



# **MODELISATION THERMIQUE DYNAMIQUE DU RAFRAICHISSEMENT PASSIF**

**DUPERRON Océane**

**VA Bâtiment**

**Promotion 56**

*Soutenance le 31 août 2011*

Président du jury :	Pierre MICHEL
Maître de TFE :	Marine MORAIN
Expert :	Jean NOEL



# NOTICE ANALYTIQUE

	<b>NOM</b>	<b>PRENOM</b>	
<b>AUTEUR</b>	DUPERRON	Océane	
<b>TITRE DU TFE</b>	Modélisation thermique dynamique du rafraîchissement passif		
	<b>ORGANISME D'AFFILIATION ET LOCALISATION</b>	<b>NOM PRENOM</b>	
<b>MAITRE DE TFE</b>	Arbor&Sens - Lyon	Morain Marine	
<b>COLLATION</b>	Nbre de pages du rapport 87	Nbre d'annexes (Nbre de pages) 5	Nbre de réf. biblio. 57
<b>MOTS CLES</b>	Rafraîchissement passif, modélisation thermique dynamique, Pleiades + Comfie, Codyba, ventilation, inertie, protections solaires, isolation, humidification, analyse multicritère		
<b>TERMES GEOGRAPHIQUES</b>	Lyon, Mâcon		
<b>RESUME</b>	Ce travail de fin d'études a pour objet la modélisation des systèmes de rafraîchissement passif. Un état de l'art est réalisé concernant ces systèmes. Des conclusions concernant les capacités des logiciels Pleiades+Comfie et Codyba, en termes de modélisation sont ici présentées. Les différents systèmes de rafraîchissement passif ont été modélisés sur ces logiciels, ainsi que des couplages entre systèmes afin d'évaluer leur action sur le comportement thermique du bâtiment. Une analyse multicritère a permis de mettre en avant les solutions les plus performantes en prenant en compte des critères thermiques, économiques et environnementaux.		
<b>ABSTRACT</b>	This work graduation is to modeling of passive cooling systems. A state of the art is made in such systems. Conclusions about the capabilities of software Codyba and Pleiades+Comfie, in termes of modeling are presented here. The various passive cooling systems were modeled on these software, and linkages between systems to assess their effect on the thermal behavior of the building. A multi-criteria analysis helped highlight the best solutions, taking into account the thermal, economic and environmental criteria.		

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout d'abord à Marine Morain qui a accepté de me suivre sur un sujet qui m'intéressait. Merci pour ses conseils avisés qui m'ont remise dans le droit chemin, ses compétences et sa bonne humeur qui m'a permis de rester motivée tout au long de ce travail de fin d'études.

Je remercie aussi toute l'équipe d'Arbor&Sens : Vincent, Xavier, Claire, Anne, Marine et Lauréna. Merci pour cette bonne ambiance de travail.

Merci à Pierre Michel qui m'a aidée lors du choix de mon sujet et m'a conseillée sur les orientations à privilégier. Je le remercie également de présider mon jury.

Je remercie Jean Noel qui a accepté d'être expert pour mon travail de fin d'études. Je le remercie aussi pour l'aide qu'il m'a apportée concernant l'utilisation du logiciel Codyba et ses conseils.



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>11</b>
<b>1 LES SYSTEMES DE RAFRAICHISSEMENT PASSIF</b>	<b>13</b>
1.1 Pourquoi rafraîchir de manière passive ?	13
1.1.1 L'avènement de la climatisation	13
1.1.2 Nécessité de s'adapter au contexte actuel	14
1.2 Comment rafraîchir et le faire de manière passive ?	15
1.2.1 Les principes physiques	15
1.2.2 Les actions de rafraîchissement	16
1.2.3 Les principes de rafraîchissement	17
1.3 Quels systèmes mettre en œuvre pour...	17
1.3.1 Minimiser les apports de chaleur	17
1.3.2 Apporter de la masse thermique	20
1.3.3 Ventiler	21
1.3.4 Humidifier	23
1.4 Classement des systèmes en fonction de leurs actions	24
<b>2 DESCRIPTION DE LA METHODE DE TRAVAIL ET DE L'ETUDE MENEES</b>	<b>26</b>
2.1 Méthode globale suivie	26
2.1.1 Objectifs de l'étude	26
2.1.2 Démarche adoptée	26
2.2 Présentation des modélisations réalisées	27
2.2.1 Logiciels testés	27
2.2.2 Bâtiment modélisé et son comportement de référence	28
2.2.1 Définition des critères d'évaluation	32
<b>3 EVALUATION DE LA CAPACITE DES LOGICIELS EN TERMES DE MODELISATION DU RAFRAICHISSEMENT PASSIF</b>	<b>34</b>
3.1 Capacités de modélisation des logiciels	34
3.1.1 Différences fondamentales dans le fonctionnement des logiciels	34
3.1.2 Modélisation des différents systèmes	34
3.1.3 Conclusion sur les capacités de modélisation des logiciels	39
3.2 Analyse des différences de résultats observées selon le logiciel utilisé	39

3.2.1	Différences fondamentales	39
3.2.2	Différences dans l'action des solutions	42
3.3	Choix du logiciel utilisé pour la suite de l'étude	44
<b>4</b>	<b>ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BATIMENT SELON LES SYSTEMES MIS EN ŒUVRE</b>	<b>46</b>
4.1	Analyse de l'action des différents systèmes sur le fonctionnement thermique global du bâtiment	46
4.1.1	Analyse des courbes de température	46
4.1.2	Analyse des valeurs des critères	52
4.1.3	Premières conclusions sur l'action des systèmes	55
4.2	Pertinence des critères d'évaluation thermique	55
4.2.1	Indice de performance de rafraîchissement et besoins en chauffage	56
4.2.2	Abaissement moyen de température et abaissement de températures maximales	59
4.2.3	Taux de réponse aux besoins en rafraîchissement et besoins en froid couverts par le système	60
4.2.4	Critères conservés pour la suite de l'étude	63
4.3	Modélisation de couplages	64
4.3.1	Apporter de la masse thermique et ventiler	65
4.3.2	Minimiser les apports solaires et faciliter l'évacuation des apports internes	66
4.3.3	Minimiser les apports solaires et apporter de la masse thermique	67
4.4	Conclusion sur les actions des systèmes modélisés	67
<b>5</b>	<b>ETUDE DE CAS : OPTIMISATION DES MAISONS EVOLUTIVES</b>	<b>69</b>
5.1	Prise en compte d'autres critères	69
5.1.1	Pertinence de la solution vis-à-vis du fonctionnement global du bâtiment	69
5.1.2	Notion de coût du système	70
5.1.3	Intérêt environnemental	70
5.2	Analyse multicritère	70
5.3	Optimisation des maisons évolutives	72
<b>CONCLUSION</b>		<b>75</b>
	Résultats obtenus	75
	Limites de ce travail	75
	Retour d'expérience	76
	Ouverture	77

<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>78</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>81</b>
Annexe A : Courbes couplages	83
Annexe B : Analyse multicritère	87



# LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 - Bagdir (Iran) - Source Richard et Tolouie.....	13
Figure 2 - Démarche Néma-Watt.....	14
Figure 3 - Course du soleil selon la saison - Source Document ARENE PACA.....	17
Figure 4 - Echanges radiatifs au niveau d'un vitrage - Source EnergiePlus .....	19
Figure 5 - Exemple de façade double peau - Source MaP3 Fluides.....	20
Figure 6 - Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide – Source Ahmad, 2004 .....	21
Figure 7 - Principes de conception pour permettre une ventilation naturelle du bâtiment – Source Chauvin 2003 .....	22
Figure 8 - Déphaseur thermique avec du gravier – Source Hollmuller 2004 .....	22
Figure 9 - Diagramme de l'air humide - Source EnergiePlus .....	23
Figure 10 - Phénomène d'évapotranspiration – Source CNRS .....	24
Figure 11 - Principes de rafraîchissement associés aux différents systèmes.....	24
Figure 12 - Actions de rafraîchissement associées aux différents systèmes.....	25
Figure 13 - Perspective du bâtiment de référence utilisé pour l'étude - Source Arbor&Sens .....	28
Figure 14- Plans et coupe du bâtiment d'étude .....	29
Figure 15 - Evolution de la température (°C) dans le séjour avec Pleiades .....	31
Figure 16 - Résultats obtenus pour le bâtiment de référence.....	31
Figure 17 – Température(°C) dans le séjour du bâtiment de référence modélisé avec Pleiades et Codyba .....	32
Figure 18 - Extrait du tutoriel d'Izuba Energie pour la simulation d'une façade double peau.....	36
Figure 19 - Courbes d'humidité et de température selon deux modélisations sous Codyba .....	38
Figure 20 - Capacités de modélisation des systèmes de rafraîchissement passif pour chacun des logiciels.....	39
Figure 21 - Températures de référence avec Pleiades et Codyba .....	40
Figure 22 - Températures intérieures et extérieures (°C) avec Pleiades et Codyba .....	40
Figure 23 - Températures intérieures et extérieures avec Pleiades et Codyba.....	41
Figure 24 - Puissances nécessaires en climatisation avec Pleiades et Codyba (kWh) .....	42
Figure 25 - Abaissement moyen de température avec Pleiades et Codyba (°C) .....	43
Figure 26 - Couverture des besoins par les systèmes avec Pleiades et Codyba (°C) .....	43
Figure 27 - Abaissement de températures maximales avec Pleiades et Codyba (°C) .....	44
Figure 28 - Indice de performance sur Codyba en fonction de l'indice de performance sur Pleiades .....	45
Figure 29 - Besoins couverts sur Codyba en fonction des besoins couverts sur Pleiades .....	45
Figure 30 - Températures résultantes avec des systèmes contrôlant les apports solaires.....	47
Figure 31 - Zoom températures résultantes - contrôle des apports solaires .....	48
Figure 32 - Températures résultantes avec des systèmes à inertie.....	49
Figure 33 - Zoom - Températures résultantes avec des systèmes à inertie.....	50
Figure 34 - Températures résultantes avec des systèmes de ventilation.....	51

Figure 35 - Zoom - Températures résultantes avec des systèmes de ventilation .....	52
Figure 36 - Indice de performance de rafraîchissement .....	53
Figure 37 - Abaissement de température moyen et abaissement de températures maximales .....	54
Figure 38 - Taux de réponse aux besoins en rafraîchissement et couverture des besoins .....	55
Figure 39 - Indice de performance de rafraîchissement et abaissement moyen de température .....	56
Figure 40 - Abaissement moyen de température en fonction d'indice de performance de rafraîchissement.....	57
Figure 41 - Répartition des solutions dans le diagramme augmentation des besoins en chauffage en fonction de l'indice de performance de rafraîchissement.....	57
Figure 42 - Recherche de solutions performantes .....	58
Figure 43 - Abaissement moyen de température et abaissement de températures maximales .....	59
Figure 44 - Amortissement ou amplification des systèmes par rapport au bâtiment de référence .....	59
Figure 45 - Observation de l'amortissement ou de l'amplification par rapport au bâtiment de référence .....	60
Figure 46 - Besoins en froid couverts par le système en fonction du taux de réponse aux besoins en rafraîchissement.....	61
Figure 47 - Observation de l'atteinte ou non de la température de consigne.....	62
Figure 48 - Zoom - Atteinte ou non de la température de consigne.....	62
Figure 49 - Tableau regroupant l'IPR, la couverture des besoins en rafraîchissement et le taux de réponse aux besoins.....	63
Figure 50 - Valeurs des critères retenus pour chacun des systèmes modélisés.....	64
Figure 51 - Valeurs obtenues pour les couplages entre inertie et ventilation.....	65
Figure 52 - Valeurs obtenues pour les couplages entre protections solaires et ventilation .....	66
Figure 53 - Valeurs obtenues pour les couplages entre protections solaires et la diminution de l'isolation.....	67
Figure 54 - Valeurs obtenues pour les couplages entre protections solaires et inertie .....	67
Figure 55 - Valeurs des critères obtenues pour les couplages.....	68
Figure 56 - Etablissement de la notation pour chaque critère .....	71
Figure 57 - Première pondération .....	71
Figure 58 - Classement des solutions en réponse à la première pondération .....	71
Figure 59 - Deuxième pondération .....	71
Figure 60 - Classement des solutions en réponse à la deuxième pondération .....	72
Figure 61 - Troisième pondération.....	72
Figure 62 - Classement des solutions en réponse à la troisième pondération.....	72
Figure 63 - Scénario de ventilation dans le bâtiment optimisé.....	73
Figure 64 - Température dans le bâtiment de référence et le bâtiment optimisé .....	74

# INTRODUCTION

L'évolution des réglementations thermiques montre clairement une volonté de réduire les besoins en chauffage des bâtiments. Il en est de même pour les bâtiments passifs dont le concept est d'utiliser au maximum les apports solaires et les apports internes pour chauffer le bâtiment. Afin de se mettre en accord avec ces préceptes, les concepteurs s'orientent donc notamment vers un choix d'isolation performante et d'ouvertures au Sud.

