



ACCES LIBRE

MASTERE SPECIALISE
CONSTRUCTION ET HABITAT DURABLES

Année 2014-2015

**Peut-on garantir un confort d'été dans les
bâtiments de bureaux performants pour
différents modes constructifs ?**



Thèse professionnelle présentée par : Michaël Guéguéno

Tuteurs Professionnels : Alexandra Prin-Derre et Martin Guer

Tuteur pédagogique : Philippe Gouy

Notice bibliographique

ANNEE : 2015

CENTRE DE RATTACHEMENT TP : Arts & Métiers ParisTech Aix-en-Provence

AUTEURS : Michaël Guéguéno

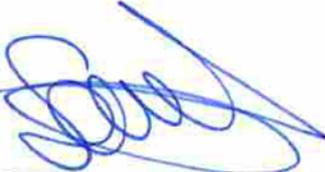
TITRE : Peut-on garantir un confort d'été dans les bâtiments de bureaux performants pour différents modes constructifs ?

ENCADREMENT DE LA TP : Alexandra Prin-Derre (remplacement de Soazig Allaire)

NOMBRE DE PAGES : 71 (dont annexes) NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :15

RESUME : Cette thèse professionnelle étudie l'impact du mode constructif sur le confort thermique à l'intérieur des bureaux bioclimatiques construits en littoral méditerranéen. Elle part du constat de surchauffes présentes lors de retours d'expériences sur des bâtiments performants de la région PACA. Le choix d'étude s'est porté sur la modélisation d'un bureau type, construit sur trois modes constructifs : en béton, en bois et mixte (planchers et toiture en béton – façades en bois) à double orientation. Une Simulation Thermique Dynamique (STD) à l'aide du logiciel Pleiades + Comfie permet d'étudier chacun des trois modes constructifs, afin de déterminer la qualité du confort à l'intérieur du bureau. Le bâtiment de bureau sera évolutif avec des protections solaires, et des systèmes de ventilation, pour comparer les températures intérieures sur ces trois modes constructifs.

MOTS-CLES : CONFORT ETE / SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE / STD

PARTIE A REMPLIR PAR LE TUTEUR PROFESSIONNEL		
ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :		
<input checked="" type="radio"/>	Classe 0 = accès libre	
<input type="radio"/>	Classe 1 = Confidentiel jusqu'au _____	
<input type="radio"/>	Classe 2 = Hautement confidentiel	
Date :	Nom du signataire : PRIN-DERRE	Signature : 

Remerciements

Je remercie Floris Van Lidth et Daniel Fauré de m'avoir accueilli pendant 6 mois, dans l'association Envirobat-BDM et de m'avoir laissé en grande autonomie pour effectuer ma mission.

Je remercie également Soazig Allaire, Alexandra Prin-Derre et Martin Guer qui m'ont aiguillé tout au long de cette thèse, avec un suivi continu.

Merci également à Philippe Gouy, mon tuteur pédagogique, pour ces précieux conseils et sa méthodologie qui m'ont permis d'aboutir ce travail.

Enfin je remercie le bureau d'études thermiques Izuba de m'avoir donné la possibilité d'utiliser les logiciels Pleiades + Comfie et Alcyone dans le cadre de cette thèse professionnelle.

TABLE DES MATIÈRES

I. INTRODUCTION	9
II. LES STRUCTURES D'ACCUEIL ET LA MISSION	10
A. <i>Les structures.....</i>	10
1. EnvirobatBDM	10
2. L'Agence Qualité Construction	10
B. <i>La mission retours d'expériences dans les bâtiments performants.....</i>	11
1. La sélection des bâtiments	11
2. La méthodologie utilisée	11
3. Les travaux complémentaires.....	11
III. CONTEXTE ET ETAT DE L'ART	12
A. <i>Les échanges thermiques.....</i>	12
1. Les échanges thermiques du corps humain	12
2. Les échanges thermiques dans le bâtiment	13
a) Le confort thermique d'été et la température opérative	13
b) Régime statique et régime dynamique	13
3. Les échanges thermiques dans les matériaux	14
a) La capacité thermique massique.....	14
b) La diffusivité	14
c) L'effusivité	15
B. <i>Principes de conception bioclimatique</i>	15
a) Le rôle de l'inertie.....	15
b) L'inertie par absorption et par transmission.....	16
c) La ventilation nocturne	17
C. <i>La notion de confort.....</i>	17
a) Les températures de confort définies par la RT 2012	18
b) La surchauffe.....	19
D. <i>Les retours d'expériences : analyse de la base de données de l'AQC.....</i>	21
1. La part de surchauffes / Froid.....	21
2. Répartition des surchauffes / typologie	21
IV. PROBLÉMATIQUE	23
V. METHODOLOGIE.....	24
A. <i>Naissance de l'étude.....</i>	24
B. <i>Démonstration par la STD</i>	24
1. Processus global	25
2. Les conditions d'analyse	27
3. Seuils et évaluation du confort.....	30
a) L'évolution des températures opératives sur 24h	30
b) Nombre d'heures ou la températures $\geq 28^{\circ}\text{C}$ sur 1 an	30
c) Diagramme de Brager.....	30

VI. EXPERIMENTATIONS - application de la méthodologie	30
A. <i>Simulations STD avec Pleiades + Comfie</i>	<i>30</i>
1. Description des choix constructifs.....	31
2. Première série de simulations.....	33
a) L'évolution des températures sur 24h	33
b) Le cumul d'heures au seuil d'inconfort $\geq 28^{\circ}\text{C}$	36
c) Le diagramme de Brager	38
3. Amélioration du confort d'été sur la construction bois	41
a) Stratégie d'améliorations	41
b) L'évolution des températures sur 24h	43
c) Le cumul d'heures au seuil d'inconfort $>28^{\circ}\text{C}$	44
d) Le diagramme de Brager	46
VII. INTERPRETATION DES RESULTATS.....	48
A. <i>La Simulation Thermique Dynamique.....</i>	<i>48</i>
1. Synthèse de l'étude	48
a) Les gains internes	48
b) Les protections solaires.....	49
c) La ventilation	49
B. <i>Synthèse des modes constructifs.....</i>	<i>50</i>
1. La construction béton.....	50
2. La construction bois.....	50
3. La construction mixte	50
C. <i>Retours d'expériences de l'AQC et données BDM.....</i>	<i>51</i>
D. <i>La place de l'utilisateur et du concepteur dans le confort intérieur</i>	<i>52</i>
VIII. CONCLUSION ET OUVERTURE	53
IX. BIBLIOGRAPHIE	54

Liste des figures :

Figure 1 : Interactions de l'être humain avec son environnement	13
Figure 2 : Flux qui traverse la paroi	13
Figure 3 : Le principe d'inertie par transmission	16
Figure 4 : Le principe d'inertie par absorption	16
Figure 4 : Ventilation mono-orientée	17
Figure 5 : Ventilation traversante	17
Figure 7 : Adaptation du corps humain en fonction de la température extérieure	18
Figure 8 : Répartition des problèmes d'inconfort thermique (base de données AQC).....	21
Figure 9 : Répartition du nombre de surchauffes par typologie de bâtiment	22
Figure 10 : Classement des pourcentages de surchauffes par nombre de bâtiment visités.	22
Figure 11 : Schéma de construction de la problématique	24
Figure 12 : méthode de résolution.....	25
Figure 13 : Plan du bureau simulé.....	26
Figure 14 : Vue axonométrique du bureau simulé	26
Figure 14 : Apports solaires	27
Figure 15 : ajout des gains internes	27
Figure 16 : casquette solaire	27
Figure 17 : dimensionnement de la casquette	27
Figure 18 : Sur-ventilation nocturne	28
Figure 19 : Ventilation naturelle.....	28
Figure 20 : Sur-ventilation + ventilation naturelle.....	28
Figure 21 : Répartition des zones climatiques de la RT 2012 en France	28
Figure 22 : organisation des simulations	29
Figure 24 : Répartition des matériaux sur les parois.....	31
Figure 25 : température intérieure dans la salle informatique n°2.....	34
Figure 26 : Histogrammes du cumul des températures annuelles	37
Figure 27 : Diagrammes de Brager sur le confort thermique intérieur	39
Figure 28 : Apports solaires annuels de la zone d'étude sans protection solaire	41
Figure 29 : Apports solaires annuels de la zone d'étude avec casquette solaire	41
Figure 30 : Températures intérieures annuelles dans la zone d'étude.....	42
Figure 31 : température intérieure dans la salle informatique n°2.....	43
Figure 32 : Histogrammes du cumul des températures annuelles	44
Figure 33 : Pourcentages de gains d'heures d'inconfort entre les simulations.....	45
Figure 34 : Diagrammes de Brager sur le confort thermique intérieur	46
Figure 35 : Apports solaires annuels avec casquette solaire et brise soleil extérieur.....	47
Figure 36 : Températures intérieures annuelles dans la zone d'étude.....	47
Figure 36 – Bâtiment l'Ensoleillée	51

I. INTRODUCTION

Le 5^{ème} rapport du GIEC confirme la cause humaine du réchauffement climatique. La MedCOP 21 à Marseille a été l'occasion d'identifier des enjeux spécifiques sur la zone méditerranéenne et la prochaine COP21 à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015 apportera de nouveaux engagements mondiaux sur le climat. Avec la hausse des températures dans les années à venir, le nombre d'heures en situation d'inconfort dans nos bâtiments va augmenter. En France, la Réglementation Thermique 2012 permet de définir des seuils de consommation sur des postes d'utilisation standard du bâtiment (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, ventilation et éclairage), de manière à rendre les bâtiments neufs performants, moins énergivores et plus confortables.

Le confort thermique et plus particulièrement le confort d'été sont des notions en perpétuelle redéfinition qui, avec l'augmentation actuelle des températures, prennent une place importante dans la conception des nouveaux bâtiments, ainsi que pour les réhabilitations.

Dans ce climat méditerranéen, qui enregistre des températures de plus en plus élevées, la question du confort d'été devient plus importante que le confort d'hiver, dans les bâtiments performants. Un problème délicat à traiter est le confort d'été des bâtiments bien isolés car, une fois que la chaleur est rentrée, elle est difficile à évacuer. Ainsi en été, il faut employer plusieurs ruses pour limiter les apports de chaleur dans le bâtiment, et bien sûr de pouvoir les évacuer. En hiver, à l'inverse, on cherche à capter les apports solaires et bénéficier des apports internes.

Les bâtiments méditerranéens ont une contrainte supplémentaire vis-à-vis des autres, celle d'assurer un confort intérieur accru durant les périodes estivales, mais aussi dans les périodes en intersaison. Pour cela, les architectes doivent intégrer à leurs bâtiments des équipements permettant de limiter le réchauffement de l'air et des parois intérieures. Ils ont de plus en plus recours à une architecture bioclimatique qui prend en compte l'environnement direct dans le processus de conception (intégration sur le site, orientation des baies, protections solaires...).

On peut remarquer que les bâtiments basse consommation (appelés aussi performants) neufs et récents souffrent de surchauffes y compris ceux qui ont une démarche environnementale. Ce sont bien entendu des constats qu'il est nécessaire de vérifier par des études complémentaires aux retours d'expériences, pour en savoir plus sur le sujet.

Le confort thermique dans les périodes non chauffées devient donc un élément de préoccupation croissant pour les concepteurs, ainsi que les usagers des bâtiments.

Cette thèse établira une comparaison entre différents modes constructifs du bâtiment, pour apporter des réponses sur le confort intérieur. Ils n'influencent pas de la même manière sur la température des locaux. Il est important de bien mesurer leur impact sur le confort pour apporter une réponse adéquate au type de bâtiment, ainsi qu'à la manière dont il sera vécu par les utilisateurs.

II. LES STRUCTURES D'ACCUEIL ET LA MISSION

La mission de stage, en convention avec plusieurs associations, m'a permis d'alimenter les réflexions de ma thèse professionnelle autour du confort d'été. C'est un sujet récurrent dans la question des bâtiments performants.

A. Les structures

1. EnvirobatBDM



J'ai effectué ma mise en situation professionnelle au sein de l'association EnvirobatBDM, à Marseille. Cette association a pour but de promouvoir la généralisation du bâtiment durable en PACA au travers de 6 fonctions (Débattre, Innover, Former, Evaluer, Capitaliser et Valoriser). Elle associe un centre de ressources à une démarche de certification, pour aider les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre à intégrer des principes de construction durable dans leurs édifices.

Le centre de ressources en ligne, l'*Enviroboite*¹, permet aux adhérents d'avoir accès à une banque d'informations sur le thème du bâtiment et de l'aménagement durables. Des débats sont régulièrement organisés sur des thèmes relatifs à la construction durable (ventilation, confort d'été, réhabilitation, etc.).

Les actions d'EnvirobatBDM sont cofinancées par l'Union Européenne et un partenariat Etat-Région-ADEME. Les 350 adhérents participent au fonctionnement de l'association.

2. L'Agence Qualité Construction - l'AQC

L'Agence Qualité Construction (AQC) est une association loi 1901, basée à Paris. Elle a été créée en 1982 suite à la mise en place de la loi Spinetta (1978), qui oblige la souscription à une assurance de responsabilité dans le domaine de la construction. L'association est financée par les cotisations d'assurances obligatoires, souscrites par les entreprises, les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage. La mission de l'AQC est de prévenir des désordres et sinistres, et d'améliorer la qualité des constructions. Elle regroupe 38 organisations professionnelles de la construction. Les actions de l'AQC s'organisent autour de trois pôles :



L'observation

C'est le fondement de tous les travaux de l'AQC. Une base de données permet de capitaliser les sinistres et désordres apparus et de les synthétiser grâce à des statistiques.

La prévention

Grâce à des commissions prévention Produits (C2P), elle identifie les techniques de mise en œuvre susceptibles d'engendrer des risques de sinistres.

La communication

Un ensemble de supports de communication (revues, plaquettes) est publié afin de sensibiliser les acteurs de la construction dans les bonnes pratiques et les évolutions possibles.

¹ Site web de l'Enviroboite : www.enviroboite.net

B. La mission Retours d'Expériences dans les bâtiments performants

1. La sélection des bâtiments

Ma mission de stage consiste à effectuer une vingtaine de visites de bâtiments performants, livrés depuis deux ans environ, dans la région PACA. Le but de ces visites est de faire des Retours d'Expériences (REX), afin de capitaliser les bonnes pratiques et les évolutions possibles. J'ai choisi, avec l'équipe d'EnvirobotBDM, de sélectionner des bâtiments me permettant d'obtenir une diversité de retours d'expériences en fonction des critères suivants:

- La répartition équitable sur toutes les zones de la réglementation thermique en PACA
- Les différents départements et climats : littoral (13-06-83), préalpin (04), alpin (05)
- Des typologies de bâtiments variés : logements individuels et collectifs, équipements...
- 50% des bâtiments ont une démarche environnementale - Démarche BDM
- La qualité architecturale

En parallèle de mon étude, une subvention de la Région PACA a été accordée à l'association EnvirobotBDM pour faire des Retours d'Expériences dans les logements sociaux qu'elle a financés (programme Rhéa). Nous avons choisi d'intégrer dans l'étude 10 immeubles de logements collectifs (parc public et privé).

2. La méthodologie utilisée

Je rencontre les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'œuvre et les utilisateurs, maillons indispensables pour bien comprendre ce qui a plus ou moins fonctionné dans le projet visité. Mon entretien suit une trame qui va du général au particulier. L'entretien est dirigé, mais reste très ouvert aux remarques des personnes rencontrées.

Pendant la visite, j'essaie de déceler les difficultés, les dysfonctionnements ou encore les sinistres qui peuvent arriver pendant la conception du projet, jusqu'aux premières années d'exploitation. L'ensemble des données est ensuite compilé dans la base de données de l'AQC. Ces données permettent ensuite d'élaborer des statistiques sur les pathologies récurrentes. L'AQC publie chaque année le rapport de l'étude REX bâtiments performants et risques². Elle reste cependant assez méconnue des professionnels.

3. Les travaux complémentaires

Un rapport thématique, demandé par l'ADEME et l'AQC, sur le thème du confort d'été est aussi écrit pour permettre de faire une synthèse des visites effectuées sur cette thématique, en développant 12 constats avec des axes d'amélioration. Ils viendront alimenter cette thèse professionnelle car ils proposent des solutions pour favoriser le confort d'été.

Parallèlement j'ai réalisé 5 fiches opérations exemplaires qui ont servi à alimenter le catalogue des retours d'expériences et à les publier dans le centre de ressources Envirobot. Ces Retours d'Expériences ont permis d'alimenter une partie de la formation "Retours d'Expériences et bonnes pratiques" pour EnvirobotBDM.

² Rapport RAGE, Règles de l'Art, Grenelle Environnement : REX Bâtiments performants et risques, v3, Oct 2014

III. CONTEXTE ET ETAT DE L'ART

La mission Retours d'Expériences a fait découvrir que les bâtiments performants sont parfois des prototypes où sont mis en œuvre les principes de l'architecture bioclimatique. L'enjeu majeur de ces bâtiments réside dans le fait qu'ils peuvent se passer de système de climatisation, qui est énergivore. On remarque que cela ne fonctionne pas toujours très bien du point de vue du confort thermique intérieur, pour de multiples raisons. Des **surchauffes** sont à signaler dans certaines pièces des bâtiments.

Nous allons dans un premier temps présenter les phénomènes physiques pour analyser plus facilement les cas d'étude. Par la suite, sera analysé une série de données extraites de la base de données REX de l'AQC.

A. Les échanges thermiques

Il est utile pour la maîtrise d'œuvre de bien comprendre le fonctionnement du métabolisme humain afin qu'elle puisse adapter une conception de bâtiment qui lui permette d'être le plus confortable possible.

1. Les échanges thermiques du corps humain

L'homme est un animal homéotherme, il doit maintenir une température constante de 37°C (soit en se refroidissant par transpiration, soit en consommant de l'énergie qu'il puise dans ses réserves pour se réchauffer. Sinon le corps entre en hypothermie ou en hyperthermie (fièvre). Il doit entretenir ses fonctions vitales pour mener ses activités. Plus il fait chaud et humide et plus ces échanges sont difficiles. Le corps réagit à cela et augmente ses échanges avec l'environnement par la sudation et dilatation des vaisseaux sanguins.

Les phénomènes physiques de conduction, convection et rayonnement de la chaleur s'opèrent sur le corps humain. Un échange de chaleur se fait entre le corps en contact avec le sol, c'est l'effet de **conduction**. Ils sont cependant minimes et réduits par les vêtements.

Des échanges de température entre l'air et la peau s'opèrent entre la peau et l'air environnant. C'est l'effet de **convection**. En été, on sera plus à la recherche de courants d'air et du fait de porter des tenues légères car ces courants d'air augmentent la convection.

Des échanges thermiques s'effectuent aussi par **rayonnement**. Ce sont des rayons infra-rouge qui sont captés par le corps. Lui-même émet un rayonnement par infra-rouge et dégage donc de la chaleur.

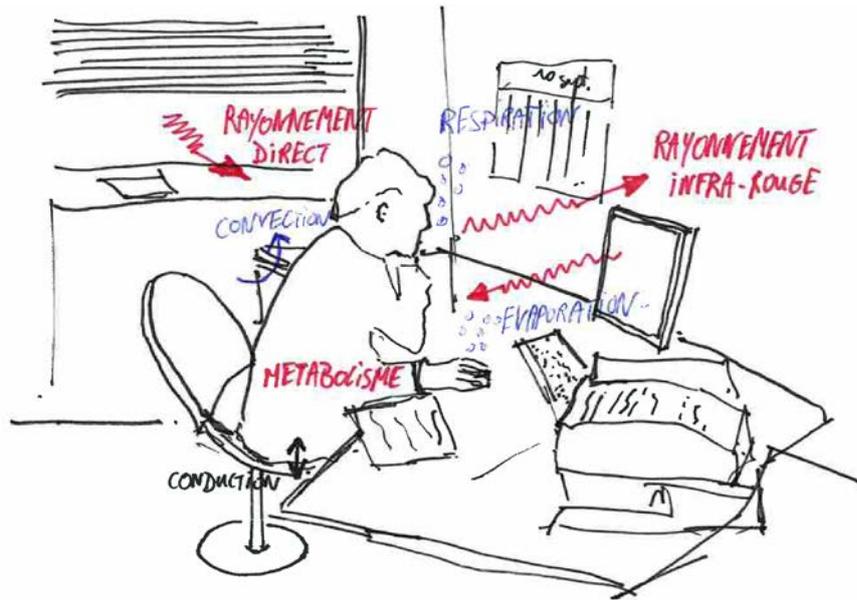


Figure 1 : Interactions de l'être humain avec son environnement

2. Les échanges thermiques dans le bâtiment

Comme le corps humain, le bâtiment a des échanges thermiques avec son environnement.

a) Le confort thermique d'été et la température opérative

Pour définir le confort thermique, on parle de **température opérative**, c'est la moyenne entre la température de l'air et celle des parois. C'est ce qui va déterminer le confort de l'occupant. Le confort thermique d'été est principalement défini par la température opérative atteinte dans le bâtiment, qui donne une meilleure indication de confort que la température de l'air intérieur. Cette température est calculée tout au long d'un jour chaud de référence, avec une zone géographique définie.

$$T_{op} = \frac{1}{2} (T_{air} + T_{paroi}) \text{ exprimée en } ^\circ\text{C}$$

b) Régime statique et régime dynamique

Dans la thermique du bâtiment, lorsque l'on s'intéresse au transfert de chaleur dans une paroi, on calcule les températures aux différentes jonctions qui la compose. Les températures extérieure et intérieure sont fixes. Les conditions créées pour le calcul ne prennent pas en compte d'autres variables qui influent sur les températures de paroi et intérieure. En régime statique, on considère que la puissance de chauffage ou de climatisation nécessaire pour un bâtiment est égale au flux de chaleur qui rentre ou qui sort du bâtiment. Le flux s'exprime par :

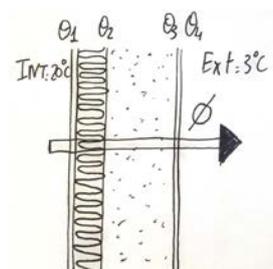


Figure 2 : Flux qui traverse la paroi

$$\phi = U * \Delta T$$

ϕ exprimée en $[\text{W}/\text{m}^2]$

U la conductivité thermique exprimée en $[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$

ΔT la variation de température exprimée en $^\circ\text{C}$

Mais en réalité, un bâtiment n'est jamais en régime statique mais en **régime dynamique**. En effet, d'autres paramètres influent sur les parois, à savoir ³:

- La température extérieure
- Le rayonnement solaire périodique (orientation de chaque paroi)
- Les apports internes dus aux usagers qui doivent être pris en compte dans des scénarios d'occupation
- La ventilation qui doit aussi être prise en compte.

Aujourd'hui, seule la **simulation thermique dynamique** (STD) permet de simuler le confort intérieur en prenant en compte l'ensemble de ces paramètres variables.

