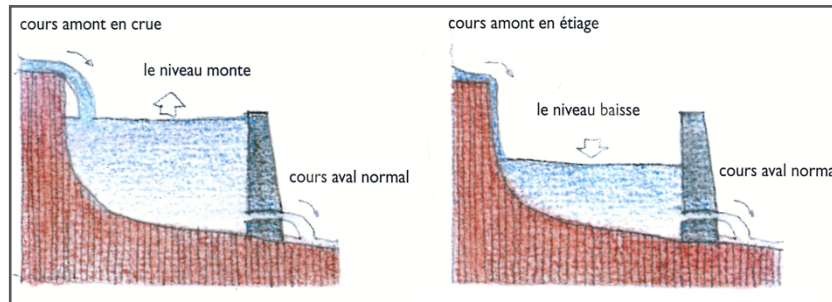


Figure 8 - l'inertie vue comme un barrage, source (Courgey et Oliva 2006)

Elle est particulièrement recherchée en hiver pour permettre la restitution nocturne, le plus longtemps possible, du flux solaire potentiellement excédentaire accumulé pendant la journée. Elle est néanmoins déconseillée pour des bâtiments à occupation fortement intermittente (Sidler 2003) car elle pourrait prendre le pas sur le réchauffement de la température intérieure.

L'inertie peut également fonctionner en sens inverse, en accumulant non pas de la chaleur mais de la fraîcheur. En réalité c'est le même principe qui est à l'œuvre : l'inertie sert à absorber la chaleur excédentaire de la journée qui sera déchargée par surventilation dès que la température extérieure sera inférieure à la température intérieure. Mais plus on a déchargé de chaleur, plus on a *accumulé de fraîcheur*, et plus la capacité d'absorption pour la journée suivante est importante. C'est la stratégie recherchée pour le confort d'été.

On voit apparaître une contradiction sur ces deux stratégies car la première nécessite un déstockage lent alors que la seconde réclame un déstockage rapide. En réalité l'arbitrage entre ces deux stratégies dépend de la quantité de chaleur stockée et de la durée disponible pour le déstockage. Soit si on considère Q_h et D_h la quantité de chaleur stockée et la durée de restitution souhaitée pour l'hiver, et Q_e et D_e leur équivalent pour l'été, on peut alors calculer :

$$V_h = \frac{Q_h}{D_h} \text{ et } V_e = \frac{Q_e}{D_e}$$

Le dimensionnement doit alors se faire en fonction du maximum entre V_h et V_e . Sachant que D_h et D_e sont probablement identiques car correspondant à la durée nocturne, il faudra donc

déterminer les quantités maximums de chaleur journalière stockée correspondant à chaque saison pour choisir laquelle des deux stratégies privilégier pour le choix des matériaux.

L'inertie, ou la capacité inertielle d'un matériau, est définie par deux paramètres qui dépendent quant à eux de la conductivité thermique du matériau (λ en W/m/K), de sa masse volumique (ρ en kg/m³) et de sa chaleur spécifique massique (C en J/kg/K ou Wh/kg/K) :

⇒ La diffusivité (a) : la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température, autrement dit la vitesse de transmission de celle-ci :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times C}$$

⇒ L'effusivité (b) : la capacité à absorber (ou restituer) une puissance thermique :

$$b = \sqrt{\lambda \times \rho \times C}$$

Pierre Lavigne conclut son analyse en indiquant que pour maximiser l'inertie d'absorption il faut maximiser la quantité d'effusivité, c'est-à-dire le produit de l'effusivité du matériau avec la surface d'échange avec le milieu disponible.

Ainsi les deux vitesses V_h et V_e évoquées plus haut dépendent de l'effusivité du matériau. Et les quantités de chaleur stockées, Q_h et Q_e , dépendent directement de la capacité volumique ($\rho \times C$) et du volume de matériau disponible.

L'inertie par transmission, par son effet de résistance, induit un effet d'amortissement des variations de température extérieure et de déphasage entre les courbes de température extérieure et intérieure. Elle augmente d'autant plus que l'épaisseur de l'enveloppe est importante, sa diffusivité et sa conductivité thermique sont faibles et son effusivité est élevée. Elle est finalement assez liée à l'isolation de l'enveloppe. Le temps de déphasage dépend pour sa part de l'épaisseur et de l'inverse de la diffusivité, suivant la formule (Izard 2006; Lavigne 2010; Dutreix 2010) :

$$T = 1,38 \times \text{épaisseur} \times \sqrt{\frac{1}{a}}$$

L'inertie par transmission est recherchée en été pour ce déphasage qu'elle apporte, surtout si celui-ci permet de reporter le pic de l'onde de chaleur à une période plus fraîche au cœur de la nuit où elle sera moins préjudiciable au confort des occupants.

Quant à l'inertie par absorption, en dehors des contextes où il est impossible d'évacuer par surventilation la chaleur qu'elle restitue, ou sur des temps trop courts, elle est également nécessaire pour assurer le confort d'été dans les bâtiments. Cette conclusion est formulée par la plupart des acteurs de la construction (Baruch Givoni 1994; Sidler 2003; Lavigne 2010; Courgey et Oliva 2006; Di Perna et al. 2011; Bornarel et al. 2016). Notre étude devra alors prendre en considération les caractéristiques d'inertie des différentes solutions envisagées.

1.4 Le confort

1.4.1 Le confort adaptatif

Les modèles de confort habituellement utilisés se basent sur des approches statistiques, définies dans les norme ISO 7730 et ASHRAE 55 (l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) jusqu'en 2001, qui ont été établies par des mesures de confort sur des échantillons d'individus placés dans des conditions thermiques et hygrométriques contrôlées. Ces modèles ont été définis pour des environnements où l'ambiance thermique est déterminée par la ventilation mécanique dans des espaces isolés de l'extérieur. Ils avaient pour but de déterminer les niveaux de climatisation acceptables dans ces conditions. Cependant, à partir du milieu des années 1990 commencent à apparaître des constructions avec de la ventilation hybride, combinaison de ventilation mécanique et naturelle, dont la Commerzbank de Francfort de l'architecte Sir Norman Foster, qui montrent des consommations d'énergie plus faibles que les constructions où le confort est uniquement géré par l'air conditionné. Richard de Gear, de l'université de Sydney, et Gail Brager, de l'université de Berkeley, commencent alors à travailler sur l'étude du confort thermique dans ces environnements ayant accès à la ventilation naturelle. Ils démontrent dans leurs travaux que les modèles de confort appliqués jusqu'alors sur toutes les constructions partout dans le monde étaient fondamentalement inappropriés (de Dear

et Brager 1998). Ils définissent alors un modèle de confort adaptatif pour les constructions ayant accès à la ventilation naturelle (de Dear et Brager 2001).

Ce modèle établit que la sensation de confort thermique dépendait également des conditions extérieures, en l'occurrence la température extérieure moyenne mensuelle (cf. Figure 9).

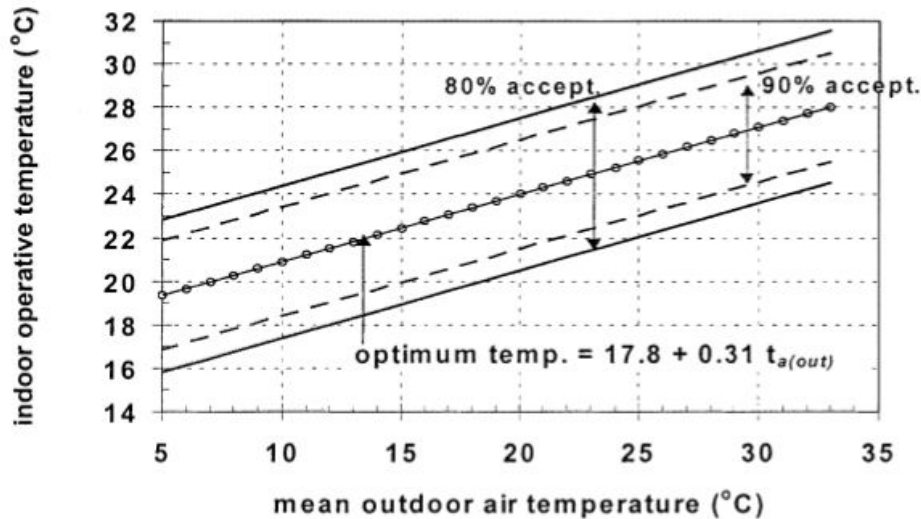


Figure 9 - modèle de confort adaptatif de de Dear et Brager, source (de Dear et Brager 2001)

Le norme NF EN 15251 qui définit les critères de confort pour les ambiances intérieures se base elle aussi sur des modèles de confort adaptatif. Par contre elle prend comme référence la température extérieure moyenne quotidienne et non mensuelle. Les coefficients du modèle sont ainsi légèrement différents puisque l'équation de base est la suivante :

$$T_{int} = 0,33 \times T_{ext} + 18,8$$

donc avec une pente et une valeur à l'origine plus élevées.

La norme définit également 4 catégories de confort listées dans le Tableau 1 ci-dessous. Puisque notre étude porte sur un bâtiment neuf, nous ne considérerons que la catégorie II, mais nous représenterons également la catégorie I à titre indicatif. Nous avons donc déterminé les maximales des températures extérieures moyennes journalières à chaque période étudiée pour en déduire les limites de confort hautes.

Pour le confort hivernal, la norme NF EN 15251 fixe une limite à 20°C, quelle que soit la catégorie.

<i>Catégorie</i>	<i>Explication</i>	<i>Plage de confort</i>
<i>I</i>	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
<i>II</i>	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
<i>III</i>	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.	$\pm 4^{\circ}\text{C}$
<i>IV</i>	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.	$\pm 5^{\circ}\text{C}$

Tableau 1 - catégories de confort selon la norme EN 15251

1.4.2 Le confort en milieu ventilé

Dès 1969, Baruch Givoni, architecte israélien, dans ses travaux sur l'architecture bioclimatique et passive retranscrits dans son ouvrage intitulé « L'homme, l'architecture et le climat » (B Givoni et Izard 1978), a établi un diagramme de confort intégrant deux paramètres : l'humidité relative et la vitesse de l'air (cf. Figure 10). Ce diagramme définit des zones de confort en fonction de ces deux paramètres, qui indiquent que la vitesse et l'assèchement de l'air permettent d'augmenter la température de confort. En effet, la vitesse de l'air, parce qu'elle augmente les phénomènes convectifs au niveau de la peau, permet de supporter des températures plus élevées. Quant à l'assèchement de l'air, il permet à celui-ci de se charger plus facilement en humidité par évaporation de la transpiration, phénomène qui prend de la chaleur au milieu ambiant et donc rafraîchit le corps. Sur ce diagramme on peut constater que la température de confort peut être augmentée de 3°C avec un air peu humide et circulant à $0,5 \text{ m/s}$.

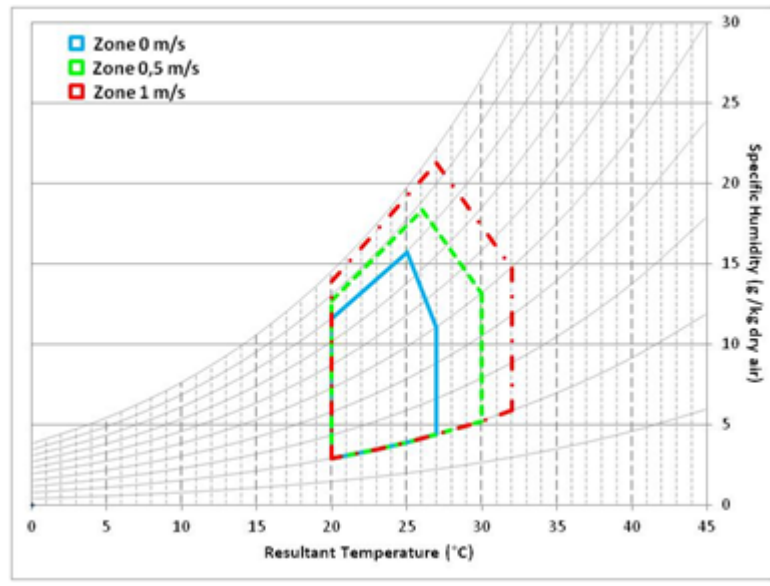


Figure 10 - diagramme de Givoni, source commons.wikimedia.org

Pour notre étude, étant pourtant dans un cas de bâtiment utilisant fortement la ventilation naturelle et les brasseurs d'air (cf. paragraphe 2.3), nous avons malgré tout décidé d'appliquer une hypothèse conservatrice correspondant à une vitesse d'air raisonnable dans les conditions d'usage du bâtiment étudié. Cela se traduit par l'ajout de +2 °C aux limites hautes établies comme décrit au paragraphe précédent.

1.5 Horizon 2050-2100 : les évolutions du climat méditerranéen

Les évolutions du climat sont étudiées et analysées finement depuis 1988 par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, ou IPCC en anglais – www.ipcc.ch), qui a été mis en place par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement afin « d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'homme ». Depuis, régulièrement, ce groupe d'experts publie les résultats de ses travaux sous la forme de rapports d'évaluation. Nous en sommes aujourd'hui au 5^{ème} rapport finalisé en novembre 2014 (IPCC 2014), qui commence par ces rappels :

« *L'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie et, aujourd'hui, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont les plus élevées jamais observées.* »

« *Le réchauffement climatique est sans équivoque...* »

Les incertitudes des précédents rapports s'estompent et l'influence des activités humaines sur le réchauffement climatique est maintenant établie à plus de 95% (Réseau Action Climat France 2013).

Le GIEC s'appuie sur une nouvelle méthodologie prenant en compte 4 scénarios différents d'émissions de gaz à effet de serre, ou plus exactement de concentration de ces gaz dans l'atmosphère (Representative Concentration Pathway – RCP) :

- ⇒ RCP 2.6 : scénario strict d'atténuation permettant de limiter le réchauffement global à 2°C par rapport au niveau préindustriel de 1850, concentration en équivalent CO₂ limitée à 490 ppm avant 2100 puis déclin ;
- ⇒ RCP 4.5 : scénario intermédiaire, concentration en équivalent CO₂ limitée et stabilisée à ~660 ppm après 2100 ;
- ⇒ RCP 6.0 : scénario intermédiaire, concentration en équivalent CO₂ limitée et stabilisée à ~850 ppm après 2100 ;
- ⇒ RCP 8.5 : scénario pessimiste dit *business as usual*, concentration en équivalent CO₂ dépassant les 1300 ppm en 2100 et en croissance continue.