Ces choix ont cependant pour conséquence un confort d'été souvent de faible qualité. En effet, le bâtiment fonctionne comme une bouteille thermos, ce qui convient tout à fait en hiver mais qui est incompatible avec les périodes chaudes de l'été : la chaleur peut difficilement être évacuée. Afin d'assurer des températures tolérables en été, ces bâtiments peuvent avoir recours à des systèmes de climatisation qui viennent augmenter leurs besoins en énergie et dégrader le bilan global malgré les bonnes performances en hiver.

On peut donc se demander comment concevoir des bâtiments avec de faibles besoins en chauffage qui permettent d'assurer un bon confort d'été sans nécessiter le recours à des systèmes de type climatisation, coûteux en énergie et néfastes pour l'environnement.

Cette prise en compte du confort d'été, pour qu'il soit obtenu sans surcoût d'énergie, doit se faire très en amont dans la conception et en accord avec les principes d'hiver. Comment instaurer des stratégies de rafraîchissement passif sans dégrader les principes de chauffage passif qui peuvent sembler incompatibles ?

De même que les stratégies de chauffage passif, celles de rafraîchissement sont à adapter en fonction du climat, de l'orientation, du type de bâtiment. Quelles adéquations peut-on mettre en avant entre les paramètres climatiques et formels, et les systèmes de rafraîchissement passif ?

De nombreux systèmes de rafraîchissement passif existent, certains très anciens, issus de l'habitat vernaculaire, d'autres issus de recherches récentes. Quels systèmes sont les plus efficaces et les plus favorables en termes de confort d'été en rapport aux coûts des systèmes ?

Comment choisir une stratégie de rafraîchissement passif ? Quels couplages privilégier ?

Par ailleurs, l'émergence d'une dynamique visant à réduire les consommations dans le secteur du bâtiment s'est traduite par l'apparition d'une nouvelle génération de bâtiments. Ce désir de rationalisation énergétique et d'optimisation se traduit de la part des professionnels par la nécessité d'utiliser des outils d'estimation des performances à tous les stades de la conception.

Si de nombreux outils de simulation numérique sont aujourd'hui disponibles sur le marché, peu ont spécifiquement été conçus pour cette nouvelle génération de bâtiments. Une rupture technologique est en effet nécessaire et elle doit s'accompagner d'une rupture au niveau de la façon de simuler les bâtiments.

Les outils de simulation existants ont été développés pour des bâtiments classiques qui consomment beaucoup plus d'énergie que les objectifs fixés, c'est pourquoi il faut revoir les méthodes de simulation employées, les modèles utilisés mais aussi se poser des questions sur l'outil le mieux adapté pour répondre aux besoins en terme de simulation.

Les logiciels de simulation thermique dynamique couramment utilisés par les bureaux d'étude prennent-ils tous en compte le confort d'été et permettent-ils de modéliser les différents systèmes de rafraîchissement passif ? Sinon, est-il possible d'approcher une modélisation des systèmes ?

Ce TFE a donc pour base l'ensemble de ces questions au cœur du débat actuel qui permettront d'orienter la démarche. La problématique que je me suis posée est alors la suivante : Comment évaluer l'impact d'une solution de rafraîchissement passif sur le comportement thermique d'un bâtiment grâce aux outils de modélisation thermique dynamique avec pour but d'améliorer le confort d'été sans avoir recours à la climatisation ?

Une première partie permettra de restituer un état de l'art concernant les solutions de rafraîchissement passif. Ces différents systèmes seront explicités, puis analysés et mis en perspective vis-à-vis des principes physiques qui les régissent.

Dans une deuxième partie, je décrirai ma démarche pour ce travail de fin d'études, avec notamment la méthode de travail que j'ai adoptée ainsi qu'une description de l'étude menée.

La troisième partie rapportera mes observations et analyses concernant la capacité des logiciels en termes de modélisation des systèmes de rafraîchissement passif suite aux tests de ces derniers.

J'analyserai ensuite les résultats des modélisations obtenus afin d'évaluer l'action des systèmes. Une analyse des critères mis en place et des modélisations de couplages entre différents systèmes permettront d'avoir un point de vue assez global sur l'action des solutions.

Dans la dernière partie, je replacerai ensuite l'analyse des différents systèmes dans un cadre plus global en étudiant à l'aide d'une analyse multicritère les points forts et les points faibles de chaque solution. Je mettrai alors en œuvre les résultats obtenus dans le cadre de l'optimisation du bâtiment étudié.

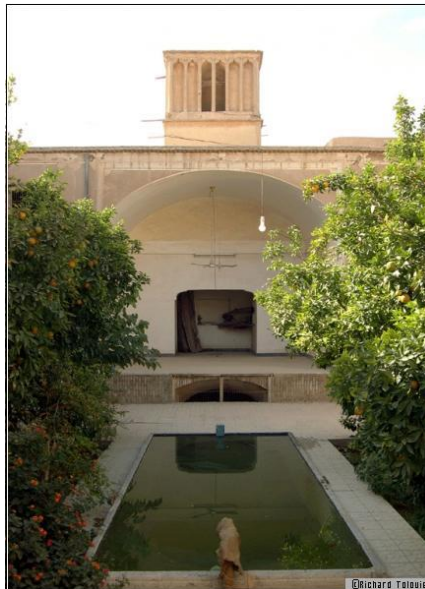
# 1 LES SYSTEMES DE RAFRAICHISSEMENT PASSIF

## 1.1 Pourquoi rafraîchir de manière passive ?

### 1.1.1 L'avènement de la climatisation

Que ce soit dans la civilisation grecque ou romaine, les bâtiments fonctionnaient en adéquation et en harmonie avec la nature. L'absence d'électricité et de systèmes modernes nécessitait une adaptation au climat et la mise en place de stratégies pour vivre malgré les aléas du climat.

De même, dans les pays chauds mais sans facilité électrique, où des températures bien plus élevées que sous nos latitudes sont observées, la chaleur dans les bâtiments est plus ou moins maîtrisée sans nécessité d'un système indépendant. L'habitat vernaculaire est généralement un bon exemple d'adaptation de la construction de bâtiments au climat. Un confort relatif est obtenu, un peu moins stable que celui procuré par des systèmes de climatisation mais plus en accord avec les conditions extérieures.



*Figure 1 - Bagdir (Iran) - Source Richard et Toloie*

La photo ci-dessus représente un bagdir, un « attrape-vent » en farsi, situé en Iran. Ces tours de ventilation issues de l'habitat vernaculaire sont présentes dans de nombreuses régions sèches et arides d'Orient. Ces tours peuvent avoir deux fonctions complémentaires, c'est pourquoi elles sont au nombre de deux dans un même bâtiment. Elles permettent d'une part de capter l'air plus rapide en hauteur et moins chargé de sable qui est amené au sous-sol pour y être rafraîchi puis insufflé dans le bâtiment. D'autre part, par effet de tirage thermique, l'air chaud peut être évacué. Ce système est un exemple montrant les capacités d'adaptation de l'homme à son climat avec des principes simples et sans utilisation d'électricité, c'est-à-dire passif.

Les climatiseurs permettent également d'apporter des conditions de confort, mais ils créent des conditions thermiques dans les bâtiments standardisées et uniformisées ; ce sont des systèmes mécaniques dont le fonctionnement est prévu indépendamment de la conception globale du projet.

C'est l'avènement de l'énergie bon marché qui a entraîné une hausse de l'utilisation des climatiseurs. Par ailleurs, la canicule extrême de 2003 en France a entraîné une forte croissance des ventes de climatiseurs à usage domestique, allant même jusqu'à des pénuries de produits dans

certaines régions. Cela a bien montré une absence de réflexion vis-à-vis du confort d'été dans la conception de nos bâtiments. Dans les bâtiments tertiaires, la consommation d'énergie pour l'usage climatisation pourrait progresser de 60 à 90 % d'ici 2030 d'après une étude de l'ADEME sur l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Il s'agit donc d'un secteur en pleine expansion malgré ses impacts négatifs sur l'environnement et la santé. En plus de consommer de l'électricité dans un contexte de crise énergétique, les climatiseurs peuvent entraîner des problèmes pour la santé des occupants et pour l'environnement ; les fluides frigorigènes sont en effet de puissants gaz à effet de serre s'ils sont libérés dans l'atmosphère.

### 1.1.2 Nécessité de s'adapter au contexte actuel

Il devient donc nécessaire de s'adapter au besoin de développement durable en limitant la dépendance énergétique ; il s'agit de réduire l'impact environnemental d'un bâtiment et donc ses consommations énergétiques.

L'association Négawatt propose la démarche générale suivante qui devrait être le fondement de toute action de maîtrise d'énergie dans tous les domaines :

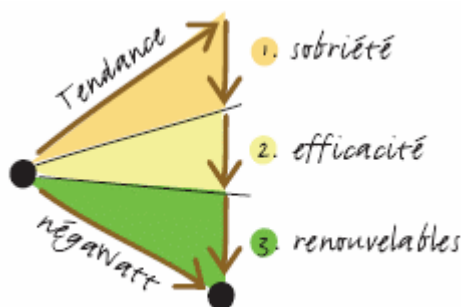


Figure 2 - Démarche Négawatt

L'idée est de réduire la consommation énergétique par les trois leviers que sont la sobriété, l'efficacité et le recours à des énergies renouvelables. Dans le domaine du bâtiment, il est parfois difficile de distinguer ce qui relève de la sobriété (réduction des besoins) et ce qui relève de l'efficacité (réduction des consommations).

La première prise de conscience à avoir est évidemment d'accepter de limiter les besoins en énergie, ce qui correspond à la sobriété. Cela passe par un changement dans les modes de vie, mais également dans les exigences de confort. Dans les pays occidentaux, la climatisation est sur-utilisée, avec des températures de consigne très basses. On n'accepte pas d'avoir un peu chaud, même si cela correspond à des économies considérables en matière d'énergie.

La question du confort est en effet une question sous-jacente. Il faut pouvoir accepter d'être dans des situations un peu moins confortables pour être en adéquation avec la nature.

Par ailleurs, il est nécessaire d'adapter nos constructions aux exigences actuelles de diminution des consommations d'énergie. Une certaine efficacité des systèmes, c'est-à-dire une réduction des consommations, est recherchée. Les réglementations actuelles et à venir encouragent en ce sens à limiter les besoins en énergie pour assurer des conditions de confort acceptables. L'utilisation des énergies renouvelables est également importante afin de les substituer aux énergies fossiles dont il faut limiter la consommation.

Comme nous le verrons lors de la dernière partie constituée par une analyse multicritère globale des systèmes de rafraîchissement passif, plusieurs éléments doivent être présents à l'esprit lorsque l'on évoque le rafraîchissement passif.

Tout d'abord, un système de rafraîchissement passif est généralement couplé à un système de chauffage passif ; une conception globale consistant à trouver un compromis entre stratégie d'hiver et stratégie d'été est à mettre en place.

Par ailleurs, selon le type de bâtiment et donc ses usages, les besoins et les exigences en fonction des périodes de la journée (tertiaire, logement) ne sont pas les mêmes.

D'autres critères que la performance thermique sont à prendre en compte, tels que les critères économiques, environnementaux, sanitaires, esthétiques, sociaux, aspect utilisateur doivent faire partie intégrale de la réflexion lors de la conception.

## **1.2 Comment rafraîchir et le faire de manière passive ?**

Avant de présenter les systèmes permettant de rafraîchir un bâtiment de manière passive, il est nécessaire de rappeler les principes physiques et actions qui le permettent.

### **1.2.1 Les principes physiques**

Il est tout d'abord nécessaire de revenir aux principes physiques qui régissent les transferts de chaleur. Il est en effet important de bien les connaître afin de savoir comment les éviter pour privilégier un rafraîchissement du bâtiment.

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur, est en réalité un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique.

L'exemple le plus courant de situation mettant en jeu un transfert thermique est le système constitué de deux corps en contact et ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie sous forme de chaleur au corps le plus froid afin de parvenir à un équilibre. Il y a un transfert thermique entre les deux corps.

Dans cette recherche d'équilibre thermique, le corps chaud cède de l'énergie au corps froid ; il y a donc échange de chaleur et non de fraîcheur. Le rafraîchissement passif est donc basé sur une limitation des échanges thermiques entre l'air chaud extérieur qui vise à réchauffer l'air intérieur plus frais pendant la journée.

Il peut également se produire des transferts thermiques vers un système dont la température reste constante, par exemple dans le cas d'un changement d'état physique. Un besoin d'énergie pour réaliser un changement d'état peut alors rafraîchir l'air ambiant.

Différents types de transferts thermiques se distinguent.

Le transfert par conduction a lieu dans toute matière présentant une répartition de température non uniforme (gradient de température) ou au contact direct d'un corps plus chaud ou plus froid. Le flux de chaleur se transmet de proche en proche, par contact des molécules.

Le transfert par convection a lieu lorsqu'un fluide en mouvement côtoie un corps inerte à une température différente. Les échanges sont d'autant plus importants que l'écart de température entre les deux est grand. Le transfert d'énergie s'accompagne de mouvement de molécules dans un fluide (liquide ou gaz). Deux types de transfert par convection sont à distinguer :

- Convection naturelle (ou libre) : l'échange de chaleur est responsable du mouvement. Le transfert thermique provoque le mouvement.
- Convection forcée : un dispositif mécanique entraîne les molécules vers le dispositif chauffant. Le mouvement favorise le transfert thermique.