3. Les échanges thermiques dans les matériaux

Il est important de connaître les échanges physiques pour pouvoir déterminer la qualité énergétique d'un matériau. Trois notions physiques permettent de comprendre les transferts de chaleur qui s'effectuent entre les matériaux et leur environnement direct. Elles permettent de quantifier **l'inertie thermique**.

a) La capacité thermique massique

La capacité thermique massique « C » d'un matériau est l'énergie qu'il faut apporter à un matériau pour qu'il élève sa température de un degré. Plus il y aura de matière et plus la valeur sera élevée. Elle s'exprime en joule par kilogramme et par degré J/(kg.K).

Cette valeur est importante à prendre en compte dans le choix de l'isolant. En effet, ils n'ont pas tous la même densité, et certains transmettent plus facilement la chaleur que d'autres. Dans le cas des constructions légères, le choix de l'isolant a beaucoup d'importance, car c'est un matériau qui va se retrouver en grande quantité. Il aura un impact plus important sur le confort qu'une construction en murs pleins.

b) La diffusivité

« La **diffusivité** est la capacité d'un matériau à transmettre la température à l'intérieur même de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (la conductivité thermique et de sa capacité à accumuler de la chaleur (chaleur massique) » ⁴

$$D = \frac{\lambda}{\rho c}$$

λ est la conductivité thermique du matériau (en W/m.K)

ρ la masse volumique du matériau (en kg/m³)

c la capacité thermique massique du matériau (en J/(kg.K))

³ Voir Annexe 2 sur les différentes sollicitations extérieures et intérieures d'un bâtiment

⁴ Source Wikipédia

Si l'on souhaite qu'un matériau transmette rapidement la chaleur, par exemple à travers une paroi chauffée, il faut que la diffusivité soit importante. Si au contraire, on souhaite stocker cette chaleur pour créer un déphasage, il faut une diffusivité plus faible. A titre d'exemple, un mètre cube d'acier sera plus diffusif qu'un mètre cube de béton.⁵

c) L'effusivité

« **L'effusivité thermique** d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. » Elle est donnée par :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c}$$

λ est la conductivité thermique du matériau (en W/m·K)

ρ la masse volumique du matériau (en kg/m³)

c la capacité thermique massique du matériau (en J/kg·K)

Contrairement à la diffusivité, l'effusivité détermine la vitesse à laquelle un matériau absorbe la chaleur, sans s'échauffer. Une bonne effusivité permet en conséquence, d'absorber les rayons solaires sans échauffer la paroi, et une faible effusivité permet à l'inverse un réchauffement rapide de la paroi. Le bois se réchauffe en surface beaucoup plus rapidement que le béton, il est moins effusif. C'est pour cela que dans les régions froides, le bois est un matériau apprécié car il est « chaleureux ». Dans les régions chaudes le béton sera plus apprécié, car il est plus « frais ».⁶

B. Principes de conception bioclimatique

a) Le rôle de l'inertie

Elle agit comme un amortisseur aux variations de températures, en s'opposant aux variations brutales. L'inertie thermique d'un matériau correspond à sa capacité à accumuler puis à restituer de la chaleur ou du froid. Plus le matériau est inerte, plus sa capacité d'accumulation est importante et plus la restitution du flux thermique est lissée. Les pics de température sont affaiblis.

L'inertie thermique traduit le comportement d'un bâtiment soumis à un régime thermique variable. Cette variabilité résulte des fluctuations du régime dynamique expliqué dans le paragraphe précédent.

L'inertie thermique dépend de la construction de l'enveloppe, du poids des planchers et du poids des murs intérieurs qui se trouvent en contact avec l'air intérieur.

Les ouvrages spécialisés sur le sujet démontrent que l'**inertie** est **nécessaire** pour garantir un **confort d'été**. Mais sur visites de retours d'expériences de l'AQC, il est étonnant de voir des

⁵, ⁶ Source : Bioclimatisme et Performances Energétiques des bâtiments – Armand Dutreix,

maisons individuelles avec une inertie d'apparence très faible, bénéficient d'un très bon confort thermique. Cela paraît paradoxal, et donne envie de comprendre **pourquoi** une construction très légère pourrait contredire les ouvrages qui démontrent qu'il faut absolument de l'inertie. La suite des recherches a permis de découvrir qu'il n'existait pas une, mais deux inerties, et que l'une d'entre elles participe dans le confort d'été des ossatures légères.

b) L'inertie par absorption et par transmission

Pour plus de précisions, il convient de parler de deux phénomènes d'inertie⁷ :

- **l'inertie de transmission**, elle décrit comment une paroi de l'enveloppe diminue l'amplitude d'une oscillation de la température extérieure et la retarde dans sa transmission vers l'intérieur

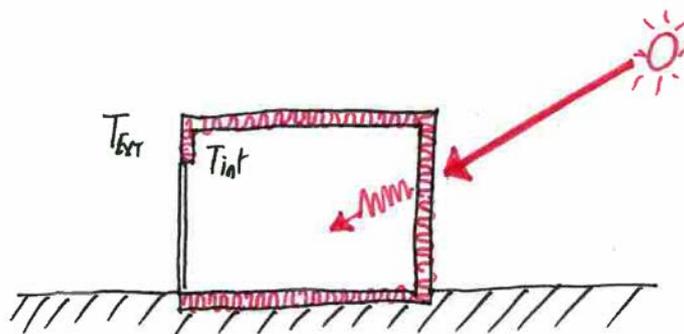


Figure 3 : Le principe d'inertie par transmission

- **l'inertie d'absorption** qui décrit comment la température de surface d'une paroi intérieure, en contact avec l'air intérieur d'un local réagit à une oscillation de flux de chaleur intérieur, par exemple due à l'ensoleillement.

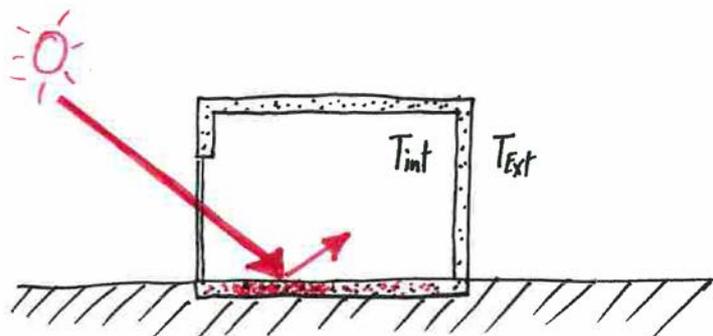


Figure 4 : Le principe d'inertie par absorption

La plupart des ouvrages traitant de l'inertie ne se limitent bien souvent qu'à l'inertie par absorption. En réalité, l'inertie par transmission a son rôle à jouer dans le confort thermique intérieur. Les parois extérieures, les toitures et les planchers en construction légère mais fortement isolés **pourraient avoir un rôle important** dans la problématique du confort d'été.

⁷ Phénomènes décrits dans l'ouvrage de Pierre Lavigne : Concevoir Des Bâtiments Bioclimatiques: Fondements & Méthodes

c) La ventilation nocturne

L'inertie thermique est une condition **nécessaire** mais pas **suffisante** du confort, hiver comme été, quel que soit le mode d'utilisation des bâtiments. Pour le confort d'été, l'inertie thermique doit obligatoirement être associée à des dispositifs de refroidissement des structures. En effet, une fois que le bâtiment est chaud après une journée ensoleillée, il reste **chaud**. Un des moyens de le refroidir est de la **sur-ventilation**.

Il existe deux manières de sur-ventiler un bâtiment. L'une est assurée par la ventilation mécanique contrôlée (VMC) et l'autre par la naturelle, assurée par les ouvrants du bâtiment.

Pour la sur-ventilation avec la VMC, les débits d'air renouvelés sont augmentés. Il arrive parfois que les moteurs soient sous-dimensionnés et donc que le bâtiment soit moyennement rafraîchi.

La ventilation naturelle est beaucoup plus efficace, surtout si les ouvrants sont diamétralement opposés, la ventilation sera traversante et plus efficace qu'avec des fenêtres situées sur la même façade.

Pour que la ventilation naturelle soit efficace, l'amplitude des températures extérieures doit être suffisamment importante pour décharger les calories accumulées. Avoir du vent est aussi nécessaire.

Pour finir, pouvoir faire de la ventilation naturelle nécessite de laisser les fenêtres ouvertes la nuit, et cela est risqué pour les intrusions (cambrioneurs, volatiles...), mais aussi pour des questions de bruit et d'intempéries. Aujourd'hui les assurances considèrent qu'une fenêtre ouverte en oscillo-battant est identique à une fenêtre ouverte.

C. La notion de confort

La notion de **confort thermique** est le lien entre la **thermique du bâtiment** et la **thermique du corps humain**. Elle est variable d'un individu à l'autre. Elle dépend en réalité de bien plus de paramètres que la température opérative. Par exemple s'il fait 40 degrés à l'extérieur et 30 à l'intérieur le corps va s'adapter à cette température sans être en situation d'inconfort. Au contraire passer d'une température extérieure de 0°C à 25°C en intérieur sera inconfortable.

Comme le dit Robert CELAIRE⁸, ingénieur spécialisé dans l'efficacité énergétique et la qualité environnementale des bâtiments, « *le confort thermique dépend du confort global (visuel, acoustique, olfactif, humidité de l'air...)*. » Tous ces facteurs ont une influence sur le bien-être.

⁸ Citation prise lors d'un débat organisé par EnvirobatBDM : Construire pour s'adapter au réchauffement climatique : Confort d'été face à la hausse des températures

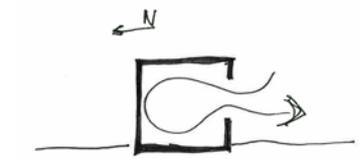


Figure 5 : Ventilation mono-orientée



Figure 6 : Ventilation traversante

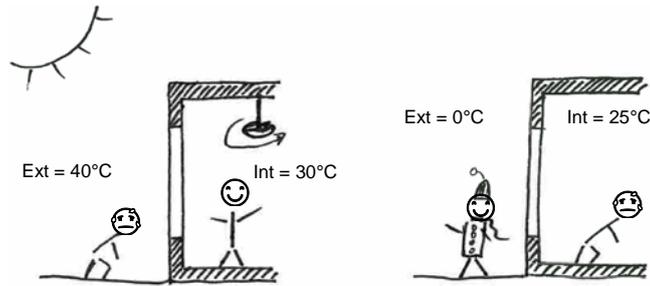


Figure 7 : Adaptation du corps humain en fonction de la température extérieure

a) Les températures de confort définies par la RT 2012

La dernière réglementation thermique relative à la construction neuve en vigueur prend en compte de manière minimale la notion de confort d'été. Elle détermine une Température Intérieure Conventionnelle (inchangée depuis la RT2000), qui ne doit pas dépasser une certaine limite définie par la zone climatique du calcul RT (H3, H2d...), pendant plusieurs jours consécutifs.

« La température Intérieure Conventionnelle doit respecter la règle $T_{ic} \leq T_{icref}$.

La température la plus chaude atteinte dans les locaux (T_{ic}), au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été, ne doit pas excéder un plafond (T_{icref}). Ce dernier est déterminé par la méthode de calcul Th-BCE 2012, et l'annexe XI de l'arrêté du 26 octobre 2010 prévoit les paramètres à prendre en compte »⁹

Cette Température Intérieure Conventionnelle est sur le point d'évoluer. En effet, à l'échelle nationale, le gouvernement a mis en place le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, le PNACC, avec une série de fiches actions orientées suivant différentes thématiques. Dans la thématique de l'urbanisme et du cadre bâti, l'action 4 traite la question du confort d'été. Elle propose de faire évoluer l'exigence de la RT 2012, qui consiste aujourd'hui à regarder la Température Intérieure Conventionnelle sur une séquence de cinq jours chauds.

L'objectif est de mettre en place des **indicateurs** plus précis basés sur l'**amplitude** et sur la **durée** de la surchauffe (que l'on utilise déjà en Simulation Thermique Dynamique), ceci dans le but de renforcer la prise en compte de la problématique du confort d'été dans les futurs bâtiments.¹⁰

La seule obligation de résultat concernant le confort d'été est la température intérieure de consigne (T_{ic}). Mais il est à noter que si des erreurs de conception engendrent des surchauffes abondantes (manque de protections solaires, trop de vitrages, mauvaise distribution de l'eau chaude sanitaire), alors le bâtiment peut être classé comme impropre à sa destination.¹¹

⁹ Extrait du site internet RT-bâtiment

¹⁰ Article tiré du magazine Les cahiers techniques du bâtiment "Plan Climat National, Le Confort D'été, Nouvelle Exigence." (342): p37.

¹¹ Affaire judiciaire du groupe scolaire de Mouans-Sartoux - Arrêt du 9 décembre 2011 req. n° 346189

b) La surchauffe

Voici ce qui définit une surchauffe dans un bâtiment :

« Une surchauffe désigne une température involontairement élevée dans un bâtiment, due à des apports énergétiques non contrôlés. L'origine des surchauffes est variée, mais elle est principalement issue de la phase de conception. »¹²

Ces bâtiments performants ont très peu de déperditions. Les matériaux, les menuiseries sont de meilleure qualité qu'auparavant et les infiltrations d'air sont plus réduites à travers les parois, afin de réduire les pertes de chaleur en hiver. Ces bâtiments sont tellement étanches à l'air, qu'on les compare à des « bouteilles Thermos »¹³.

Des études de Stéphane Bedel, du bureau d'études thermiques Izuba à Montpellier, montrent qu'en 2030 avec l'impact du réchauffement climatique, les températures intérieures supérieures à 28°C (situation d'inconfort défini par la RT 2012) augmenteront de 270 heures en moyenne selon les typologies en climat méditerranéen.

Voici les **causes** les plus récurrentes relevées par l'Agence Qualité Construction¹⁴ qui occasionnent des surchauffes :

- **Abondance de vitrages**

Les architectures contemporaines sont de plus en plus vitrées. De nombreux architectes et maîtres d'ouvrage aiment les vitrages pour des questions esthétiques et d'apport de lumière naturelle. Cependant, ils permettent aux rayons solaires de rentrer plus facilement, et donc de réchauffer plus rapidement l'intérieur des pièces. L'évolution technique permet aujourd'hui d'avoir des vitrages peu émissifs qui rejettent une partie des rayons solaires vers l'extérieur.

Un calcul sur le logiciel de simulation thermique dynamique Pleiades + Comfie montre que 1 m² de vitrage transmet autant d'énergie sur une journée que :

- 55m² de paroi avec 30cm d'isolant
- 35m² de paroi avec 20cm d'isolant
- 18m² de paroi avec 10cm d'isolant

- **Absence ou protections solaires inefficaces**

Même si la majorité des architectes ont bien compris l'enjeu des protections solaires, il reste encore du travail dans le positionnement et le dimensionnement de ces protections, pour qu'elles soient le plus adaptées à la situation, dimensionnées et orientées par rapport à la course du soleil. Il arrive parfois que ces protections soient installées « par défaut » et soient inefficaces.

¹² Définition apportée par Lina Mauriange dans sa thèse professionnelle MSCHD 2013 : Désordres et responsabilités. Quelle place pour la garantie de performance énergétique ?

¹³ Comparaison d'Olivier Sidler - "Le Confort D'été." Mutuelle des architectes français assurances & Enertech
Fiche T18: 8 pages.

¹⁴ Rapport RAGE, Règles de l'Art, Grenelle Environnement : Retours d'Expériences (REX) Bâtiments performants et risques, version 3, Octobre 2014

- Apports internes trop importants

Les équipements électriques qui font partie de notre quotidien sont de plus en plus présents. L'évolution des consommations électriques ne cesse d'augmenter. On peut aussi noter les ballons d'eau chaude sanitaire mal positionnés et les canalisations non calorifugées. Ces équipements qui dégagent de la chaleur ont leur part de responsabilité dans les inconforts thermiques.

- Ventilation impossible ou inefficace

La ventilation naturelle et la sur-ventilation nocturne aide le bâtiment à décharger les calories accumulées dans les matériaux inertes. Il faut sur-dimensionner les caissons de VMC pour qu'elle rafraichisse le bâtiment la nuit. Dans certains cas la ventilation naturelle est impossible (bruits extérieurs, intrusions et intempéries...). Le risque est que le bâtiment continue de monter en température jour après jour.

- Trop de matériaux à faible effusivité

Dans les ouvrages sur le thème du bioclimatisme qui traitent de l'inertie, on peut lire qu'avoir des matériaux à forte inertie (et donc à forte effusivité) est bénéfique pour obtenir un confort d'été. Les études thermiques montrent que les ossatures légères ne permettent pas au bâtiment de rester dans des températures confortables.¹⁵

Cependant, cette affirmation reste à vérifier. Lors des visites et retours d'expériences, plusieurs bâtiments construits en ossature légère présentaient de bonnes performances en termes de confort thermique intérieur.

Synthèse de cette première partie :

Les lectures d'ouvrages écrits par les ingénieurs thermiciens qui traitent du confort d'été montrent qu'en général, il est possible d'obtenir un **confort satisfaisant** en jouant sur la **conception** du bâtiment (inertie thermique, protections solaires, exposition des façades...) et sur la gestion de la ventilation. Un bâtiment bien conçu vis-à-vis de la problématique du confort thermique doit être non seulement apte à minimiser la température maximale atteinte dans la journée, mais aussi à empêcher les trop fortes variations de températures. Cependant, des **mises en garde** sont évoquées concernant les constructions à **ossature bois** qui ont très **peu d'inertie**. Ainsi, dans un climat chaud tel le littoral méditerranéen, il est a priori plus difficile pour un bâtiment à ossature bois que ce même bâtiment en structure lourde de pouvoir assurer un bon confort d'été et ce malgré les atouts indéniables des constructions bois. On pourrait donc généraliser sur le fait que la **construction légère** est forcément synonyme de **surchauffes**. Or, après avoir effectué un retour d'expériences des maisons individuelles bioclimatiques des architectes J.Solari et S.Brofiga¹⁶, qui sont en ossature légère et sont confortables d'un point de vue thermique, il est intéressant de regarder si il peut en être de même pour **les autres typologies en ossature légère**, afin de voir si il existe des **solutions** pour limiter les problèmes de surchauffes.¹⁷

¹⁵ CIMbéton. 2001. Inertie Thermique Des Logements et Confort D'été : étude de Sensibilité.

¹⁶ Architectes spécialisés en bioclimatisme exerçant dans les Bouches du Rhône

¹⁷ Constats appuyées par la thèse de Marc Corbella – *La question du confort d'été dans un bâtiment à faible inertie construit en bois* – MSCHD 2013

D. Les Retours d'Expériences : analyse des données de l'AQC

La partie qui va suivre est une série d'extractions de la base de données Rex Retours d'Expériences dans les bâtiments performants de l'AQC qui capitalise les difficultés, dysfonctionnements et les sinistres depuis 2010. La base est filtrée selon les inconforts thermiques.

1. La part de surchauffes / Froid

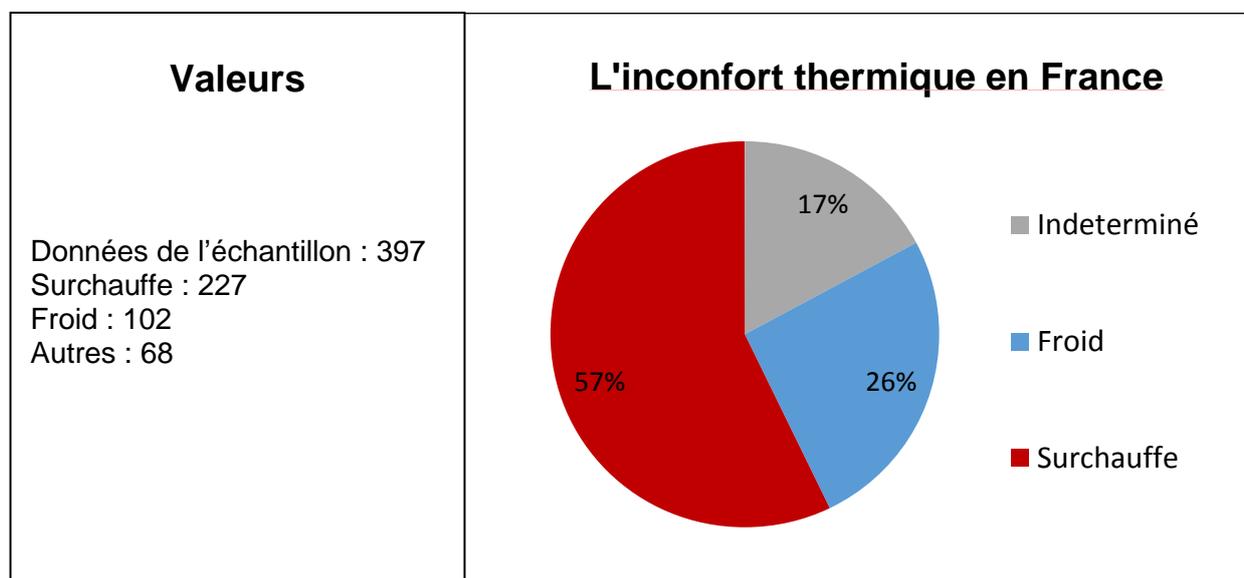


Figure 8 : Répartition des problèmes d'inconfort thermique (base de données AQC)

Si l'on regarde sur les inconforts thermiques sur la base de données française, on peut s'apercevoir que le pourcentage de bâtiments victimes de surchauffes est bien **supérieur** aux problèmes dus au froid. Cela confirme bien ce qui est expliqué en introduction, vis à vis des surchauffes sur l'ensemble des typologies de bâtiments récents et performants.

2. Répartition des surchauffes / typologie

Sur les 57 % de surchauffes, voici comment elles sont réparties selon les typologies de bâtiments visités. Il peut arriver que pour un même bâtiment, plusieurs cas de surchauffes aient été renseignés.