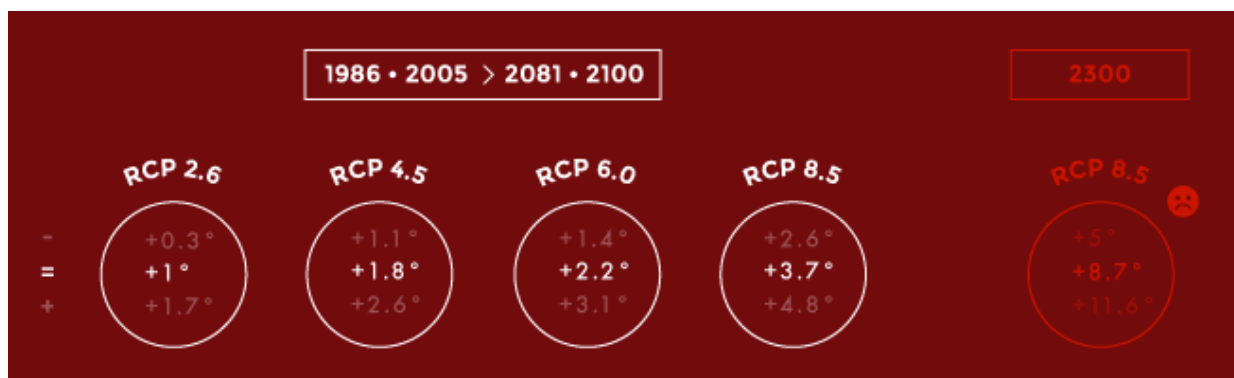


Figure 11 - élévation des températures selon les scénarios du GIEC, source (Réseau Action Climat France 2013)

Selon les scénarios les experts ont estimé les impacts sur le climat et les phénomènes météorologiques. Si les 4 scénarios donnent des résultats similaires en termes d'élévation moyenne des températures à la surface du globe jusqu'en 2030, ils divergent fortement au-delà de cette date. Ainsi le scénario RCP 2.6 permettrait de limiter à +1°C l'élévation moyenne des températures à la fin du XXI^{ème} siècle par rapport à 2005¹, alors que le scénario RCP 8.5 aboutirait à une élévation de +3,7°C par rapport à 2005² (cf. Figure 11).

Les valeurs données ici sont des valeurs globales à l'échelle de la planète. Pour représenter plus finement ce qui se passe à l'échelle du climat méditerranéen, il faut consulter les données régionales plus spécifiques, telles que celles publiées par le GREC PACA (Groupement Régional d'Experts sur le Climat) dans son rapport (GREC PACA 2016) établi sur la base des données du DRIAS (www.drias-climat.fr). On peut alors connaître l'évolution des températures avec une certaine précision géographique en fonction des scénarios du GIEC.

Comme l'a noté Angéla Chelala dans sa thèse (Chelala 2017), le climat méditerranéen est très varié, et même si l'on se restreint à un pays comme la France, ce qui est notre cas, des disparités importantes existent, par exemple entre Marseille, Nice et Perpignan qui sont pourtant trois villes côtières. De plus nous cherchons à déterminer la construction qui pourra apporter du confort aux occupants en hiver tout autant qu'en été, et ce en minimisant les consommations énergétiques (approche passive). C'est pour ces raisons que nous avons choisi d'étudier les évolutions climatiques dans une ville où les deux saisons sont bien marquées : Aix-en-Provence. La situation de la ville à l'intérieur des terres fait que celle-ci bénéficie moins de l'inertie apportée par la mer. A l'extérieur de la ville, les températures hivernales sont fréquemment négatives, et en été la température sera plus élevée que sur le littoral qui bénéficie de surcroît d'un régime de brises thermiques.

Le Tableau 2 reprend les données disponibles pour cette ville pour la moyenne annuelle des températures, selon le scénario et l'horizon, à partir d'une moyenne de référence établie sur la période 1976-2005.

¹ +1,7°C par rapport à 1850 car la température moyenne du globe a déjà augmenté de +0,7°C entre 1850 et 2005

² +4,4°C par rapport à 1850

Scénario	Moyenne de référence (1976-2005)	Horizon proche (2021-2050)		Horizon moyen (2041-2070)		Horizon lointain (2071-2100)	
RCP 2.6	13,32°C	+1,01°C	14,33°C	+1,35°C	14,67°C	+1,24°C	14,56°C
RCP 4.5	13,32°C	+1,20°C	14,52°C	+1,36°C	14,68°C	+2,34°C	15,66°C
RCP 8.5	13,32°C	+1,34°C	14,66°C	+2,20°C	15,52°C	+3,96°C	17,28°C

Tableau 2 - évolution des températures à Aix-en-Provence, source www.drias-climat.fr

Pour caractériser l'évolution du climat à l'horizon 2050 puis 2100, nous avons décidé de retenir les scénarios RCP 2.6 pour 2050 et RCP 4.5 pour 2100 (cases entourées en rouge). En effet les scénarios RCP 6.0 et 8.5 correspondent à des hypothèses trop pessimistes pour seulement se poser la question du confort des occupants. Si c'était effectivement les scénarios qui se réalisaient, l'humanité toute entière serait alors dans une impasse et notre questionnement sans intérêt. On pourra noter que le scénario RCP 4.5 prédit une augmentation de température de +2,34°C, ce qui n'est pas sans rappeler le seuil de +2°C couramment utilisé comme seuil de référence.

En pratique, nous utiliserons les valeurs saisonnières d'augmentation de température (Tableau 3) car celles-ci révèlent une augmentation des températures plus marquées en été qu'en hiver, amplifiant encore l'écart entre les deux saisons.

Horizon	Année	Printemps	Été	Automne	Hiver
2050 (RCP 2.6)	+1,35°C	+1,25°C	+1,87°C	+1,48°C	+0,83°C
2100 (RCP 4.5)	+2,34°C	+2,13°C	+3,03°C	+2,36°C	+1,86°C

Tableau 3 - augmentation des températures en fonction des saisons,

source www.drias-climat.fr

Méthode d'étude

2.1 Méthodologie générale

L'étude se base sur la simulation thermique dynamique (STD) pour déterminer le comportement du bâtiment en fonction de certaines hypothèses constructives et météorologiques.

Le bâtiment est modélisé le plus fidèlement possible, principalement au niveau de ses orientations, formes, ouvertures et modes constructifs.

La simulation est lancée plusieurs fois pour différents scénarios :

- ⇒ Sans surventilation, sans usager et sans système : pour obtenir la signature bioclimatique brute du bâtiment ;
- ⇒ Avec surventilation, sans usager et sans système : pour déterminer la signature du bâtiment sans charge interne³ ;
- ⇒ Avec surventilation, usagers et sans système : pour obtenir la signature bioclimatique nette du bâtiment ;
- ⇒ Et enfin en ajoutant les systèmes pour mesurer les besoins énergétiques.

Les effets de la végétation présente autour et sur le bâtiment, conséquence d'une conception bioclimatique bien pensée, nécessitent des adaptations au niveau du modèle selon les saisons.

La simulation nous permet alors de déterminer quels modes constructifs sont plus résilients que les autres face au changement climatique qui nous attend, en termes de confort comme en termes énergétiques.

Ces résultats sont ensuite rapprochés des caractéristiques inertielles des différents modes constructifs, mais également de leur coût en énergie grise.

³ Nous n'avons finalement pas exploité cette signature, lui préférant la signature bioclimatique nette qui a la même forme et prend directement en compte les apports internes des occupants.

En fonction des premiers résultats observés, des variantes sont élaborées et des études complémentaires sont réalisées sur celles-ci.

2.2 Adéquation des outils

Nous disposons de plusieurs outils pour la simulation thermique dynamique :

- ⇒ Pleiades Comfie de Izuba Énergies,
- ⇒ Virtual Environment (VE) 2017 de Integrated Environmental Solutions Limited.

Après discussion avec des experts en STD, il est apparu que Pleiades Comfie n'était pas le plus indiqué pour simuler les effets de l'inertie des parois. Notre choix s'est donc orienté sur VE mais nous avons commencé par valider l'hypothèse selon laquelle ce logiciel prenait bien en compte les effets de l'inertie.

Nous avons donc étudié un cas purement théorique d'une paroi dont on remplaçait le béton par un matériau dont la chaleur massique (C) et la masse volumique (ρ) étaient divisées par 10, soit une capacité thermique 100 fois moindre (cf. Figure 12).

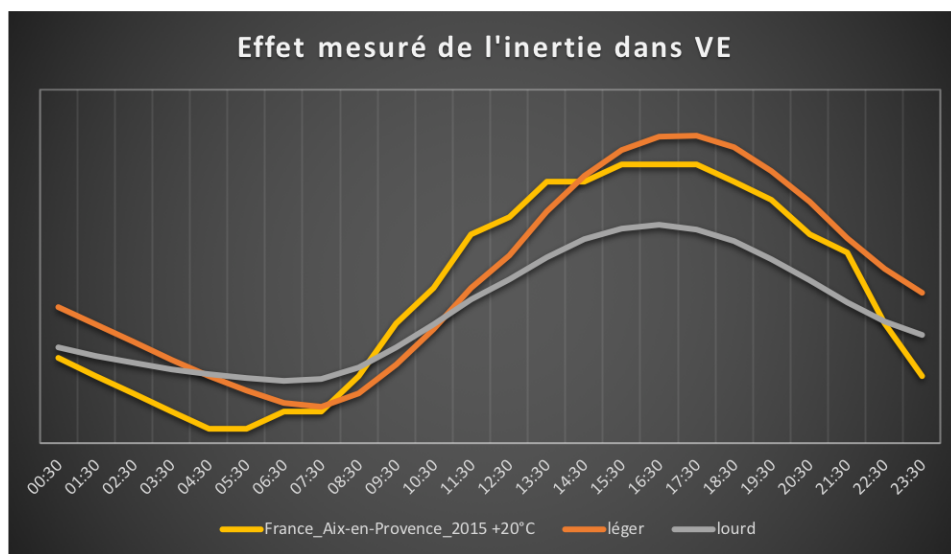


Figure 12 - effet de l'inertie dans VE

Il s'agit d'une journée d'été. La courbe en jaune est celle de la température extérieure. La courbe grise est celle de la paroi de référence en béton. La courbe orange est celle de la paroi théorique dite *légère*.

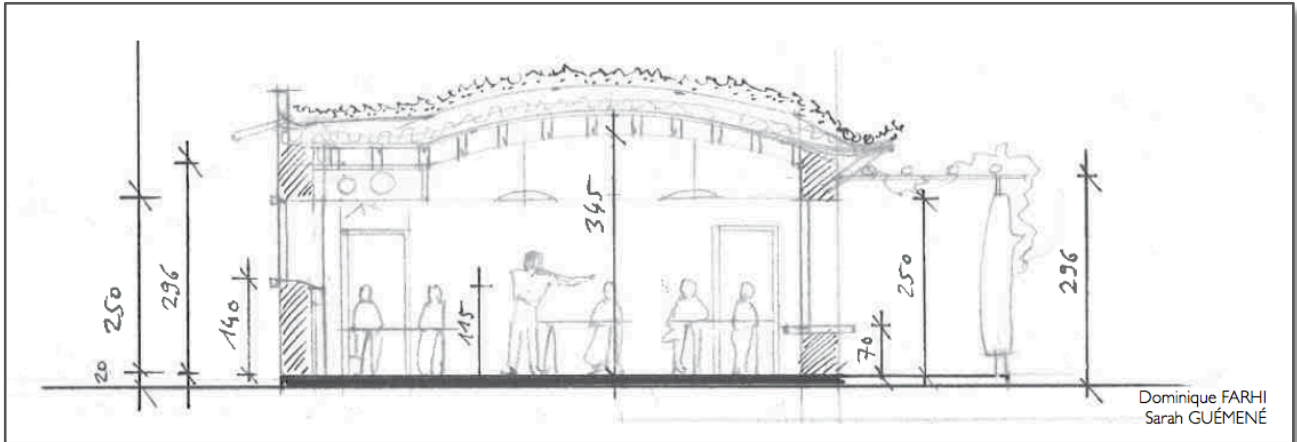
La paroi dite *légère* a une inertie de transmission un peu plus importante, ce qui se traduit par un déphasage un peu plus prononcé. En revanche on voit très clairement l'effet d'amortissement apporté par l'inertie d'absorption sur la paroi dite *lourde*, ce qui confirme la capacité de VE à prendre en compte les effets de l'inertie des parois.

2.3 Le choix du bâtiment

Comme indiqué en introduction, notre étude se base sur un bâtiment tertiaire de taille et d'usages volontairement réduits, pour permettre une modélisation simple dans un outil de simulation thermique dynamique. Nous avons porté notre choix sur le projet d'extension de l'école Steiner Waldorf de Sorgues (84), conçu par les architectes Dominique Farhi et Sarah Guémené (Arch'Eco), et l'ingénieur Robert Célaire, en qualité de bureau d'études Thermique et Environnement. Le projet a été labellisé BDM Or en phase conception en 2017. Il est à présent en attente d'exécution des travaux de VRD pour lancer la phase réalisation. Étant sollicité par le maître d'ouvrage pour la réalisation de nouvelles classes dans cette école, les architectes se sont montrées particulièrement intéressées par notre étude et nous ont donné leur accord pour l'utilisation de ce projet.

Le choix d'un bâtiment tertiaire est motivé par le fait que c'est la typologie de bâtiment pour laquelle la notion de confort et la réduction des charges du bâtiment que permet la construction passive prennent le plus de sens pour la maîtrise d'ouvrage. C'est d'autant plus vrai pour ce projet où le maître d'ouvrage, l'association Pierre d'Avenir, adepte de la méthode d'enseignement alternative Steiner basée sur l'autonomie des élèves et la flexibilité du cadre, a souhaité ne pas avoir recours à l'éclairage artificiel ni à des systèmes conventionnels de chauffage et de climatisation, préférant adapter les activités d'enseignement aux conditions climatiques du moment. Ainsi par exemple, ils pratiquent des activités sportives si la température intérieure des classes est trop basse, ou inversement ils sortent de la classe pour des activités en extérieur si la température est trop élevée. Nous sommes bien là en présence d'utilisateurs actifs propices à un bâtiment passif. Et l'absence de systèmes techniques de chauffage, de climatisation et de ventilation permet effectivement de caractériser ce bâtiment de passif, même si au regard des premières études de conception le besoin de chauffage est supérieur aux exigences du label Passivhaus que nous avons vues au paragraphe 1.1.2.b.

Le projet est en réalité constitué de deux salles de classe indépendantes. Nous nous sommes restreints à une seule de ces deux salles, la salle 1, d'une surface de plancher d'environ 40 m² (cf. Figure 13).



*Figure 13 - esquisse de la classe 1 de l'école Steiner Waldorf,
source D. Farhi et S. Guéméné*

La conception satisfait les contraintes de conception bioclimatique quant à son implantation et orientation (axe nord-sud). Elle est relativement protégée du mistral par une haie en bordure de parcelle à une vingtaine de mètres à l'ouest du bâtiment. Il y a quelques masques proches constitués de bâtiments légèrement plus hauts situés à un peu moins de 8 m à l'ouest jusqu'à une ligne sud-ouest, et de plus faible hauteur à un peu plus de 3 m à l'est jusqu'à une ligne sud-est. Ces masques constituent une protection solaire intéressante pour le soleil levant et surtout couchant d'été et mi saison, souvent source de surchauffe. Ils n'ont cependant pas été repris dans le modèle. En revanche la végétation présente à l'est du bâtiment (arbres) a été intégrée au modèle.

Pour pallier l'absence d'éclairage artificiel, la classe est très vitrée sur les façades sud (~48% du taux de percement) et nord (~29% de taux de percement). Cette disposition permet également une ventilation traversante importante. Une petite ouverture vitrée à l'est vient compléter cette ouverture sur l'extérieur. Les menuiseries sont en bois éco-certifié à double vitrage argon à faible émissivité. Le taux de percement global ne dépasse pas les 20%.