Le transfert par rayonnement a lieu par propagation d'un rayonnement infrarouge dans le vide ou dans tout matériau transparent à ce rayonnement. L'intensité du transfert dépend de la température du corps et de l'émissivité du matériau.

Le transfert par changement d'état a lieu notamment lors du passage d'un matériau d'un état à un autre. Ce changement d'état nécessite un apport d'énergie appelée chaleur latente qui est prise sous forme de chaleur sensible à l'air, qui voit donc sa température diminuer.

Le transfert d'énergie par chaleur se réalise généralement par une combinaison de plusieurs modes. C'est le cas du verre d'une vitre chauffée par le rayonnement solaire, le transfert étant combiné avec une convection naturelle de l'air, derrière la vitre d'une pièce.

### 1.2.2 Les actions de rafraîchissement

Nous avons donc présenté les différents principes physiques permettant un transfert de chaleur. Lorsque des corps sont à des températures différentes, l'équilibre se fait toujours en faveur du corps le plus froid. C'est en effet le corps chaud qui transmet de l'énergie au corps froid pour atteindre un équilibre. Il n'existe donc pas réellement de principes physiques de rafraîchissement. Il s'agit en réalité d'éviter les transferts de chaleur puisque les transferts de fraîcheur n'existent pas au sens physique du terme. Nous allons donc mettre en avant trois actions de base qui permettent d'éviter ces transferts de chaleur et les analyser d'un point de vue physique.

#### 1.2.2.1 *Minimiser les apports de chaleur*

Tout d'abord, il est nécessaire de limiter les apports de chaleur, aussi bien les apports de chaleur internes qu'externes. Dans les bâtiments performants, les apports de chaleur sont difficiles à évacuer ; il est donc encore plus important de les limiter.

Les apports internes proviennent en premier lieu des habitants. Leur métabolisme est en effet une source d'apports de chaleur. Il est variable en fonction de l'activité de l'occupant. Les apports internes proviennent également des équipements électriques. La majeure partie de l'électricité consommée est rejetée sous forme de chaleur, mis à part par exemple l'énergie lumineuse d'une lampe. Il semble donc nécessaire d'adapter nos comportements vis-à-vis des équipements électriques et de privilégier des classes A afin de limiter les consommations. Malgré les efforts qui peuvent être réalisés, il sera difficile de réduire significativement ces apports de chaleur.

Il s'agit alors de réduire les apports externes. Ces apports sont les apports solaires directs ou diffus qui pénètrent dans le bâtiment par les vitrages et les parois. Les apports solaires directs doivent être notamment limités au niveau des ouvertures. Les rayons du soleil qui tapent sur le vitrage correspondent en fait à l'effet de serre. Afin de limiter cet apport direct, on peut d'une part agir sur le type de vitrage qui aura une transmission des rayons lumineux plus ou moins importante. D'autre part, des protections solaires doivent être mises en place afin d'éviter tout simplement cet effet de serre, même si des apports diffus seront tout de même possibles. Au niveau des parois, un travail d'isolation peut également être réalisé pour limiter les apports par conduction à travers la paroi. Il faut également veiller à ne pas faire pénétrer l'air chaud de l'extérieur ; un travail sur les stratégies de ventilation est en effet à réaliser. Une bonne étanchéité à l'air est également importante.

Ces apports sont donc des apports par rayonnement, combinés ensuite à de la convection à l'intérieur du bâtiment. Il faut donc bloquer ce rayonnement.

#### 1.2.2.2 *Evacuer le chaud*

Comme nous avons pu le voir, des apports de chaleur dans le bâtiment sont inévitables, en premier lieu car un bâtiment a pour vocation d'être occupé et que les occupants dégagent de la chaleur. Des solutions pour évacuer la chaleur sont alors à mettre en place. Une stratégie de ventilation semble assez adéquate pour répondre à ce besoin puisqu'elle permettrait d'évacuer l'air chaud. Il est alors nécessaire de ne pas apporter de l'air chaud pour le remplacer, mais plutôt d'apporter du frais. Il faut alors apporter de l'air plus frais et favoriser les échanges par convection. L'air plus frais va se réchauffer au contact de l'air intérieur plus chaud. Le mouvement ainsi induit permettra l'évacuation de cet air tiède jusqu'à obtenir une température satisfaisante.



### 1.2.2.3 Apporter du frais

L'apport de fraîcheur est également un des principes de base du rafraîchissement passif. Cela permet de refroidir directement la pièce. Au sens physique du terme, il ne s'agit pas d'un apport de fraîcheur mais d'une prise de chaleur. Comme lors des changements d'état, de l'énergie est nécessaire et elle est donc prise sous forme de chaleur dans l'air ambiant. Par ailleurs, nous verrons que l'air peut être rafraîchi en lien avec l'humidité de la pièce. L'évapotranspiration des plantes est également une source de fraîcheur. Les mécanismes seront détaillés plus loin. La masse thermique permet également d'apporter du frais en déphasant et amortissant la chaleur extérieure.

## 1.2.3 Les principes de rafraîchissement

Après avoir vu les différents principes physiques et actions qui régissent les transferts de chaleur et permettent d'assurer un rafraîchissement, nous pouvons définir quatre principes de rafraîchissement :

- Minimiser les apports de chaleur, à la fois internes et externes, en limitant le rayonnement et la conduction à travers les parois.
- Apporter de la masse thermique, afin d'amortir la chaleur extérieure pénétrant dans le bâtiment.
- Ventiler, avec de l'air frais, en favorisant les échanges par convection.
- Humidifier, afin d'apporter de la fraîcheur par évaporation ou évapotranspiration en présence de plantes.

Ces quatre principes de base permettront de classer grossièrement les différents systèmes que l'on peut mettre en avant. Le classement d'un système dans une catégorie pourra être parfois délicat ; il sera donc affiné dans la partie 4.

## 1.3 Quels systèmes mettre en œuvre pour...

Une présentation des systèmes pouvant être utilisés dans le cadre du rafraîchissement passif est ici réalisée. La liste n'est sûrement pas exhaustive mais le but était de s'attacher à avoir une vision la plus large possible, à la fois au niveau temporel et spatial.

### 1.3.1 Minimiser les apports de chaleur

#### 1.3.1.1 Protections solaires : brise-soleil, masques architecturaux et stores

Les brise-soleil, ainsi que les masques architecturaux (casquette, flanc), ont pour but de bloquer les rayons du soleil en été, mais de les laisser atteindre le vitrage en hiver. Leur dimensionnement se fait grâce à des diagrammes solaires qui décrivent la course du soleil au cours de la journée et pour toute l'année.

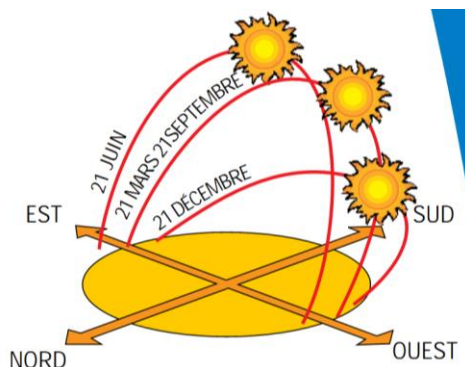


Figure 3 - Course du soleil selon la saison - Source Document ARENE PACA

On obtient en effet la hauteur angulaire du soleil à partir de laquelle on veut bloquer le rayonnement solaire direct et cela permet de dimensionner les masques architecturaux ou brise-soleil. Des brise-soleil orientables existent également ; ils permettent d'adapter l'orientation des lames à la course du soleil. Ils nécessitent cependant l'intervention de l'utilisateur. Ils sont plus efficaces en façade Sud ; il faut également veiller à utiliser un matériau ne stockant pas trop la chaleur pour les réaliser.

Le rayonnement solaire direct est donc bloqué ; le rayonnement solaire diffus atteint tout de même les vitrages.

La mise en place de stores permet également de bloquer le rayonnement direct. Il faut veiller à les positionner à l'extérieur pour ne pas faire pénétrer le flux de chaleur à l'intérieur. Le matériau choisi pour les stores, comme pour les brise-soleil, ne doit pas emmagasiner trop de chaleur.

#### *1.3.1.2 Diminution des apports internes*

Avec l'essor de la technologie et des besoins électriques (éclairages, électroménager,...), les apports de chaleur internes ont fortement augmenté. Les appareils transforment en effet quasiment toute l'énergie qu'ils consomment en chaleur. Les postes informatiques sont également de vraies sources de chaleur. Les occupants constituent évidemment une autre source d'apports internes par leur métabolisme.

Dans les bâtiments performants, les apports internes représentent une part importante des apports de chaleur. Afin d'améliorer le confort d'été, il conviendrait donc de les réduire. On ne peut agir sur les occupants puisqu'ils sont à la base du besoin de confort ; on peut cependant essayer de réduire les apports de chaleur issus des appareils consommant de l'électricité. Un travail peut être réalisé au niveau de l'éclairage en ayant recours à des lampes à basse consommation.

#### *1.3.1.3 Isolation*

Les matériaux isolants reconnus en tant que tels sont apparus avec les crises pétrolières des années 70. Une grande campagne d'isolation a alors permis la large diffusion des laines minérales.

Dans les bâtiments performants d'aujourd'hui, l'isolation joue un rôle très important notamment pour le confort d'hiver car la chaleur reste à l'intérieur. Cela semble donc incompatible avec le confort d'été ; l'isolation joue cependant un rôle. En effet, l'isolation permet tout de même de diminuer les apports de chaleur par les parois, mais pour cela elle doit être mise en œuvre par l'extérieur et être couplée à de la ventilation et de l'inertie. Si l'isolation est à l'intérieur, le chaud peut rentrer mais reste stocké à l'intérieur car il ne peut plus ressortir. L'isolation par l'extérieur limite également les ponts thermiques et permet de conserver l'inertie des murs.

De nombreux produits isolants existent aujourd'hui, aussi bien au niveau de leur composant (laines minérales, laines végétales, isolants minces,..) que de leur conditionnement (vrac, panneaux, rouleaux,...) et de leur épaisseur.

Le caractère isolant d'un matériau se traduit par le coefficient de transmission surfacique  $U$  qui s'exprime en  $W/m^2.K$ . Il correspond à la chaleur transmise par mètre carré de matériau ou de paroi pour une différence de température de un degré de part et d'autre de l'élément. Plus ce coefficient  $U$  est faible, plus le matériau ou la paroi est performante. Comme le chaud va vers le froid, on cherche en hiver à ne pas faire sortir le chaud et en été on cherche à ne pas faire entrer le chaud, c'est pourquoi idéalement en été, l'isolant doit être placé à l'extérieur.

#### *1.3.1.4 Vitrages*

Lorsque le flux solaire lumineux frappe une vitre, une partie est directement transmise à l'intérieur, une autre est réfléchie vers l'extérieur et enfin une partie du rayonnement est absorbée par le vitrage. La nature du vitrage a une influence sur la transmission énergétique du rayonnement solaire selon les caractéristiques suivantes : le nombre de feuilles de verre, le facteur de transmission de chaque feuille, le facteur de réflexion ou d'absorption.

Le schéma ci-dessous représente les différents échanges radiatifs au niveau du vitrage.



Figure 4 - Echanges radiatifs au niveau d'un vitrage - Source EnergiePlus

La maîtrise du flux entrant s'apprécie par le facteur solaire de la baie. C'est un coefficient définissant le rapport entre l'énergie solaire qui pénètre à l'intérieur d'un local par une fenêtre et l'énergie solaire incidente sur cette même surface. Le facteur solaire (FS) correspond donc à la somme de la transmission énergétique directe et de la transmission énergétique secondaire intérieure.

Les menuiseries font l'objet de différents échanges de chaleur : les échanges radiatifs au niveau du vitrage vus précédemment, mais également les échanges par conduction en considérant le caractère isolant du vitrage et de la menuiserie. Il faut également considérer les ponts thermiques au niveau de la menuiserie.

Les bâtiments performants sont généralement très ouverts en façade Sud afin d'optimiser les apports de chaleur en hiver. En été, les surchauffes sont notamment dues à ces ouvertures.

Il existe aujourd'hui différents types de vitrages, notamment des vitrages performants pour le confort d'été qui présente des facteurs solaires assez faibles. Le vitrage idéal serait en fait celui qui présenterait un facteur de transmission énergétique allant en diminuant lorsque l'énergie solaire incidente augmente. La mise en place de triple vitrage permet également d'augmenter le caractère isolant de la menuiserie.

#### 1.3.1.5 Façade double peau et serre

Les façades double peau sont un principe de doublage de la façade ; le vide ainsi créé vient remplir différentes fonctions selon les parois de part et d'autre, et les systèmes pouvant lui être associés.