Typologies	nb surchauffes
BUREAUX	63
ENSEIGNEMENT CRECHE	49
MAISON IND	48
COLLECTIF	27
CULTUREL	17
SANTE	14
AUTRES	6
NON RENSEIGNE	2
HOTEL	1
Total général	227

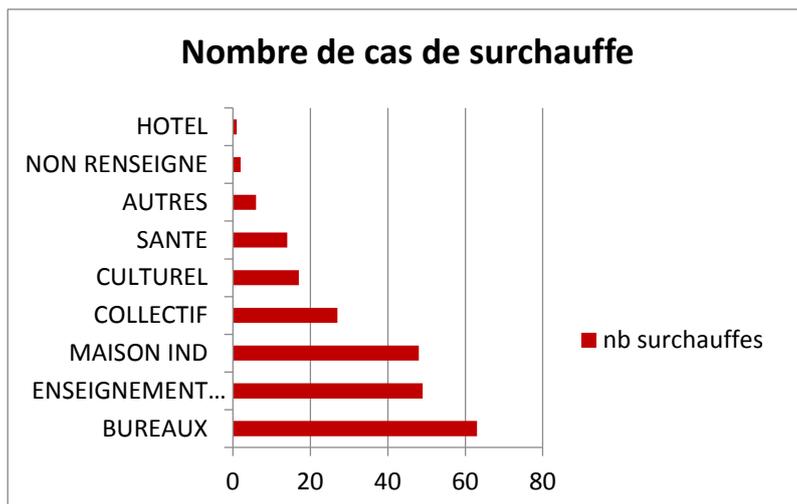


Figure 9 : Répartition du nombre de surchauffes par typologie de bâtiment

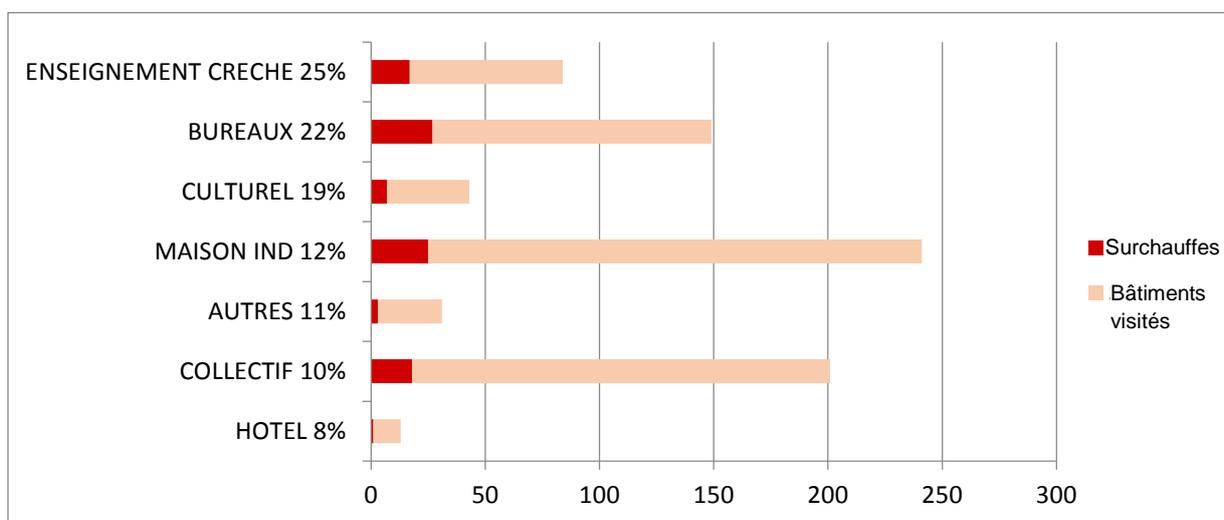


Figure 10 : Classement des pourcentages de surchauffes par nombre de bâtiment visités

Ces statistiques montrent que les **bureaux** et les locaux d'enseignement souffrent plus de surchauffes que les autres typologies. Cela vient en majorité des apports internes qui sont difficilement maîtrisés (bureautique, groupe d'élèves, éclairage...). Ces typologies sont généralement conçues avec de larges baies vitrées, ce qui accentue le réchauffement intérieur par les apports solaires.

Vu ces statistiques, il paraît donc pertinent de se focaliser sur les surchauffes des bureaux pour avancer sur cette thèse, afin de rendre mon étude plus ciblée.

IV. PROBLÉMATIQUE

Les travaux scientifiques existants montrent que de manière générale, pour avoir un confort d'été, il faut de l'inertie. C'est un critère nécessaire, mais pas suffisant¹⁸. Elle doit être associée à la ventilation naturelle nocturne, qui va permettre de libérer les calories accumulées. **Mais est-ce le cas pour toutes les typologies de constructions ?** On considère les constructions lourdes en béton comme très confortables, mais qu'en est-il de la construction à **ossature bois**, qui peut avoir non pas une inertie d'absorption mais une inertie de transmission ? Elles se déchargent beaucoup plus vite du fait de leur faible inertie d'absorption. Ces modes constructifs peuvent avoir des **avantages** dans le temps de refroidissement.

Si l'on regarde de plus près les bureaux performants, victimes de plus de surchauffes, il serait intéressant de voir si l'on peut **garantir un confort d'été dans ces bureaux**, construits avec **différentes inerties**. L'idée étant de montrer si avec des matériaux moins effusifs, on peut quand même obtenir un confort suffisant.

L'énoncé de la problématique est la suivante :

Peut-on garantir un confort d'été dans les bureaux situés sur le littoral méditerranéen, pour différents modes constructifs ?

¹⁸ Olivier Sidler. 2003. L'inertie Thermique Des Bâtiments - Consommation et Confort D'été En Climat Méditerranéen.

V. METHODOLOGIE

A. Naissance de l'étude

La raison pour laquelle cette question est soulevée vient d'une mise en commun de plusieurs constats, découverts grâce à des lectures sur la question du confort d'été, mais aussi grâce aux visites sur le terrain, qui donnent des constats opposés. L'analyse des statistiques de l'ensemble des retours d'expériences donne un troisième type de données. Cela renforce l'intérêt de cette problématique.

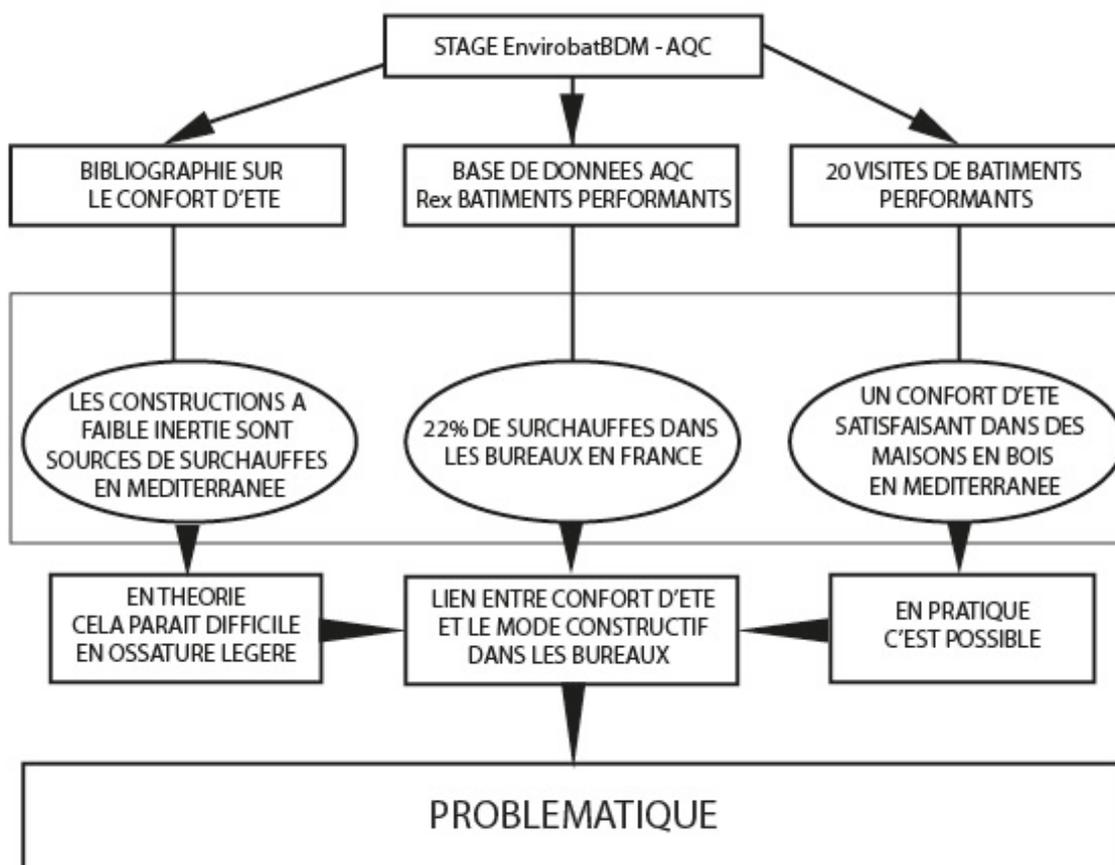


Figure 11 : Schéma de construction de la problématique

B. Démonstration par la STD

L'objectif de cette thèse est de tester l'impact du mode constructif des bâtiments sans climatisation sur le confort d'été, soumis aux sollicitations extérieures (température, apports solaires, vent...), et aux sollicitations intérieures (éclairage, matériel informatique, utilisateurs, chauffage).

Cette série de tests va tenter de montrer si l'impact constructif a une influence sur les températures intérieures du bâtiment, et si l'on peut toujours se passer de climatisation dans la construction sur plusieurs des modes constructifs étudiés et notamment sur ceux à faible inertie.

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette problématique, une série de tests est effectuée grâce à un logiciel de simulation thermique dynamique : Pleiades + Comfie. En amont est utilisé un logiciel de dessin en plan, Alcyone, qui permet de dessiner le projet d'études et d'affecter toutes les données de systèmes aux différentes zones d'étude.

Le but est de faire ressortir les situations d'inconfort intérieur suivant les seuils de confort définis par la suite. Les trois modes constructifs sont comparés entre eux, et permet de voir quelle amélioration est possible.

1. Processus global

Un plateau de bureaux classique est modélisé, avec deux surfaces de bureaux séparés, comprenant chacune une salle informatique, une salle de réunion, une cuisine et un sanitaire. Un couloir d'entrée permet de distribuer chacun de ces bureaux.

Un des bureaux sera orienté au nord et l'autre au sud, de manière à obtenir des résultats différents. Ce bureau sera représentatif d'un bureau « type », comparable à des bureaux classiques, avec une façade d'architecture contemporaine, majoritairement vitrée à 80%, au nord et au sud. Le but est d'avoir des résultats qui puissent être généralisés.

Sur chaque modèle est affecté un mode constructif différent. Dans un premier temps, on simule un mode constructif en mur béton banché isolé par l'intérieur, avec plancher et murs de refend en béton qui correspond à une inertie lourde.

Puis il y aura une série de tests avec une ossature légère en bois, ainsi que des murs de refend en ossature bois isolés, avec un plancher et une toiture en ossature bois isolé eux aussi. Cela correspond à une inertie légère.

Pour finir, un troisième mode constructif sera mixte (façade en bois, refend, plancher et toiture en béton) Cela correspond à une inertie moyenne.

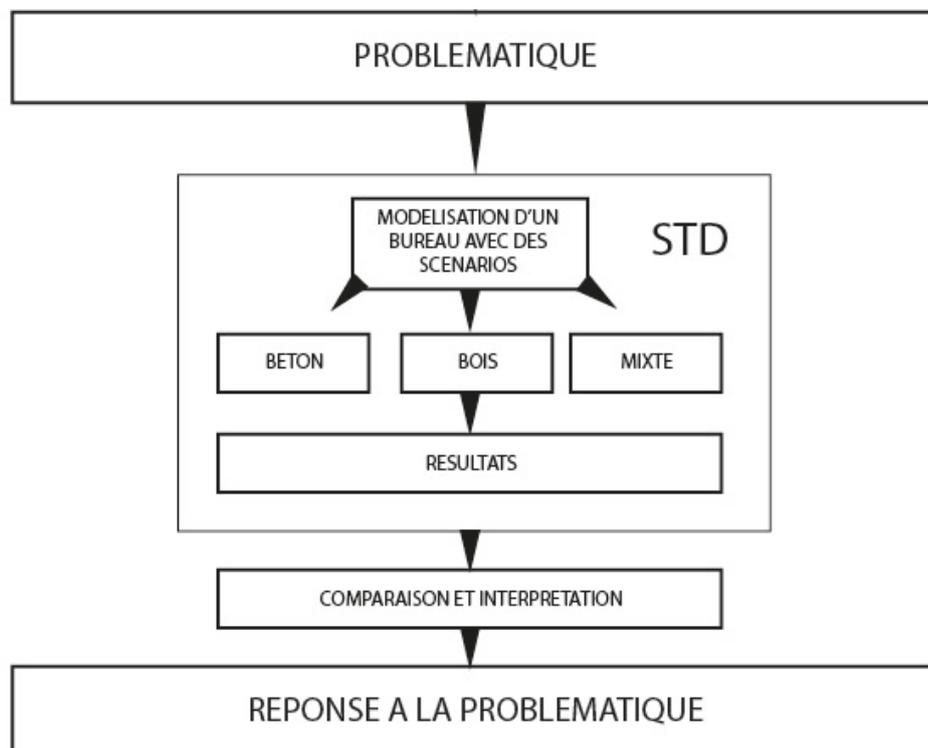


Figure 12 : méthode de résolution

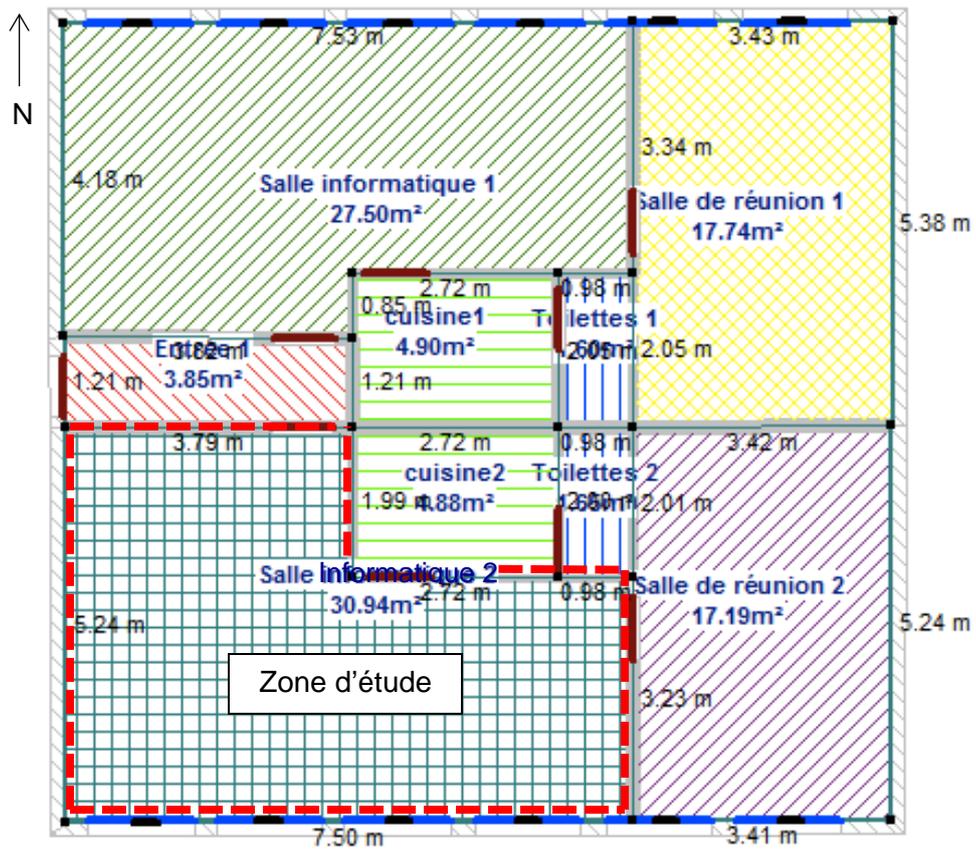


Figure 13 : Plan du bureau simulé

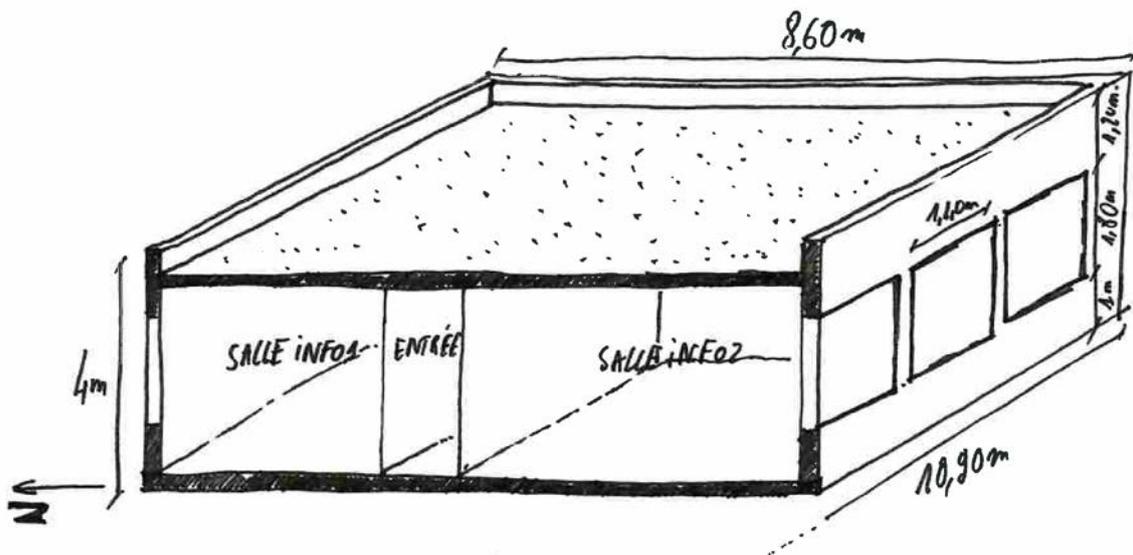


Figure 14 : Vue axonométrique du bureau simulé

Les scénarios de la STD prennent en compte les préconisations standard en termes de ventilation, apports internes, chauffages, scénarios d'occupation, éclairage, déperditions. Ces valeurs sont définies par défaut dans le logiciel Pleiades + Comfie pour des typologies de bureaux.¹⁹

2. Les conditions d'analyse

Il est affecté à ces modèles plusieurs facteurs qui vont faire varier la température intérieure et influencer sur le confort. Ces expérimentations sont « superposées », c'est à dire que les paramètres de la 1^{ère} expérience sont utilisés pour la seconde et ainsi de suite.

Une seule pièce est étudiée. Il s'agit de la **salle informatique n°2**, qui est la pièce avec le plus de contraintes, et la plus sensible aux surchauffes (exposition au sud, gains internes).

Simulation A1 : Le bâtiment est soumis aux apports énergétiques externes (AE)

Ce premier test permet de comparer les trois modes constructifs vis à vis des variations de températures externes. Il sera important de noter les heures et la durée de dépassement de la température d'inconfort de 28°C, ainsi que le déphasage que vont apporter les isolants et les matériaux. Le fichier météo utilisé est celui de Nice RT2012 (H3).



Figure 15 : Apports solaires

Simulation A2 : Intégration des gains internes (GI)

Les données fournies par le logiciel Pleiades + Comfie sont prises en compte, qui donnent des scénarios de puissance dissipée par mètre carrés, dans un local avec ordinateurs et imprimante. A cela sont ajouté les dégagements de puissance par les occupants, à savoir 80W par personne.

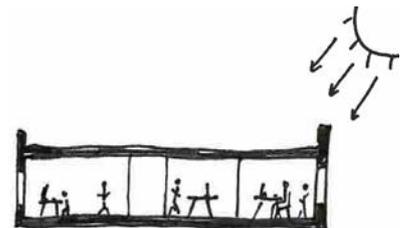


Figure 16 : ajout des gains internes

Simulation A3 : Ajout de protections solaires (PS)

Pour cette troisième expérience, une casquette solaire est ajoutée au bâtiment, à l'intérieur sur la façade orientée au sud. Le dimensionnement de la casquette solaire est de 3 mètres, de manière à protéger des rayons du soleil arrivant à 45° sur la façade, jusqu'au niveau de l'allège.

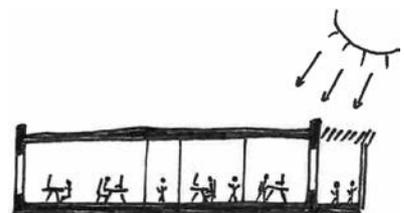


Figure 17 : casquette solaire

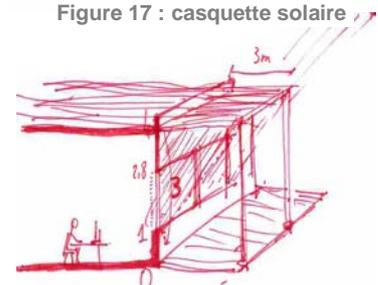


Figure 18 : dimensionnement de la casquette

¹⁹ Scénarios de STD visible en Annexe n°7

Simulation A4 : Ajout de la sur-ventilation nocturne (VNoc)

La simulation prend en compte une sur-ventilation lorsque les utilisateurs quitteront le bureau de 19h à 9h. Les volumes d'air de la VMC double flux sont multipliés par 5 passant de 25m³/h à de 125m³/h

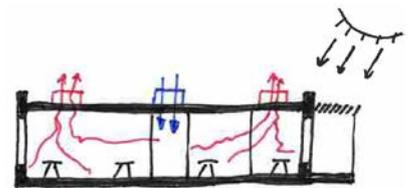


Figure 19 : Sur-ventilation nocturne

Simulation A5 : ventilation naturelle nocturne (VNat)

Le bâtiment est refroidi par ouverture des menuiseries oscillo-battant, du 14 mai au 14 octobre. Les dates sont choisies pour ne pas faire descendre de manière trop importante le bâtiment en température, afin que les premières heures où les occupants travaillent ne soient pas des températures d'inconfort du au froid.

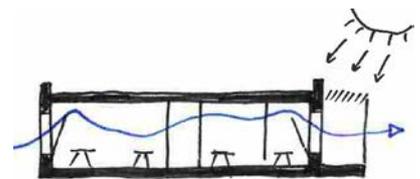


Figure 20 : Ventilation naturelle

Simulation A6 : Combinaison de la sur-ventilation nocturne et de la ventilation naturelle. (VNoc + VNat)

Un dernier test combine les deux modes de ventilation, pour voir s'il y a des impacts positifs sur l'abaissement de la température.

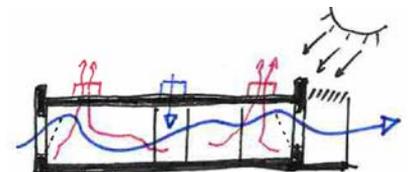


Figure 21 : Sur-ventilation + ventilation naturelle

Précisions sur le fichier météo :

²⁰

L'ensemble des modèles est testé avec le fichier météo de Nice zone H3 de l'année 2001. On sait que le problème des surchauffes est un problème entendu au niveau français, mais pour des questions de facilité d'expérimentation, l'étude est concentrée sur le climat méditerranéen.

Le fichier météo à des données de vent incomplètes, le logiciel prendra des données de vent par défaut. Il peut donc y avoir des écarts possibles avec la réalité, notamment dans les débits d'air dans la ventilation naturelle nocturne.