La large ouverture au sud permet en outre de bénéficier d'apports solaires passifs très conséquents en hiver. Le débord de la toiture (40 cm à l'est et à l'ouest et ~80 cm au sud) constitue en revanche une bonne protection solaire contre le haut soleil d'été (cf. la course

du soleil dans le sud de la France en Figure 2). Le bâtiment s'ouvre au sud sur une terrasse en bois recouverte par une treille végétalisée qui vient compléter la protection solaire à partir du milieu du printemps et jusqu'à la fin septembre.

Le mode constructif retenu pour le bâtiment est l'ossature bois avec de l'isolation répartie à base de paille. Le contreventement est assuré à l'extérieur par des panneaux d'Agepan de 22 mm. Les parois sont recouvertes à l'extérieur par un bardage de bois et à l'intérieur par du plâtre projeté.

Le bâtiment est construit sur un vide-sanitaire de 20 cm, avec un plancher en poutrelles de béton et hourdis de polystyrène, recouvert d'une chape de compression, d'une chape de ravaillage et de linoléum.

La toiture de la classe 1 est végétalisée sur un complexe constitué de deux couches de laine de roche haute densité enserrant une couche de laine de bois de 200 mm, le tout sur un platelage bois.

Les principaux détails constructifs sont donnés en Annexe 1.

Les usagers sont mis à contribution pour assurer leur confort et la qualité de l'air intérieur. Aucun automatisme ne vient en effet piloter les ouvertures de fenêtres. Ils disposent d'un capteur de CO₂ qui leur permet d'ouvrir les fenêtres lorsque c'est nécessaire. En cas de surchauffe, ils peuvent bien sûr ouvrir les fenêtres si la température extérieure le permet, mais également faire tourner les brasseurs d'air installés au plafond. Nous sommes donc bien en présence d'un bâtiment ventilé naturellement.

2.4 Les modes constructifs étudiés

Nous avons décidé d'étudier des modes constructifs correspondant aux différentes formes d'architecture passive évoquée ci-dessus au paragraphe 1.1.2, mais également de les comparer à la construction la plus répandue à ce jour à base de béton. Nous avons donc choisi les modes constructifs suivants :

- La construction correspondant au projet, relativement légère, en ossature bois et isolation paille, avec des fenêtres à double vitrage, un plancher bas sur vide-sanitaire

- à base de poutrelles béton et hourdis en polystyrène et une toiture végétalisée – hypothèse de faible inertie ;
- Une construction en béton et isolation thermique par l'extérieur en laine de bois avec des fenêtres à double vitrage, le même plancher bas et la même toiture végétalisée – hypothèse d'inertie moyennement élevée ;
 - Une construction inspirée du bâtiment « 2226 » de Lustenau, caractérisée par une très forte isolation répartie obtenue par une double épaisseur de briques monomur, des fenêtres à triple vitrage, un plancher bas à isolation renforcée par 80 mm de laine de bois en sous-face et une toiture végétalisée également à isolation renforcée par une double épaisseur de laine de bois – hypothèse d'inertie relativement lourde ;
 - Et une construction vernaculaire traditionnelle provençale légèrement améliorée correspondant à une forme de frugalité, en pierre massive avec correction d'isolation à l'intérieur à base d'enduit chaux-chanvre, des fenêtres simple vitrage, un plancher bas en terre cuite sur terre-plein non isolé, et une toiture deux pentes⁴ en tuiles – hypothèse d'inertie importante.

Les détails des modes constructifs et leurs caractéristiques thermiques sont fournis en Annexe 2. Les deux tableaux suivants (Tableau 4 et Tableau 5) présentent quant à eux un résumé des caractéristiques de ces modes constructifs du point de vue de l'inertie d'absorption, respectivement des murs et du plancher bas, sur les premiers centimètres d'épaisseur à l'intérieur.

⁴ Pente ramenée à 20° pour des questions esthétiques ☺

<i>Mode constructif des murs (intérieur → extérieur)</i>	<i>Épaisseur (cm)</i>	<i>Effusivité (W.h^{1/2}/m²/K)</i>	<i>Capacité de stockage (J/K/m²)</i>
<i>Bois-paille</i>			<i>50 400</i>
plâtre	3	24 000	30 000
paille	12	6 909	20 400
<i>Béton-ITE</i>			<i>234 040</i>
plâtre	4	24 000	40 000
béton	11	94 290	194 040
<i>Frugal « 2226 »</i>			<i>134 072</i>
enduit chaux	0,5	38 970	5 022
monomur	14,5	17 927	129 050
<i>Vernaculaire provençal</i>			<i>186 720</i>
enduit chaux chanvre	8	21 799	96 000
moellon	7	83 656	90 720

Tableau 4 – inertie d'absorption des murs sur les premiers 15 cm

<i>Mode constructif du plancher (intérieur → extérieur)</i>	<i>Épaisseur (cm)</i>	<i>Effusivité (W.h^{1/2}/m²/K)</i>	<i>Capacité de stockage (J/K/m²)</i>
<i>Plancher linoléum - poutrelles hourdis</i>			<i>164 200</i>
linoléum	1	13 994	5 440
chapes de béton	9	94 290	158 760
<i>Plancher terre cuite sur mortier</i>			<i>148 726</i>
terre cuite	2,3	58 650	31 395
mortier de chaux	5	68 816	75 600
gravier	2,7	44 756	41 731

Tableau 5 - inertie d'absorption du plancher bas sur les premiers 10 cm

On constate que, contrairement aux hypothèses d'inertie qui ont guidé nos choix, le mode constructif le plus inerte du point de vue des murs est finalement le béton-ITE car la couche de béton a une capacité de stockage plus élevée que le moellon du fait de ses plus fortes épaisseur, densité et chaleur spécifique. En revanche les constructions bois-paille et « 2226 » confirment bien leur inertie.

La construction frugale « 2226 » est celle qui a la plus forte effusivité sur sa couche intérieure, mais il ne faut pas négliger la faible épaisseur de cette couche et la faible effusivité de la couche suivante qui ne crée pas d'aspiration du flux thermique. On peut donc s'attendre à ce que la plus forte effusivité de la couche interne de la construction frugale soit donc finalement altérée par la couche suivante, contrairement à la construction vernaculaire provençale ou béton-ITE. Enfin on peut noter que la couche d'enduit chaux-chanvre appliquée sur les murs de la construction vernaculaire, bien que relativement isolante, ne fait pas barrage à l'inertie d'absorption grâce à son effusivité assez élevée.

Pour ce qui est du plancher bas, la capacité inertielle est sensiblement la même quel que soit le mode constructif, mais la différence notable se situe au niveau de la couche de linoléum, faiblement effusive par rapport à la terre cuite, qui fait barrage à l'inertie d'absorption du béton. Globalement la construction vernaculaire provençale va finalement avoir une inertie comparable à celle de la construction courante en béton.

2.5 Les hypothèses de modélisation

2.5.1 Fichier de données météorologiques

Comme indiqué au paragraphe 1.5, le bâtiment a été relocalisé à Aix-en-Provence pour le placer dans un environnement météorologique plus difficile.

Le fichier de données météorologiques de base que nous avons choisi est celui de l'année 2015 qui a vu des extrêmes en hiver comme en été. La moyenne annuelle des températures de cette année de base est de 14,36°C. Elle est supérieure de +1,04°C à celle de l'année 2005 qui sert de référence aux données d'augmentation de température (cf. Tableau 2 du paragraphe 1.5). Cet écart de référence a donc été déduit des augmentations appliquées aux données météorologiques.

Les fichiers de données météorologiques 2050 et 2100 ont été générés en appliquant les augmentations saisonnières. La température moyenne annuelle a été calculée pour vérifier l'adéquation aux hypothèses des scénarios RCP 2.6 (2050) et RCP 4.5 (2100).

Les autres indicateurs du fichier de données météorologiques : humidité relative, force et orientation du vent, irradiation solaire normale et diffuse, pression atmosphérique, couverture nuageuse et précipitations, n'ont pas été changés.

Enfin concernant l'année 2015, on relève que la semaine la plus froide de l'année est la semaine du 1^{er} au 7 février, semaine pendant laquelle un épisode pluvieux apparaît à partir du 3 février jusqu'à la fin de la semaine. La semaine la plus chaude se situe quant à elle du 19 au 25 juillet. Bien que les élèves ne soient pas censés se trouver en classe à cette période-là, nous avons décidé d'étendre la période d'occupation jusqu'au 23 juillet (cf. paragraphe suivant) pour déterminer le confort des usagers dans ces conditions les plus sévères.

Les fichiers 2050 et 2100 n'étant que le résultat d'une augmentation des températures, ce seront les mêmes semaines que nous observerons.

A partir des fichiers de données météorologiques, nous sommes également en mesure de déterminer les limites de confort d'été qui évoluent avec les moyennes journalières maximales.

Scénario	Référence 2015	Horizon 2050 (RCP 2.6)	Horizon 2100 (RCP 4.5)
Moyenne journalière maximale	27,67°C	28,50°C	29,66°C
Limite haute EN 15251 catégorie I	29,93°C	30,20°C	30,59°C
Limite haute EN 15251 catégorie II	30,93°C	31,20°C	31,59°C
Limite haute EN 15251 catégorie II + Givoni	32,93°C	33,20°C	33,59°C

Tableau 6 - évolution des limites de confort

Pour l'analyse des résultats, nous considérerons donc que les occupants sont en situation de confort acceptable lorsque la température intérieure est supérieure à la température minimale de la norme NF EN 15251, soit 20°C (cf. paragraphe 1.4.1), et inférieure à la limite haute en catégorie II + Givoni (33,59°C en 2100). Ces limites peuvent paraître extrêmes mais rappelons que nous sommes en présence d'usagers *actifs* (au sens de leur engagement) dans un bâtiment passif. Même si c'est loin d'être la règle générale aujourd'hui, il est nécessaire de tendre vers ce comportement pour lutter contre le réchauffement climatique.

Pour compléter ces données, nous avons analysé les répartitions des températures les plus basses et les plus hautes pour déterminer leur probabilité d'occurrence pendant l'année. C'est ce que reflètent les tableaux et les courbes de l'Annexe 4.

2.5.2 Usages

Concernant les usages, nous avons considéré un scénario unique composé des éléments suivants :

- ⇒ 20 enfants dans la classe avec un professeur ;
- ⇒ Présence entre 8h et 12h puis entre 14h et 17h, sauf entre le 24 juillet et le 30 août ;
- ⇒ Apport de chaleur d'un adulte : en hiver 83 W de chaleur sensible, 49 W de chaleur latente ; en été 71 W de chaleur sensible, 60 W de chaleur latente (source www.energieplus-lesite.be) ;
- ⇒ Apport de chaleur d'un enfant : 75% de celui d'un adulte ;
- ⇒ un ordinateur portable (80 W) et un vidéoprojecteur (40 W) dans la classe, utilisés 60% du temps.

Les bascules été/hiver des apports de chaleur des occupants se font au 1^{er} juin et 30 septembre.

2.5.3 Ventilation naturelle

Bien que ne disposant pas de système de commande automatique d'ouverture des fenêtres, pour modéliser le comportement des occupants qui vont ouvrir et fermer les fenêtres en fonction de la température intérieure, ou plus précisément de son écart à la température extérieure, et du taux de CO₂ dans la pièce, nous avons défini un scénario d'ouverture automatique avec les hypothèses suivantes :

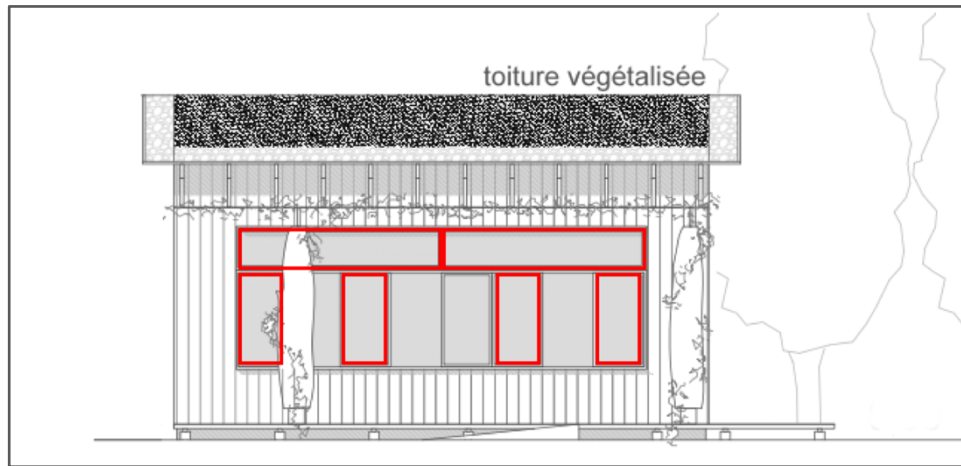
- Jusqu'au 1^{er} mars et à partir du 1^{er} décembre :
 - ⇒ Entre 8h et 17h, ouverture des fenêtres si la température intérieure est supérieure à 26°C ;
- Du 1^{er} au 31 mars et du 16 octobre au 1^{er} décembre :
 - ⇒ Entre 8h et 17h, ouverture des fenêtres si la température intérieure est supérieure à 25°C ;

- Du 1^{er} au 30 avril :
 - ⇒ Entre 8h et 17h, ouverture des fenêtres si la température intérieure est supérieure à 23,5°C ;
- Du 1^{er} mai au 15 octobre :
 - ⇒ Entre 8h et 17h, ouverture des fenêtres si la température intérieure est supérieure à 22°C et à la température extérieure ;
 - ⇒ Entre 17h et 8h, ouverture des fenêtres si la température intérieure est supérieure à 20°C et à la température extérieure, et la température extérieure est supérieure à 16°C.

Avec un tel scénario, les ouvertures de fenêtres pour l'apport d'air neuf en cas du pic de CO₂ ne sont pas représentées. Cependant, ayant observé qu'elles conduisaient à des ouvertures de fenêtres en toute saison, permettant ainsi une ventilation hygiénique, nous considérons que ces hypothèses sont acceptables.

Il faut noter que nous avons fait l'hypothèse que la fenêtre située sur la façade est ne s'ouvrirait pas.

Par ailleurs, nous avons simplifié le modèle des menuiseries et considéré que toute la surface de la fenêtre pouvait s'ouvrir en mode oscillo-battant jusqu'à un angle de 20°. C'est assez différent des menuiseries réelles du projet dont seules quelques portions des fenêtres sont ouvrantes. Les parties ouvrantes sont encadrées en rouge dans la Figure 14, les parties hautes en oscillo-battant sur un tiers de la hauteur et les parties basses en coulissant ou ouvrant à la française.



*Figure 14 - ouvrants des fenêtres de l'école Steiner Waldorf,
source D. Farhi et S. Guémené*

En réalité cet écart de modélisation, qui se traduit par une surface ouvrante du modèle de 8% inférieure à la surface réelle pour la fenêtre nord, et de 1% supérieure pour la fenêtre sud, sera appliqué à tous les modes constructifs qui seront comparés entre eux, et non pas par rapport au comportement réel du bâtiment du projet. Il n'a donc pas d'importance. En revanche, il est plus important de vérifier qu'il ne vient pas grever la capacité de ventilation du bâtiment.