Certains types de façade double peau ont marqué l'histoire de la thermique, avec notamment les murs Trombe et murs capteurs, dont le principe était de placer une vitre devant une paroi à forte inertie afin de bénéficier de l'effet de serre pour chauffer davantage la paroi et emmagasiner davantage de chaleur en hiver. A cela pouvait être couplé un système de ventilation par clapets haut et bas.

En ce qui concerne le confort d'été, la création d'une façade double peau permet de créer un espace tampon qui peut être ventilé et ainsi permettre de diminuer les apports de chaleur à l'intérieur. Sur un bâtiment à plusieurs niveaux, la façade double peau peut être continue sur tous les étages afin de bénéficier d'un effet de tirage thermique et donc de ventilation naturelle. Des brise-soleil peuvent également être mis en place entre les deux parois.

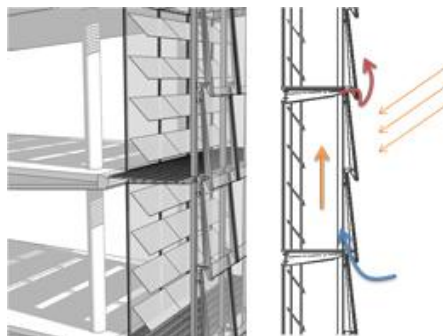


Figure 5 - Exemple de façade double peau - Source MaP3 Fluides

La serre constitue une variante à la façade double peau. Il s'agit également de créer un espace tampon assurant différentes fonctions. La serre est cependant un espace habitable.

### 1.3.2 Apporter de la masse thermique

#### 1.3.2.1 Inertie

La fraîcheur estivale des maisons anciennes aux épais murs de pierre n'est pas à prouver : le phénomène entrant en jeu ici est l'inertie des murs. La mise en place de masse thermique permet en effet de déphaser et d'amortir les apports de chaleur externes.

Différents paramètres entrent en compte pour quantifier l'inertie d'un matériau. Il ne doit d'abord pas être trop isolant pour que la chaleur à stocker puisse pénétrer dans le matériau, c'est-à-dire posséder une conductivité assez grande. Il doit également avoir une bonne capacité à accumuler la chaleur, c'est-à-dire une bonne capacité thermique et avoir une densité élevée pour stocker la chaleur dans une épaisseur de paroi minimale ; une forte masse volumique est donc souhaitée. L'inertie d'une paroi dépend aussi de la surface d'échange. Un mur de refend intérieur a deux fois plus de surface d'échange utile qu'une paroi en contact avec l'extérieur.

Deux notions physiques sont associées à l'inertie : l'effusivité d'une part qui traduit la capacité du matériau à absorber de l'énergie sans se réchauffer notablement ; la diffusivité d'autre part traduit la vitesse de propagation d'un flux de chaleur dans un matériau. Si la diffusivité est faible, le temps pour traverser le matériau est long ; il a donc une forte inertie.

L'interaction de l'inertie avec l'isolation est délicate comme nous l'avons évoqué plus haut : l'isolation doit être à l'extérieur pour bénéficier des bienfaits de l'inertie. Les revêtements, notamment les faux-plafonds, sont également à éviter sur les masses thermiques. Par ailleurs, le couplage avec la ventilation est important pour évacuer la chaleur émise à l'intérieur du bâtiment à l'issue du déphasage temporel.

#### 1.3.2.2 Matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase peuvent être classés parmi les masses thermiques. C'est en effet sous cette appellation qu'ils sont vendus, leur action globale étant similaire à celle des masses thermiques.

Le principe des matériaux à changement de phase est basé sur un stockage de chaleur, c'est pourquoi ces systèmes peuvent être classés parmi les systèmes de masse thermique. Cependant ce stockage de chaleur n'est pas de la chaleur sensible comme pour l'inertie mais de la chaleur latente qui provient du changement de phase des matériaux.

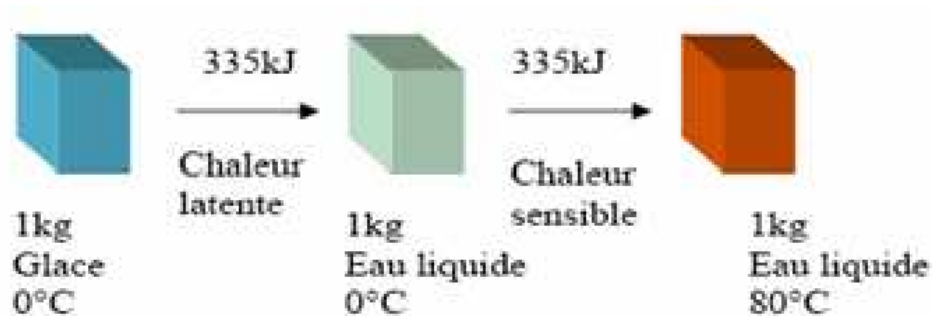


Figure 6 - Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide – Source Ahmad, 2004

Le graphique ci-dessus montre que l'énergie nécessaire à changer 1 kg de glace en eau liquide nécessite autant d'énergie que pour chauffer 1 kg d'eau liquide de 0 à 80°C. Cette chaleur latente est donc très intéressante d'un point de vue thermique. Les points de fusion dépendent des corps utilisés ; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées.

De nombreuses considérations aussi bien au niveau thermique, que physique et cinétique sont à prendre en compte pour la mise en œuvre de ces matériaux qui sont toujours en cours de développement. Les matériaux les plus couramment utilisés sont des composés organiques paraffiniques et non paraffiniques, et des hydrates salins. Leur température de fusion avoisine les 20°C.

Ces matériaux à changement de phase sont en plein développement. J'ai rencontré au cours de mon travail de fin d'études M. Raoul RIOUAL de la société DuPont, représentant pour le matériau Energain, matériau à changement de phase qui est solide à 18°C et liquide à 26°C. Durant la phase d'échauffement du matériau, il se charge en énergie et capte ainsi de la chaleur dans la pièce. Lorsque la température diminue, le matériau va se solidifier à nouveau et restituer la chaleur à la pièce.

Ces matériaux peuvent être placés aussi bien au niveau des parois extérieures, en doublage ou en toiture.

### 1.3.3 Ventiler

#### 1.3.3.1 Ventilation

La ventilation est un principe important dans le cadre du rafraîchissement passif. La ventilation résulte d'une surpression, c'est-à-dire une différence de pression entre deux points. Cette différence peut avoir deux types de causes : thermiques (l'air chaud plus léger s'élève, provoquant un appel d'air plus froid) et mécaniques (le vent crée des zones de surpression qui favorisent les mouvements d'air).

La ventilation est intéressante car d'une part, elle peut apporter du frais si l'air extérieur est plus froid que l'air intérieur ; d'autre part, elle permet un mouvement d'air qui joue sur le confort physiologique car il accroît les échanges thermiques entre le corps et l'air ambiant par convection et par évaporation de la sueur. La ventilation a également un rôle hygiénique vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur.

Plusieurs systèmes de ventilation existent. Tout d'abord, la ventilation naturelle peut être efficace en ouvrant tout simplement les fenêtres ; ce système nécessite cependant une bonne conception du bâtiment qui doit permettre une ventilation traversante et une bonne position des ouvrants par rapport à la direction des vents dominants. Le tirage thermique peut également être mis en œuvre lorsque le bâtiment le permet.

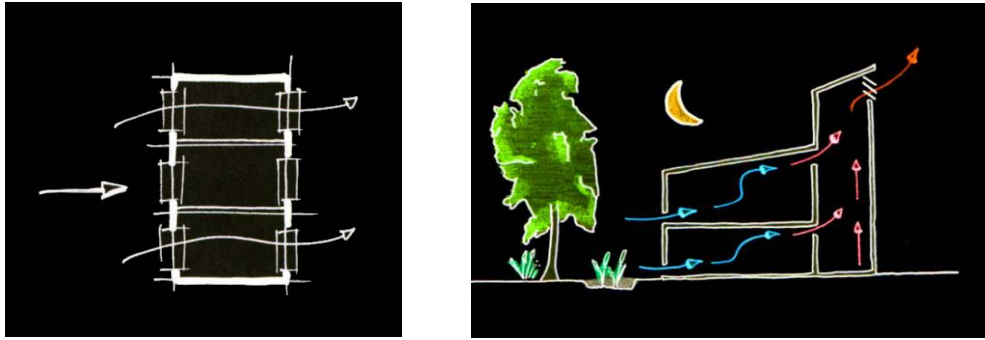


Figure 7 - Principes de conception pour permettre une ventilation naturelle du bâtiment – Source Chauvin 2003

Si la conception du bâtiment ne permet de ventilation naturelle, la ventilation peut également être mécanique avec la mise en place d'un extracteur d'air dans les pièces humides généralement. Une ventilation double flux permet à la fois d'extraire l'air vicié, mais également d'insuffler de l'air neuf.

Enfin, la ventilation peut être hybride, c'est-à-dire une combinaison de ventilation naturelle et de ventilation mécanique afin de palier à une faible efficacité de la ventilation naturelle.

Dans le cas d'une ventilation naturelle, l'utilisateur aura un rôle à jouer puisqu'il devra assurer une ouverture des fenêtres judicieuse afin de conserver un niveau de confort satisfaisant.

### 1.3.3.2 Puits canadien – Geocooling - Déphaseur

A 2 mètres sous terre, les variations de température sont faibles d'une saison à l'autre, nulles entre le jour et la nuit et ne dépendent pas du temps qu'il fait dehors. Il fait donc plus chaud qu'à l'extérieur en hiver et plus frais en été. L'air insufflé dans la maison peut donc être préchauffé ou prérafraîchi. Dans de nombreuses cultures en climats chauds (puits provençal), comme en climats froids (puits canadien), on s'est servi de l'inertie du sol pour obtenir, à l'intérieur des bâtiments, des températures moins sensibles aux variations d'amplitude extérieures.

Afin de mettre en place un puits canadien, il faut donc installer des canalisations dans lesquelles l'air extérieur peut circuler et ainsi bénéficier de l'inertie de la terre pour se rafraîchir ou se réchauffer. Le dimensionnement de ses canalisations, du débit d'air à l'intérieur et leur profondeur sont à adapter à chaque bâtiment.

Un autre système couplé à la ventilation et basé sur l'inertie est un élément en cours de recherches appelé déphaseur. Le déphaseur est un système en développement basé sur l'augmentation des échanges thermiques entre l'air et la masse thermique. Le principe est de faire passer l'air dans un lit de billes d'un matériau à forte capacité thermique, comme des galets par exemple. On obtient alors une grande surface d'échange dans un environnement assez petit.



Figure 8 - Déphaseur thermique avec du gravier – Source Hollmuller 2004

### 1.3.4 Humidifier

#### 1.3.4.1 Eau (bassin, toiture, murs(systèmes radiatifs))

L'eau a de nombreuses propriétés et certaines lui permettent d'être très active dans le cadre du rafraîchissement passif.

L'eau a tout d'abord des propriétés intéressantes au niveau de sa masse volumique et de sa capacité thermique. Elle a donc été utilisée pour créer des murs d'eau ou des toiture-bassins dans les années 70. Aujourd'hui un stockage des eaux de pluie sur le toit reprend ce principe. Il nécessite cependant un dimensionnement du bâtiment conséquent.

L'eau permet également un rafraîchissement de l'air comme c'est illustré sur le graphique ci-dessous.

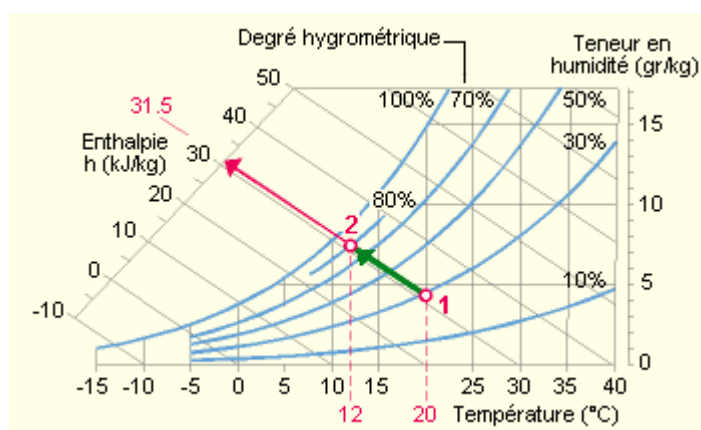


Figure 9 - Diagramme de l'air humide - Source EnergiePlus

On peut effectivement noter qu'une augmentation de l'humidité permet une baisse de température à enthalpie constante. La brumisation ou la présence d'un bassin à proximité du bâtiment permettent donc de rafraîchir l'air. Les humidificateurs à évaporation sont des systèmes basés sur ce principe. L'air passe à travers un rideau de gouttelettes d'eau par exemple qui s'évaporent dans l'air pulsé qui est ainsi rafraîchi. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est extraite de l'air qui en conséquence se refroidit. Ce système gagne en efficacité avec l'augmentation de la température extérieure. Au delà de 30°C, l'air peut se refroidir de plus de 10°C ce qui se traduit par un rendement de rafraîchissement très efficace.