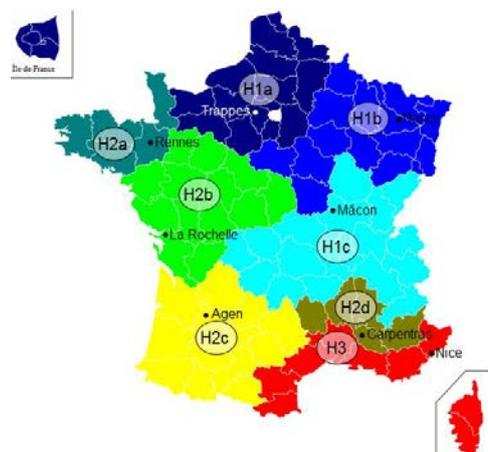


Figure 22 : Répartition des zones climatiques de la RT 2012 en France

²⁰ Carte de zonage disponible sur le site internet RT bâtiment : <http://www.rt-batiment.fr>

L'ensemble des simulations est résumé sur le graphique suivant :

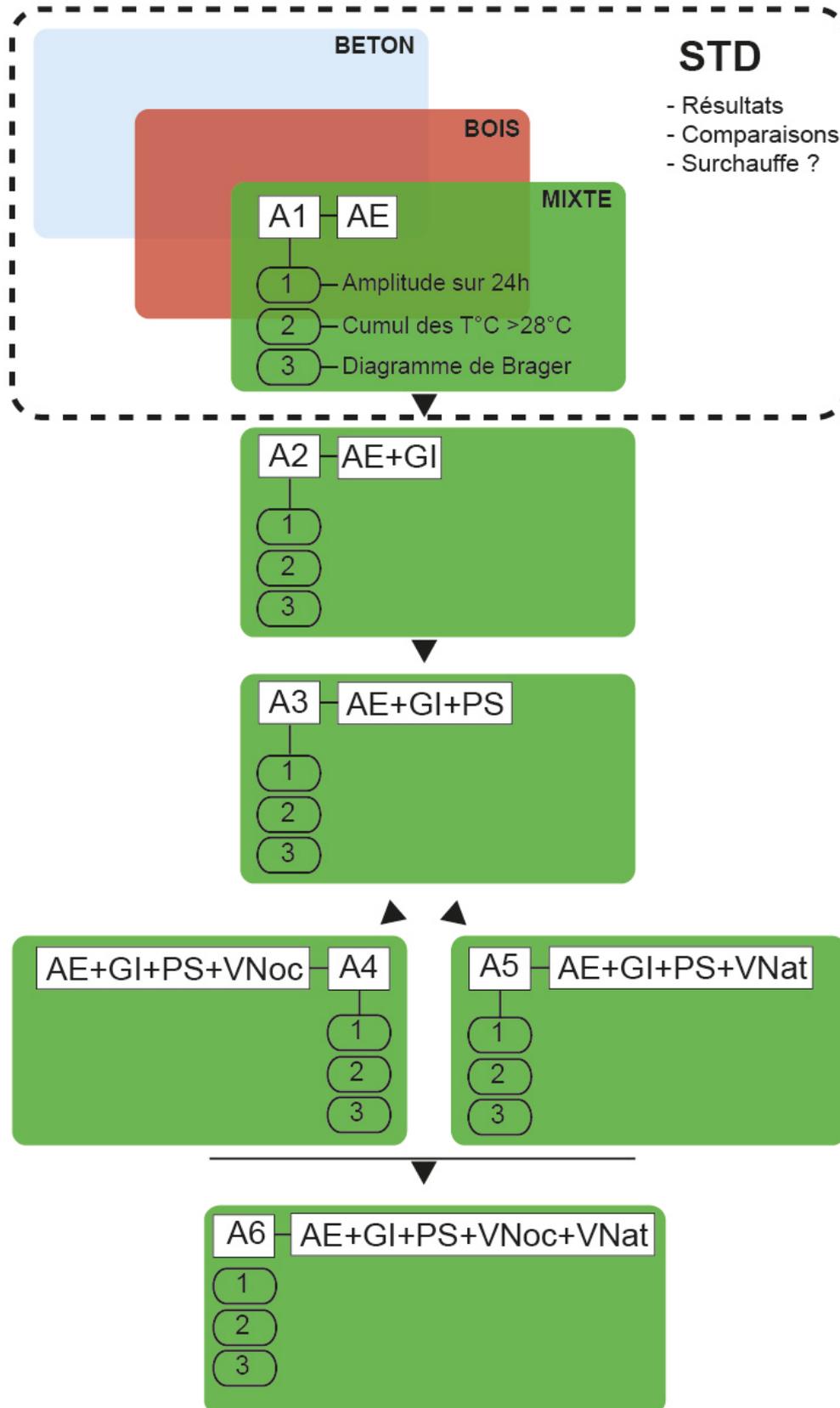


Figure 23 : organisation des simulations

3. Seuils et évaluation du confort

Plusieurs indicateurs vont permettre de qualifier une situation d'inconfort thermique dû à une surchauffe ou non :

a) L'évolution des températures opératives sur 24h

La simulation thermique dynamique permet de comparer les températures intérieures suivant le degré d'inertie du bâtiment. La superposition de ces courbes détermine le mode constructif qui apporte le plus de confort. Les températures intérieures sont comparées aux températures extérieures. On peut évaluer le déphasage, et le rôle des matériaux employés pour retarder la montée des températures à l'intérieur du local d'étude. Les températures maximales sont comparées à limite d'inconfort qui est de 28°C, définie par la démarche BDM (Bâtiment Durables Méditerranéens)²¹. L'heure et la durée à laquelle ce seuil est dépassé sera relevée pour le situer par rapport aux heures d'occupation du bureau (9h – 19h).

b) Nombre d'heures ou la températures $\geq 28^{\circ}\text{C}$ sur 1 an

Des surchauffes ponctuelles peuvent être acceptées, mais sur une certaine durée. Le nombre d'heures en inconfort thermique de chaque mode constructif est comparé avec **la démarche BDM Bâtiment Durables Méditerranéens**. Il existe plusieurs niveaux de reconnaissance, le Bronze, l'Argent et l'Or, avec différentes exigences sur la question du confort d'été. On choisira de suivre le niveau **Argent**, car il définit sur l'année un seuil d'inconfort à ne pas dépasser : **le nombre d'heures d'inconfort supérieur à 28°C ne doit pas excéder 180 heures sur l'année en période d'occupation**. Cette limite va définir le seuil d'inconfort pour les trois modes constructifs.

c) Diagramme de Brager

Ce diagramme est obtenu grâce à la STD. Il donne une version simplifiée du confort intérieur en période d'occupation, en mettant en relation la température opérative (moyenne de l'air et des parois) en fonction de la température extérieure pour définir une plage de confort dans laquelle la plupart des occupants se sentent bien dans la pièce.

La simulation thermique dynamique tente de simuler des situations réelles en prenant en compte des scénarios. Elle tente de se rapprocher de la réalité, mais sans pour autant être exacte. Elle permet néanmoins de faire des choix constructifs pour tenter de trouver la meilleure solution adaptée au besoin.

VI. EXPERIMENTATIONS - application de la méthodologie

A. Simulations STD avec Pleiades + Comfie

²¹ La démarche environnementale BDM est détaillée sur www.polebdm.eu

1. Description des choix constructifs

Voici un tableau récapitulatif des matériaux employés dans les 3 modes constructifs qui sont simulés dans la STD. Ces trois modes constructifs correspondent à une inertie lourde (béton), légère (bois) et intermédiaire (mixte) :

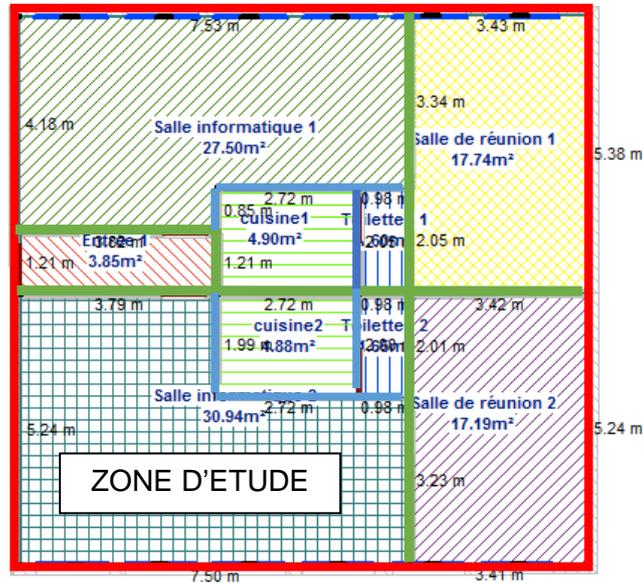


Figure 24 : Répartition des matériaux sur les parois

	BETON	BOIS	MIXTE
Mur extérieur	<p>$e = 42,8 \text{ cm}$ $R = \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Placoplatre 1.3 cm - lame d'air : 1,5 cm - ITE laine de verre: 20cm - Béton banché : 20cm 	<p>$e = 32,3 \text{ cm}$ $R = 5.88 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - bardage bois : 2cm - lame d'air : 1,5cm - pare pluie - panneau OSB : 1cm - laine de bois : 4cm - ouate de cellulose : 20cm - panneau OSB : 1cm - lame d'air : 1,5cm - Fermacell : 1.3cm 	<p>$e = 32,3 \text{ cm}$ $R = 5.88 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - bardage bois : 2cm - lame d'air : 1,5cm - pare pluie - panneau OSB : 1cm - laine de bois : 4cm - ouate de cellulose : 20cm - panneau OSB : 1cm - lame d'air : 1,5cm - Fermacell : 1.3cm
Cloison lourde	<p>$e = 17,6 \text{ cm}$ $R = \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Placoplatre 1.3cm - béton 15 cm - Placoplatre 1.3cm 	<p>$e = 16 \text{ cm}$ $R = 2.89 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fermacell : 1cm - panneau OSB : 1cm - ouate de cellulose : 12cm - panneau OSB : 1cm - Fermacell : 1cm 	<p>$e = 17,6 \text{ cm}$ $R = \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Placoplatre 1.3cm - béton 15 cm - Placoplatre 1.3cm

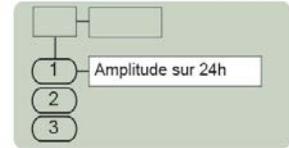
Cloison fine	e = 10cm R = m ² ·K/W - plaque gypse : 1cm - laine de roche : 8cm - plaque gypse : 1cm		
Toiture	e = 38cm R = 6.62 m ² ·K/W - feutre bitumeux : 1cm - polyuréthane : 16cm - Laine de verre : 26cm - Plaque Gypse : 1cm	e = 46cm R = 8.44 m ² ·K/W - gravier : 5cm - feutre bitumineux : 1cm - panneau OSB : 1cm - laine de bois : 6cm - panneau OSB : 1cm - bois léger : 2cm	e = 46cm R = 8.44 m ² ·K/W - gravier : 5cm - feutre bitumineux : 1cm - panneau OSB : 1cm - laine de bois : 6cm - panneau OSB : 1cm - bois léger : 2cm
Plancher	e = 40cm R = 4.99 m ² ·K/W - laine de verre : 20cm - Béton lourd : 20cm	e = 32.5cm R = 6.86 m ² ·K/W - Linoléum : 0.5 cm - Panneau OSB : 1cm - Ouate de cellulose : 30cm - Panneau OSB : 1cm	e = 40cm R = 4.99 m ² ·K/W - laine de verre : 20cm - Béton lourd : 20cm
Menuiseries extérieures	BBC double vitrage peu émissif avec lame d'argon avec store intérieur Largeur : 1,40m – Hauteur : 2,00m – Allège : 1,00m – surface : 2,80m ² Ouverture oscillo battant - Coefficient Uw = 1,10 W/(m ² .K) Facteur solaire : Sw= 0.43 Facteur de transmission lumineuse : 0,71		
Menuiseries intérieures	Porte en bois 2.04*0.93m – détalonnage : 1.5cm		
Ventilation VMC	Système de ventilation double flux : Salle informatique 1 et 2 – cuisine 1 et 2 - Soufflage d'air 25m ³ /h - Reprise d'air 25m ³ /h Système de ventilation simple flux Hygro B : Salle de réunion 1 et 2 – toilettes 1 et 2 - 2 Entrées d'air sur les menuiseries 30m ³ /h - Reprise d'air 30m ³ /h		
Chauffage	Radiateurs électriques : 2000 W Salles informatiques : 2 unités Salle de réunion : 1 unité Cuisines : 1 unité Entrée : 1 unité		
Climatisation	Pas de système de climatisation		

Tableau 1 : Sélection des matériaux pour les trois modes constructifs

2. Première série de simulations

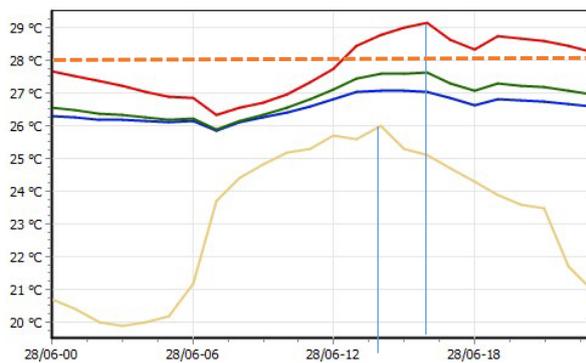
a) L'évolution des températures sur 24h

Voici les résultats des simulations qui présentent le comportement des trois modes constructifs un jour d'été travaillé. Le jour le plus chaud tombe durant un week-end, et n'est pas stratégique pour notre étude, car les gains internes des occupants ne seraient pas pris en compte. Le jeudi 28 juin 2001 ayant des températures moyennes de saison sera pris en compte sur le fichier météo de Nice (H3).



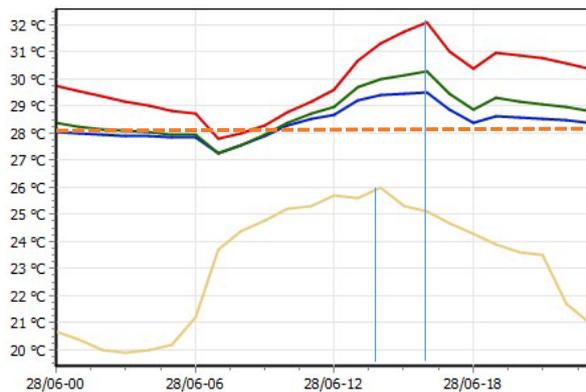
Légende :

Béton — Mixte — Bois — T°C ext — T°C limite inconfort — déphasage ↔



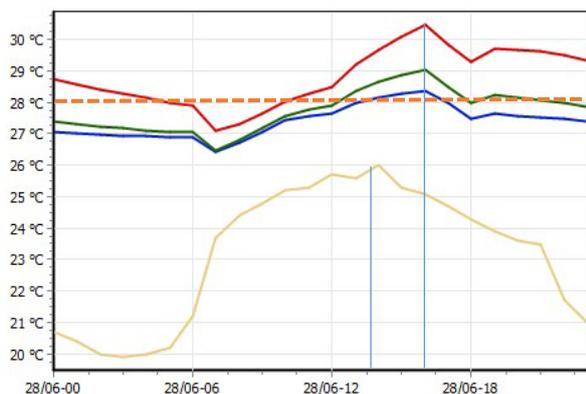
Simulation **A1** : apports externes

Ce premier test classe la réaction des trois modes constructifs réagissant aux apports solaires. Plus on a d'inertie, et plus le bâtiment est frais. Le béton et mixte ne sont pas en surchauffe, mais le bois dépasse les 28°C.



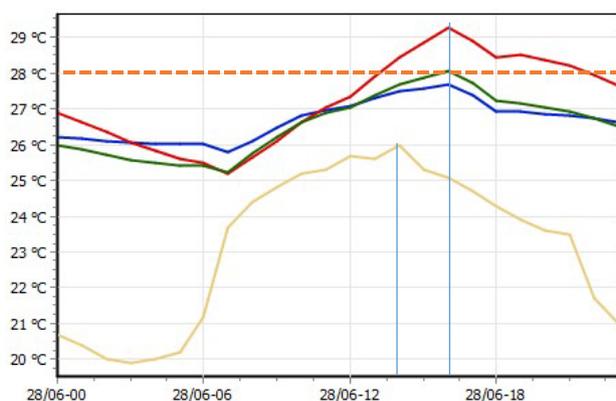
Simulation **A2** : gains internes

L'ajout des gains internes (occupation humaine + matériel bureautique) fait monter les températures internes des 3 modes constructifs et dépassent les 28°C sur l'ensemble de la journée. Il est nécessaire de se protéger des apports solaires.



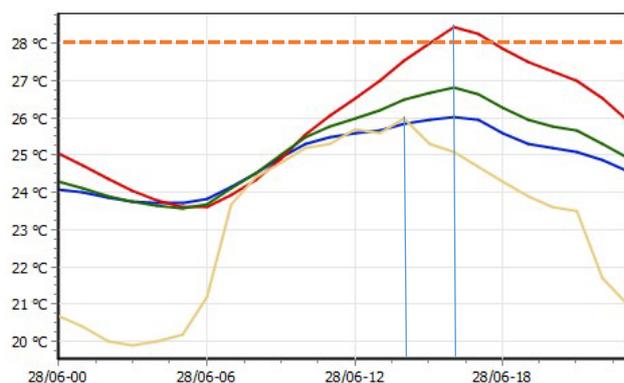
Simulation **A3** : casquette solaire

L'ajout du débord de toiture au sud permet de gagner entre un et deux degrés suivant les modes constructifs. Le débord de toiture diminue les apports solaires, mais pas suffisamment pour ne pas dépasser la limite d'inconfort des 28°C.



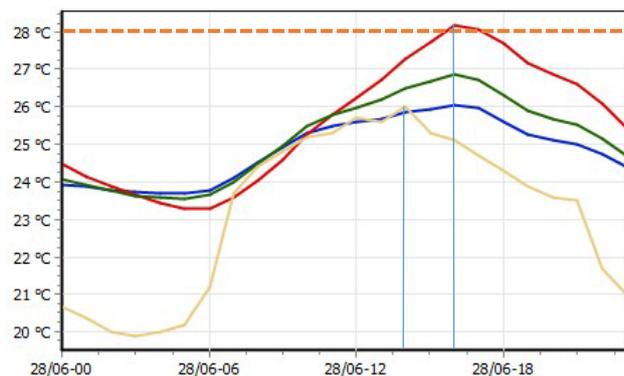
Simulation **A4** : Sur-ventilation nocturne

Le but de la sur-ventilation nocturne est de rafraichir le bâtiment la nuit. Les constructions en béton et mixte repassent en dessous de la barre des 28°C.



Simulation **A5** : Ventilation naturelle nocturne

L'ouverture des fenêtres oscillo-battantes est plus efficace que la sur-ventilation nocturne. Elle permet de gagner 1°C supplémentaire. La construction bois dépasse les 28°C durant 1h dans l'après-midi.



Simulation **A6** : Sur-ventilation + ventilation naturelle

La combinaison des deux modes de ventilation ne s'avère pas être très bénéfique. Les températures sont trop peu abaissées.

Figure 25 : température intérieure dans la salle informatique n°2

Bilan de l'évolution des températures sur 24h

La comparaison de ces courbes permet de montrer l'influence des protections solaires et de la ventilation dans le confort intérieur. Le déphasage est d'environ 2 heures, il est faible car les apports solaires réchauffent trop vite la pièce.

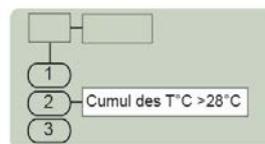
Le tableau suivant compare les différents modes constructifs et leur donne une appréciation selon l'heure et la durée de l'inconfort.

	Mode constructif	Heure $\geq 28^{\circ}\text{C}$	Temps $\geq 28^{\circ}\text{C}$	Appréciation
A1	Béton	✗	✗	😊
	Bois	12h30	12h	😞
	Mixte	✗	✗	😊
A2	Béton	9h15	18h	😞 😞
	Bois	7h30	23h	😞 😞 😞
	Mixte	9h15	18h	😞 😞
A3	Béton	12h30	2h	😞
	Bois	10h	20h	😞 😞
	Mixte	12h	6h	😞
A4	Béton	✗	✗	😊
	Bois	13h	10h	😞
	Mixte	✗	✗	😊
A5	Béton	✗	✗	😊 😊
	Bois	15h30	2h	😞
	Mixte	✗	✗	😊
A6	Béton	✗	✗	😊 😊
	Bois	16h	1h	😞
	Mixte	✗	✗	😊

Tableau 2 : Récapitulatif des heures et durées d'inconfort pour les différents modes constructifs

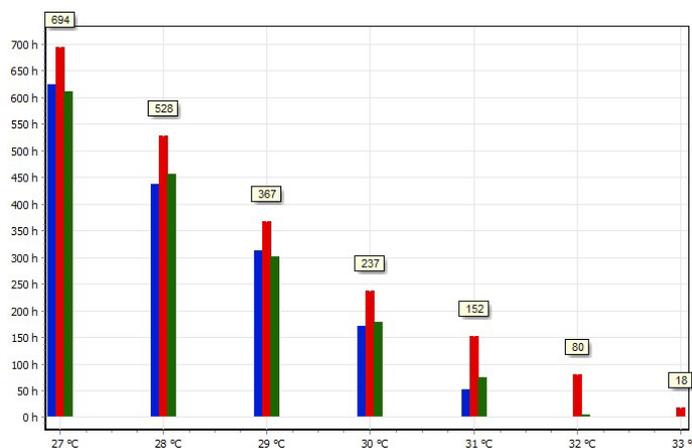
b) Le cumul d'heures au seuil d'inconfort $\geq 28^{\circ}\text{C}$

La suite des simulations se poursuit avec la simulation sur une année, et de regarder pour chaque mode constructif, le nombre d'heures au-dessus de la limite d'inconfort de 28°C .