En pratique, c'est la plus petite fenêtre qui détermine la capacité de ventilation réelle du bâtiment dans le cas d'une ventilation traversante. Nous avons donc estimé celle-ci pour la fenêtre nord en fonction de l'angle d'ouverture et de la vitesse du vent entre 0,05 m/s et 1 m/s (cf. Figure 15). Il en résulte une capacité de renouvellement de 3 volumes par heure à 20° d'ouverture dès 0,05 m/s de vent, et jusqu'à plus de 60 volumes par heure à 1 m/s. Or il est communément admis qu'il est nécessaire d'assurer un taux de renouvellement d'air d'au moins 4 à 8 volumes par heure (Salomon et Aubert 2005) pour la surventilation nocturne. Les ouvertures modélisées permettent donc des débits suffisants pour assurer une surventilation efficace dès 0,1 m/s de vent (un souffle d'air en quelque sorte) et 15° d'ouverture, et peu différents des débits que permettent les ouvertures réelles du projet.

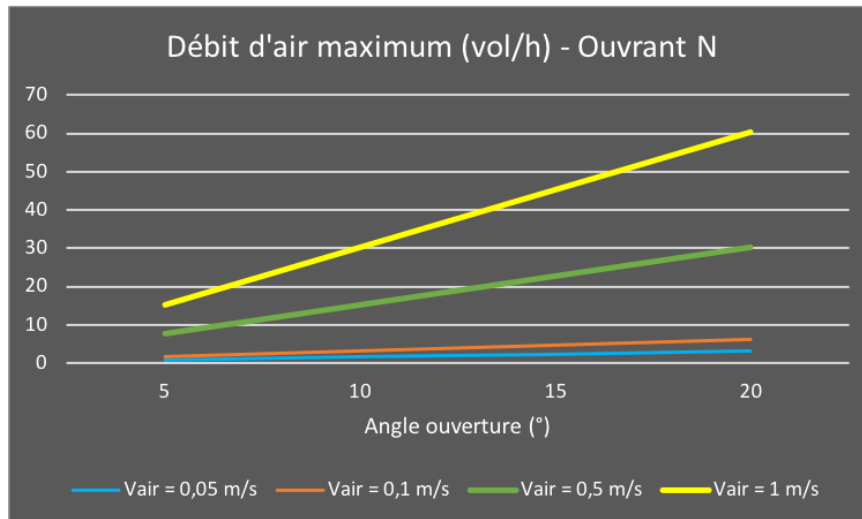


Figure 15 - débit d'air maximum de la fenêtre nord

2.5.4 Éclairage

Le bâtiment ne compte aucun éclairage artificiel. Nous n'avons donc pas considéré d'apport interne dû à l'éclairage artificiel.

2.5.5 Treille

La treille est délicate à modéliser. Elle apporte une protection solaire variable en fonction de la période de l'année. Il faudrait donc pouvoir modéliser un brise-soleil ne coupant qu'un certain pourcentage du flux solaire, variable en fonction du temps, par exemple :

- ⇒ 10% jusqu'à début mars,
- ⇒ 20% jusqu'à mi-mai,
- ⇒ 50% jusqu'à début juillet,
- ⇒ 90% jusqu'au la mi-septembre,
- ⇒ 70% en début d'automne,
- ⇒ Puis très rapidement à la perte des feuilles de la végétation, retour à 10%.

Une telle modélisation n'étant pas possible avec VE, nous avons choisi de modéliser le comportement de la treille avec trois modèles différents comme illustré sur la figure ci-dessous.

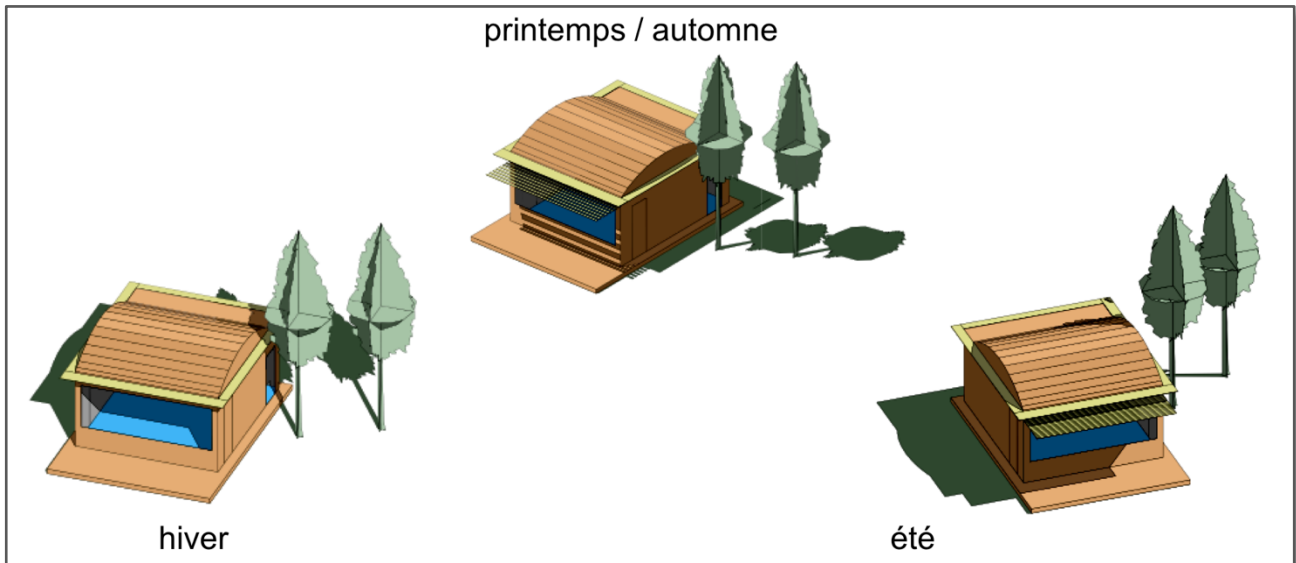


Figure 16 - les trois modèles de la treille

En hiver, jusqu'au 15 mai, nous utilisons un modèle sans treille. Pour les intersaisons, de mi-mai au 1^{er} juillet, puis du 15 au 30 septembre, nous utilisons un modèle avec une treille ajourée laissant passer 50% du flux solaire (on voit ci-dessus l'ombre ajourée de la treille sur la façade sud). Et enfin en été, du 1^{er} juillet au 15 septembre, nous utilisons un modèle avec une treille coupant complètement le flux solaire.

Pour constituer un fichier de résultat annuel, nous avons donc assemblé les résultats des trois modèles correspondant à leur période d'utilisation respective.

2.5.6 Étanchéité à l'air / Infiltrations

Les hypothèses d'étanchéité à l'air que nous avons prises sont celles du label Passivhaus, soit 0,6 h⁻¹ mesurés sous une dépression de 50 Pa. En appliquant la norme NF EN 13790 qui permet de déterminer un débit moyen annuel d'infiltration en fonction de la configuration du site, de l'exposition du bâtiment aux vents dominants et de l'écart de débit de la ventilation, nous avons pu déterminer le débit d'infiltration appliqué au modèle :

$$Q_{inf} = \frac{V \times n_{50} \times e}{1 + \frac{f}{e} \times \left(\frac{\Delta Q_{ventil}}{V \times n_{50}} \right)^2}$$

Dans notre cas, il n'y a pas de ventilation mécanique donc le dénominateur vaut 1 et le coefficient e a été choisi à 0,07 (site modérément abrité en exposition multiple), ce qui nous donne un débit d'infiltration égal à :

$$Q_{inf} = 146,2 \times 0,6 \times 0,07 = 6,14 \text{ m}^3/h$$

Il faut cependant noter que la norme NF EN 13790 est désormais obsolète depuis décembre 2017. Elle est remplacée par la norme NF EN 52016-1 qui précise que les calculs d'infiltration ne doivent plus s'effectuer sur la base d'un débit annuel moyen mais d'un calcul au pas horaire en fonction des conditions météorologiques de l'instant. Notre choix de rester sur la norme NF EN 13790 est motivé par le logiciel de STD⁵ que nous utilisons qui n'applique pas encore le nouveau mode de calcul mais se base encore sur un débit annuel moyen.

2.5.7 Consignes

Pour les simulations avec systèmes permettant de mesurer les besoins de chauffage et de climatisation, les consignes ont été fixées à :

- ⇒ Chauffage : 20°C,
- ⇒ Climatisation : 28,5°C.

De façon simpliste, elles s'appliquent pendant toute la journée et toute la semaine hormis entre le 24 juillet et le 30 août.

Ces consignes sont identiques aux limites moyennes de confort d'hiver et d'été de la norme EN 15251, 20°C et ~28,6°C en 2100 compte-tenu des valeurs du Tableau 6 de la page 41. Leur but n'est pas de faire une mesure des besoins de chauffage et climatisation en valeur absolue mais de permettre une comparaison entre les différents modes constructifs et entre les différentes années. Nous avons donc volontairement choisi des valeurs relativement proches des exigences de confort actuelles de la part des usagers.

2.6 Les résultats demandés

Pour les comportements que nous souhaitons analyser peu de résultats sont finalement nécessaires. Les signatures bioclimatiques n'exigent que la température intérieure en

⁵ VE dans sa version 2017, la version 2018 prend probablement en compte le nouveau mode de calcul

fonction de la température extérieure, heure par heure. Et pour déterminer les besoins énergétiques du bâtiment en fonction de ses modes constructifs, seuls les besoins de chauffage et de climatisation sont nécessaires.

A partir de ces seuls indicateurs, nous sommes capables d'obtenir, pour l'étude du confort :

- ⇒ Les signatures bioclimatiques brutes,
- ⇒ Les signatures bioclimatiques nettes (cf. paragraphe 1.2),
- ⇒ Les courbes de température pour la semaine la plus chaude et la semaine la plus froide,
- ⇒ Les histogrammes de répartition des températures les plus hautes et les plus basses,

Et pour l'étude des besoins :

- ⇒ Les valeurs des besoins de chauffage et climatisation.

Analyse des résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus et les premières conclusions que l'on peut en tirer. Nous commencerons par l'analyse du confort en dehors de tout système, ce qui est notre axe principal s'agissant de l'étude de constructions passives. Puis nous regarderons les consommations pour nous placer dans un cas plus général d'occupants plus exigeants en matière de confort. Forts des observations sur la base de ces premiers résultats, nous présenterons alors les variantes que nous avons étudiées. Enfin nous finirons par l'analyse de critères supplémentaires, parfois moins techniques mais tout aussi importants dans le contexte de la construction durable.

3.1 Analyse du confort

3.1.1 Signatures bioclimatiques

L'analyse du confort s'appuie sur les signatures bioclimatiques des différents modes constructifs du bâtiment dont un exemple est donné en Figure 17 pour en illustrer la lecture.

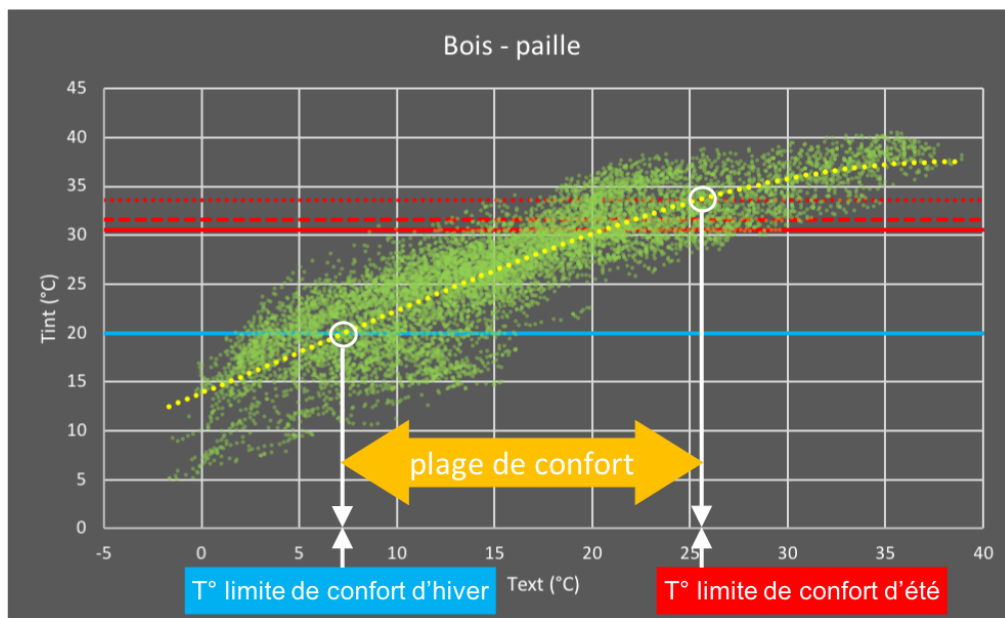


Figure 17 - exemple de lecture de signature bioclimatique

Sur ces signatures sont représentées les différentes limites de confort de la norme NF EN 15251 calculées pour l'année 2100 comme indiqué au paragraphe 2.5.1 :

- ⇒ Trait bleu continu : limite basse, c'est ce qui va permettre de déterminer la température extérieure limite de confort d'hiver ;
- ⇒ Trait rouge continu : limite haute catégorie I à titre indicatif ;
- ⇒ Trait rouge pointillés larges : limite haute catégorie II ;
- ⇒ Trait rouge pointillés : limite haute catégorie II + Givoni, c'est ce qui va permettre de déterminer la température extérieure limite de confort d'été.

La plage de confort d'un bâtiment se définit alors entre la limite de confort d'hiver et celle de confort d'été.

3.1.1.a Signatures brutes

La Figure 18 ci-dessous présente les signatures bioclimatiques brutes des 4 modes constructifs pour l'année 2100.