#### 1.3.4.2 Végétation

La végétation possède également plusieurs propriétés lui permettant d'améliorer le confort d'été. D'une part, par l'ombre qu'elle peut apporter au bâtiment, elle permet de diminuer les apports par rayonnement solaire et ainsi constituer une protection solaire. D'autre part, la végétation à proximité du bâtiment permet également d'apporter de la fraîcheur par évapotranspiration. Les végétaux peuvent être attenants au bâtiment comme les treilles ou pergolas végétalisées, ou plus lointains comme les arbres de haute tige à feuilles caduques. Ces types de végétaux sont plus intéressants que des conifères qui resteront fournis toute l'année et limitent également les apports solaires en hiver.

L'évapotranspiration est un phénomène qui couple deux propriétés des végétaux. D'une part, on observe une évaporation au niveau du sol, d'autre part de la transpiration par les pores des feuilles des végétaux. Elle est difficilement mesurable.



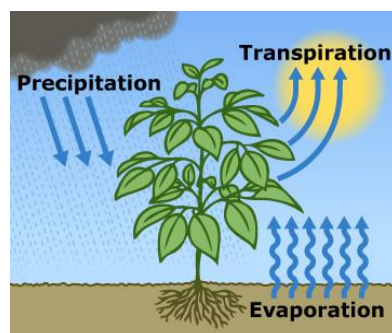


Figure 10 - Phénomène d'évapotranspiration – Source CNRS

La végétation peut également être plantée en toiture. Une toiture végétalisée permet de bénéficier d'un microclimat mais également de l'inertie apportée par la terre nécessaire à la plantation des végétaux. La toiture doit cependant être bien isolée et le bâtiment bien dimensionné. En ville, en outre, ces toitures végétalisées permettent de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain.

#### 1.3.4.3 Terre crue

La terre crue est un matériau de construction utilisé pour son inertie. Il s'agit également d'un matériau qui peut se charger fortement en vapeur d'eau ; elle se condense lorsque le mur est froid (en libérant de la chaleur) pour se réévaporer lorsque la température augmente. Cet aspect permet donc de faire de la terre crue un matériau doublement intéressant pour le rafraîchissement passif. Comme pour l'évapotranspiration, peu de données permettent de quantifier les échanges de chaleur.

## 1.4 Classement des systèmes en fonction de leurs actions

La description et l'explication des principes de rafraîchissement passif a permis d'obtenir un état de l'art et un point de vue assez global sur le panel des solutions. Nous avons pu voir qu'il existe une grande variété de systèmes, ce qui est intéressant car des couplages vont notamment être possibles. Il est alors nécessaire de revenir aux actions et aux principes physiques afin de croiser les différentes spécificités de chacun et ainsi mettre en avant des classifications et des combinaisons stratégiques.

Il est tout d'abord important de revenir sur le classement de chaque système dans une des catégories de principes de rafraîchissement. Certains peuvent en effet répondre à plusieurs de ces principes.

	Minimiser les apports de chaleur	Apporter de la masse thermique	Ventiler	Humidifier
Protections solaires	X			
Diminution des apports internes	X			
Isolation	X			
Vitrages	X			
Façade double peau	X		X	
Inertie		X		
MCP		X		
Ventilation			X	
Puits canadien	X		X	
Eau		X		X
Végétation	X	X		X
Terre crue		X		X

Figure 11 - Principes de rafraîchissement associés aux différents systèmes

Ce tableau permet de montrer que certains systèmes réalisent plusieurs actions. Comme nous l'avons vu lors de la description de systèmes, la végétation par exemple permet à la fois d'apporter



du frais par évapotranspiration mais également de minimiser les apports de chaleur puisqu'elle apporte de l'ombre au bâtiment si elle placée judicieusement.

Un classement des systèmes en fonction de leur action de base de rafraîchissement permet de mettre en avant leurs complémentarités.

	Minimiser les apports (internes et externes)	Evacuer le chaud	Rafrâchir (amener du frais)
Protections solaires	X		
Diminution des apports internes	X		
Isolation	X		
Vitrages	X		
Façade double peau	X	X	X
Inertie			X
MCP			X
Ventilation		X	X
Puits canadien	X	X	X
Eau			X
Végétation	X		X
Terre crue			X

*Figure 12 - Actions de rafraîchissement associées aux différents systèmes*

Ces deux tableaux ont permis d'avoir une vision synthétique sur les actions et les systèmes de rafraîchissement passif. Cet état de l'art et analyse des systèmes sont une étape importante dans ce travail puisqu'ils posent la base de la réflexion. Ils sont intégrés à une démarche globale que je vais vous présenter dans la partie suivante.

## 2 DESCRIPTION DE LA METHODE DE TRAVAIL ET DE L'ETUDE MENEES

### 2.1 Méthode globale suivie

#### 2.1.1 Objectifs de l'étude

Différents objectifs ont été fixés concernant ce travail de fin d'études réalisé au sein de l'agence Arbor&Sens. Consciente de l'importance prise par les besoins de confort d'été dans les bâtiments performants, l'agence souhaitait réaliser une étude plus détaillée sur les systèmes et leur modélisation. Cette étude devait notamment permettre de connaître plus en détail les caractéristiques et capacités des logiciels utilisés quotidiennement, notamment vis-à-vis du rafraîchissement passif.

Le premier objectif était donc de réaliser un état de l'art et de l'avancement de la recherche concernant les systèmes de rafraîchissement passif afin d'accéder à une vision globale des solutions.

Ce travail de fin d'études avait également pour objectif de connaître quels systèmes étaient modélisables sur ces logiciels, lesquels ne l'étaient pas, mais également si certains systèmes pouvaient être modélisés indirectement, en utilisant certains outils propres à chaque logiciel. Une conclusion sur la capacité des logiciels était donc attendue.

Par ailleurs, il était souhaité qu'une analyse des résultats des simulations, mais également la prise en compte d'autres critères, permettent de mettre en avant les points forts et les points faibles des différents systèmes.

Enfin, l'optimisation du comportement thermique d'un des projets de l'agence était attendue afin de mettre en application le travail réalisé, mais également de mettre au point une méthodologie d'optimisation qui pourrait être réemployée par l'agence.

#### 2.1.2 Démarche adoptée

La démarche adoptée afin de répondre à ces objectifs s'est mise en place de manière assez logique et naturelle.

L'état de l'art présenté dans la partie précédente était en effet nécessaire afin de connaître de manière assez exhaustive les systèmes qui existent, aussi bien des systèmes mis au point au niveau de l'habitat vernaculaire que des systèmes toujours à l'état expérimental. La classification de ces systèmes en fonction des principes physiques, de leurs interactions avec le fonctionnement global du bâtiment a permis de mettre en avant les caractéristiques de chaque système et de pouvoir ainsi appréhender plus facilement leur modélisation sur les logiciels.

Un bâtiment support d'étude était nécessaire pour mener ce travail qui ne pouvait se limiter à tester les capacités de modélisation sans les mettre en œuvre. Cela permettait en effet d'observer l'influence des systèmes sur le comportement thermique du bâtiment et donc d'observer leur influence. Le choix de bâtiment s'est fait en lien avec les besoins de l'agence.

Le choix des logiciels étudiés s'est orienté vers des logiciels utilisés couramment par les maîtres d'œuvre (architectes, bureau d'études,...) afin de voir comment ces logiciels prennent en compte le confort d'été et permettent de modéliser des systèmes de rafraîchissement en évitant le recours à la climatisation.

Dans un premier temps, les objectifs étaient clairement orientés logiciels et non optimisation du confort thermique. Conserver pour objectif la capacité des logiciels en termes de modélisation et ne pas chercher à optimiser le confort dans le bâtiment a été assez difficile. Il est en effet assez tentant de s'atteler au travail qu'un ingénieur réalise dans un bureau d'études, c'est-à-dire trouver la

meilleure solution pour améliorer le confort d'été. Il s'agissait donc de conserver une démarche de recherche en première phase de ce travail.

Dans un second temps, l'analyse multicritère des systèmes modélisés et l'optimisation du bâtiment étude était alors plus proche du travail d'un ingénieur dans un bureau d'études et s'est donc fait de manière assez naturelle.

Après avoir effectué les différentes simulations du bâtiment avec chacun des systèmes de rafraîchissement passif testés, il est possible d'analyser les résultats afin d'observer le comportement du bâtiment dans chacun des cas et avec chacun des logiciels. Nous pourrions ainsi observer la prise en compte des éléments par les logiciels. Cette analyse permettra également de regarder les critères qui interfèrent afin de qualifier les systèmes mais également montrer la pertinence de ces critères.

Rappelons que nous observons ici des tendances. Le choix du bâtiment de référence est en effet déterminant dans l'obtention des résultats. Par ailleurs, les systèmes n'ont pas été optimisés.

## **2.2 Présentation des modélisations réalisées**

La base de réflexion de ce travail de fin d'études a été la modélisation de systèmes de rafraîchissement sur un bâtiment d'étude. Il a donc fallu faire le choix des logiciels testés, du bâtiment à modéliser et des critères d'évaluation des systèmes.

### **2.2.1 Logiciels testés**

Le choix des logiciels testés devait se faire parmi les logiciels couramment utilisés par les bureaux d'études et les architectes. Un des objectifs de ce travail de fin d'études était en effet d'évaluer les capacités de ce type de logiciels. Les modélisations auraient pu se faire sur des logiciels plus évolués, type TRNSYS, et alors tous les systèmes auraient pu être modélisés, mais ce n'était pas le but de ce TFE. Il s'agissait vraiment de se mettre à la place d'un maître d'œuvre moyen et d'analyser ses outils. De même, des logiciels trop simplifiés ne pouvaient convenir à cette étude. Il était nécessaire d'obtenir des données horaires afin de pouvoir exploiter les résultats de manière assez fine. En effet, des logiciels davantage règlementaires tels que Climawin ou PHPP donnent des résultats mensuels, voire annuels. Ce ne sont donc pas des données exploitables dans le cadre de cette étude.

Le choix des logiciels s'est donc porté vers Pleiades+Comfie et Codyba, deux logiciels permettant d'effectuer des calculs dynamiques. Ils n'utilisent pas directement des équations de la mécanique des flux, mais des équations simplifiées qui permettent de réduire considérablement les temps de calcul.

Pleiades+Comfie est un logiciel qui a été développé à la fin des années 80 par l'école des Mines de Paris par Peuportier et Blanc Sommereux pour faire face aux besoins de modélisation. L'interface utilisateur a été réalisée par la société Gefosat, et aujourd'hui mise à jour en suivant l'évolution du logiciel par la même société renommée Izuba Energies. Pleiades correspond en fait à l'interface utilisateur et Comfie au moteur de calcul. Nous utiliserons parfois au cours de ce rapport simplement l'appellation Pleiades pour le logiciel mais il s'agira bien évidemment de Pleiades + Comfie. C'est un logiciel assez répandu puisqu'en 2009, 700 licences étaient délivrées.

CoDyBa a été créé à l'origine par J.-J. Roux, chercheur à l'Université. La version multi-zones sous Windows et les fonctionnalités suivantes ont été développées par Jean Noel. Ce logiciel est un peu moins répandu avec 50 licences en France.

Notons également que ces deux logiciels sont mis à jour régulièrement, notamment avec l'insertion de nouveaux modules. Le développement de ces logiciels ne se fait généralement que lorsque des thésards peuvent y travailler ou lorsque des investisseurs privés peuvent financer la recherche.

### 2.2.2 Bâtiment modélisé et son comportement de référence

Le choix du bâtiment d'étude s'est fait en fonction des besoins d'Arbor&Sens. Ils avaient en effet travaillé sur un concept de maison évolutive pour Mâcon habitat qui permettrait l'accession à la propriété pour des familles dont l'évolution de la maison serait conjointe à celle de la taille de la famille. L'innovation est également de conserver une maison performante malgré les éventuels agrandissements. Arbor&Sens souhaitait que je travaille à terme sur l'optimisation du fonctionnement de cette maison concept afin de poursuivre les études. Elle a donc d'abord été un prétexte et un support à l'étude vis-à-vis de l'évaluation des logiciels, puis elle a fait l'objet d'une optimisation en application de l'étude menée.



*Figure 13 - Perspective du bâtiment de référence utilisé pour l'étude - Source Arbor&Sens*

La maison évolutive a été testée lorsqu'elle n'était pas encore dotée de l'extension. Cette étape-là a été retenue puisque elle correspond au moment où la compacité du bâtiment est la plus faible. Elle est en effet de 0,93, alors qu'une fois agrandie, la compacité deviendra 1,12. La compacité correspond au rapport entre le volume chauffé et la surface déperditive du bâtiment. Une forte compacité correspond pour un même volume chauffé à une surface de déperditions moindre et les besoins en chauffage seront donc a priori moins importants.