Légende :

Béton — Mixte — Bois —



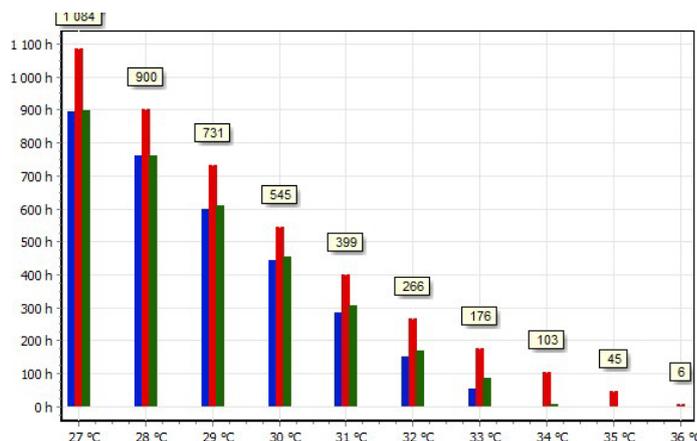
Simulation **A1** : apports externes

Somme des $T^{\circ}\text{C} \geq 28^{\circ}\text{C} =$

Béton : 974 h

Bois : 1382 h

Mixte : 1016 h



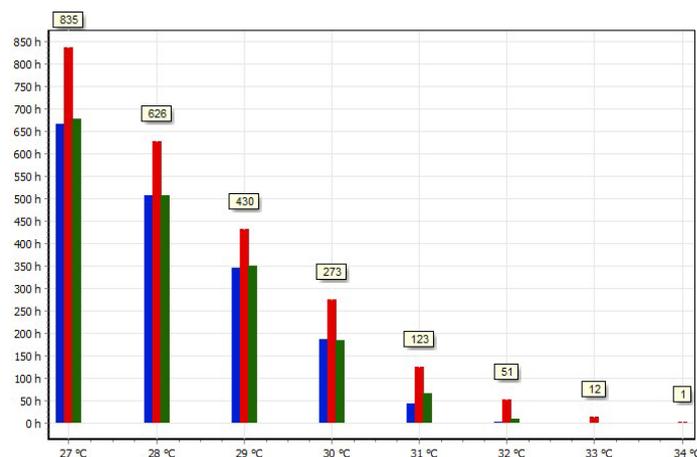
Simulation **A2** : gains internes

Somme des $T^{\circ}\text{C} \geq 28^{\circ}\text{C} =$

Béton : 2294 h

Bois : 3171 h

Mixte : 2390 h



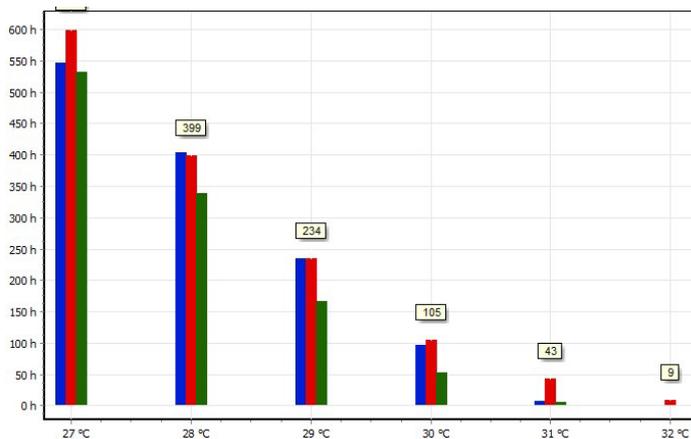
Simulation **A3** : casquette solaire

Somme des $T^{\circ}\text{C} \geq 28^{\circ}\text{C} =$

Béton : 1079 h

Bois : 1516 h

Mixte : 1114 h



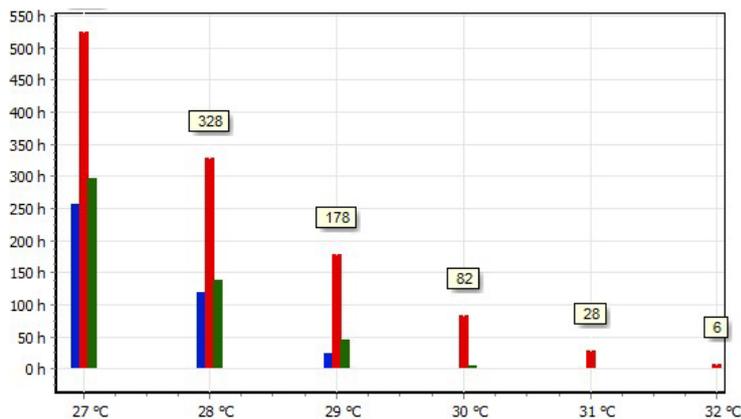
Simulation **A4** : Sur-ventilation nocturne

Somme des T°C ≥ 28°C =

Béton : 743 h

Bois : 790 h

Mixte : 563 h



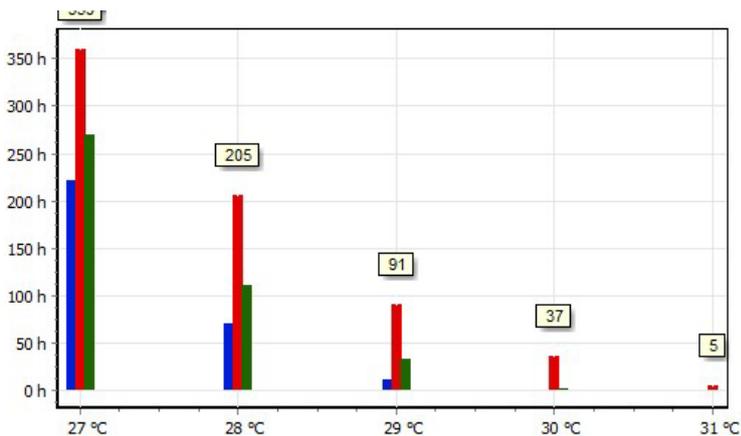
Simulation **A5** : Ventilation naturelle nocturne

Somme des T°C ≥ 28°C =

Béton : 142 h

Bois : 622 h

Mixte : 187 h



Simulation **A6** : Sur-ventilation nocturne + ventilation naturelle nocturne

Somme des T°C ≥ 28°C =

Béton : 81 h

Bois : 338 h

Mixte : 147 h

Figure 26 : Histogrammes du cumul des températures annuelles

Bilan du cumul des températures à l'année en période d'occupation

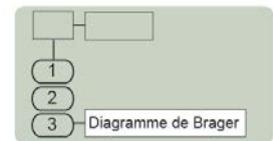
Malgré la ventilation et les protections solaires, **la construction bois n'obtient pas de bons résultats**. Seuls le béton et mixte arrivent à des résultats inférieurs à 180h. Les résultats montrent un **avantage considérable de la ventilation naturelle** pour les constructions **béton** et **mixte**, par rapport à la sur ventilation nocturne. La combinaison des deux ventilations (Simulation A6) n'apporte pas beaucoup plus de confort. Elle peut être intéressante à utiliser uniquement la semaine la plus chaude de l'année.

Cumul heures >28°C	1 ^{ère} série de simulations					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Béton	974	2294	1079	743	142	81
Bois	1382	3171	1516	790	622	338
Mixte	1016	2390	1114	563	187	147

Tableau 3 : Cumul des T°C ≥ 28°C sur l'année

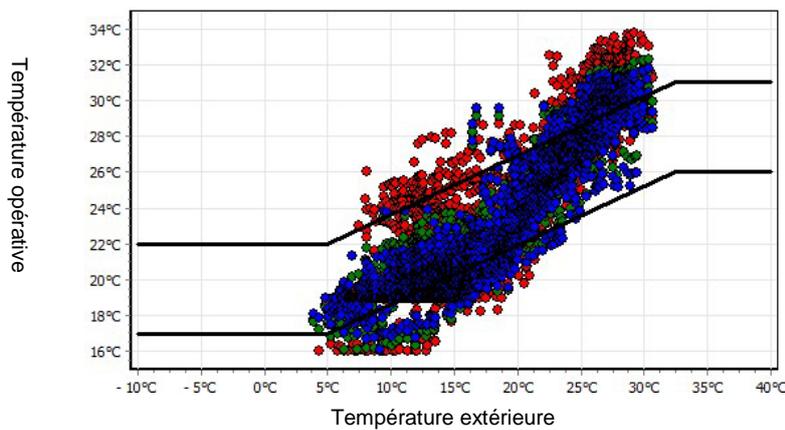
c) Le diagramme de Brager

Les valeurs données par le diagramme de Brager sont des pourcentages de confort (température opérative en fonction de la température extérieure, en prenant en compte aussi bien l'inconfort du froid que celui produit par la chaleur.



Légende :

Béton ——— Mixte ——— Bois ——— zone de confort



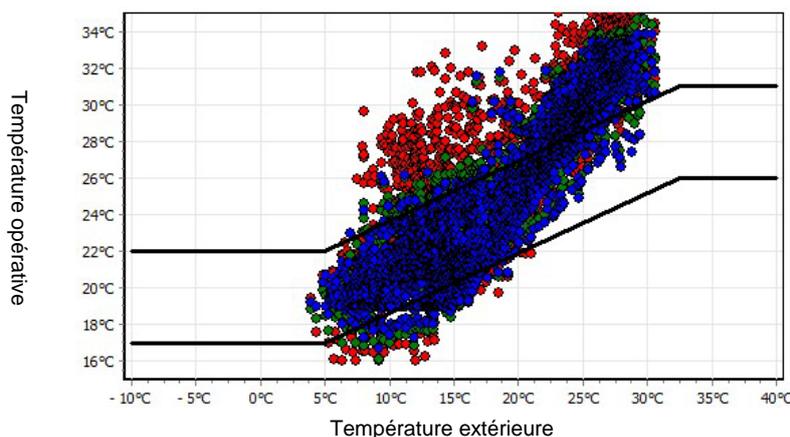
Simulation **A1** : apports externes

Pourcentage de confort

Béton : 65.46%

Bois : 62%

Mixte : 67.54%



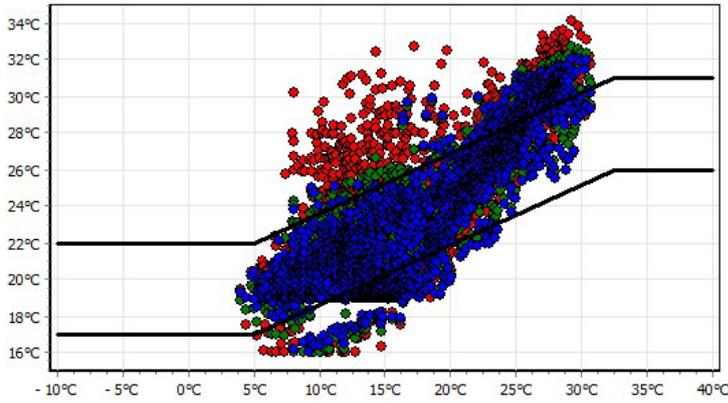
Simulation **A2** : gains internes

Pourcentage de confort

Béton : 62.96 %

Bois : 47.77%

Mixte : 60.58%



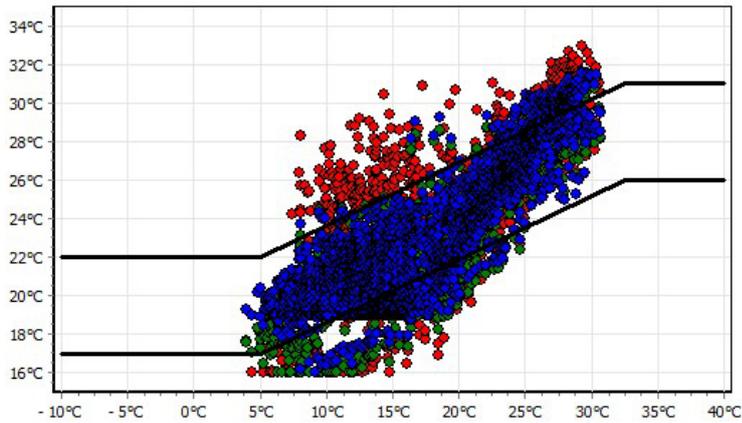
Simulation **A3** : casquette solaire

Pourcentage de confort

Béton : 67.88%

Bois : 59.08%

Mixte : 67.58 %



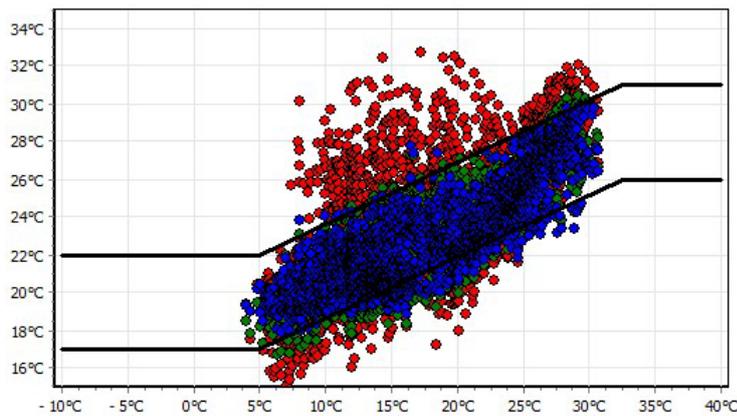
Simulation **A4** : Sur-ventilation nocturne

Pourcentage de confort

Béton : 72.19%

Bois : 63.23 %

Mixte : 69.77%



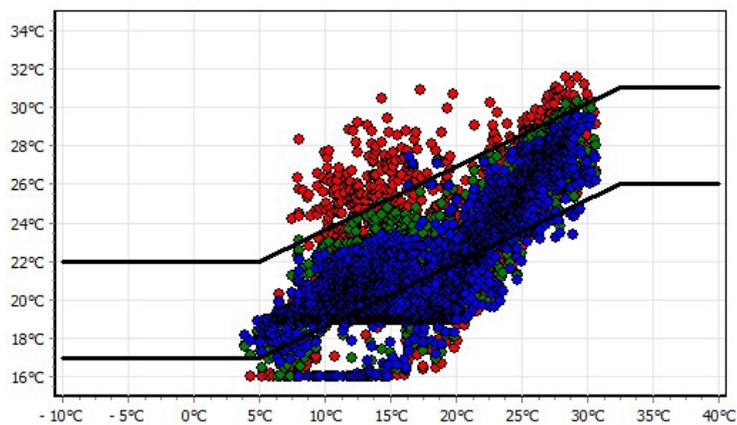
Simulation **A5** : Ventilation naturelle nocturne

Pourcentage de confort

Béton : 88.35 %

Bois : 69.62 %

Mixte : 84.65%



Simulation **A6** : Sur-ventilation nocturne + ventilation naturelle nocturne

Pourcentage de confort

Béton : 67.88 %

Bois : 61.42 %

Mixte : 67.88 %

Figure 27 : Diagrammes de Brager sur le confort thermique intérieur

Bilan des diagrammes de Brager

Le pourcentage de confort augmente avec les protections solaires et la ventilation, sauf dans l'expérience 6, où le bâtiment paraît trop rafraîchi et les températures sont trop basses lorsque les occupants arrivent dans les locaux. Il faut donc bien doser la sur-ventilation mécanique et naturelle, et ne pas le déclencher trop tôt dans l'année, sous peine de créer l'effet inverse à savoir de l'inconfort, mais dû au froid.

% confort	1 ^{ère} série de simulations					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Béton	65	63	68	72	88	68
Bois	62	47	59	63	70	61
Mixte	67	60	68	70	85	68

Tableau 4 : Pourcentages de confort de la zone d'étude

Bilan de cette première série de simulations

La simulation A5 a les meilleurs résultats de pourcentage de confort sur les trois modes constructifs. Les constructions **béton** et **mixte** réussissent à maintenir un **bon confort d'été** sur la saison chaude. L'ensemble des simulations montrent que cela n'est pas utile de faire de la ventilation naturelle et de la sur-ventilation, si au préalable, le bâtiment n'est pas bien protégé des rayons du soleil. Les **apports solaires** sont les gains à **limiter** dans la conception du bâtiment. Le déphasage n'est pas efficace non plus, il est seulement de deux heures. Il devrait être d'environ cinq heures pour être utile, et d'avoir les températures les plus élevées lorsque les occupants ont quitté le bureau. On remarque cependant que les matériaux inertes ont la capacité de limiter les variations d'amplitudes internes.

Simulation	Combinaisons	Béton	Bois	Mixte
A1	AE	☹️	☹️	☹️
A2	AE_GI	☹️	☹️☹️	☹️
A3	AE_GI_PS	☹️	☹️	☹️
A4	AE_GI_PS_VNoc	☹️	☹️	😊
A5	AE_GI_PS_VNat	😊😊	☹️	😊😊
A6	AE_GI_PS_VNoc+Vnat	😊	☹️	😊

Tableau 5 : Pourcentages de confort de la zone d'étude

Légende :

AE : apports solaires externes

GI : Gains internes

PS : Casquette solaire

VNoc : Sur-ventilation nocturne

VNat : Ventilation naturelle nocturne

PS2 : Casquette solaire + store extérieur

3. Amélioration du confort d'été sur la construction bois

a) Stratégie d'améliorations

Pour analyser la nature de la surchauffe, il est nécessaire de regarder du côté des apports solaires qui entrent dans le bâtiment, afin de voir si les protections solaires sont correctement dimensionnées, et permettent une protection optimale.

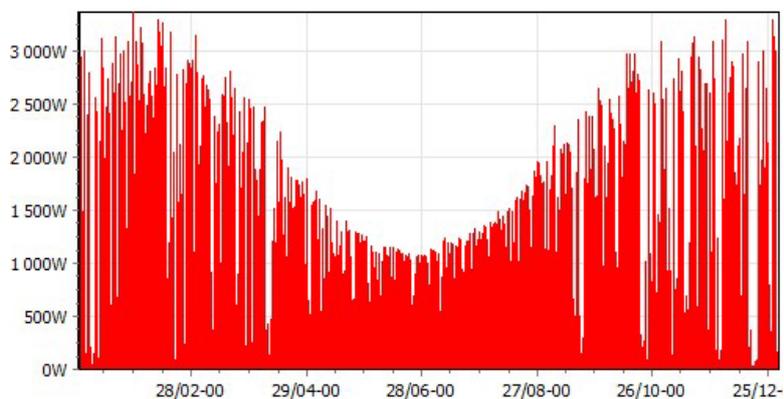


Figure 28 : Apports solaires annuels de la zone d'étude sans protection solaire

Le premier graphique montre les apports solaires qui entrent dans la salle informatique sur l'année, sans protections solaires. La course du soleil d'automne et d'hiver est plus basse que celle du printemps et de l'été, et apporte plus de puissance dans le local de travail.

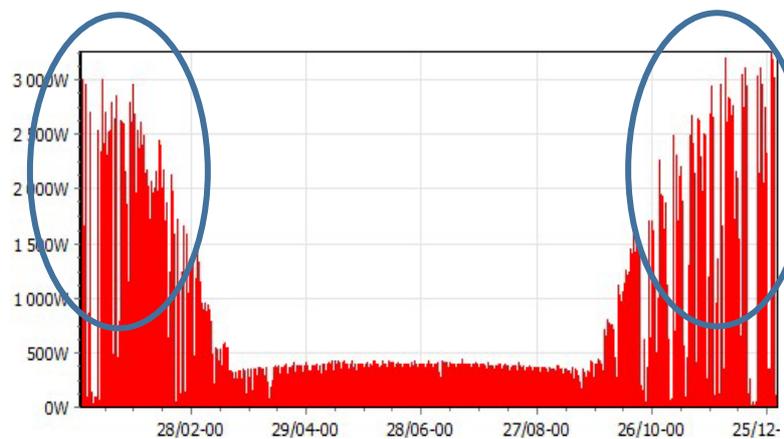


Figure 29 : Apports solaires annuels de la zone d'étude avec casquette solaire

Dans la simulation A3, les protections solaires permettent de diminuer les apports à partir du mois de mars jusqu'en octobre. Mais à partir de ce moment, la casquette solaire ne remplit plus sa fonction de barrière, car le soleil est trop bas. Les rayons solaires réchauffent très vite le local de travail.

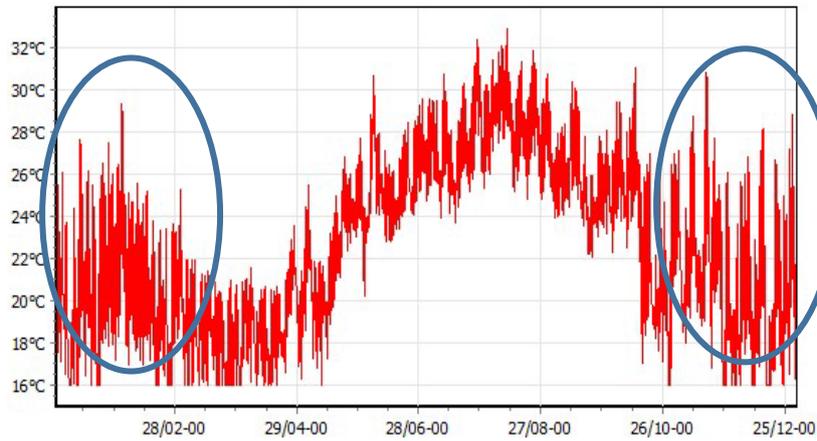


Figure 30 : Températures intérieures annuelles dans la zone d'étude

Voici l'évolution des températures intérieures à l'année pour la construction bois, avec la casquette solaire, sur la simulation A3.

D'octobre à mars, les températures sont trop élevées, et atteignent parfois les 30 degrés. On remarque qu'après le mois de février, une fois que le soleil a pris de l'altitude elles sont plus basses, car la casquette solaire limite les apports. Dans les constructions à inertie légère, cela **remet en question les principes bioclimatiques**, qui incitent à laisser entrer les apports solaires en hiver.

Dans le cas des constructions mixte et béton, l'inertie par absorption des matériaux permet d'accumuler la puissance solaire transmise, et évite la surchauffe. L'inertie légère de la construction bois ne permet pas de limiter ces apports. Ils sont transmis en majorité par les vitrages et dans ce cas, l'inertie par transmission ne joue pas son rôle. La pièce de travail monte alors très vite en température, même pendant la période hivernale. Une solution pour permettre de diminuer la puissance solaire est **d'installer des brise-soleil** sur les menuiseries, de manière à contrer les rayons du soleil horizontaux.

Il est donc nécessaire **d'optimiser la conception des protections solaires** afin de pouvoir diminuer la puissance qui entre dans la salle informatique. La protection doit être efficace **toute l'année**.

Quelles sont les marges de manœuvre possibles en simulation thermique dynamique sur Pleiades + Comfie ?

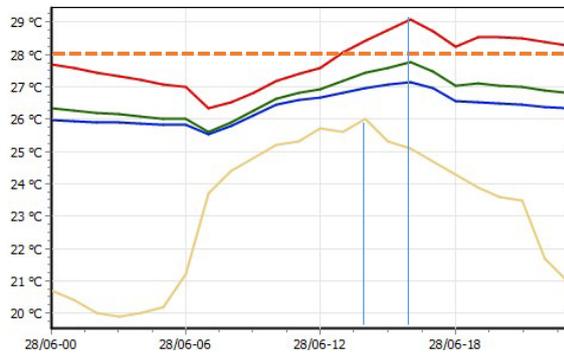
Une des solutions consiste à changer le facteur solaire de la menuiserie, en simulant un brise soleil extérieur. Les valeurs sont visibles en annexe n°3. Je prendrai un facteur solaire sera à 0.13, qui correspond à un store à lame extérieur de couleur claire²².