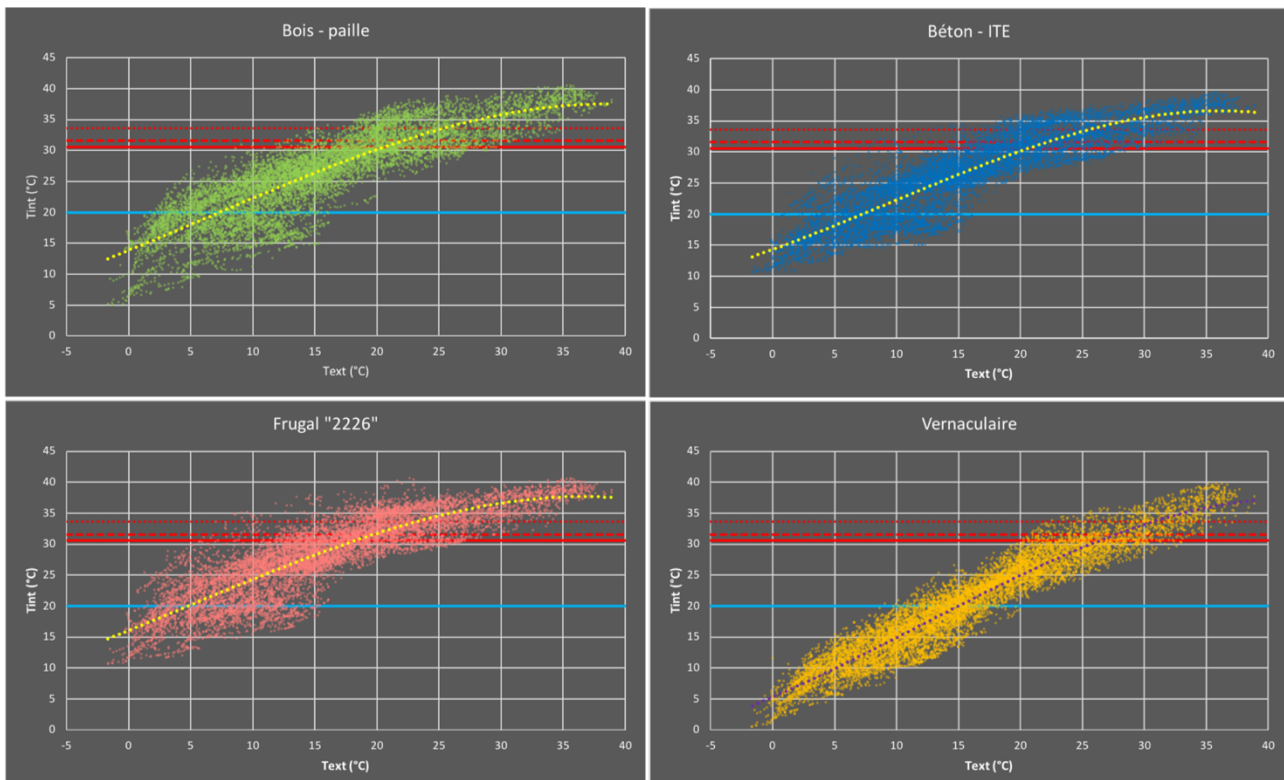


Figure 18 - signatures bioclimatiques brutes en 2100

On peut déjà faire quelques observations à leur lecture :

1. Les constructions bois-paille et béton-ITE ont des signatures très similaires avec une limite de confort d'hiver autour de 7,5°C environ de température extérieure, et une limite de confort d'été à ~25°C.
2. La signature de la construction frugale est décalée vers la gauche avec une limite de confort d'hiver dès 5°C, mais en contrepartie une limite de confort d'été à tout juste 23°C environ.
3. A contrario, la construction vernaculaire est décalée vers la droite avec une limite de confort d'hiver à 15°C et une limite de confort d'été à ~31°C, ce qui confirme l'adage que la construction vernaculaire provençale était conçue pour le confort d'été.
4. Les plages de confort des différentes constructions sont plus ou moins homogènes de 17,5°C pour toutes les constructions sauf la vernaculaire qui a une plage plus réduite de 16°C.
5. La dispersion des points de la signature autour de sa courbe d'interpolation semble être représentative de l'inertie du bâtiment : plus l'inertie est forte, plus les points sont concentrés, et inversement les points très dispersés (par exemple de la construction bois-paille) semblent être le signe d'une faible inertie (pas d'amortissement des variations de température).

Rappelons enfin que les signatures brutes sont déterminées sans surventilation du bâtiment, ce qui explique des limites de confort d'été relativement basses.

3.1.1.b Signatures nettes

Observons maintenant le comportement du bâtiment en usage réel, c'est-à-dire avec ses occupants et la ventilation naturelle.

Dès lors qu'on introduit les élèves dans la classe, ils génèrent des apports internes (estimés ici à ~1,5 kW) qui vont apporter un gain notable de confort en hiver. Dans notre modèle cet effet est cependant gommé par les hypothèses de ventilation (cf. paragraphe 2.5.3) qui vont limiter la température intérieure en journée.

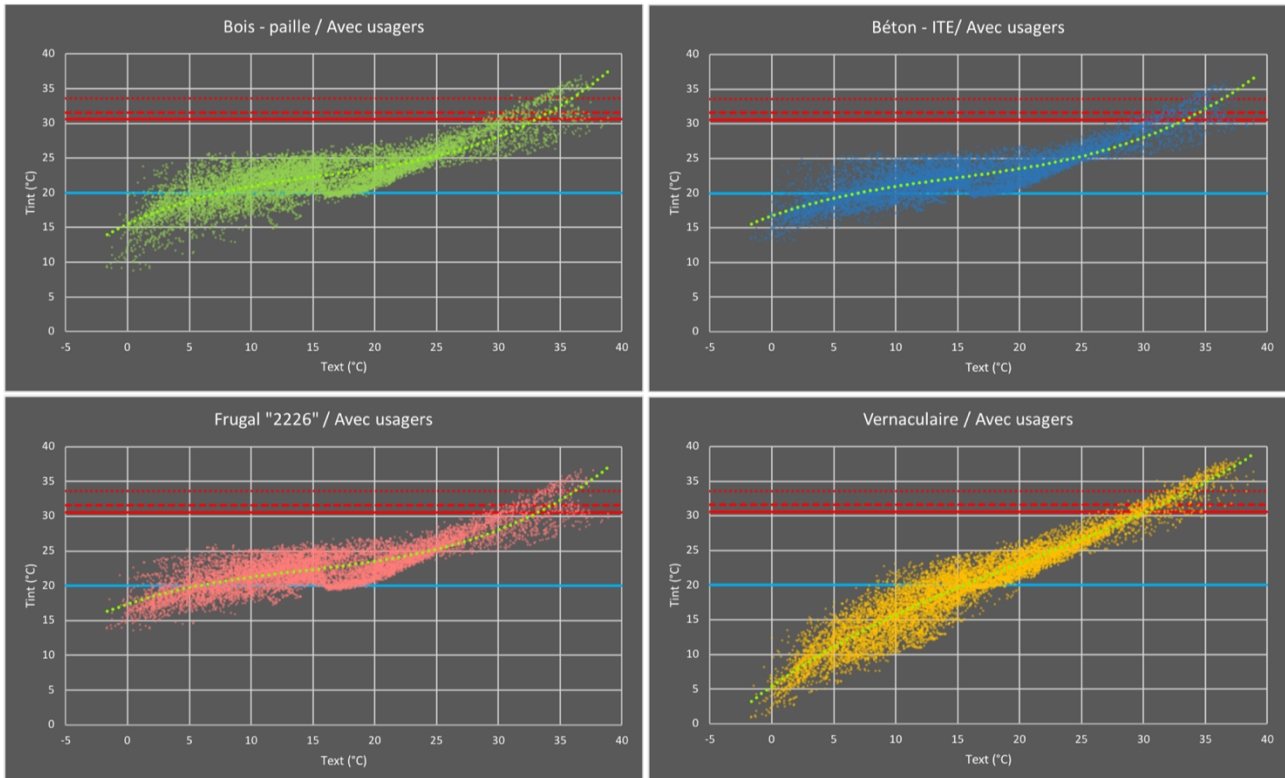


Figure 19 - signatures bioclimatiques nettes en 2100

Sur les signatures nettes de la Figure 19 ci-dessus, cela se traduit par une limite de confort d'hiver qui n'évolue pratiquement pas, et une courbe de signature qui s'aplatit jusqu'à une température extérieure d'environ 20-25°C. On peut également remarquer une élévation et une concentration des points qui sont plus resserrés autour de la courbe d'interpolation. C'est l'effet amortisseur des usagers par leurs apports internes et leur comportement (peut-on parler de l'inertie des occupants ?).

Par contre, le gain que la ventilation par ouverture de fenêtres permet d'obtenir en confort d'été est très visible. La limite de confort d'été s'est ainsi déplacée vers la droite pour tous les modes constructifs, quoique plus modérément pour la construction vernaculaire.

Ainsi le mode constructif qui se comporte le mieux en présence d'occupants et avec de la ventilation naturelle est la construction frugale. Sa plage de confort s'étend en effet désormais de 5°C à 37°C. Le béton-ITE se comporte aussi relativement bien avec une plage de confort s'étendant de 7,5°C à ~37,5°C. Le bois-paille n'est pas très loin avec une plage de ~7,5°C à 37°C. Nous avons donc affaire à trois modes constructifs qui offrent une très

grande plage de confort passif⁶, surtout si l'on tient compte, sur la base des données de l'Annexe 4, du fait qu'en 2100 les températures ne dépasseront les 37°C que pendant 20 heures (0,2% de l'année), et seront inférieures à 7°C pendant 1 387 heures (15,8% de l'année, mais en réalité seulement 349 heures pendant les horaires de présence des usagers, soit ~10% de ce temps de présence). Ce n'est par contre pas le cas de la construction vernaculaire, comme l'on pouvait s'y attendre car telle que nous l'avons définie, avec une trop faible isolation et du simple vitrage, elle ne présente aucune des caractéristiques permettant de répondre aux enjeux de la construction passive. De plus les ouvertures au sud sont probablement trop grandes pour garantir le confort d'été que nos ancêtres obtenaient avec ce type de construction. Ce sont d'ailleurs ces observations qui nous ont amenés à étudier une variante de ce mode constructif que nous verrons au paragraphe 3.1.4.a.

Les courbes suivantes (Figure 20 et Figure 21) permettent de mieux comprendre ce qui se passe effectivement, tant en hiver qu'en été.

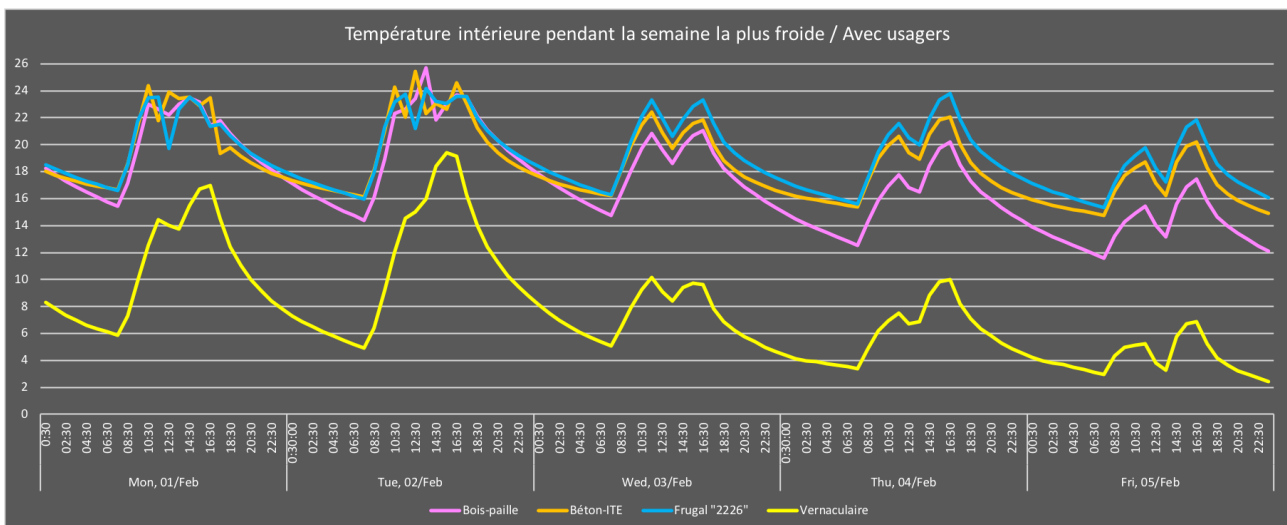


Figure 20 - courbes de température intérieure pendant la semaine la plus froide en 2100

Pendant la semaine la plus froide, on y voit bien le défaut d'isolation de la construction vernaculaire qui perd tout le bénéfice des apports solaires et internes pendant la nuit. Pour les trois autres modes constructifs, on retrouve les effets des consignes de ventilation dans les oscillations à la mi-journée. L'effet de l'inertie moindre de la construction bois-paille se

⁶ Sans brasseur d'air la limite de confort d'été serait à ~34,5°C ce qui est encore très satisfaisant.

matérialise dans l'amplitude des oscillations jour-nuit et la dérive qui s'amorce à partir de la journée nuageuse du 3 février. On voit bien que dans ces conditions, la construction frugale est celle qui se comporte le mieux, probablement grâce à son isolation renforcée qui évite la perte de calories pendant la nuit ou les journées nuageuses.

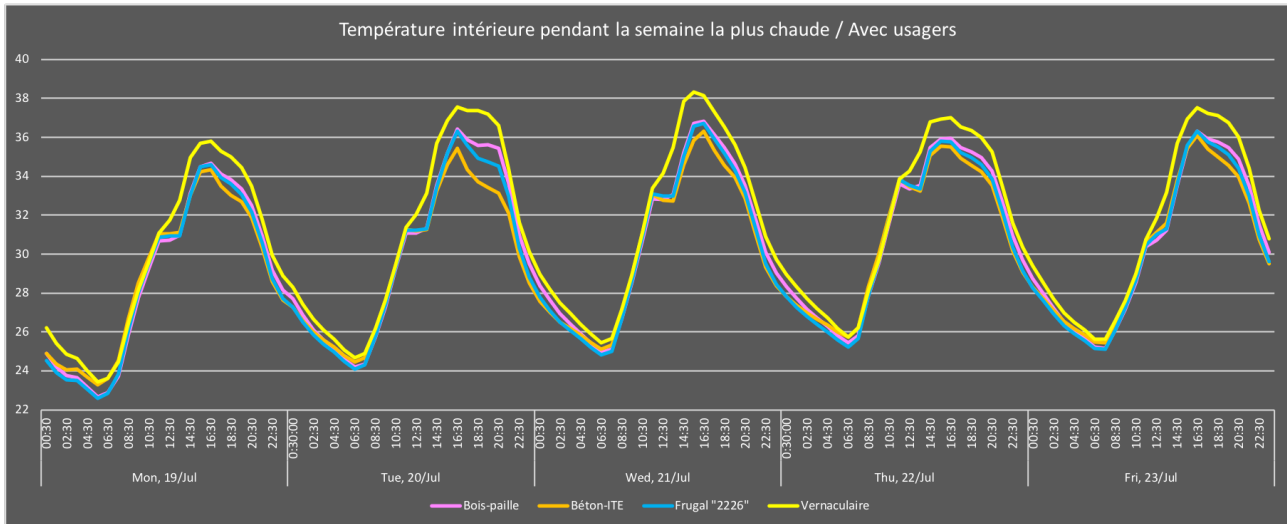


Figure 21 - courbes de température intérieure pendant la semaine la plus chaude en 2100

Pendant la semaine la plus chaude, l'inertie de la construction béton-ITE permet d'amortir le pic de chaleur de milieu de journée (journée du 20 juillet), mais limite également le refroidissement du bâtiment pendant la nuit. On peut le constater dans la nuit du 18 au 19 juillet et cela se traduit par une température maximale en journée quasi-identique à celle des autres modes constructifs passifs. Il faut noter que les écarts de température entre les différents modes constructifs, hormis le vernaculaire, sont ici très faibles, confirmant une des conclusions du guide du bâtiment frugal qui dit que « les bâtiments sont tous logés à la même enseigne face aux surchauffes, qu'ils soient peu ou très isolés » (Bornarel et al. 2016).

On voit en effet que dans tous les cas la classe sera inconfortable pendant l'après-midi avec des températures entre 32°C et 36°C. Dans ces conditions, il vaudrait mieux adapter les usages en décalant les horaires de cours plutôt que de chercher à rendre le bâtiment confortable par des équipements de climatisation. Rappelons cependant que le cas est ici assez théorique puisqu'en pratique il n'y a pas cours à cette période du mois de juillet.

Pour la construction vernaculaire, on constate le même effet de l'inertie de limitation de la décharge nocturne avec en plus l'effet très marqué du simple vitrage qui provoque une montée en température plus importante pendant la journée.

3.1.2 Statistiques de confort

On ne peut pas mener une analyse de confort sans analyse statistique de probabilité d'inconfort. Les histogrammes de répartition de la température intérieure des deux figures ci-dessous permettent cette analyse.