Voici les plans de la maison :

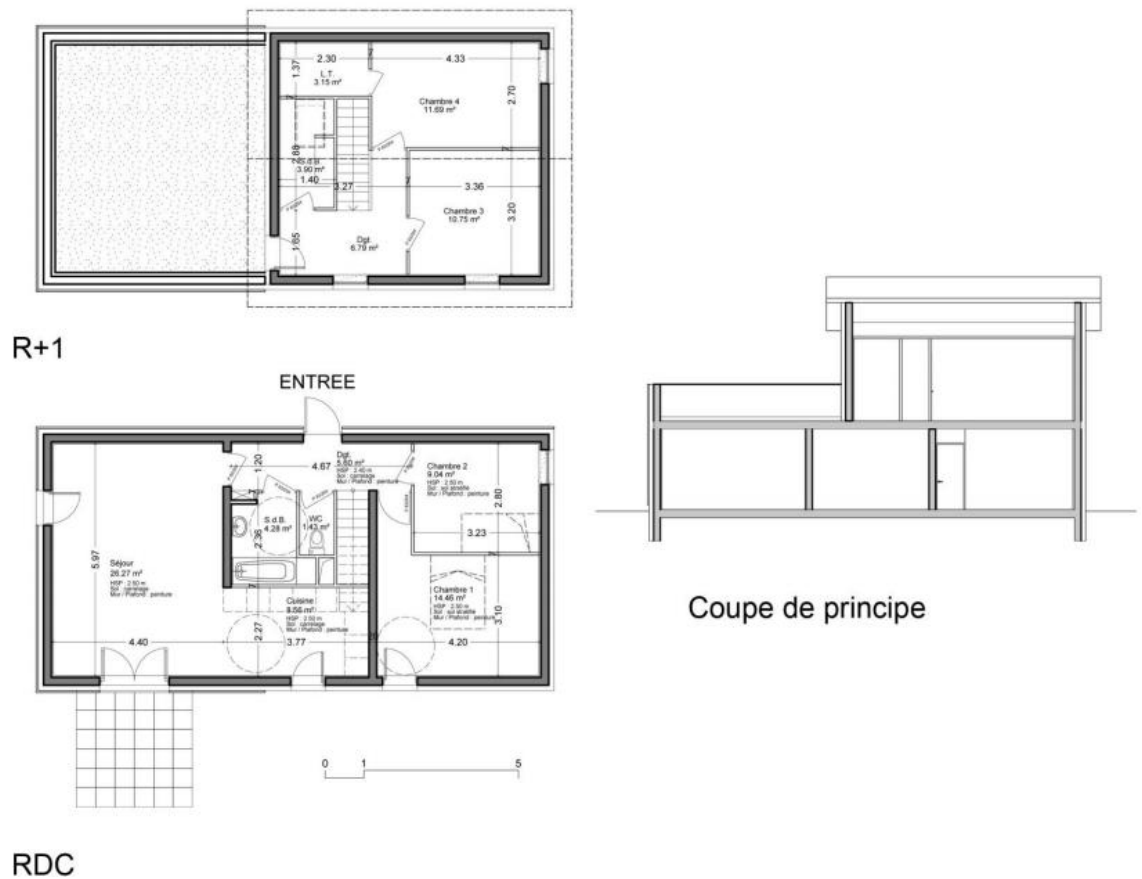


Figure 14- Plans et coupe du bâtiment d'étude

Cinq zones ont été définies : le séjour, la salle de bain et l'entrée au rez-de-chaussée, les chambres du rez-de-chaussée, la cage d'escalier et la salle de bain de l'étage, les chambres de l'étage. Ce découpage permet d'associer à chaque zone une température de consigne, un scénario d'occupation, une puissance dissipée et un scénario de ventilation.

Afin de rendre cette maison performante, les choix constructifs suivants ont été faits (couches de l'extérieur vers l'intérieur) :

MURS :	Panneau de cellulose	18 cm
	KLH	9,5 cm
	Fibre de chanvre	12 cm

Résistance thermique :  $R = 8,37$

PLANCHERS :	Fibre de bois	3cm
	Laine de chanvre	20 cm
	Terre cuite	16 cm

Résistance thermique :  $5,54$

CLOISONS INT :	Plâtre gypse	1 cm
	Laine de roche	8 cm

	Plâtre gypse	1 cm
--	--------------	------

*Résistance thermique :  $R = 1,99$*

TOITURES :	Fibre de bois	1,6 cm
	Cellulose	20 cm
	Fibre de bois	1,6 cm
	Laine de chanvre	20 cm
	Cellulose	9 cm

*Résistance thermique :  $R = 12,6$*

Les ponts thermiques ont été calculés à l'aide de la RT2005 ; ils ne sont cependant pas pris en compte par le logiciel Codyba. Les premières études de modélisation ont donc été faites sans ponts thermiques afin de pouvoir comparer les deux logiciels.

Pour les menuiseries, nous avons fait le choix d'une menuiserie standard avec les caractéristiques suivantes :

FSmoyen : 0,40  
 Coeff U moyen ( $U_w$ ) : 2,22 W/(m<sup>2</sup>.K)  
 % de vitrage : 66 %  
 FSvitrage : 0,61  
 Coeff U vitrage ( $U_g$ ) : 1,3 W/(m<sup>2</sup>.K)  
 Coeff U cadre ( $U_f$ ) : 4 W/(m<sup>2</sup>.K)

L'ouverture de la façade Sud correspond à environ 20 %.

*Température de consigne :*

La température de consigne de chauffage correspond à la température minimale acceptable dans le bâtiment : elle a été fixée à 19°C le jour et 15°C la nuit. Dans les chambres, elle est de 18°C toute la journée. La température de consigne de rafraîchissement correspond à la température maximale acceptable : elle a été fixée à 27°C.

*Scénario de ventilation :*

Nous avons supposé 0,1 vol/h d'infiltrations d'air.

Nous avons fait le choix d'une ventilation double flux avec un débit de 1 vol/h et un rendement de l'échangeur de chaleur de 92%. La modélisation donne donc un débit de 0,18 vol/h. Dans le séjour, en supposant que les utilisateurs ouvrent les fenêtres lorsqu'il fait trop chaud par exemple, le débit a été fixé à 0,3 vol/h.

En ce qui concerne les scénarios d'occupation, nous avons supposé que la maison était occupée par une famille de 4 personnes. Les repas du midi sont pris à l'extérieur le midi pendant la semaine. Les chambres sont occupées la nuit, le séjour aux heures de repas, en soirée et le week-end. Les salles de bain sont utilisées brièvement le matin et le soir.

Aucune puissance dissipée n'a été prévue dans les chambres et dans les salles de bain puisqu'il y a seulement l'éclairage qui reste très ponctuel. Pour le séjour, 100W sont dissipés en permanence, additionnés de 500W pendant les heures de repas.

Le bâtiment a été tout d'abord modélisé sur Pleiades, nous avons obtenu les résultats suivants :

Besoins en chauffage : 2069 kWh/an soit 18 kWh/m<sup>2</sup>/an  
 Besoins en climatisation : 1278 kWh/an soit 11 kWh/m<sup>2</sup>/an  
 T°max : 39,1°C

Voici la courbe présentant l'évolution de température au cours de l'année.

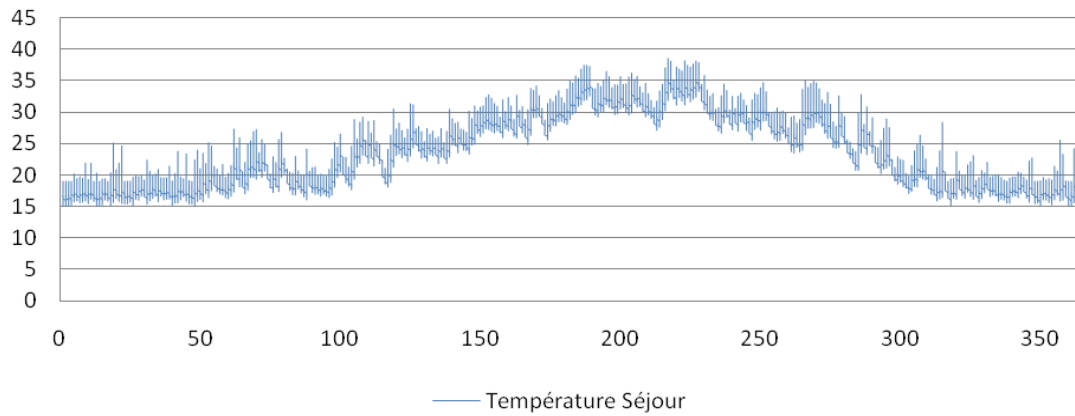


Figure 15 - Evolution de la température (°C) dans le séjour avec Pleiades

Nous avons ensuite modélisé le même bâtiment avec le logiciel Codyba. Cependant, ce logiciel ne permet pas de prendre en compte les ponts thermiques. Nous avons donc dû modéliser également le logiciel sous Pleiades sans ponts thermiques afin de pouvoir comparer les résultats obtenus.

	Simulations sans ponts thermiques	
	Codyba	Pleiades
Besoins chauffage	1268 kWh/an soit 11 kWh/m <sup>2</sup> /an	1558 kWh/an soit 14 kWh/m <sup>2</sup> /an
Besoins climatisation	1372 kWh/an soit 12 kWh/m <sup>2</sup> /an	1514 kWh/an soit 14 kWh/m <sup>2</sup> /an
T°max	38,5°C	40,6°C

Figure 16 - Résultats obtenus pour le bâtiment de référence

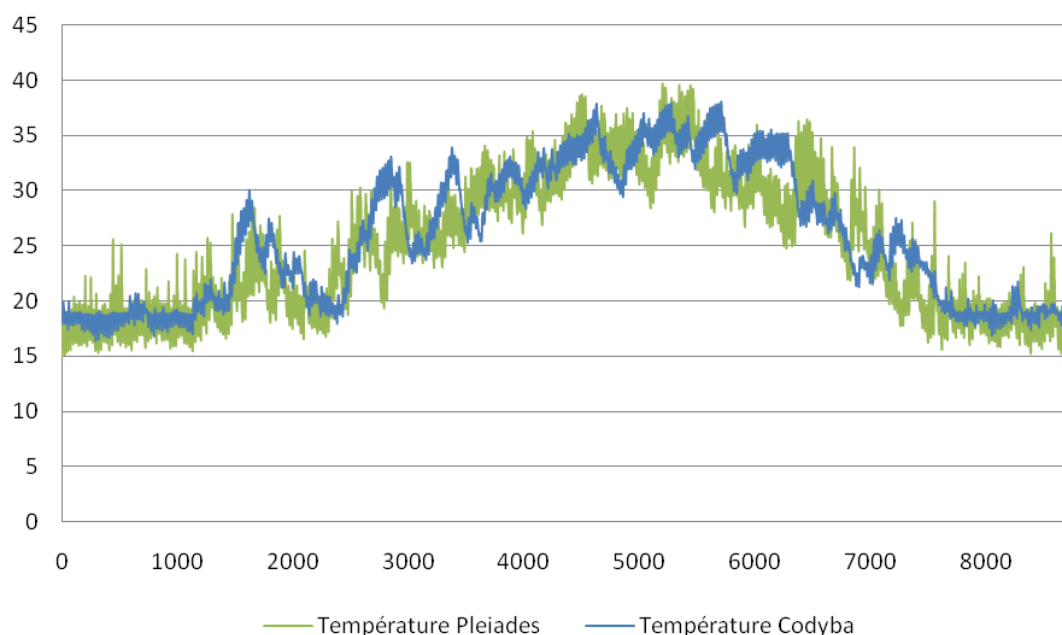


Figure 17 – Température(°C) dans le séjour du bâtiment de référence modélisé avec Pleiades et Codyba

L'évolution de la température à l'intérieur du séjour n'est pas tout à fait la même en fonction du logiciel utilisé. Ces différences seront analysées dans la partie 3. Notons simplement pour l'instant qu'il sera important par la suite de ne pas comparer directement les résultats obtenus pour chacun des logiciels, mais bien de comparer les résultats à ceux du bâtiment de référence pour chaque logiciel.

### 2.2.1 Définition des critères d'évaluation

Il est nécessaire de mettre en place différents critères afin de pouvoir évaluer de manière assez précise l'impact d'une solution sur le comportement thermique du bâtiment. Ces critères seront tous rapportés au bâtiment de référence pour chaque logiciel afin de pouvoir comparer directement les résultats obtenus.

Nous avons tout d'abord évalué les **besoins en froid couverts par le système** en pourcentage calculés à partir des besoins en climatisation en kWh du bâtiment de référence et ceux du bâtiment testé. Cela permet alors de comparer l'efficacité des systèmes.

Il faut veiller également à ce que le système de rafraîchissement passif ne dégrade pas les besoins en chauffage. Afin de prendre en compte l'influence du système de rafraîchissement sur les besoins en chauffage, il est nécessaire d'évaluer les besoins en chauffage supplémentaires qui peuvent être générés. L'**augmentation des besoins en chauffage** par rapport au bâtiment de référence en pourcentage sera donc un des critères mis en place.

Il s'agit également d'observer l'action des systèmes sur l'ambiance intérieure résultante. L'objectif de ce TFE n'étant pas l'optimisation d'un bâtiment mais l'analyse de l'action de systèmes de rafraîchissement passif, les critères ne sont pas vraiment orientés confort de l'utilisateur.