²² Voir Annexe 3 sur l'influence des stores sur le facteur solaire

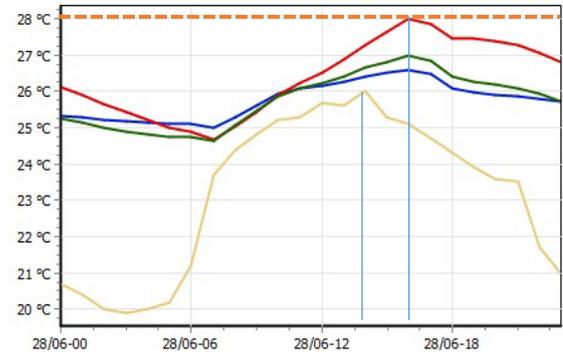
b) L'évolution des températures sur 24h

Légende :

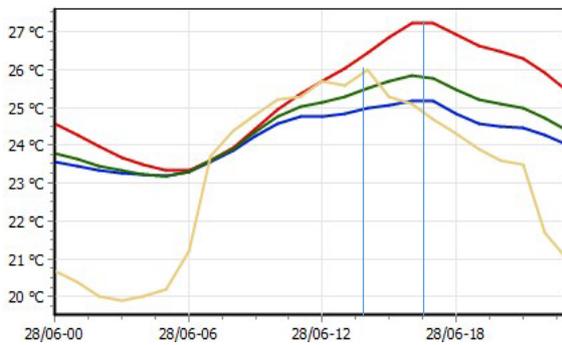
Béton — Mixte — Bois — T°C ext — T°C limite inconfort — déphasage



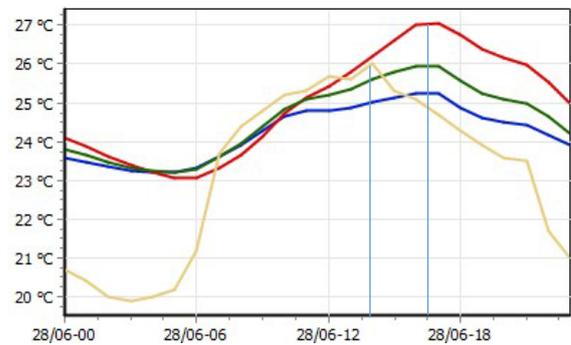
Simulation **B3** : casquette solaire + brise soleil ext.



Simulation **B4** : Sur-ventilation nocturne



Simulation **B5** : Ventilation naturelle nocturne



Simulation **B6**: Sur-ventilation nocturne + Ventilation naturelle nocturne

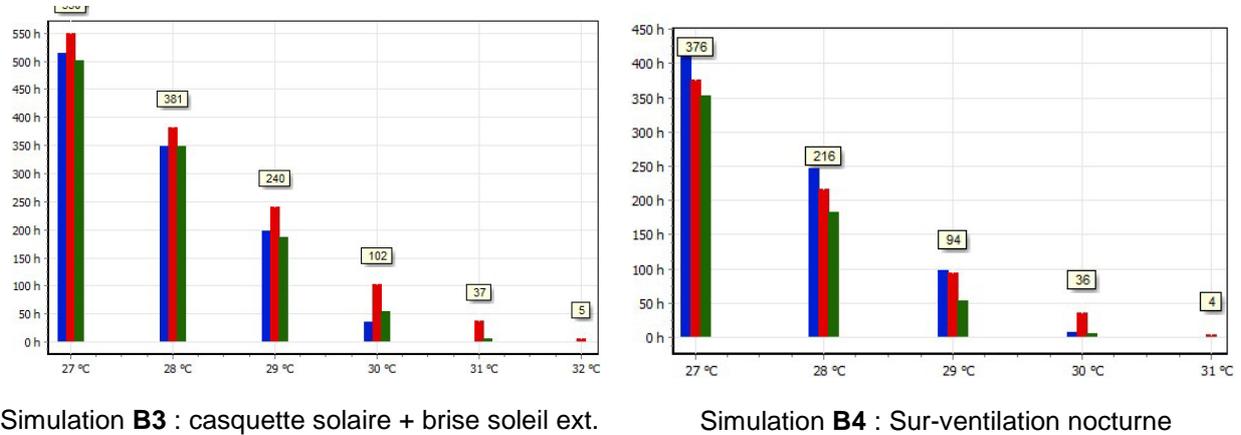
Figure 31 : température intérieure dans la salle informatique n°2

Si l'on compare les trois modes constructifs avant et après la pose d'un brise-soleil extérieur, on remarque que chacun des trois modes constructifs perdent de 1,3°C à 1,5°C. Les températures des constructions béton et mixte passent deviennent inférieures 28°C. Cependant on reste sur le même déphasage de deux heures. Le brise-soleil extérieur apporte une grande utilité au confort thermique, en saison hivernale. En regardant la construction bois, on obtient des températures inférieures à 28°C lorsque le bâtiment est ventilé la nuit.

c) Le cumul d'heures au seuil d'inconfort $\geq 28^{\circ}\text{C}$

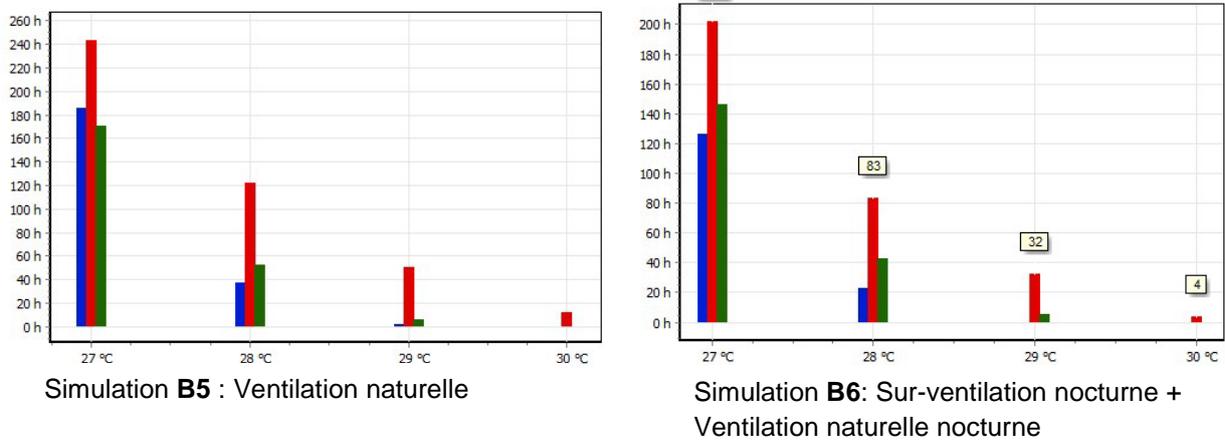
Légende :

Béton — Mixte — Bois —



Simulation B3 : casquette solaire + brise soleil ext.

Simulation B4 : Sur-ventilation nocturne



Simulation B5 : Ventilation naturelle

Simulation B6 : Sur-ventilation nocturne + Ventilation naturelle nocturne

Figure 32 : Histogrammes du cumul des températures annuelles

Cumul heures $\geq 28^{\circ}\text{C}$	1 ^{ère} série de simulations						2 ^{ème} série de simulations			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B3	B4	B5	B6
Béton	974	2294	1079	743	142	81	581	352	39	23
Bois	1382	3171	1516	790	622	338	765	350	184	119
Mixte	1016	2390	1114	563	187	147	595	242	58	48

Tableau 6 : Récapitulatif du cumul d'heures $\geq 28^{\circ}\text{C}$ Valeurs exprimées en heures

Voici deux schémas montrant les valeurs des gains d'heures d'inconfort en pourcentage

Légende

Béton - Bois - Mixte

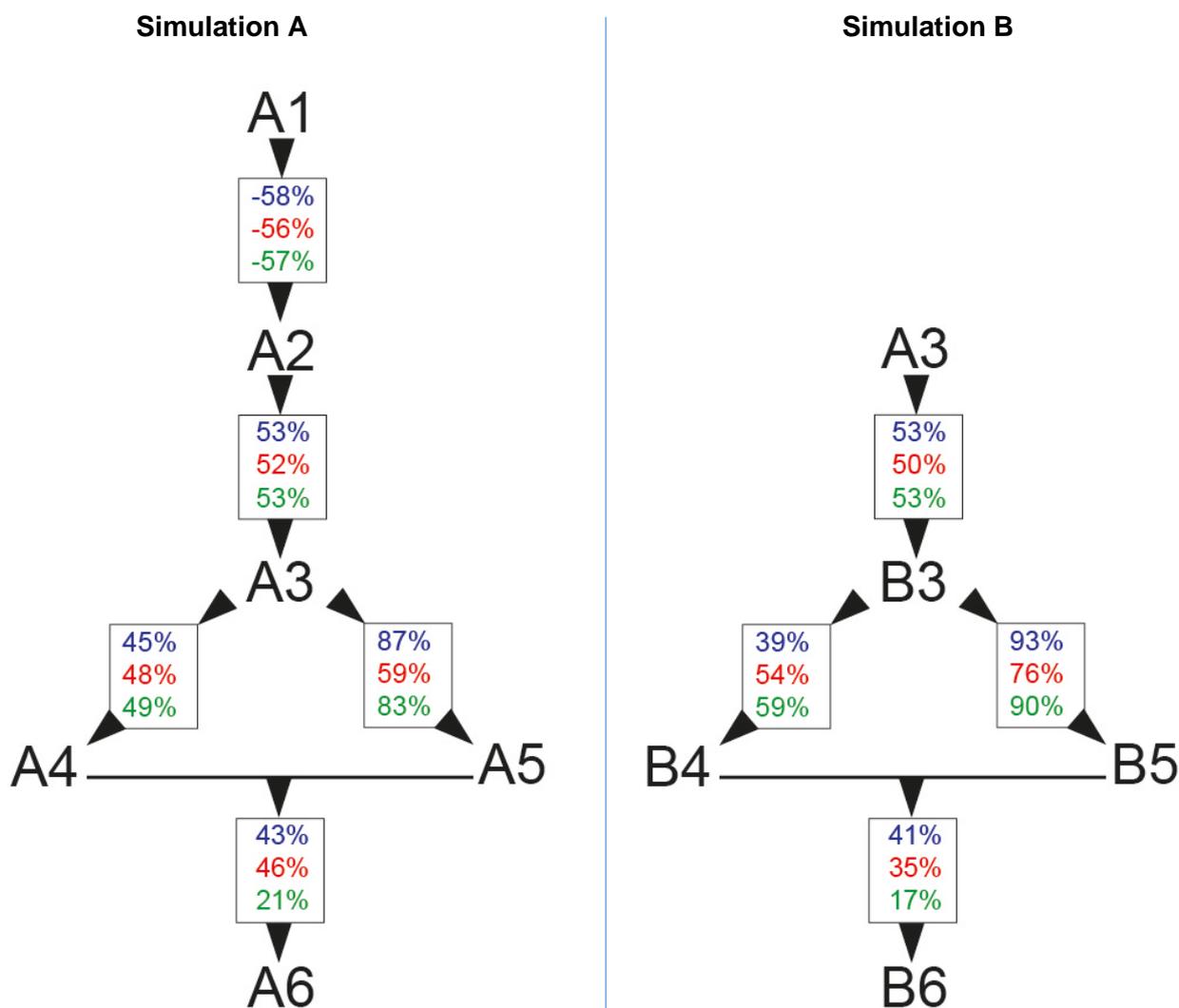


Figure 33 : Pourcentages de gains d'heures d'inconfort entre les simulations

Bilan du cumul des températures à l'année en période d'occupation

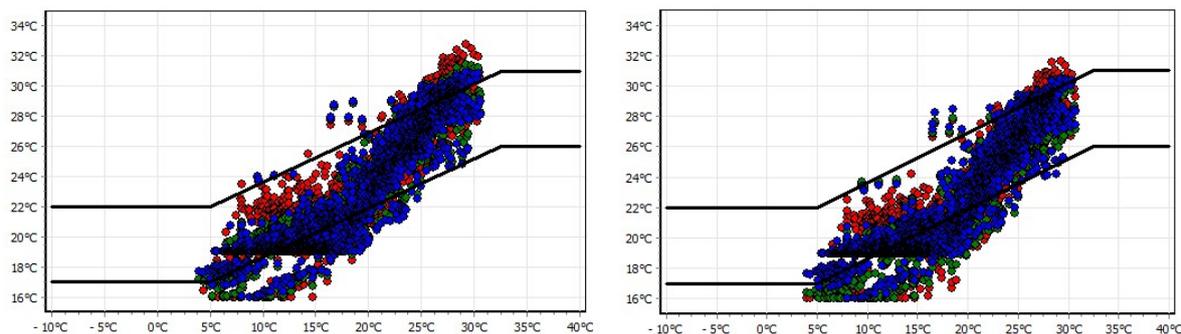
La comparaison des deux séries de simulations permet de voir que l'on **divise** environ **par trois** le nombre d'heures supérieur à 28°C dès lors que l'on fait de la ventilation naturelle, les trois modes constructifs passent sous les 180 heures annuelles d'inconfort. (La construction bois compte 4h de plus, mais on peut considérer que cela est négligeable).

L'analyse du tableau 6 montre une combinaison intéressante, celle de la **construction mixte associée à une sur-ventilation nocturne (A4)**, qui permet d'obtenir de meilleurs résultats que la construction béton. (Chiffres en bleu dans le tableau de synthèse). Béton et mixte obtiennent de très bons résultats grâce à la ventilation naturelle.

d) Le diagramme de Brager

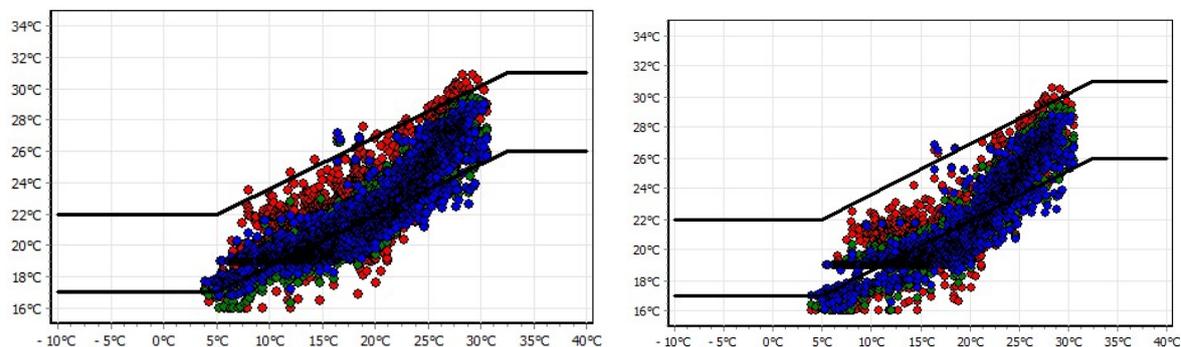
Légende : abscisse = T°C extérieure – Ordonnée = T°C opérative

Béton ——— Mixte ——— Bois ——— zone de confort



Simulation **B3** : casquette solaire + brise soleil ext.

Simulation **B4** : Sur-ventilation nocturne



Simulation **B5** : Ventilation naturelle

Simulation **B6**: Sur-ventilation nocturne +
Ventilation naturelle nocturne

Figure 34 : Diagrammes de Brager sur le confort thermique intérieur

% confort	1 ^{ère} série de simulations						2 ^{ème} série de simulations			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B3	B4	B5	B6
Béton	65	63	68	72	88	68	61	61	58	47
Bois	62	47	59	63	70	61	67	63	74	58
Mixte	67	60	68	70	85	68	62	56	56	49

Tableau 7 : Pourcentages de confort de la zone d'étude

Bilan des diagrammes de Brager

La **construction bois** associée à de la **ventilation naturelle** obtient un **bon résultat** de confort en comparaison avec les deux autres modes constructifs. Le bâtiment se rafraichit suffisamment la nuit, mais pas trop pour que les occupants ne soient pas en inconfort dû au froid.

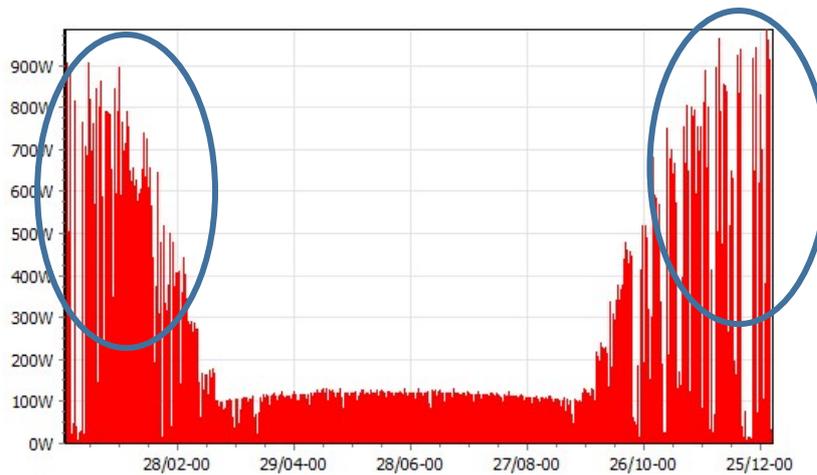


Figure 35 : Apports solaires annuels avec casquette solaire et brise soleil extérieur

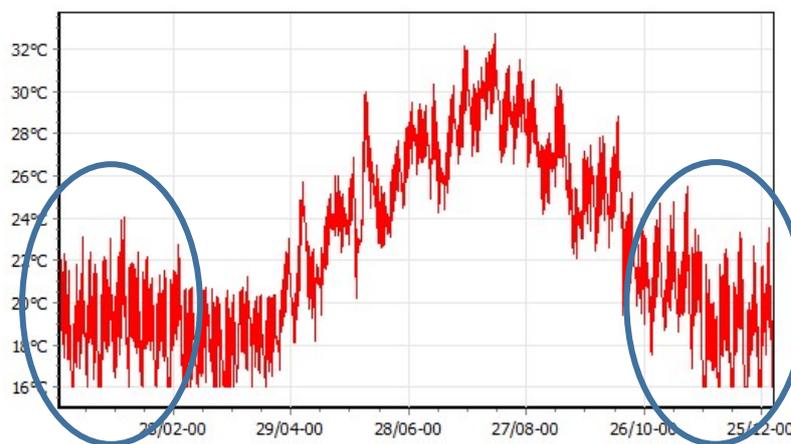


Figure 36 : Températures intérieures annuelles dans la zone d'étude

Les brise-soleil extérieurs permettent de limiter la montée des températures à l'intérieur de la salle de travail, qui sont maintenues sur une moyenne de 19°C grâce au chauffage

Le deuxième graphique montre que les apports solaires sont **divisés par 3**, par rapport à la première simulation sans brise soleil extérieur. (figure 29)

Cette combinaison débord de toiture + brise soleil extérieur est une bonne solution pour garder un confort thermique intérieur sur l'ensemble de l'année. La casquette joue son rôle en été, et les brise-soleil en hiver.

Simulation	Combinaisons	Béton	Bois	Mixte
B3	AE_GI_PS2	☹️	☹️	☹️
B4	AE_GI_PS2_VNoc	☹️	☹️	😊
B5	AE_GI_PS2_VNat	😊	😊 😊	😊
B6	AE_GI_PS2_VNoc+VNat	😊	😊	😊

Tableau 8 : Appréciation des différents modes constructifs

Bilan de la deuxième série de simulations

Le nombre d'heures d'inconfort **diminue sur les trois modes constructifs**, mais le pourcentage de confort est plus faible parce que le bâtiment est trop rafraîchi. Cependant si l'on sort du cadre de la simulation thermique dynamique et du diagramme de Brager et que l'on se place dans la logique de la Réglementation Thermique RT2012 (température de confort à 19°C), la pièce de travail est tout à fait confortable. Cependant, les retours d'expériences montrent que les occupants d'une pièce se sentent plus confortable avec un ou deux degrés de plus que la T°C règlementaire à 19°C.

VII. INTERPRETATION DES RESULTATS

Le but de cette thèse est de montrer si l'on peut obtenir un confort d'été dans les bureaux de la zone H3 en PACA, sur différents modes constructifs. La simulation STD avec le logiciel Pleiades + Comfie m'a permis d'obtenir des résultats qui montrent les leviers et facteurs d'influence sur lesquels il faut s'appuyer en conception.

Pour répondre à la problématique, on peut maintenant affirmer que l'on peut garantir un confort d'été dans les bureaux performants sur les trois modes constructifs étudiés. Les constructions avec une forte inertie ont plus de facilités que celles qui en ont moins. Cependant, avec une conception bioclimatique optimale, les constructions en ossature légères obtiennent un bon confort d'été, et dans certaines configurations sont meilleures que celles qui ont plus d'inertie.

A. La Simulation Thermique Dynamique

1. Synthèse de l'étude

La STD apporte une réponse positive à la problématique. Elle apporte des résultats convaincants avec la construction à ossature bois, même avec une grande façade vitrée, caractéristique des bureaux d'architecture contemporaine. Pour avoir de meilleurs résultats, il aurait été possible de diminuer la dimension des surfaces vitrées, pour diminuer davantage les apports externes.

a) Les gains internes

Sur les trois modes constructifs, les gains internes font partie des éléments qui doivent être surveillés de très près. En effet, ils augmentent de 60% les températures d'inconfort (voir figure 29, simulations A1 et A2). Imaginer une conception de bureaux avec des équipements électriques qui dissipent moins de puissance va permettre de réduire ce pourcentage. Comme les gains internes dégagés par les occupants sont fixes (80W) il faut alors veiller à ce que le local de travail ne soit pas surchargé d'occupants.

b) Les protections solaires

La casquette solaire est une solution efficace pour atténuer les apports solaires d'été et d'intersaison, tout en gardant des surfaces vitrées importantes.

Sur le littoral méditerranéen, cette étude montre que **le soleil d'hiver est très puissant**. Les éléments de construction du modèle en bois ne peuvent pas emmagasiner toute la puissance dans les murs, toiture et planchers. La température intérieure monte très vite. Il est indispensable pour ce type de constructions d'installer des protections sur les menuiseries (store extérieur) qui vont filtrer les rayons et diminuer la puissance qui passe à travers les vitrages.

c) La ventilation

Cette étude a permis de tester deux types de ventilation, la sur-ventilation nocturne par l'augmentation du débit de VMC double flux et la ventilation naturelle.

La **ventilation naturelle** apporte un **gain considérable** dans le **confort d'été** sur les **trois modes constructifs** (93% d'heures d'inconfort diminuées en construction béton - figure 33).

Combiner la sur-ventilation et la ventilation naturelle présente un intérêt dans la diminution des heures d'inconfort, mais rafraichit trop le bâtiment dans les constructions béton et mixte. Le matin, les occupants se retrouvent en inconfort du au froid si l'on regarde les diagrammes de Brager. Cette solution peut être adoptée lors des semaines les plus chaudes de l'année.

Voici un tableau récapitulatif des situations qui donne une appréciation globale des trois modes constructifs selon les apports internes, les protections solaires ou encore la ventilation. Les résultats prennent en compte à la fois les températures journalières, le cumul d'heures d'inconfort sur l'année et le pourcentage de confort mesuré par le diagramme de Brager :

Simulation	Combinaisons	Béton	Bois	Mixte
A1	AE	☹️	☹️	☹️
A2	AE_GI	☹️	☹️☹️	☹️
A3	AE_GI_PS	☹️	☹️	☹️
A4	AE_GI_PS_VNoc	☹️	☹️	😊
A5	AE_GI_PS_VNat	😊😊	☹️	😊😊
A6	AE_GI_PS_VNoc+Vnat	😊	☹️	😊
B3	AE_GI_PS2	☹️	☹️	☹️
B4	AE_GI_PS2_VNoc	☹️	☹️	😊
B5	AE_GI_PS2_VNat	😊	😊😊	😊
B6	AE_GI_PS2_VNoc+VNat	😊	😊	😊

Tableau 9 : Synthèse de l'impact des protections et ventilation sur le mode constructif

B. Synthèse des modes constructifs

1. La construction béton

En comparaison des 3 modes constructifs, c'est celle qui obtient de meilleurs résultats. Les températures intérieures sont les plus basses sur l'année. Une des solutions pour réduire les températures trop basses la nuit serait de diminuer la période de ventilation nocturne et de fermer les fenêtres plus tôt, pour que les occupants arrivent dans le local avec des températures convenables.