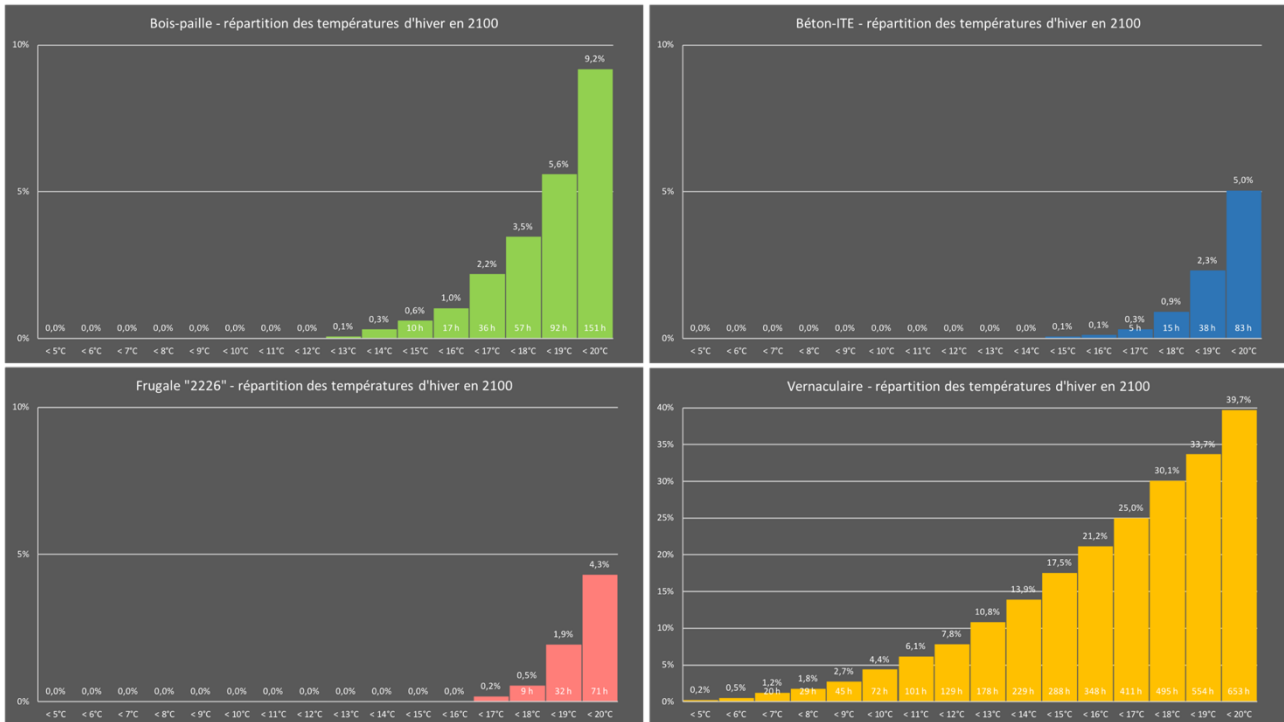


Figure 22 - répartition de la température intérieure en hiver en 2100

En hiver tout d'abord, si l'on prend une température de base de confort d'hiver à 20°C comme le suggère la norme EN 15251 (cf. paragraphe 2.5.1), on relève alors les très bonnes performances des constructions béton-ITE et frugale avec 83 heures en situation d'inconfort en période d'occupation (5% du temps d'occupation). La construction frugale s'avère cependant un peu meilleure que le béton-ITE. La construction bois-paille montre ici des performances un peu moins bonnes avec un peu moins de 2 fois plus d'heures d'inconfort (151 heures, soit 9,2%). Quant à la construction vernaculaire, on mesure ici tout l'inconfort qu'elle peut procurer dans ces conditions.



Figure 23 - répartition de la température intérieure en été en 2100

L'analyse de la répartition des températures les plus élevées confirme les observations des signatures nettes. Les 3 modes constructifs passifs donnent des résultats quasiment identiques avec environ 50 heures au-dessus de 33°C (3,2% du temps d'occupation) et environ 100 heures au-dessus de 30°C (6,1% du temps d'occupation). Contrairement à la situation hivernale, la construction vernaculaire se rapproche ici des autres constructions puisqu'elle comptabilise 69 heures au-dessus de 33°C (4,2%), ce qui fait quand même ~40% de plus que les autres constructions.

3.1.3 Sensibilité aux évolutions climatiques

Pour compléter cette analyse, il nous a semblé intéressant d'observer comment les évolutions du climat avaient impacté le confort des occupants. Autrement dit, y a-t-il un mode constructif qui réagit mieux aux évolutions du climat ?

Pour cela, nous avons mesuré l'évolution de la température moyenne pendant les semaines la plus froide et la plus chaude entre 2015 et 2100. Ces mesures sont reproduites dans les tableaux ci-dessous. Les modes constructifs sont triés par température moyenne décroissante pour la semaine la plus froide, et croissante pour la semaine la plus chaude.

Mode constructif	T°moy 2015	T°moy 2050	T°moy 2100	2100/2015
Frugal "2226"	18,41	18,28	19,17	4,1%
Béton ITE	15,71	15,59	16,34	4,1%
Bois-paille	16,31	16,04	17,23	5,7%
Vernaculaire	6,30	5,95	7,70	22,2%

Tableau 7 - évolution de la température moyenne pendant la semaine la plus froide

Mode constructif	T°moy 2015	T°moy 2050	T°moy 2100	2100/2015
Béton ITE	27,82	28,70	29,92	7,54%
Frugal "2226"	27,89	28,74	29,96	7,39%
Bois-paille	28,07	28,93	30,15	7,39%
Vernaculaire	28,87	29,77	31,01	7,43%

Tableau 8 - évolution de la température moyenne pendant la semaine la plus chaude

Le bâtiment le plus résilient devrait être celui dont la température moyenne pendant la semaine la plus froide a connu la plus forte augmentation, et inversement pour la semaine la plus chaude.

Selon cette hypothèse, en dehors de la construction vernaculaire dont on sait qu'elle est trop inconfortable (ce qui se reflète par son classement dans le tableau), c'est la construction bois-paille qui est la plus résiliente. Mais on ne peut pas faire abstraction de son classement en avant-dernière position dans ces tableaux. Même si l'écart est presque insignifiant en été, un écart de $\sim 2^{\circ}\text{C}$ sur une température moyenne en hiver est très significatif.

3.1.4 Étude de variantes

3.1.4.a Vernaculaire à isolation renforcée au niveau passif

La première conclusion que l'on peut tirer de ces analyses de confort est que le mode de construction vernaculaire amélioré tel que nous l'avons envisagé ne peut pas se comparer aux autres modes constructifs. Ses caractéristiques d'isolation sont trop éloignées des exigences d'une construction passive et cela se traduit dans toutes les analyses. Nous avons donc décidé d'étudier une variante de ce mode constructif avec des performances plus proches de celles des autres. C'est le mode constructif « Vernaculaire provençal à isolation renforcée » présenté en Annexe 3 que nous qualifierons de vernaculaire à isolation renforcée au niveau passif. Ses performances sont légèrement inférieures à celle du projet d'origine mais nous souhaitons rester dans quelque chose de réaliste et non pas théorique.

Les deux principales différences par rapport à la construction vernaculaire étudiée précédemment sont :

1. L'isolation par l'extérieur ;
2. L'utilisation d'un véritable isolant à base de laine de bois à la place d'un enduit correcteur d'isolation.

Les caractéristiques d'inertie des murs ainsi redéfinis (cf. Tableau 9) ne sont pas très différentes des précédentes. Seule la couche de plâtre est légèrement plus effusive que l'enduit correcteur d'isolation chaux-chanvre, ce qui réduit un peu plus le frein à l'absorption de la chaleur par les moellons.

Mode constructif des murs (intérieur → extérieur)	Épaisseur (cm)	Effusivité ($W.h^{1/2}/m^2/K$)	Capacité de stockage ($J/K/m^2$)
Vernaculaire provençal à isolation renforcée			182 560
plâtre	4	24 000	40 000
moellon	11	83 656	142 560

Tableau 9 – inertie d'absorption de la construction vernaculaire à isolation renforcée

Sa signature bioclimatique nette est reproduite en Figure 24.

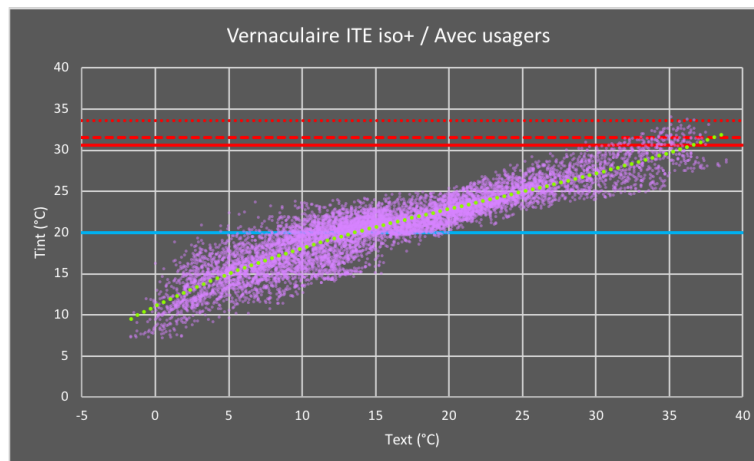


Figure 24 - signature nette de la construction vernaculaire à isolation renforcée en 2100

Elle révèle une nette amélioration de la plage de confort avec une limite de confort d'hiver qui est descendu à $\sim 12,5^{\circ}C$, mais surtout une limite de confort d'été qui semble aller jusqu'à $40^{\circ}C$, résultant probablement de la combinaison d'une plus forte inertie d'absorption des

murs et d'une meilleure isolation des murs, de la toiture et surtout des menuiseries à double vitrage limitant fortement les apports solaires.

3.1.4.b Bois paille isolation renforcée au niveau frugal

La seconde observation que nous avons pu faire jusqu'ici est que la construction frugale se comportait bien mieux que la construction bois-paille, dont elle se différencie au niveau de l'isolation, bien meilleure (pour rappel : R des parois de 8,8 m².K/W pour la construction « 2226 » et 5,2 m².K/W pour le bois-paille, cf. Annexe 2), et de l'inertie. Pour déterminer lequel de ces deux facteurs était la raison de ces meilleurs résultats, nous avons donc étudié une construction bois-paille à isolation renforcée au niveau de la construction frugale dont les caractéristiques sont données en Annexe 3. En réalité, on reprend les mêmes plancher bas, toiture et menuiseries que la construction frugale mais avec les murs de la construction bois-paille auxquels on a adjoint une épaisseur de 14 cm de laine de bois à l'extérieur de la paille. La différence avec la construction frugale ne se situe donc plus qu'au niveau de l'inertie d'absorption car l'ajout d'un isolant à l'extérieur n'a pas modifié l'inertie des murs de cette construction.

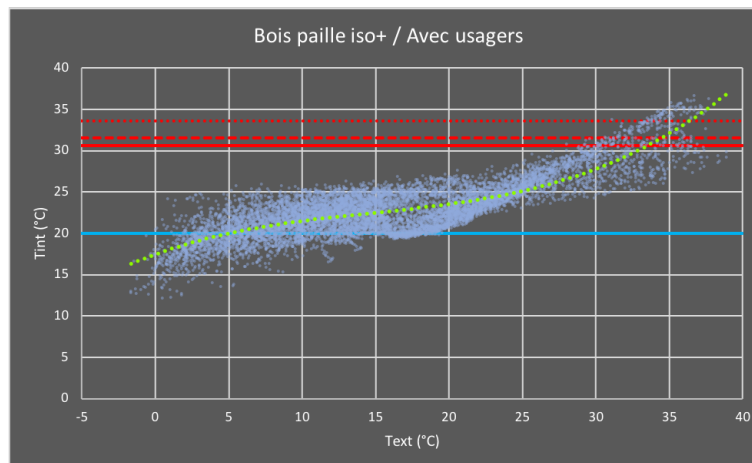


Figure 25 - signature nette de la construction bois-paille à isolation renforcée en 2100

La signature nette de la Figure 25 fait apparaître un comportement a priori aussi bon que la construction frugale avec une plage de confort de 05°C à 37°C.

3.1.4.c Analyses comparatives

Les courbes de l'Annexe 5 confirment ce que révèlent les signatures. Les comportements des variantes se retrouvent dans les courbes de température des semaines plus froide et plus chaude, ainsi que dans les statistiques de confort :

- ⇒ La construction vernaculaire à isolation renforcée présente le meilleur potentiel de confort d'été, mais son isolation légèrement inférieure la rend encore trop vite inconfortable en hiver ;
- ⇒ La construction bois-paille à isolation renforcée se comporte pratiquement comme la construction frugale, à quelques petites différences près, notamment en été, dues à la différence d'inertie.

3.1.5 Conclusions

Les études de confort des quatre modes constructifs en 2100 à Aix-en-Provence font ressortir trois modes constructifs présentant des performances très bonnes : le bois-paille, le béton-ITE et le frugal « 2226 ». Pour ces trois modes constructifs, d'après leur signature bioclimatique nette, en 2100, il sera possible de se passer de chauffage dès que la température extérieure sera entre 5°C et ~7,5°C. Et ces modes constructifs resteront confortables l'été jusqu'à une température extérieure d'environ 37°C, en partie grâce à la ventilation naturelle et aux brasseurs d'air.

En se basant sur les histogrammes de répartition de la température intérieure du paragraphe 3.1.2, on constate que ces modes constructifs ne nécessiteraient qu'entre 70 et 150 heures de chauffage et ~50 heures de climatisation en période d'occupation. On comprend aisément que pour de si courtes périodes d'utilisation des solutions alternatives de chauffage et climatisation soient recherchées.

Si l'on regarde dans les détails, entre ces trois modes constructifs, le frugal « 2226 » est celui qui se comporte le mieux l'hiver, alors que le béton-ITE est celui apportant un confort d'été très légèrement meilleur que les autres, probablement du fait de sa plus grande inertie d'absorption. L'étude de la variante vernaculaire à isolation renforcée permet de confirmer que c'est l'inertie d'absorption qui est prépondérante pour le confort d'été, du moins tant

que la ventilation naturelle nocturne est capable de décharger toute la chaleur emmagasinée pendant la journée.

La variante bois-paille à isolation renforcée se comporte quant à elle globalement comme la construction frugale, très légèrement mieux en été, légèrement moins bien en hiver.

Ces conclusions ne sont cependant que partielles à ce niveau car il nous faut analyser les autres indicateurs avant de pouvoir conclure définitivement notre étude.

3.2 Analyse des besoins

Pour l'analyse des besoins nous avons désormais intégré les deux variantes introduites au paragraphe précédent. En appliquant donc les consignes définies au paragraphe 2.5.7 et en considérant des équipements de chauffage et climatisation sans limite de puissance, nous avons obtenu par simulation des valeurs indicatives des besoins de chauffage et de climatisation pour chaque mode constructif et pour les années 2015, 2050 et 2100. L'analyse qui suit est à la fois comparative et tendancielle.

Les valeurs présentées ne doivent pas être regardées dans l'absolu car les scénarios de chauffage et climatisation utilisés sont volontairement simplistes et ne tiennent pas compte des horaires de présence effective des occupants. Les résultats ne sont donc pas représentatifs de ce que seraient les véritables besoins. Par exemple **on ne peut pas comparer le besoin de chauffage du bâtiment obtenu à l'exigence du label Passivhaus que nous avons vue précédemment** (cf. paragraphe 1.1.2.b).