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique. Il dépend donc de la température de l'air qui entoure l'individu mais également des températures de surface des éléments environnants (rayonnement), de la vitesse de l'air et de l'humidité. Il dépend également d'aspects psychologiques, physiologiques et culturels dont nous ne parlerons pas ici. Les exigences de confort doivent donc être définies en prenant en compte tous ces paramètres.



La façon la plus simple d'appréhender le confort d'été consiste à considérer uniquement l'effet de la température ambiante et à évaluer le nombre d'heures durant lesquelles cette température dépasse une valeur donnée (souvent 26 ou 27°C). J'ai donc retenu cette évaluation du confort.

Des méthodes d'évaluation du confort plus complètes existent cependant, notamment avec la prise en compte de la température de parois, la notion de confort adaptatif (tolérance d'une température plus élevée à l'intérieur s'il fait plus chaud à l'extérieur), le PMV (Predicted Mean Vote) qui prend en compte la vitesse de l'air, le rayonnement, la température de l'air et le l'habillement, et la méthode de Givoni qui ajoute la prise en compte de l'humidité.

Nous avons cependant privilégié l'évaluation des performances des systèmes en termes d'abaissement de la température et d'atteinte d'une température de consigne. Comme les températures les plus élevées sont rencontrées dans le séjour, nous étudierons les évolutions de températures dans cette pièce afin de discuter de la performance des différents systèmes testés.

Un critère a alors été défini : l'**abaissement de température moyen** qui correspond à la moyenne des différences de température entre le bâtiment de référence et le bâtiment testé. Ce critère a été retenu car il est assez parlant et il est significatif des degrés perdus dans le bâtiment.

Ce critère ne prenant pas en compte la réponse du bâtiment vis-à-vis d'une température de consigne, nous avons mis en place un **indice de performance de rafraîchissement** qui se calcule à partir des températures moyennes journalières du bâtiment de référence et du bâtiment testé, et la température maximale tolérée à l'intérieur du bâtiment.

Cependant, ce critère ne suffit pas à montrer l'efficacité d'un système. Il est en effet nécessaire de le ramener à la différence souhaitée entre le bâtiment de référence et la température de consigne. Nous avons donc mis en place l'indice de performance de rafraîchissement qui correspond à la moyenne des rapports entre la différence de température réelle et celle souhaitée. Un système efficace possède alors un indice de rafraîchissement proche de 1. En effet, s'il est inférieur à 1, la différence de température réelle est trop inférieure à la différence de température souhaitée : le système n'est donc pas assez performant. Cependant, si le potentiel de rafraîchissement s'éloigne trop de 1, cela signifie que les différences de températures réelles sont supérieures aux différences de température souhaitées : le système serait alors surdimensionné ou mal adapté. Il pourrait en effet trop rafraîchir lorsque les besoins en frais sont peu importants et ne pas assez rafraîchir lorsqu'on observe des surchauffes dans le bâtiment. C'est l'inconvénient de faire une moyenne qui peut fausser le résultat.

Un autre critère a alors été mis en place, c'est le **taux de réponse aux besoins en rafraîchissement**, c'est-à-dire le pourcentage de temps où la température est inférieure à la température de consigne alors qu'un rafraîchissement était nécessaire. Cela permettra d'évaluer la pertinence du système et savoir s'il est adapté ou non. Cet indice est différent des besoins en froid couverts par le système car le système peut permettre de rafraîchir au niveau des heures les moins chaudes de la journée et avoir peu d'efficacité sur les heures chaudes. Par ailleurs, le système peut permettre de rafraîchir mais ne pas atteindre la température de consigne. Il peut donc couvrir une bonne partie des besoins mais pas forcément permettre de répondre totalement à la demande en froid. Une adéquation entre le taux de réponse aux besoins en rafraîchissement et les besoins en froid couverts par le système permet de conclure sur la pertinence du système.

Un autre indicateur serait nécessaire afin de compléter cette analyse : **la différence des températures maximales** entre celle du bâtiment de référence et celle obtenue grâce au système testé.

L'analyse des résultats obtenus vis-à-vis de ces critères complémentaires devrait donc permettre d'avoir une vision assez complète de l'effet d'un système sur le comportement thermique du bâtiment.

### 3 EVALUATION DE LA CAPACITE DES LOGICIELS EN TERMES DE MODELISATION DU RAFRAICHISSEMENT PASSIF

Le but de cette partie est de conclure quant aux caractéristiques et capacités des deux logiciels au niveau de la modélisation du rafraîchissement passif. Chacun des systèmes a été modélisé si c'était possible avec chaque logiciel. L'objectif de cette partie est de choisir un logiciel pour la suite des modélisations.

#### 3.1 Capacités de modélisation des logiciels

##### 3.1.1 Différences fondamentales dans le fonctionnement des logiciels

L'architecture des deux logiciels utilisés dans cette étude semble assez proche. La modélisation d'un bâtiment consiste en effet dans les deux cas à créer des pièces ou volumes, auxquels sont associés des parois et des scénarios d'occupation, de ventilation et de chauffage.

Des différences sont tout de même à noter. En effet, si plusieurs éléments ont la même composition (parois, menuiseries,...), il est possible de la définir une fois et de l'appliquer à plusieurs éléments avec Pleiades. Cette opération n'est cependant pas possible avec Codyba ce qui augmente significativement le temps nécessaire à la modélisation d'un bâtiment.

Un des autres inconvénients de Codyba est la possibilité de créer uniquement des scénarios hebdomadaires, et difficilement des scénarios annuels. Cela empêche donc de mettre en place différents débits de ventilation en fonction des saisons, de manière simple. Il faut modéliser chacun des cas et réaliser un recoupement sous Excel.

L'exploitation des résultats se fait en effet généralement sous Excel, surtout avec Codyba car très peu d'éléments sont donnés directement par le logiciel.

L'interface utilisateur est plus travaillée sous Pleiades+Comfie, ce qui semble normal puisqu'elle a été développée par une entreprise. Cela apporte du confort dans l'utilisation du logiciel.

##### 3.1.2 Modélisation des différents systèmes

Je vais ici décrire les choix de modélisation qui ont été faits pour chaque système afin de pouvoir tester la performance de chacun d'eux. Il n'était pas toujours simple de faire ces choix de dimensionnement des systèmes. En effet, cette étape ne consistait pas à optimiser les systèmes, il fallait donc trouver une modélisation assez représentative avec des paramètres moyens.

###### 3.1.2.1 *Minimiser les apports de chaleur*

###### *Brise-soleil*

Le brise-soleil est un dispositif dont le rôle essentiel est d'éviter que tout ou partie du rayonnement solaire, notamment le direct, ne pénètre à travers une ouverture.

Le choix a été fait de disposer des brise-soleils sur les ouvertures de la paroi Sud. Il est vraiment nécessaire dans une maison passive de limiter les apports solaires, dès le lever du soleil jusqu'à son coucher. Il faut cependant veiller à ne pas limiter les apports solaires d'hiver et ne pas gêner le confort visuel.

A l'aide de l'ouvrage *Concevoir des bâtiments bioclimatiques* des Editions du Moniteur, j'ai pu dimensionner un brise-soleil qui laisse entrer le soleil en hiver mais qui le limite pendant l'été. J'ai pour cela utilisé le diagramme solaire de Mâcon et regardé quand je souhaitais ombrer totalement

les ouvertures. On trouve alors une hauteur angulaire qui correspond à l'inclinaison des rayons du soleil. On peut alors par de la trigonométrie trouver la longueur du brise-soleil en fonction de la hauteur du vitrage. Le diagramme indicateur d'occultation de l'ouvrage d'E.Mazria permet de trouver le pourcentage d'ombre en fonction des saisons.

Le choix des brise-soleil a donc été de mettre une protection horizontale de 1,50 mètre au-dessus des portes vitrées et de 70 cm au-dessus des fenêtres. Cependant, si la même proportion entre la hauteur de vitrage et la longueur de brise-soleil est conservée, on peut imaginer pour des questions d'encombrement et esthétiques de diviser ce brise-soleil en différents éléments parallèles horizontaux, en considérant que c'est équivalent à plusieurs fenêtres avec brise-soleil superposées. Le fonctionnement étant équivalent, aucune autre simulation n'a été réalisée pour ce système.

Cette modélisation s'est avérée assez simple pour chacun des logiciels avec une possibilité d'ajouter un masque pour une ouverture, prédéfini dans Pleiades, pour chacune des fenêtres dans Codyba.

### *Stores extérieurs*

Nous avons ici considéré des stores extérieurs. Des stores intérieurs ne sont en effet pas adaptés à la recherche de confort d'été comme nous avons pu le remarquer précédemment.

On suppose une occultation la nuit (de 22h à 6h) et en été, on suppose une occultation de 80% avec des volets roulants en alu le jour qui amène une résistance thermique supplémentaire de 1,0 m<sup>2</sup>.K/W.

Un scénario d'occultation est mis en place sous Pleiades avec un type de store, appliqué ensuite aux ouvertures concernées. Le même principe de mise en place de stores sous Codyba existe.

### *Vitrages plus performants*

Nous avons testé des vitrages avec un facteur solaire plus faible. Pour rappel, le facteur solaire correspond à la proportion d'énergie solaire reçue à l'extérieur qui passe à l'intérieur. Nous avons donc testé le comportement du bâtiment avec des menuiseries plus performantes afin de voir si cet élément est important dans le confort d'été. Nous avons mis en place des menuiseries qui ont les caractéristiques suivantes :

FSmoyen : 0,23

Coeff U moyen (Uw) : 0,86 W/(m<sup>2</sup>.K)

% de vitrage : 70 %

FSvitrage : 0,32

Coeff U vitrage (Ug) : 0,60 W/(m<sup>2</sup>.K)

Coeff U cadre (Uf) : 1,50 W/(m<sup>2</sup>.K)

Le changement du type de vitrage s'est fait assez facilement sous Pleiades car une fois le nouveau vitrage défini, il pouvait être facilement appliqué aux ouvertures concernées. Cependant, sous Codyba, l'opération doit être renouvelée pour chaque fenêtre. De plus, le facteur solaire ne fait pas partie des variables d'entrée, il faut jouer avec l'absorbance et la transmission des vitrages utilisés.

### *Diminution de l'isolation*

L'isolation est à la base du concept de maison passive puisqu'on veut garder toute la chaleur captée à l'intérieur et ne pas avoir recours à un système de chauffage. Cependant, dans notre cas d'étude, l'isolation est très importante, peut-être même trop vis-à-vis du confort d'été. C'est pourquoi nous avons testé le comportement d'un bâtiment moins isolé. Les parois verticales sont alors constituées de 9,5 cm de KLH et de 12 cm de cellulose, ce qui donne un R de 3,79 (au lieu de 8,37). Pour les toitures, on a supprimé les couches de chanvre et de cellulose, ce qui donne un R de

5,22 au lieu de 12,6. Ces modifications se sont faites assez simplement sur les deux logiciels puisqu'il s'agissait simplement de modifier la composition des parois.

#### *Façade double peau - Serre*

La création d'un espace tampon entre l'extérieur et la façade Sud du bâtiment est une stratégie qui peut être intéressante. J'ai donc créé une pièce supplémentaire de un mètre de large constituant cet espace tampon. Cette largeur de pièce permet de voir l'effet de cet espace qui est à la limite entre façade double peau et serre.

La mise en place de cet espace tampon n'a pu être réalisée que sur Pleiades, l'architecture du logiciel Codyba ne le permettant pas. Ce fut par ailleurs assez compliqué sur Pleiades puisque le logiciel ne prend pas en compte le passage du rayonnement solaire à travers deux vitrages successifs. Il faut donc jouer sur les facteurs solaires et les résistances thermiques des vitrages mis en place pour obtenir une simulation correcte. Un tutoriel est mis en place sur le site d'Izuba Energie, concepteur de l'interface Pleiades.

Le schéma ci-dessous présente en rouge les facteurs solaires fictifs à appliquer au deuxième vitrage (l'extérieur se situe à gauche et l'intérieur à droite).

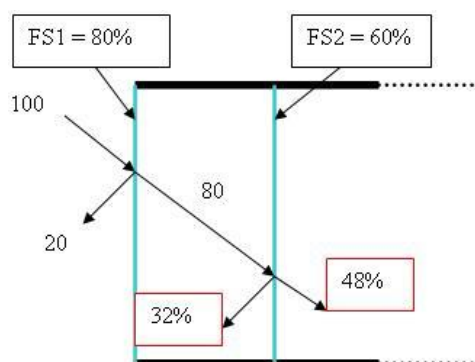


Figure 18 - Extrait du tutoriel d'Izuba Energie pour la simulation d'une façade double peau

La simulation de cette façade double peau est un exemple des faiblesses du logiciel dont le concepteur est conscient mais ce dernier ne peut développer le logiciel sans travail de thèse ou de subventions d'entreprises privées. Une assistance par téléphone est cependant assez efficace pour aider les utilisateurs et j'ai pu en bénéficier.