Les propriétés du béton offrent une inertie qui permet de lisser et de diminuer l'amplitude intérieure des températures. La combinaison de ce mode constructif, associé à de la ventilation naturelle est une bonne méthode pour obtenir un bon confort d'été. Les simulations confirment ce qui est évoqué dans la partie contexte.

2. La construction bois

Ce mode constructif est celui qui présentait le plus de doutes sur le confort d'été. Les courbes journalières d'évolution de température intérieure confirment que c'est le plus sensible aux variations de température extérieure, et surtout aux apports solaires.

Il présente de nombreuses heures d'inconfort lorsque le bâtiment n'est ni protégé des apports solaires, ni ventilé la nuit. Sur ce type de constructions, il faut absolument pouvoir contrôler les apports solaires qui entrent par les menuiseries sur toute l'année, pour éviter la surchauffe.

La diminution des heures d'inconfort suivant les simulations est progressive et l'on obtient un confort d'été satisfaisant lorsque le bâtiment bois a des protections solaires (casquette + brise soleil extérieur) et une ventilation naturelle nocturne.

En complément, le choix d'un isolant qui présente une forte densité (ouate de cellulose, laine de bois compressée) va donner plus d'inertie par transmission, et limitera le transfert de chaleur dans les parois. Pour ce mode constructif, cela soulève maintenant la problématique sur la gestion des surchauffes en hiver.

3. La construction mixte

Les résultats suivent de près la construction béton. Elle obtient de meilleurs résultats que le béton sur le cumul d'heures d'inconfort avec la simulation par sur-ventilation nocturne (A4). Une explication peut venir par le fait qu'il décharge plus de calories la nuit. Sur la journée, les températures sont donc plus faibles et la température maximale est reculée jusque dans les dernières heures d'occupation grâce au déphasage.

La ventilation naturelle donne aussi des résultats convaincants pour le confort d'été.

Ce mode constructif est **intéressant pour la typologie des bureaux**. En effet, d'un point de vue structurel, il permet de créer la structure porteuse à l'intérieur et d'avoir une façade légère (le Plan Libre, le Corbusier²³). D'un point de vue thermique, il obtient des performances similaires à celles du béton.

²³ Le plan libre consiste à ramener la structure porteuse à l'intérieur du bâtiment, de manière à libérer les façades et pouvoir donner plus de liberté architecturale, comme des façades vitrées par exemple.

Ces simulations ont permis de confirmer que l'inertie a son rôle à jouer dans la capacité du bâtiment à garder des températures intérieures confortables. Dès que l'on conçoit le bâtiment avec un élément constructif effusif, cela va permettre d'atténuer les variations de température journalières. Les résultats de cette étude sont donc **en accord** avec les ouvrages spécialisés.

Ce que cette étude apporte comme nouveaux éléments, c'est qu'il est **possible** d'avoir un **confort d'été** en construisant des parois, plancher et toiture avec des **matériaux légers**, mais avec des **isolants** présentant une bonne **capacité thermique massive**, favorisant une inertie par **transmission**. Une autre découverte est la forte sensibilité des bâtiments légers aux apports solaires en hiver. La première série de simulations a montré que le type de construction montre très vite en température. Il faut donc protéger les vitrages aussi bien en hiver qu'en été.

Les résultats peu convaincants concernent le déphasage de chacun des modes constructifs. En effet, ils sont faibles pour l'ensemble des simulations (environ deux heures). Les températures maximales à l'intérieur de la zone d'étude sont enregistrées pour la même heure, quel que soit le mode constructif.

Il serait intéressant de regarder les éléments à modifier pour permettre d'améliorer ce déphasage et arriver à un déphasage de six à douze heures (température extérieure maximale à 14h et température intérieure maximale à 20h).

C. Retours d'expériences de l'AQC et données BDM

Il est intéressant de pouvoir comparer les simulations théoriques de la STD, avec les retours d'expériences qui ont été réalisés pour l'Agence Qualité Construction et EnvirobatBDM. Un bâtiment BEPOS a retenu mon attention, il s'agit du siège social de la société de téléphonie Orange à Aix en Provence : *L'Ensoleillée*. La conception de ces bureaux est pensée pour garantir un confort d'été optimal, répondant aux préoccupations de confort de travail et de bien-être santé. Les murs extérieurs, planchers intermédiaires et toiture sont en panneau de bois massifs. L'inertie par absorption est apportée grâce à une chape sur les planchers. L'étude thermique a permis de dimensionner les casquettes solaires permettant de stopper les rayons néfastes.



Figure 37 – Bâtiment l'Ensoleillée

L'enquêteur relève néanmoins que les usagers se plaignent de **surchauffes** et d'éblouissement dans les locaux. D'après les études pourtant, le dimensionnement des casquettes au sud était suffisant pour la protection solaire en été et en l'éblouissement en hiver. Des stores intérieurs ont par la suite été installés par l'exploitant.

Cela remet en cause l'étude thermique, car le bâtiment monte en température, et visiblement lorsque le soleil est bas, en hiver ou en intersaison. Les protections solaires d'origine sont inefficaces, et l'exploitant a dû s'adapter en ajoutant des stores intérieurs.

Même si l'étude thermique démontre l'absence de surchauffe, cela ne veut pas dire que dans la réalité, les occupants ne seront pas en situation d'inconfort thermique. Les bâtiments performants même « BEPOS » ne sont pas parfaits sur la question du confort des occupants.

D. La place de l'utilisateur et du concepteur dans le confort intérieur

Cela peut paraître paradoxal mais les bâtiments bioclimatiques demandent plus d'attention que les autres. La Simulation Thermique Dynamique est une méthode qui permet de simuler la réalité en prenant le maximum de paramètres par des scénarios. En réalité la performance des bâtiments dépend en grande partie de la manière dont il est utilisé. Si le bâtiment est conçu avec des principes « *low tech* »²⁴ qui demandent une implication des utilisateurs, ils ont leur part de travail quotidien pour que les principes imaginés en conception soient réalisés (ventilation naturelle nocturne, ouverture des fenêtres, réglages de la température). Il arrive bien souvent que ces principes imaginés en conception ne soient pas réalisés, ou mal compris par les utilisateurs par un manque de communication à l'entrée des utilisateurs dans le bâtiment. Des surchauffes peuvent être présentes si la ventilation nocturne était prévue en conception et qu'elle n'est pas réalisée, pour des problèmes d'intrusion, d'intempéries ou tout simplement d'oubli.

Des évolutions sont possibles afin d'adopter de bonnes pratiques. Il faut définir qui doit être impliqué dans le fonctionnement du bâtiment : Maître d'ouvrage / Gestionnaire avec entreprise de maintenance / Utilisateur niveau 1 et niveau 2 / visiteur ponctuel.

A chacun de ces statuts correspondent un rôle différent, un intérêt différent et une implication différente.

Les concepteurs doivent permettre de faciliter la gestion du confort d'été, et mettre à disposition des outils de gestion comme par exemple des thermomètres comparant en permanence la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur associés à un feu rouge/vert autorisant ou non l'ouverture d'une fenêtre. D'autres solutions peuvent être d'installer des brasseurs d'air, un plancher rafraichissant, un humidificateur d'air, etc...

²⁴ Equipements simples d'utilisation installés sur le bâtiment qui participent au confort intérieur, sans domotique, et compréhensible par le plus grand nombre d'utilisateurs.

VIII. CONCLUSION ET OUVERTURE

Cette thèse professionnelle a montré grâce à une simulation thermique dynamique qu'il **est possible d'obtenir un confort d'été dans un bureau construit sur différents modes constructifs**, à savoir en béton, en bois et mixte (bois et béton). Cependant, il est nécessaire d'employer une conception adaptée aux matériaux employés. Plus les matériaux auront une faible effusivité, et plus il faudra protéger le bâtiment des apports solaires et pouvoir le ventiler par l'ouverture des menuiseries la nuit. Construire des bureaux confortables en bois est donc possible, en étant vigilant dans la conception et dans l'usage. Les trois modes constructifs étudiés permettent d'avoir un confort d'été qui entre dans les règles définies par la démarche BDM si le bâtiment est ventilé hors période d'occupation. Cependant, le béton a plus de marge de sécurité que le bois si l'on imagine des apports internes exceptionnels (augmentation du personnel, nouveau matériel informatique et luminaires...).

La STD est aujourd'hui la démarche de conception qui permet de coller le plus à la réalité. Elle est d'une grande aide pour les architectes et les ingénieurs pour concevoir des bâtiments confortables. De grandes lignes peuvent être tirées de ces simulations pour aider la conception. La priorité est la protection des rayons solaires traversant les menuiseries. Ensuite, la ventilation hors occupation doit rafraîchir le bâtiment. Pour finir, c'est la réduction des apports internes qui permettra de gagner quelques degrés (changement du matériel informatique...)

Les concepteurs des bâtiments performants se penchent sur la question du confort d'été et apportent des solutions convaincantes. Néanmoins, on remarque que de nombreuses observations par les retours d'expériences viennent du manque de rigueur de conception, ou une mauvaise connaissance des principes bioclimatiques. L'enjeu actuel est de concevoir des bâtiments confortables en été de manière passive, mais qu'ils le restent pendant leur vie en œuvre. Les concepteurs doivent prendre en compte l'évolution possible des températures.

La question de l'orientation aux vents dominants devient aussi importante que celle du soleil. Le bâtiment devra être conçu avec plus de porosités. Il s'agit des menuiseries qui permettent de ventiler, mais aussi de l'espace vide, permettant à l'air de circuler (traverses en cœur d'îlot, circulations, cour intérieures, doubles toitures...)

L'utilisateur devient un maillon important du bon fonctionnement des bâtiments performants. La citation de l'architecte Patrick Sauvage²⁵ illustre bien ceci :

« Un bâtiment passif, c'est un utilisateur actif »

Alors comment sensibiliser l'utilisateur et le rendre actif ? Cela passe par un temps d'explication qui doit être adapté en fonction de la typologie du bâtiment, car l'utilisateur n'apporte pas toujours la même importance lorsqu'il est dans le bureau de son entreprise, locataire ou propriétaire de son logement. Le travail des sociologues et peut devenir utile à ce moment dans le lien entre concepteur et utilisateur, de manière à trouver les solutions pour que la maîtrise d'usage s'approprie le lieu, et encore mieux, puisse s'impliquer dans le bon fonctionnement et confort du bâtiment.

²⁵ Architecte spécialisé en bioclimatisme et membre de l'association EnvirobatBDM

IX. BIBLIOGRAPHIE

CIMbéton. 2001. "Inertie Thermique Des Logements et Confort D'été : étude de Sensibilité."

Denis Jacob, Thierry Cabriol, Olivier Rigal, and Gérard Saurel. "Confort D'été En Provence Alpes Côte d'Azur."

Dutreix, Armand, and Annick Delhaye. 2010. *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*. Paris: Eyrolles.

Ecole nationale supérieure d'arts et métiers (Paris), and du bâtiment et de l'industrie Ecole spéciale des travaux publics. 2012. *Construction et habitat durables*. Saint-Denis-La Plaine (Seine-Saint-Denis): Afnor éditions.

ENVIROBAT méditerranée. *L'essentiel Des EnviroDEBATS 2009/2010*. 2010th ed. Marseille.

Fernandez, Pierre, and Pierre Lavigne. 2009. *Concevoir Des Bâtiments Bioclimatiques: Fondements & Méthodes*. Paris: Moniteur.

Inconnu. 2015. "Plan Climat National, Le Confort D'été, Nouvelle Exigence." *Les cahiers techniques du bâtiment* (342): p37.

Izard, Jean-Louis, and Dorothée Velmincx. 2006. "Les Indicateurs de L'architecture Bioclimatique."

Mauriange, Lina. 2013. "Désordres et Responsabilités Quelle Place Pour La Garantie de Performance énergétique ?" ENSAM Aix en Provence.

Corbella, Marc. 2013. " La question du confort d'été dans un bâtiment à faible inertie construit en bois " ENSAM Aix en Provence.

Olivier Sidler. 2003. "L'inertie Thermique Des Bâtiments - Consommation et Confort D'été En Climat Méditerranéen."

Pierre Lavigne, Mohammed Belmaaziz, and Jean-Louis Izard. 2010. "Effets de L'effusivité Des Matériaux et de La Surface Offerte à L'échange Thermique : Comportements Simulés de Maisons En Région PACA."

Sidler, Olivier. 2013. "Le Confort D'été." *Mutuelle des architectes français assurances & Energetech* Fiche T18: 8 pages.

Wolfgang, Feist, Hasper Wolfgang, and Michaël Horner. "Les Bâtiments Passifs Non Résidentiels En Période Estivale : Expériences et Nouvelles Constatations."

Wright, David, and Jeffrey Cook. 2004. *Manuel d'architecture naturelle*. Marseille: Éditions Parenthèses.

Webographie

Site web de l'Enviroboite :

<http://www.enviroboite.net>

Démarche BDM - Bâtiments Durables Méditerranéens :

www.polebdm.eu

Les Charges Thermiques Internes Dans Les Bureaux

<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11245#c1978>.

“Règlementation Thermique 2012 Bâtiment.” 2011. *RT-bâtiment.fr*.

http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2012/plaquetteRT2012_avril2011.pdf.

Définition de L'inertie thermique sur Wikipédia

https://fr.wikipedia.org/wiki/Inertie_thermique

Forum Pleiades + Comfie

<http://www.www.izuba-energies.com/forum/>

Cas de surchauffe sur un bâtiment scolaire à Mouans-Sartoux

<http://www.adden-leblog.com/?p=1570>

Rapport RAGE, Règles de l'Art, Grenelle Environnement : Retours d'Expériences (REX)
Bâtiments performants et risques, version 3, Octobre 2014

<http://www.reglesdelart-grenelle-environnement2012.fr/fileadmin>

[/redacteurs/Regles_de_l_Art/Rapports/rapport-rex-batiments-performants-risques-2014-10.pdf](http://www.reglesdelart-grenelle-environnement2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles_de_l_Art/Rapports/rapport-rex-batiments-performants-risques-2014-10.pdf)

Lexique des abréviations

AQC : Agence Qualité Construction

REX : Retour d'Expériences

BDM : Bâtiments Durables Méditerranéens

STD : Simulation Thermique Dynamique

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

Abréviations pour la STD

AE : apports solaires externes

GI : Gains internes

PS : Casquette solaire

VNoc : Sur-ventilation nocturne

VNat : Ventilation naturelle nocturne

PS2 : Casquette solaire + store extérieur

Liste des annexes

Annexe 1 : Composition et caractéristiques des parois

Annexe 2 : Les différentes sollicitations extérieures et intérieures d'un bâtiment

Annexe 3 : Protections solaires et facteurs solaires

Annexe 4 : Illustration des phénomènes d'inertie

Annexe 5 : Propriétés thermiques de quelques matériaux

Annexe 6 : Résultats de température mensuels

Annexe 7 : Scénarios choisis pour l'étude STD

Annexe 1 : composition et caractéristiques des parois

Mur extérieur en ossature bois – 20cm

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Bois léger	2.0	0.150	500	0.333	7.50	0.13
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Laine de bois	4.0	0.042	140	0.580	1.05	0.95
Ouate de cellulose	20.0	0.045	55	0.390	0.22	4.44
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.094	1	0.340	6.25	0.16
Fermacell	1.3	0.360	1150	0.450	27.69	0.04
Total					0.17	5.88

Mur intérieur séparatif en ossature bois isolé – 16cm

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Fermacell	1.0	0.360	1150	0.450	36.00	0.03
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Ouate de cellulose	12.0	0.045	55	0.390	0.37	2.67
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Fermacell	1.0	0.360	1150	0.450	36.00	0.03
Total					0.35	2.88

Plancher bas en ossature bois– 30cm

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Linoléum	0.5	0.170	1200	0.389	34.00	0.03
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Ouate de cellulose	30.0	0.045	55	0.390	0.15	6.67
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Total					0.15	6.85

Toiture en ossature bois – 30cm

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Sable et gravier	5.0	2.000	1950	0.253	40.00	0.03
Feutre bitumeux	1.0	0.500	1700	0.278	50.00	0.02
Laine de bois	6.0	0.042	140	0.580	0.70	1.43
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Ouate de cellulose	30.0	0.045	55	0.390	0.15	6.67
Panneau OSB	1.0	0.130	650	0.470	13.00	0.08
Bois léger	2.0	0.150	500	0.333	7.50	0.13
Total					0.12	8.43

Cloison lourde en béton

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Béton lourd	15.0	1.750	2300	0.256	11.67	0.09
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Total					6.03	0.17

Plancher bas en béton

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Total					0.20	4.99

Mur en béton

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Laine de verre	20.0	0.041	12	0.233	0.20	4.88
Béton lourd	20.0	1.750	2300	0.256	8.75	0.11
Total					0.20	4.99

Toiture en béton

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Feutre bitumeux	1.0	0.500	1700	0.278	50.00	0.02
Polyuréthane	16.0	0.030	35	0.233	0.19	5.33
Béton cellulaire 400	20.0	0.160	400	0.244	0.80	1.25
Plâtre gypse	1.0	0.420	1200	0.233	42.00	0.02
Total					0.15	6.63

Cloison légère

Composante : Simple	Epaisseur (cm)	λ W/(m.K)	ρ kg/m ³	CS Wh/(kg.K)	U W/(m ² .K)	R (m ² .K)/W
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.094	1	0.340	6.25	0.16
Placoplatre BA 13	1.3	0.325	850	0.222	25.00	0.04
Total					4.17	0.24

Annexe 2 : Les différentes sollicitations extérieures et intérieures d'un bâtiment

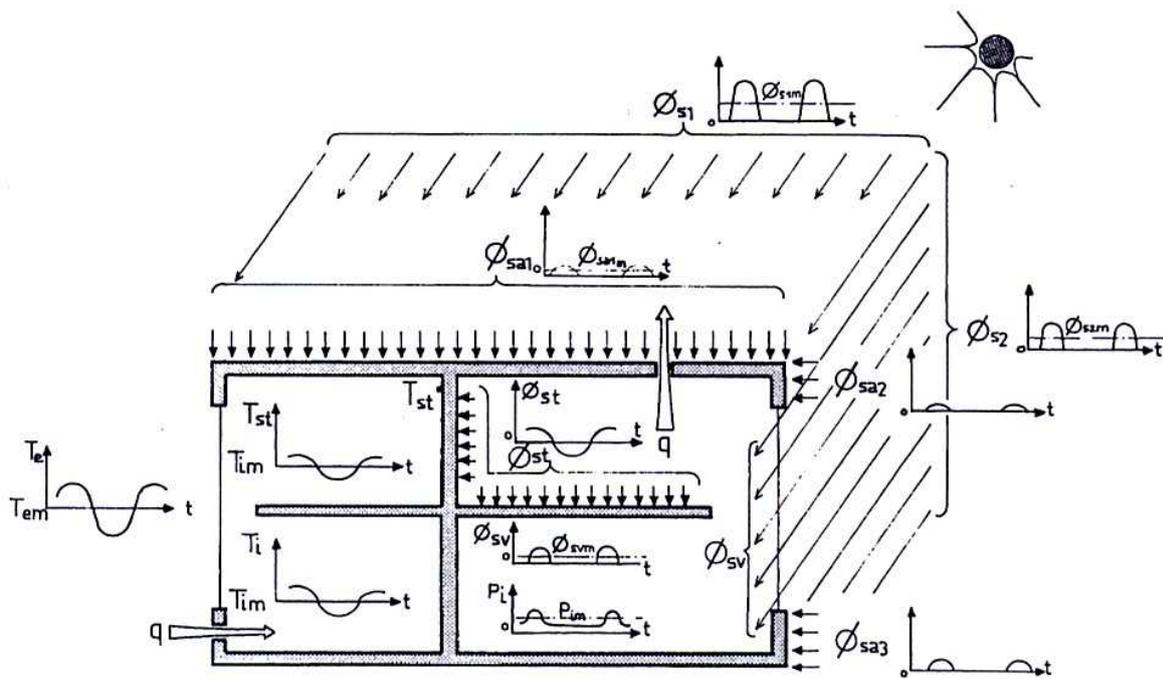
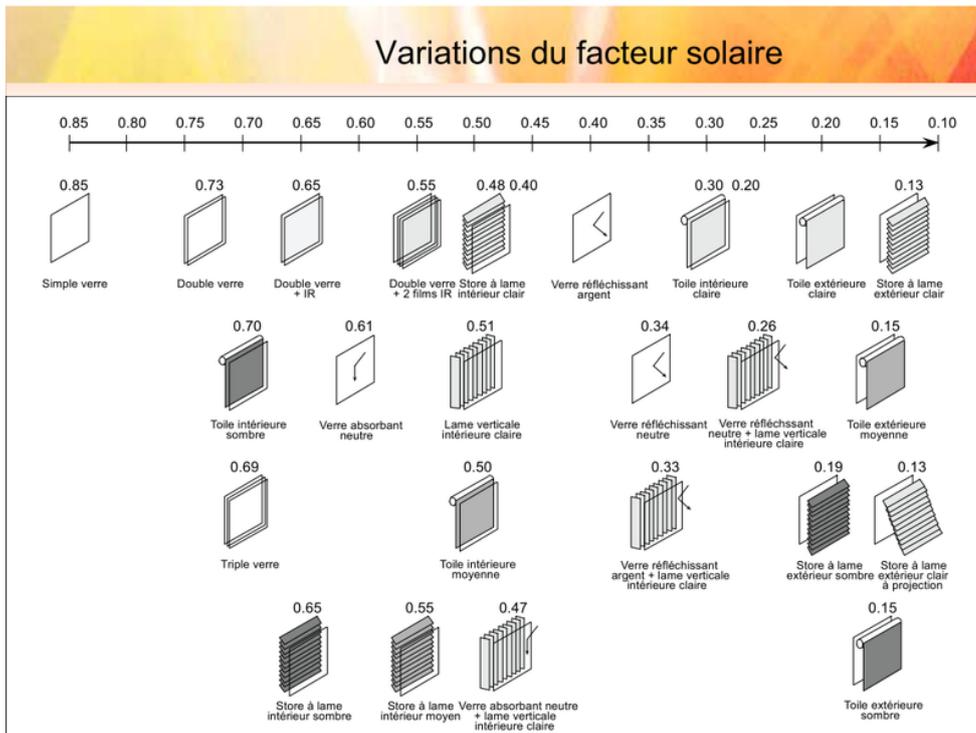