3.2.1 Besoin de chauffage

Le Tableau 10 ci-dessous présente les résultats obtenus pour le besoin de chauffage, triés par ordre croissant.

Mode constructif	2015	2050	2100	écart 2100/2015
Bois-paille iso+	11,3	11,4	8,9	-21,4%
Frugal "2226"	12,0	12,0	9,3	-22,0%
Béton ITE	14,6	14,7	11,0	-24,6%
Bois-paille	19,1	18,8	15,0	-21,4%
Vernaculaire ITE iso+	52,7	52,0	39,8	-24,6%
Vernaculaire	177,4	174,6	146,3	-17,5%

Tableau 10 - besoin de chauffage des différentes constructions en 2015, 2050 et 2100, en $kWh_{eu}/m^2/an$ pour une consigne de $20^{\circ}C$

On constate que le mode constructif ayant le besoin de chauffage le plus faible est le bois-paille à isolation renforcée, plus faible par exemple que la construction frugale qui pourtant, d'après l'analyse de confort, se comportait légèrement mieux en hiver. Il y a probablement un effet favorable de la construction légèrement moins inerte et donc plus réactive qui permet à la classe de monter plus rapidement en température.

Cependant on observe le phénomène inverse entre le bois-paille et le béton-ITE. On peut penser que l'inertie beaucoup plus importante du béton-ITE par rapport au bois-paille permet de compenser plus largement la moindre réactivité de ce mode constructif. L'écart d'inertie est moins important entre le frugal et le bois-paille à isolation renforcée.

Si l'on observe maintenant les écarts entre 2015 et 2100, on constate que le béton-ITE et le vernaculaire à isolation renforcée sont ceux qui réagissent a priori le plus favorablement au changement climatique puisque ce sont ceux pour lesquels la baisse de besoin de chauffage est la plus forte entre 2015 et 2100. Mais les différences constatées sur ces pourcentages de baisse de besoin de chauffage sont faibles, et le besoin de chauffage en 2100 du béton-ITE reste quand même ~23% supérieur à celui de la construction bois-paille à isolation renforcée.

Sans surprise, on peut enfin noter l'écart entre la construction vernaculaire et celle dont l'isolation a été renforcée. Le besoin de chauffage a été divisé par plus de trois, mais il reste quand même plus de quatre fois supérieur à celui de la construction la plus performante.

3.2.2 Besoin de climatisation

Le Tableau 11 ci-dessous présente les résultats pour le besoin de climatisation, triés par ordre croissant.

Mode constructif	2015	2050	2100	écart 2100/2015
Vernaculaire ITE iso+	1,0	1,9	3,8	+265,5%
Béton ITE	3,2	4,4	7,0	+120,8%
Frugal "2226"	3,6	4,7	7,3	+105,5%
Bois-paille iso+	3,8	5,0	7,5	+98,9%
Bois-paille	4,4	5,8	8,8	+99,3%
Vernaculaire	16,4	21,1	30,2	+83,3%

Tableau 11 - besoin de climatisation des différentes constructions en 2015, 2050 et 2100, en kWh_{eu}/m²/an pour une consigne de 28,5°C

On retrouve les mêmes résultats que ceux de l'analyse de confort. La construction la plus performante en confort d'été est celle qui a le besoin de climatisation le plus faible.

En revanche, en dehors du vernaculaire, celui qui a l'augmentation du besoin de climatisation la plus faible entre 2015 et 2100 est la construction bois-paille à isolation

renforcée, suivie de la construction bois-paille dont le besoin de climatisation est quand même plus de 25% plus élevé que celui du béton-ITE.

3.2.3 Conclusions

Pour tirer des conclusions de cette analyse des besoins, nous avons déterminé le besoin total, somme des besoins de chauffage et de climatisation. Les résultats sont donnés dans le Tableau 12, triés par ordre croissant.

Par rapport aux conclusions de l'étude du confort on constate que la construction la moins énergivore est finalement la construction bois-paille à isolation renforcée. La consommation de la construction frugale « 2226 » qui vient juste après est 1,2% plus élevée.

Mode constructif	2015	2050	2100	écart 2100/2015
Bois-paille iso+	15,1	16,3	16,4	+8,6%
Frugal "2226"	15,5	16,7	16,6	+7,2%
Béton ITE	17,7	19,1	18,0	+1,4%
Bois-paille	23,5	24,6	23,8	+1,3%
Vernaculaire ITE iso+	53,8	53,9	43,6	-18,9%
Vernaculaire	193,8	195,7	176,5	-8,9%

Tableau 12 - besoins totaux des différentes constructions en 2015, 2050 et 2100, en $kWh_{eu}/m^2/an$

Mais les résultats sont globalement sans surprise puisqu'ils reflètent assez fidèlement les caractéristiques d'isolation des différentes constructions : les constructions les plus isolées sont celles qui ont les besoins les plus faibles. Il est cependant intéressant de noter qu'à isolation équivalente, le béton-ITE, grâce à son inertie, a des besoins plus faibles que le bois-paille, autant en hiver qu'en été.

Enfin ces résultats nous montrent que la construction qui réagit le plus favorablement au réchauffement climatique est la vernaculaire à isolation renforcée.

3.3 Étude de variantes

3.3.1 Autre conception architecturale : toiture 2 pentes sur espace tampon

Nous avons étudié une variante de conception inspirée de la construction vernaculaire provençale. Cette variante se base sur le principe d'un espace tampon sous forme de combles sous une toiture deux pentes (cf. Figure 26). Cet espace tampon est fermé et isolé en hiver, mais ouvert et ventilé pendant l'été. L'idée est de chercher une amélioration du confort d'été en évitant l'effet capteur de la toiture, comme indiqué par exemple dans le livre de S. Courgey et J.-P. Oliva. (Courgey et Oliva 2006).

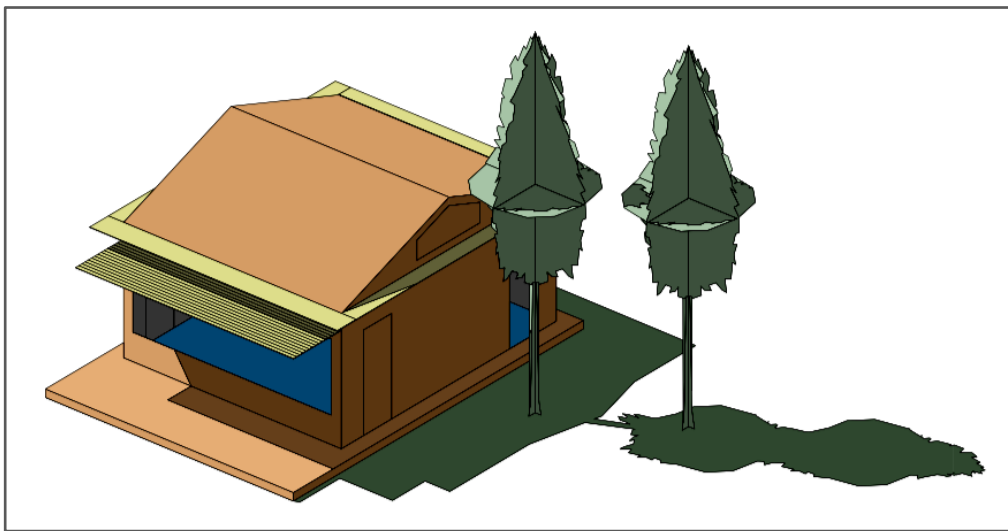


Figure 26 - modèle avec volume tampon sous toiture 2 pentes

Nous avons modélisé cette variante avec la toiture tuile de la construction vernaculaire et deux modes d'isolation du plancher des combles : par l'extérieur et par l'intérieur de la classe. Les détails des planchers sont fournis en Annexe 6.

En outre nous avons modélisé deux portes, de même isolation que les parois, sur les côtés qui sont :

- ⇒ Ouvertes du 15 avril au 15 octobre pour assurer la ventilation traversante du volume tampon des combles ;
- ⇒ Fermées le reste de l'année.

Enfin nous avons étudié cette variante sur deux modes constructifs, celui du projet initial, bois-paille, et la construction béton-ITE.

Les résultats de cette étude sont présentés en Annexe 7.

Comme en témoignent les Figure 36 et Figure 37, le bénéfice en hiver de ce volume tampon avec une isolation par l'extérieur est indéniable pour la construction bois-paille. Il est en revanche moins net pour la construction béton-ITE. Mais l'étude du besoin de chauffage (Tableau 17) montre cependant un bénéfice pour les deux modes constructifs et la même solution d'isolation par l'extérieur, qui se traduit par une diminution du besoin de chauffage de ~15 à 18%.

Par contre nous n'avons pas pu observer de bénéfice en été, que ce soit sur les courbes de température (Figure 38 et Figure 39), ou sur le besoin de climatisation (Tableau 18) qui montre même un effet inverse dans le cas de l'isolation par l'intérieur. Il est possible que la toiture végétalisée du projet initial se comporte déjà de manière très satisfaisante. En effet elle ne comporte pas de lame d'air pouvant s'échauffer bien au-delà de la température extérieure par un effet de serre comme l'évoquent S. Courgey et J.-P. Oliva. De plus la terre du toit apporte au contraire une inertie d'absorption très importante.

Ces résultats sont à prendre avec beaucoup de précautions. Il aurait fallu en effet consacrer plus de temps à cette étude de variante pour pouvoir éliminer toutes les incertitudes liées au modèle et en tirer des conclusions.

3.3.2 Impact de l'étanchéité à l'air

Nous avons effectué des simulations pour mesurer l'impact de l'étanchéité à l'air sur tous les modes constructifs, y-compris les variantes introduites au paragraphe 3.1.4, en prenant pour hypothèse 4 fois, 8 fois et 12 fois la valeur de référence du n_{50} de $0,6 \text{ h}^{-1}$ (soit un q_4 compris entre $\sim 0,13 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ et $\sim 1,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$). Le but de cette étude était d'analyser la sensibilité des modes constructifs à la qualité effective de réalisation ou à l'usage qui peuvent, pour différentes raisons (difficulté de réalisation, ouvertures intempestives de fenêtres, ...), dégrader les hypothèses de conception prises dans ce domaine.

Si les résultats montrent sans surprise une augmentation assez marquée de l'inconfort en hiver, ils ne révèlent en revanche aucune différence notable sur le comportement en été, et

ce pour tous les modes constructifs. Dans certains cas on note une petite augmentation de la température maximale de $\sim 0,2^{\circ}\text{C}$.

En regardant en détail les résultats de simulation, on observe en effet que les infiltrations n'apportent qu'un supplément de chaleur de 0,15 kW au débit d'infiltration maximum, alors que les apports solaires s'élèvent à 0,9 kW au mois de juillet, soit environ 6 fois plus, et les apports internes à 1,2 kW, soit 8 fois plus.

La valeur d'étanchéité à l'air que nous nous sommes fixés en hypothèse est ambitieuse mais atteignable, plus ou moins facilement selon les modes constructifs. Elle est couramment obtenue en construction passive et c'est d'ailleurs un des critères du label Passivhaus. Il est cependant intéressant d'observer que même avec un q_4 de $1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (valeur cible de la Réglementation Thermique 2012 dans le tertiaire) et des occupants qui ne se comportent pas comme prévu, l'impact sur le confort d'été sera négligeable.

3.4 Critères supplémentaires

3.4.1 Énergie grise

Pour aller plus loin dans l'analyse comparative des modes constructifs et permettre un choix éclairé aux architectes dans un contexte de construction durable, nous avons regardé l'impact en énergie grise des différentes solutions, en nous limitant cependant aux différences liées aux parois opaques.

Nous nous sommes aidés de l'outil REGIME (Réduire l'Énergie Grise et l'Impact des Matériaux sur l'Environnement) de l'Agence Locale de l'Énergie de Lyon (dev.ale-lyon.org). Cet outil permet « d'évaluer l'impact d'une paroi en termes d'énergie grise et d'émission de gaz à effet de serre pour la construction neuve ». Il s'appuie sur les informations de la base de données autrichienne Baubook (www.baubook.info).

Les résultats sont résumés dans le Tableau 13. Ils appellent quelques commentaires.

<i>Mode constructif</i>	<i>Énergie grise (kWh_{ep}/m²)</i>	<i>Émission de GES (kg CO₂ eq/m²)</i>
<i>Mur ossature bois + paille</i>	107,35	9,16
<i>Mur béton + ITE</i>	143,35	92,66
<i>Mur « 2226 » (double brique monomur)</i>	416,64	109,28
<i>Mur moellon + ITI (vernaculaire provençal)</i>	Pierre + 70,26	Pierre + 26,46
<i>Mur moellon + ITE laine de bois</i>	Pierre + 105,77	Pierre + 21,36
<i>Mur ossature bois + paille à isolation renforcée</i>	137,7	9,16

Tableau 13 - synthèse de l'énergie grise des parois opaques des différents modes constructifs

Premièrement, les émissions de gaz à effet de serre des constructions bois-paille sont uniquement le fait du pare-pluie et du plâtre. La base de données Baubook considère en effet que la paille et le bois (structure et parement) ont des émissions négatives.

Ensuite, pour les constructions vernaculaires, si les pierres utilisées pour la construction sont prises localement sur le site, comme le faisaient nos ancêtres en Provence, leur coût en énergie grise et en émission de gaz à effet de serre serait nul.

L'enduit à la chaux de la construction vernaculaire est responsable de près de 70% des émissions de gaz à effet de serre de cette construction. Des alternatives d'enduit à base de terre auraient un bilan encore plus positif.

La construction frugale « 2226 » est très fortement pénalisée par les impacts liés à la production très énergivore de la brique monomur. Mais il faut bien se garder de généraliser à la construction frugale car il y a d'autres façons de la réaliser.

Enfin les bons résultats de la construction béton-ITE s'expliquent par la très forte densité de centrales à béton sur le territoire, réduisant ainsi son coût en énergie grise par la diminution des besoins de transport. Cela dit sa production reste très émettrice de gaz à effet de serre.

Selon ces critères environnementaux, il apparaît qu'il vaut mieux construire en bois-paille ou en vernaculaire, qu'en béton, ou pire en frugal « 2226 ».

3.4.2 Démarche BDM

Le dernier critère que nous avons considéré pour cette étude est celui de la démarche BDM. Le projet initial tel qu'il a été conçu a obtenu un score de 85 points et une labellisation Or. Étant un critère important pour le maître d'ouvrage et l'équipe de conception, il est essentiel que les modes constructifs alternatifs envisagés permettent de préserver ce résultat.

En considérant que toutes les autres données du projet restent identiques (ce qui n'est pas tout à fait vrai pour la localisation mais c'est une hypothèse acceptable), l'impact des variantes apportées au projet se concentre essentiellement sur la thématique Matériaux de la grille BDM. Pour le label Or, le prérequis concernant cette thématique est d'obtenir au minimum 8 points. Le projet de base présenté en commission a obtenu un score de 11,22 points dans cette thématique.

D'une manière générale, pour la plupart des modes constructifs alternatifs, sauf le vernaculaire et le vernaculaire à isolation renforcée, il n'y a pas de changement dans le

référentiel concernant les plancher et dalle, la charpente, et les menuiseries. Les impacts portent principalement sur la structure porteuse, l'isolation et la capacité de déconstruction.

<i>Mode constructif</i>	<i>Différences par rapport au projet initial</i>	<i>Score Matériaux</i>	<i>Score Global</i>
<i>Bois-paille</i>	-	11,22	72,89
<i>Béton-ITE</i>	- structure porteuse en béton - impossibilité de déconstruction	9,71	71,38
<i>Frugal « 2226 »</i>	- structure porteuse en briques monomur - diminution de la quantité d'isolant biosourcé - impossibilité de déconstruction + enduit extérieur à la chaux laissé brut	9,6	71,27
<i>Vernaculaire provençal</i>	+ réutilisation de matériaux existants pour la structure (moellon des champs) - utilisation d'isolant mixte chaux-chanvre en quantité notable - utilisation de la tuile en couverture au lieu de la toiture végétalisée - utilisation de la terre cuite pour le sol - impossibilité de déconstruction + enduits intérieurs et extérieurs laissés bruts	9,3	70,97
<i>Vernaculaire provençal à isolation renforcée</i>	+ réutilisation de matériaux existants pour la structure (moellon des champs) - utilisation de la tuile en couverture au lieu de la toiture végétalisée - utilisation de la terre cuite pour le sol - impossibilité de déconstruction + enduits intérieurs et extérieurs laissés bruts	10,35	72,02
<i>Bois-paille à isolation renforcée</i>	-	11,22	72,89

Tableau 14 - évaluation des modes constructifs dans le référentiel BDM

Tous les changements sont résumés dans le Tableau 14 ci-dessus, ainsi que le score obtenu dans la thématique matériaux et le score global hors points de cohérence durable⁷.

Tous les modes constructifs permettent de satisfaire le prérequis dans la thématique Matériaux. Il est fort probable que tous les modes constructifs permettent également d'atteindre le score minimum requis pour le label Or (80 points) si les points de cohérence durable⁸ peuvent être maintenus car non liés à une caractéristique constructive.

Pour ce qui est du confort d'été, en 2100, le bâtiment ne satisfera plus le prérequis du référentiel qui exige que, pour le label Or, la température intérieure du bâtiment ne dépasse pas les 28°C plus de 50 heures. Le référentiel du projet initial mentionne 36 heures au-dessus de 28°C à Sorgues (84). D'après nos simulations, en se recalant sur une période d'occupation conforme au calendrier scolaire⁹, la température intérieure correspondant à ce seuil de 50 heures serait plutôt de 30°C en 2100. C'est assez logique compte-tenu de l'augmentation générale des températures. Si l'on augmente le nombre d'élèves dans la classe pour être plus conforme à la réalité actuelle des écoles, quitte à s'éloigner de la pédagogie Steiner-Waldorf, cette valeur va probablement encore augmenter. Le référentiel d'évaluation n'étant pas figé, la question de la révision des seuils de 28°C ou de 50 heures se posera donc certainement à l'association et ses membres à un moment donné.

⁷ Ces points attribués pendant la commission d'évaluation valorisent des innovations ou choix particuliers et permettent souvent de franchir un niveau, ce qui a été le cas pour ce projet qui a finalement obtenu 85 points.

⁸ 13 points au total.

⁹ C'est-à-dire en excluant la période du 5 juillet au 31 août.

Conclusions

Cette étude avait pour but de répondre à une interrogation personnelle sur la possibilité de construire passif dans les régions chaudes méditerranéenne sans souffrir de surchauffe en été. La question pouvait se résumer en quelque sorte à savoir si une isolation trop importante, qui est à la base de construction passive telle que nous la connaissons, n'est pas inadaptée aux climats chauds et source d'inconfort. Mais ce n'était pas la seule question. Car en réalité le débat sur la construction passive sous les climats chauds est aussi inhérent au mode de construction et une seconde question se pose : peut-on construire passif **sans inertie** sous ces climats ? Pour le vérifier nous avons décidé d'étudier le comportement d'un bâtiment passif au sens le plus strict, c'est-à-dire sans équipement actif de chauffage et de climatisation, dans des conditions météorologiques difficiles et en nous projetant à l'horizon 2100 en suivant un scénario établi par le GIEC comme une des trajectoires possibles d'évolution du climat qui nous permettrait de limiter la surchauffe globale de la planète sous le seuil critique des 2°C. Nous sommes justement partis d'un bâtiment conçu en construction légère en ossature bois et isolation paille. Et nous nous sommes alors rendus compte que cette question que nous nous posions était également une préoccupation des architectes du projet sur lequel nous nous sommes appuyés. Nous avons observé son comportement face aux évolutions climatiques et nous l'avons comparé à d'autres constructions avec des caractéristiques d'isolation et d'inertie différentes. Voici, en guise de conclusion, les enseignements que nous pouvons en tirer.

1. L'inertie d'absorption est un facteur de confort d'été s'il est possible de déstocker pendant la nuit la chaleur accumulée pendant la journée : les modes constructifs les plus inertes sont ceux qui apportent le plus grand confort d'été en écrêtant légèrement les températures. Mais les différences en été sont très faibles d'un mode constructif à l'autre, de l'ordre de 0,2°C, et une construction légère telle que celle du projet initial, ou une construction très isolée comme la construction frugale « 2226 » sont quasiment équivalentes à une construction plus lourde telle que le béton.

2. L'inertie d'absorption semble également être un facteur de confort d'hiver : elle paraît pouvoir compenser en partie une isolation plus faible comme en témoignent les répartitions de température en hiver quasi-identiques des constructions béton et frugale « 2226 » et les courbes de température de la semaine la plus froide. Inversement, une construction légère comme celle du projet initial est légèrement moins confortable, mais cet inconfort peut être annulé par un renforcement de son isolation.
3. En matière d'inertie d'absorption, il est essentiel de bien choisir les matériaux qui composent les dix premiers centimètres à l'intérieur de l'enveloppe inerte par rapport à leur effusivité. Une effusivité trop faible de la couche interne peut bloquer l'inertie du reste de la paroi mais elle peut être recherchée pour éviter la sensation de paroi froide préjudiciable au confort d'hiver.
4. La forte isolation d'un bâtiment n'est pas source d'inconfort l'été, du moins dans l'hypothèse où il est possible de ventiler le bâtiment la nuit pour faire baisser rapidement la température ou déstocker la chaleur accumulée dans l'enveloppe inerte. Les modes constructifs les plus isolés (frugal « 2226 » et bois-paille à isolation renforcée) sont ceux qui obtiennent les meilleurs résultats en matière de confort d'hiver ou d'été, et de besoins.
5. La construction la plus homogène dans son comportement, tant en hiver qu'en été, est la construction frugale « 2226 ». Mais c'est aussi celle qui a la plus forte énergie grise du fait du mode constructif choisi (double épaisseur de brique monomur). Son pendant léger en ossature bois-paille à isolation renforcée obtient des résultats similaires avec une énergie grise parmi les plus faibles. Il est donc possible de faire de la construction frugale à faible énergie grise et c'est même son esprit.
6. Traditionnellement dans les bilans carbone le coût en énergie grise des constructions est mis en balance avec les économies d'énergie qu'une construction permet. Dans notre cas, le bâtiment étant totalement passif dans la limite des critères de confort que nous avons définis, il n'y a pas de consommation d'énergie autre que celle des brasseurs d'air, et le surcoût en énergie grise ne

peut être compensé pendant la vie en œuvre du bâtiment. Il faut donc dans ce cas privilégier les constructions ayant la plus faible énergie grise.

7. Selon les critères de notre étude, la construction la plus résiliente face au changement climatique est une construction lourde, en l'occurrence la construction vernaculaire à isolation renforcée. Si les évolutions du climat s'avéraient pire que les prévisions du scénario RCP 4.5, c'est sans nul doute ce mode de construction qu'il faudrait privilégier en région méditerranéenne.
8. Quasiment toutes les constructions se valent et obtiennent un score similaire dans la démarche BDM. Le choix ne pourra se faire que sur des points bien précis de celle-ci comme par exemple la capacité de déconstruction qui met en avant les constructions en ossature bois.

On voit ici qu'il n'y a pas de conclusion unique et évidente qui mette en avant un mode constructif sur tous les critères étudiés. De notre point de vue, le meilleur compromis se situe autour de deux modes constructifs :

- ⇒ Une construction frugale se rapprochant plus de la construction vernaculaire, c'est-à-dire limitant l'énergie grise du bâtiment en réutilisant des matériaux du site ;
- ⇒ Une construction à ossature bois et isolation renforcée, permettant un réel confort et surtout une évolutivité du bâtiment par sa capacité de déconstruction.

Ces conclusions viennent confirmer, en s'appuyant sur des simulations de modes constructifs concrets, les principes énoncés dans le guide du bâtiment frugal (Bornarel et al. 2016). Il faudrait désormais accumuler les retours d'expérience de bâtiments réels pour passer du modèle hypothétique et théorique à la confirmation sur le terrain. Malheureusement trop peu de bâtiments permettent cette confrontation aux résultats réels et la simulation est alors un bon outil pour tenter d'anticiper le comportement d'un bâtiment.

Pour aller plus loin...

Au fur et à mesure de notre étude et des conclusions qui se dessinaient, plusieurs aspects ou pistes nous ont semblés intéressants à approfondir pour compléter nos résultats, mais nous n'avons pas pu les explorer par manque de temps. Ils pourraient faire l'objet d'un travail complémentaire.

Dans la mesure où l'effusivité et la capacité thermique jouent un rôle essentiel dans l'inertie d'absorption, il aurait été intéressant de pouvoir mener une étude de sensibilité sur l'épaisseur du revêtement intérieur des parois, pour pouvoir éventuellement déterminer l'épaisseur de la couche de plâtre à appliquer sur les parois pour un comportement optimum.

Dans le même ordre d'idée, il aurait été intéressant d'étudier des variantes de cette couche interne, pour les murs par exemple en remplaçant le plâtre par du fermacell ou encore mieux un enduit de terre pour sa plus faible énergie grise. Pour le plancher bas, le linoléum ayant une effusivité faible, il serait intéressant d'étudier le remplacement de celui-ci par un autre matériau plus effusif et vérifier si son impact sur l'inertie du plancher bas est réel ou pas.

Enfin, la construction frugale, dans la composition que nous avons choisie, a un coût en énergie grise très élevé et nous proposons en conclusion d'étudier des variantes de celles-ci où les briques monomur en terre cuite seraient remplacées par d'autres approches plus vernaculaires. On pourrait alors étudier leur remplacement par de l'adobe ou des briques de terre crue.

Bibliographie

Aste, Niccolò, Adriana Angelotti, et Michela Buzzetti. 2009. « The Influence of the External Walls Thermal Inertia on the Energy Performance of Well Insulated Buildings ». *Energy and Buildings* 41 (11): 1181-87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>.

Bornarel, Alain, Sophie Brindel-Beth, Antoine Boulla, Pierre Bourrellis, Frédéric Boury, Hugues Delcourt, Denis Frehel, et al. 2016. *Le bâtiment frugal*. les guides iceb lanceurs d'avenir. <http://www.asso-iceb.org/document/les-guides-iceb-lanceur-davenir-le-batiment-frugal/>.

Bornarel, Alain, Dominique Gauzin-Müller, et Philippe Madec. 2018. « Manifeste pour une frugalité heureuse ». janvier 2018. <https://www.frugality.org/fr/le-manifeste.html>.

Chelala, Angela. 2017. « Peut-on concevoir des bâtiments BBKA en région méditerranéenne, en offrant un confort d'été aujourd'hui et en pensant au réchauffement climatique de demain ? »

Colloque solaire international, et Solar Energy Symposium, éd. 1980. *Colloque solaire international: expérimentation de maisons solaires passives, 11-12 décembre 1980, Nice, France = Solar energy symposium: experimental research with passive solar houses, 11-12 Decembre 1980, Nice, France*. Nice, France: M.I.S.

Courgey, Samuel, et Jean-Pierre Oliva. 2006. *La conception bioclimatique des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation*. Terre vivante. Techniques de PRO.

Dear, Richard de, et G. S. Brager. 1998. « Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference », janvier. <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>.

Dear, Richard de, et Gail Brager. 2001. « The Adaptive Model of Thermal Comfort and Energy Conservation in the Built Environment » 45 (2): 100-108. <https://doi.org/10.1007/s004840100093>.

Di Perna, C., F. Stazi, A. Ursini Casalena, et M. D'Orazio. 2011. « Influence of the Internal Inertia of the Building Envelope on Summertime Comfort in Buildings with High Internal Heat Loads ». *Energy and Buildings* 43 (1): 200-206.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>.

Dutreix, Armand. 2010. *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. Eyrolles.

Givoni, B, et Jean Louis IZARD. 1978. *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris: Moniteur.

Givoni, Baruch. 1994. *Passive and low energy cooling of buildings*.

GREC PACA. 2016. *Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR).

IPCC. 2014. « Fifth Assessment Report - Synthesis Report ». 2014. http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/index_fr.shtml.

IZARD, Jean Louis. 2006. « L INERTIE THERMIQUE DANS LE BATIMENT ». juillet 2006. <https://docplayer.fr/60237143-L-inertie-thermique-dans-le-batiment.html>.

« La Maison Passive Définition de la construction passive ». s. d. Consulté le 4 août 2018. <http://www.lamaisonpassive.fr/la-construction-passive/quest-ce-que-la-construction-passive/>.

Lavigne, Pierre. 2010. « COMPRENDRE LES INERTIES THERMIQUES DANS LES BATIMENTS », 28.

Massot, Jean-Luc. 2014. *Maisons rurales et vie paysanne en Provence*. Actes Sud.

Mazria, Edward, et Pierre Bazan. 1981. *Le Guide de l'énergie solaire passive*. Roquevaire: Editions Parenthèses.

Munaretto, Fabio. 2014. « Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments ». Phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01068784/document>.

National Passive Solar Conference, Gregory Franta, International Solar Energy Society, American Section, Mid-American Solar Energy Complex, United States, Department of Energy, et Passive and Hybrid Solar Buildings Branch, éd. 1979. *Proceedings of the 4th National Passive Solar Conference: October 3-4-5, Kansas City, Missouri*. Newark, Del.: Pub. Office of the American Section of the International Solar Energy Society.

Passive Solar Heating and Cooling Conference, University of New Mexico, United States, Energy Research and Development Administration, Division of Solar Energy, Heating and Cooling Research and Development Branch, Los Alamos Scientific Laboratory, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers American Society of Heating, et New Mexico Solar Energy Association, éd. 1977. *Passive Solar Heating and Cooling: Conference and Workshop Proceedings, May 18-19, 1976, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico*. Washington, D.C.]; Springfield, Va.: Energy Research and Development Administration; Available from the National Technical Information Service, U.S. Dept. of Commerce.

Réseau Action Climat France. 2013. « Les éléments scientifiques | Le 5ème rapport du GIEC décrypté ». septembre 2013. <http://leclimatchange.fr/les-elements-scientifiques/>.

Salomon, Thierry, et Claude Aubert. 2005. *Fraîcheur sans clim'*. Terre Vivante. L'Écologie Pratique.

Sidler, Olivier. 2003. « L'apport des campagnes de mesure », mai, 16.

Wright, David. 1978. *Natural Solar architecture, a passive primer*. Van Nostrand Reinhold Company.

———. 2004. *Manuel d'architecture naturelle*. Editions Parenthèses.