Schéma de Pierre Lavigne in : Architecture bioclimatique. Une contribution au développement durable. 2 tomes, Pierre Lavigne – Ed. Edisud 1994

Annexe 3 : Protections solaires et facteur solaire



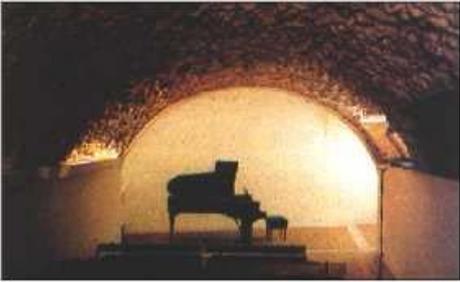
Source : Forum Izuba

Annexe 4 : Illustration des phénomènes d'inertie

DEUX EXEMPLES EXTREMES... LA GROTTES ET LA TENTE

La grotte	La tente
	
<p>Inertie thermique très grande Quand il y a de grandes variations de $T^{\circ}\text{C}$ extérieure Variations de $T^{\circ}\text{C}$ intérieure quasi nulles</p>	<p>Inertie thermique quasi nulle Quand il y a de grandes variations de $T^{\circ}\text{C}$ extérieure Variations de $T^{\circ}\text{C}$ intérieure très importantes</p>

MAIS AUSSI... LA CAVE ET LA SERRE

La cave	La serre
	
<p>Inertie thermique très grande Quand il y a de grandes variations de $T^{\circ}\text{C}$ extérieure Variations de $T^{\circ}\text{C}$ intérieure quasi nulles</p>	<p>Inertie thermique quasi nulle Quand il y a de grandes variations de $T^{\circ}\text{C}$ extérieure Variations de $T^{\circ}\text{C}$ intérieure très importantes</p>

Annexe 5 : Propriétés thermiques de quelques matériaux

PROPRIÉTÉS THERMIQUES DE QUELQUES MATÉRIAUX					
Matière	Densité ou masse vol. ρ en kg/m^3	Conductivité λ en $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	Chaleur spécifique c en $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	Capacité thermique $S = \rho \cdot c$ en $\text{kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$	Effusivité $E_f = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}$ en $\text{J}/\sqrt{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
Air	1,29	0,024	1005	1,256	5,6
Polystyrène	15	0,04	1380	21	29
Laine de verre	120	0,04	828	99	63
Liège	215-220	0,04-0,05	1750	376-385	122-139
Bois	400-800	0,13-0,2	2400-2700	960-2160	353-657
Béton cellulaire	400-800	0,14-0,23	1000	400-800	237-429
Isolant fibreux	500	0,05	600	300	120
Béton léger	600-2000	0,22-102	1000-1100	600-2200	360-1600
Linoléum naturel	700	0,081	1900	1330	330
Maçonnerie en briques	700-2000	0,30-0,96	900	630-1800	480-1300
Terre sèche	1500	0,75	900	1350	1000
Pierres naturelles (poreuses)	1600	0,55	700	1120	785
Béton ordinaire	2200-2400	1,6-2,1	1100	2400-2640	1960-2350
Aluminium	2700	200	900	2430	22000
Pierres naturelles (non poreuses)	2800-3100	3,5	900	2520-2790	2970-3120
Fer	7250	56	540	3915	14800
Acier	7800	60	500	3900	15300
Cuivre	9000	348	385	3465	34700
Eau	1000	0,58	4200	4200	1560

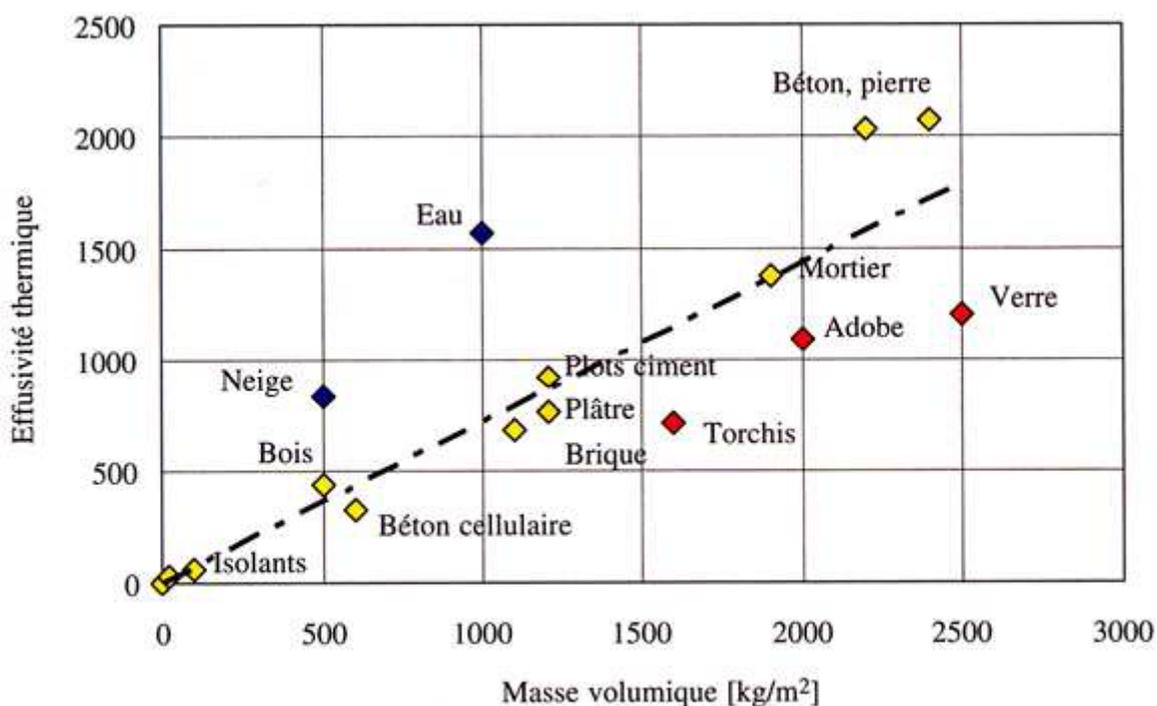


Fig. 5.46 Effusivité thermique de divers matériaux en fonction de leur masse volumique.

Annexe 6 : Résultats de température mensuels

Construction Bois – AE_GI_PS2_VNat

Température minimale (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	16.00	16.00	16.00	16.00	16.87	15.77	19.84	22.94	18.22	16.85	16.00	16.00
Couloir	16.00	16.00	16.00	16.00	17.92	16.36	20.74	23.89	19.28	16.00	16.00	16.00
Cuisine	16.00	16.00	16.29	16.60	19.15	17.66	21.77	24.19	20.39	17.89	16.00	16.00
Toilettes	15.96	15.94	16.50	16.78	19.72	18.66	22.46	24.70	20.89	18.23	15.92	15.90
salle informatique 2	16.00	16.00	16.00	16.36	17.41	16.22	20.24	23.32	18.71	17.46	16.00	16.00
Réunion_1	16.00	16.00	16.00	16.00	16.74	15.77	19.99	23.17	18.44	16.00	16.00	16.00
Réunion_2	16.00	16.00	16.00	16.00	17.48	16.14	20.21	23.26	18.69	17.03	16.00	16.00
Extérieur	3.46	3.96	5.06	7.16	9.36	12.76	16.46	16.46	14.86	5.36	3.96	2.66

Température moyenne (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	17.97	18.12	18.94	19.85	21.67	22.63	24.96	26.68	23.23	21.97	19.38	17.27
Couloir	17.29	17.36	17.91	18.79	21.37	23.13	25.49	27.12	23.60	21.43	18.39	16.68
Cuisine	19.07	19.23	19.88	20.70	22.65	23.54	25.82	27.46	24.17	23.06	20.58	18.32
Toilettes	18.79	18.99	19.68	20.45	22.49	23.42	25.75	27.38	24.11	22.84	20.32	18.10
salle informatique 2	18.92	19.04	19.42	20.20	21.88	22.77	25.11	26.80	23.43	22.61	20.38	18.17
Réunion_1	17.46	17.50	18.10	18.73	20.99	22.49	24.86	26.15	23.16	21.20	18.37	16.72
Réunion_2	18.53	18.65	18.91	19.38	21.44	22.52	24.90	26.11	23.20	22.16	19.78	17.58
Extérieur	8.83	9.24	11.78	13.58	17.88	21.06	23.36	25.07	21.82	17.94	12.21	8.85

Température maximale (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	20.96	21.71	22.07	25.49	26.77	28.76	30.57	31.00	28.88	26.61	23.39	21.26
Couloir	19.68	19.71	20.64	23.07	26.62	29.04	30.33	30.94	28.68	25.87	21.69	19.55
Cuisine	22.44	23.48	23.05	26.49	27.52	29.04	31.10	31.59	29.38	27.34	24.77	22.79
Toilettes	20.90	21.94	21.72	25.18	26.37	27.95	29.73	30.09	27.82	26.16	23.36	21.23
salle informatique 2	23.11	24.04	22.75	25.50	27.08	28.55	30.39	30.90	28.87	27.62	25.47	23.51
Réunion_1	20.34	20.93	21.39	24.53	25.71	28.37	30.54	29.24	28.65	26.27	22.11	20.60
Réunion_2	22.36	23.23	21.99	24.86	26.36	28.07	30.25	29.06	28.36	27.38	24.47	22.64
Extérieur	19.26	18.06	18.76	20.06	26.76	29.46	30.76	31.36	30.36	27.56	20.16	17.86

Construction Béton – AE_GI_PS2_VNat

Température minimale (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	16.00	16.17	16.98	17.59	18.31	18.36	21.93	24.21	20.50	19.10	16.31	16.00
Couloir	16.00	16.00	16.69	17.23	19.13	19.26	22.84	25.14	21.56	18.28	16.00	16.00
Cuisine	16.77	16.99	17.77	18.18	18.21	18.81	22.05	24.43	20.94	18.49	17.52	16.80
Toilettes	16.86	17.12	17.78	18.06	19.42	19.99	23.07	25.56	21.75	20.19	17.63	16.83
salle informatique 2	16.58	16.69	17.65	17.90	18.51	18.70	22.17	24.40	20.82	19.74	17.33	16.59
Réunion_1	16.00	16.00	16.48	17.18	18.83	18.68	22.17	24.51	20.90	18.72	16.00	16.00
Réunion_2	16.26	16.62	17.36	17.67	19.05	18.91	22.35	24.68	21.14	19.88	16.99	16.23
Extérieur	3.46	3.96	5.06	7.16	9.36	12.76	16.46	16.46	14.86	5.36	3.96	2.66

Température moyenne (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	17.82	17.94	18.49	18.98	20.70	22.28	24.82	26.60	23.52	21.48	19.17	17.14
Couloir	17.61	17.69	18.20	18.71	20.75	22.51	25.06	26.83	23.77	21.44	18.84	17.01
Cuisine	18.47	18.64	19.13	19.55	20.56	22.43	24.87	26.60	23.71	21.45	20.07	17.82
Toilettes	18.15	18.34	18.82	19.19	20.74	22.36	24.91	26.60	23.85	21.68	19.74	17.52
salle informatique 2	18.28	18.45	18.78	19.20	20.79	22.37	24.91	26.70	23.70	21.87	19.92	17.64
Réunion_1	17.55	17.69	18.24	18.63	20.72	22.19	24.76	26.27	23.57	21.52	18.80	16.84
Réunion_2	18.09	18.26	18.58	18.88	20.80	22.21	24.78	26.28	23.64	21.89	19.55	17.38
Extérieur	8.83	9.24	11.78	13.58	17.88	21.06	23.36	25.07	21.82	17.94	12.21	8.85

Température maximale (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	19.22	19.41	19.91	21.15	22.49	25.52	27.75	28.96	26.45	24.39	21.30	19.37
Couloir	19.00	19.00	19.23	20.56	22.54	25.26	27.55	28.85	26.23	24.06	20.56	19.00
Cuisine	19.99	20.36	20.67	21.87	22.90	25.92	28.05	29.28	26.78	24.80	22.22	20.16
Toilettes	19.00	19.32	19.65	20.79	21.89	24.85	27.07	28.16	26.10	23.85	21.21	19.14
salle informatique 2	20.06	20.48	20.14	21.27	22.58	25.56	27.74	29.02	26.53	24.78	22.13	20.30
Réunion_1	19.02	19.14	19.80	20.94	22.52	25.40	27.70	28.02	26.44	24.31	21.09	19.18
Réunion_2	19.59	19.92	19.99	20.98	22.44	25.31	27.59	27.92	26.36	24.58	21.83	19.67
Extérieur	19.26	18.06	18.76	20.06	26.76	29.46	30.76	31.36	30.36	27.56	20.16	17.86

Construction Mixte – AE_GI_PS2_VNat

Température minimale (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	16.00	16.00	16.23	16.99	18.08	17.49	21.33	23.60	19.55	18.40	16.00	16.00
Couloir	16.00	16.00	16.20	16.76	18.85	18.70	22.50	24.84	20.89	18.17	16.00	16.00
Cuisine	16.39	16.51	17.29	17.78	19.80	19.87	23.00	25.37	21.58	20.05	16.65	16.40
Toilettes	16.47	16.59	17.29	17.65	19.73	20.04	23.10	25.65	21.59	20.08	16.74	16.45
salle informatique 2	16.00	16.00	16.92	17.31	18.34	17.80	21.59	23.76	19.86	19.04	16.00	16.00
Réunion_1	16.00	16.00	16.00	16.44	18.33	17.75	21.57	23.96	19.90	17.64	16.00	16.00
Réunion_2	16.00	16.00	16.51	16.98	18.56	17.98	21.76	24.17	20.13	18.89	16.00	16.00
Extérieur	3.46	3.96	5.06	7.16	9.36	12.76	16.46	16.46	14.86	5.36	3.96	2.66

Température moyenne (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	17.60	17.69	18.26	18.82	20.93	22.31	24.77	26.45	23.23	21.42	18.66	16.91
Couloir	17.51	17.57	18.07	18.60	20.94	22.55	25.06	26.72	23.54	21.41	18.53	16.88
Cuisine	18.20	18.32	18.77	19.24	21.51	22.84	25.30	26.93	23.99	22.20	19.44	17.55
Toilettes	17.89	18.04	18.52	18.93	21.21	22.53	25.07	26.65	23.79	21.92	19.16	17.27
salle informatique 2	18.07	18.21	18.57	19.05	21.11	22.44	24.92	26.60	23.45	21.96	19.38	17.40
Réunion_1	17.37	17.45	18.01	18.48	20.74	22.24	24.75	26.15	23.28	21.24	18.38	16.67
Réunion_2	17.86	18.01	18.40	18.75	20.90	22.28	24.80	26.18	23.37	21.69	19.04	17.12
Extérieur	8.83	9.24	11.78	13.58	17.88	21.06	23.36	25.07	21.82	17.94	12.21	8.85

Température maximale (°C)

Zone	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
salle informatique_1	19.10	19.15	19.73	21.51	23.06	26.07	28.31	29.30	26.77	24.50	20.95	19.15
Couloir	19.00	19.00	19.15	20.68	22.78	25.55	27.91	28.99	26.34	24.17	20.41	19.00
Cuisine	19.63	19.85	20.09	21.59	23.07	26.04	28.19	29.26	26.74	24.69	21.61	19.68
Toilettes	18.77	19.01	19.26	20.69	22.29	25.09	27.34	28.20	26.19	23.84	20.76	18.84
salle informatique 2	20.40	20.57	20.22	21.67	23.24	26.18	28.41	29.43	26.94	25.27	21.98	20.51
Réunion_1	19.11	19.23	19.79	21.47	23.02	26.07	28.40	28.27	26.89	24.54	20.89	19.25
Réunion_2	20.03	20.14	20.07	21.52	23.04	26.01	28.35	28.18	26.87	25.06	21.68	20.04
Extérieur	19.26	18.06	18.76	20.06	26.76	29.46	30.76	31.36	30.36	27.56	20.16	17.86

Annexe 7 : Scénarios de STD

Consigne de température

Hebdomadaire		Consigne de température			Usage 16 - Bureau Zone Bureau Chauffage H1		
Heure	Lun °C	Mar °C	Mer °C	Jeu °C	Ven °C	Sam °C	Dim °C
0-1h	16	16	16	16	16	16	16
1-2h	16	16	16	16	16	16	16
2-3h	16	16	16	16	16	16	16
3-4h	16	16	16	16	16	16	16
4-5h	16	16	16	16	16	16	16
5-6h	16	16	16	16	16	16	16
6-7h	16	16	16	16	16	16	16
7-8h	16	16	16	16	16	16	16
8-9h	16	16	16	16	16	16	16
9-10h	19	19	19	19	19	16	16
10-11h	19	19	19	19	19	16	16
11-12h	19	19	19	19	19	16	16
12-13h	19	19	19	19	19	16	16
13-14h	19	19	19	19	19	16	16
14-15h	19	19	19	19	19	16	16
15-16h	19	19	19	19	19	16	16
16-17h	19	19	19	19	19	16	16
17-18h	19	19	19	19	19	16	16
18-19h	19	19	19	19	19	16	16
19-20h	16	16	16	16	16	16	16
20-21h	16	16	16	16	16	16	16
21-22h	16	16	16	16	16	16	16
22-23h	16	16	16	16	16	16	16
23-24h	16	16	16	16	16	16	16

Pourcentage d'occupation

Hebdomadaire		% d'occupation			Usage 16 - Bureau Zone Bureau Occupation H1		
Nombre d'occupants : 0.07 Occupants/m ²							
Heure	Lun %	Mar %	Mer %	Jeu %	Ven %	Sam %	Dim %
0-1h	0	0	0	0	0	0	0
1-2h	0	0	0	0	0	0	0
2-3h	0	0	0	0	0	0	0
3-4h	0	0	0	0	0	0	0
4-5h	0	0	0	0	0	0	0
5-6h	0	0	0	0	0	0	0
6-7h	0	0	0	0	0	0	0
7-8h	0	0	0	0	0	0	0
8-9h	0	0	0	0	0	0	0
9-10h	42	42	42	42	42	0	0
10-11h	87	87	87	87	87	0	0
11-12h	100	100	100	100	100	0	0
12-13h	100	100	100	100	100	0	0
13-14h	55	55	55	55	55	0	0
14-15h	55	55	55	55	55	0	0
15-16h	100	100	100	100	100	0	0
16-17h	100	100	100	100	100	0	0
17-18h	100	100	100	100	100	0	0
18-19h	42	42	42	42	42	0	0
19-20h	0	0	0	0	0	0	0
20-21h	0	0	0	0	0	0	0
21-22h	0	0	0	0	0	0	0
22-23h	0	0	0	0	0	0	0
23-24h	0	0	0	0	0	0	0

Débit de la ventilation double flux

Hebdomadaire		% de ventilation			VMC double flux + surventilation nocturne		
Débit d'air nominal : 25m ³ /h							
Heure	Lun %	Mar %	Mer %	Jeu %	Ven %	Sam %	Dim %
0-1h	500	500	500	500	500	500	500
1-2h	500	500	500	500	500	500	500
2-3h	500	500	500	500	500	500	500
3-4h	500	500	500	500	500	500	500
4-5h	500	500	500	500	500	500	500
5-6h	500	500	500	500	500	500	500
6-7h	500	500	500	500	500	500	500
7-8h	100	100	100	100	100	500	500
8-9h	100	100	100	100	100	500	500
9-10h	100	100	100	100	100	500	500
10-11h	100	100	100	100	100	500	500
11-12h	100	100	100	100	100	500	500
12-13h	100	100	100	100	100	500	500
13-14h	100	100	100	100	100	500	500
14-15h	100	100	100	100	100	500	500
15-16h	100	100	100	100	100	500	500
16-17h	100	100	100	100	100	500	500
17-18h	100	100	100	100	100	500	500
18-19h	100	100	100	100	100	500	500
19-20h	100	100	100	100	100	500	500
20-21h	500	500	500	500	500	500	500
21-22h	500	500	500	500	500	500	500
22-23h	500	500	500	500	500	500	500
23-24h	500	500	500	500	500	500	500

Ventilations internes

Type	Zone source	Zone destination	Caractéristiques
Ventilation par une porte	salle informatique 2	Cuisine	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 30 %
Ventilation par une porte	salle informatique_1	Cuisine	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 30 %
Ventilation par une porte	Réunion_1	salle informatique_1	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 10 %
Ventilation par une porte	Réunion_2	salle informatique 2	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 10 %
Ventilation par une porte	Couloir	salle informatique 2	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 5 %
Ventilation par une porte	Couloir	salle informatique_1	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 5 %
Ventilation par une porte	Cuisine	Toilettes	Hauteur : 2.05 m, Surface : 1.74 m ² Frequence d'ouverture : 2 %

Puissances internes dégagées

Hebdomadaire		Puissance dissipée			Usage 16 - Bureau Bureau standard Puissance dissipée H1		
Heure	Lun Watts/m ²	Mar Watts/m ²	Mer Watts/m ²	Jeu Watts/m ²	Ven Watts/m ²	Sam Watts/m ²	Dim Watts/m ²
0-1h	0.88888	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
1-2h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
2-3h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
3-4h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
4-5h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
5-6h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
6-7h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
7-8h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
8-9h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
9-10h	8.80000	8.80000	8.80000	8.80000	8.80000	1.77776	1.77776
10-11h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
11-12h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
12-13h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
13-14h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
14-15h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
15-16h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
16-17h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
17-18h	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	16.00000	1.77776	1.77776
18-19h	8.80000	8.80000	8.80000	8.80000	8.80000	1.77776	1.77776
19-20h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
20-21h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
21-22h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
22-23h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776
23-24h	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776	1.77776

Eclairage en lux

Hebdomadaire		Niveau d'éclairage			Eclairage bureaux 500 lux		
Heure	Lun Lux	Mar Lux	Mer Lux	Jeu Lux	Ven Lux	Sam Lux	Dim Lux
0-1h	0	0	0	0	0	0	0
1-2h	0	0	0	0	0	0	0
2-3h	0	0	0	0	0	0	0
3-4h	0	0	0	0	0	0	0
4-5h	0	0	0	0	0	0	0
5-6h	0	0	0	0	0	0	0
6-7h	0	0	0	0	0	0	0
7-8h	0	0	0	0	0	0	0
8-9h	500	500	500	500	500	0	0
9-10h	500	500	500	500	500	0	0
10-11h	500	500	500	500	500	0	0
11-12h	500	500	500	500	500	0	0
12-13h	500	500	500	500	500	0	0
13-14h	500	500	500	500	500	0	0
14-15h	500	500	500	500	500	0	0
15-16h	500	500	500	500	500	0	0
16-17h	500	500	500	500	500	0	0
17-18h	500	500	500	500	500	0	0
18-19h	0	0	0	0	0	0	0
19-20h	0	0	0	0	0	0	0
20-21h	0	0	0	0	0	0	0
21-22h	0	0	0	0	0	0	0
22-23h	0	0	0	0	0	0	0
23-24h	0	0	0	0	0	0	0