#### *3.1.2.2 Apporter de la masse thermique*

##### *Masses inertielles peau*

Un des systèmes testés est l'ajout d'inertie aux parois du bâtiment. Elle permet normalement de déphaser les apports de chaleur à l'intérieur du bâtiment. Il faut cependant veiller à ce que la résistance thermique reste identique. Nous avons donc mis en place une nouvelle paroi verticale composée de 20 cm de cellulose, 12 cm de liège et 30 cm de béton lourd. Nous obtenons un R de 8,17 et la masse surfacique de la paroi passe de 54 à 724 kg/m<sup>2</sup>. De même, nous avons ajouté de l'inertie aux toits sans modifier leur résistance thermique en ajoutant une dalle de 20 cm de béton. Nous obtenons alors une masse surfacique de 494 kg/m<sup>2</sup> au lieu de 47. Une modification de la composition de la façade permet d'intégrer le système.

##### *Masses inertielles intérieures*

Nous avons également testé d'apporter de l'inertie à l'intérieur, en conservant des parois extérieures peu inertes. Nous avons alors mis en place des cloisons intérieures lourdes au niveau

des séparations principales des espaces composées de 15 cm de béton et de BA13 de part et d'autre. Nous obtenons alors une masse surfacique de 367 kg/m<sup>2</sup>. La résistance thermique s'est vue diminuer mais cela a moins d'importance à l'intérieur de la maison. Une modification de la composition des cloisons intérieures permet d'intégrer ce système.

#### *Matériaux à changement de phase*

Nous avons testé le matériau Energain qui est modélisé dans Pleiades et Codyba. Sa température de fusion est 21,7°C et celle de solidification est 18°C. Il est donc tout à fait applicable dans une situation de recherche de confort dans un bâtiment. Afin d'observer une réelle action de la part de ce matériau, je l'ai appliqué en épaisseur d'un centimètre (deux plaques) sur toutes les parois verticales et au niveau du toit. Il a suffi de l'ajouter à la composition des parois du côté intérieur.

#### *3.1.2.3 Ventiler*

Différentes stratégies de ventilation ont été testées pour assurer un rafraîchissement passif du bâtiment. Il s'agit alors de modifier les scénarios de ventilation mis en place dans le bâtiment de référence. Nous avons choisi de modéliser une surventilation nocturne, de la ventilation naturelle qui pourrait correspondre à une ouverture des fenêtres, et un puits canadien.

La modélisation du tirage thermique n'a pas été testée, même si elle désormais possible sur Pleiades grâce à l'intégration d'un nouveau module. Cette action de tirage thermique revenait en fait simplement à ajouter un débit d'air, ce n'était donc pas très intéressant. Par ailleurs, le bâtiment étudié ne pouvait être le siège d'une telle action. Il n'aurait donc pas été très cohérent de le tester seul.

#### *Surventilation nocturne*

Une surventilation nocturne a été mise en place en été. Elle a été fixée à 3 vol/h, qui viennent donc se rajouter au 1,1 vol/h de la ventilation hygiénique (ventilation double flux supposée bypassée).

#### *Ventilation naturelle*

Nous avons simplement augmenté le débit de ventilation afin de simuler la ventilation naturelle. Il est augmenté de 1 vol/h en conservant la ventilation double flux. Nous obtenons donc un débit de 1,3 vol/h dans le séjour et 1,18 vol/h dans les autres pièces.

#### *Puits canadien*

Nous avons pu modéliser un puits canadien dans Pleiades grâce au module spécial. Les caractéristiques de ce puits canadien sont standards et l'optimisation, comme dans les autres systèmes, n'a pas été recherchée.

Le puits canadien n'a pu être modélisé uniquement sur Pleiades. Un module spécial a été intégré suite à un travail de thèse. Son utilisation n'est cependant pas très aisée puisqu'elle nécessite la création d'une pièce fictive dans laquelle l'air issu du puits canadien est insufflé. Les différentes pièces du bâtiment sont ensuite liées à cette pièce fictive par un débit d'air. L'air du puits canadien ne peut être insufflé directement dans le bâtiment.

#### *3.1.2.4 Humidifier*

## Eau

L'eau peut être utilisée au même titre que le béton pour apporter de l'inertie dans les murs par exemple. Ces caractéristiques thermiques ne sont cependant pas vraiment plus intéressantes qu'un autre matériau inerte. Ce sont ses propriétés de changement d'état qui sont intéressantes ; elles ne sont cependant pas prises en compte sur les deux logiciels. Par ailleurs, il n'est pas possible de voir l'effet d'un bassin puisque la fraîcheur pouvant être apportée par l'eau n'est pas modélisable.

Le logiciel Pleiades ne prend pas en compte l'humidité. J'ai essayé de modéliser ces phénomènes à l'aide du module des matériaux à changement de phase. Cependant, ce sont des phénomènes de micro-climat qui dépendent de nombreux paramètres et qui ne sont pas aussi facilement modélisables.

Cependant, en ce qui concerne CoDyBa, l'humidité est prise en compte, notamment au niveau de régulateurs d'humidité. J'ai donc testé de modifier l'humidité dans le bâtiment en fixant le taux d'humidité à des valeurs de consigne. Voici les courbes que j'ai observées :

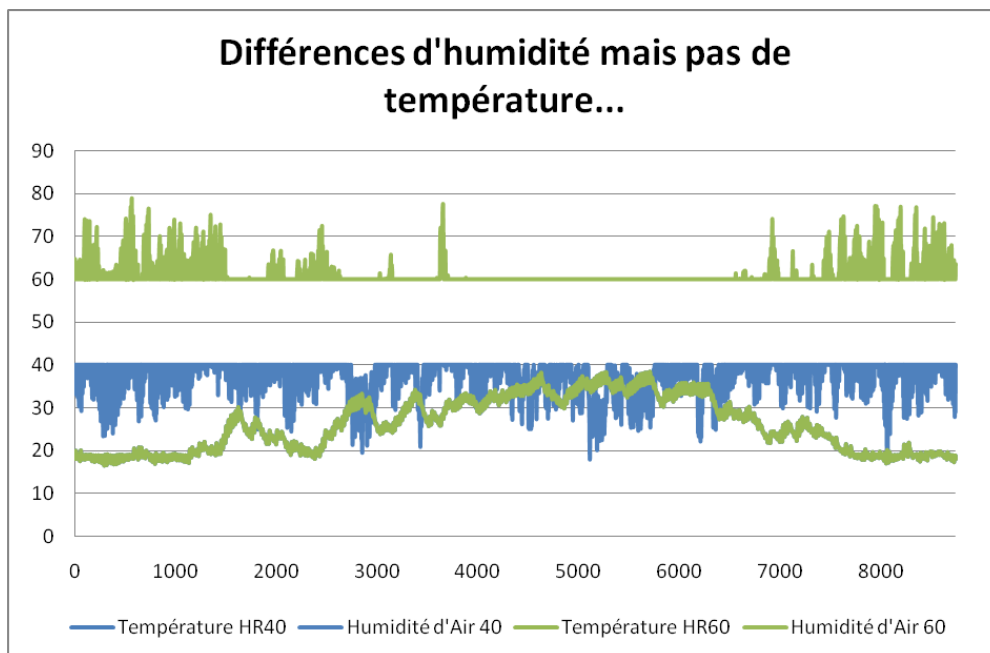


Figure 19 - Courbes d'humidité et de température selon deux modélisations sous Codyba

Les courbes de température sont superposées alors que celles d'humidité sont clairement différentes. Il n'existe donc pas d'interférence entre humidité et température dans le logiciel Codyba.

## Végétation

Sur Pleiades, il est possible de modéliser directement de la végétation autour du bâtiment. Il correspond alors à un filtre de rayonnement solaire qui varie en fonction des saisons (feuilles caduques). Codyba permet bien moins facilement cette simulation. En effet, il n'est pas possible de faire varier les ombres lointaines en fonction de la saison. De plus, l'arrêt des rayons solaires incidents est forcément total, un pourcentage n'est pas possible à mettre en place comme dans Pleiades. Ce module est adapté par exemple à des bâtiments mais pas à des arbres à feuilles caduques dont le feuillage évolue au fil des saisons.

Cependant, aucun des logiciels ne permet de prendre en compte l'évapotranspiration et donc la fraîcheur qui pourrait être apportée par ce phénomène. Ce système n'est donc pas modélisé dans sa globalité.

Par ailleurs, les toitures végétalisées pourraient être modélisées en intégrant le matériau terre à la composition des toitures. Cependant, l'action des végétaux et le stockage d'eau dans la terre ne sont pas pris en compte. Il n'est donc pas possible d'obtenir des résultats concluant sur ce système car des actions sont manquantes. Les logiciels ne considèrent alors qu'une nouvelle composition de toiture, plus ou moins isolée, plus ou moins inerte.

#### *Terre crue*

L'action complète de ce système n'est évidemment pas modélisable. Le côté inertie est pris en compte, mais pas celui d'échanges de chaleur grâce à l'eau présente dans le matériau. La terre crue est équivalente à peu de choses près à une épaisseur de béton vis-à-vis des logiciels.

### 3.1.3 Conclusion sur les capacités de modélisation des logiciels

Nous pouvons donc conclure sur les capacités des logiciels en termes de modélisation des systèmes de rafraîchissement passif. Ce tableau permet de donner le niveau de difficulté de modélisation de chacun.

	Pleiades + Comfie			Codyba		
	Modélisable		Non modélisable	Modélisable		Non modélisable
	Facilement	Difficilement		Facilement	Difficilement	
Protections solaires	X			X		
Diminution des apports internes	X			X		
Isolation	X			X		
Vitrages	X				X	
Façade double peau		X				X
Inertie	X			X		
MCP	X			X		
Ventilation	X			X		
Puits canadien	X					X
Eau			X			X
Végétation			X			X
Terre crue			X			X

Figure 20 - Capacités de modélisation des systèmes de rafraîchissement passif pour chacun des logiciels

Le logiciel Pleiades+Comfie permet d'une part de modéliser davantage de systèmes, mais également de manière générale de modéliser plus facilement que Codyba les systèmes modélisables.

## 3.2 Analyse des différences de résultats observées selon le logiciel utilisé

Ce travail de modélisation a donc permis de connaître quels systèmes de rafraîchissement passif sont modélisables par chacun des logiciels. Pour avoir une vision plus complète des capacités des logiciels, il est nécessaire d'analyser les résultats des modélisations afin de mieux comprendre comment chaque logiciel fonctionne et comment il prend en compte l'intégration d'un système.

### 3.2.1 Différences fondamentales

De plus, lors de la présentation du bâtiment de référence, nous avons pu noter des différences de base au niveau des résultats. En effet, bien que le bâtiment modélisé ainsi que les hypothèses formulées soient exactement les mêmes, le comportement de référence est différent selon logiciel, comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous.

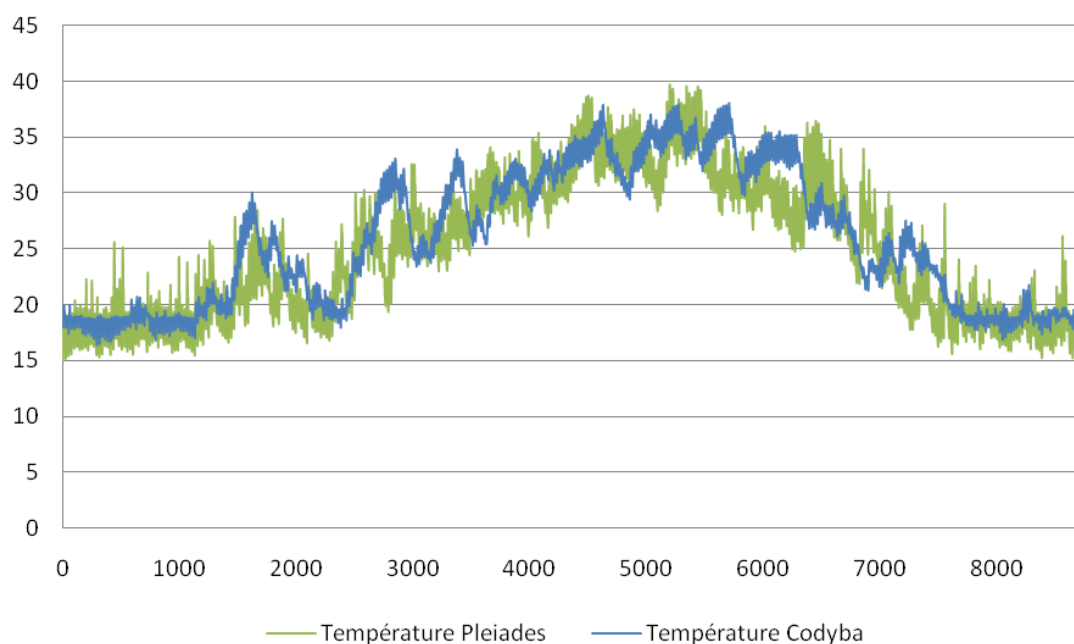


Figure 21 - Températures de référence avec Pleiades et Codyba

Nous pouvons remarquer avec Codyba un amortissement de l'amplitude de températures plus important qu'avec Pleiades ; la courbe est en effet davantage lissée. Par ailleurs, à l'échelle mensuelle, aucune coïncidence entre les pics de températures de chacun des logiciels n'est observée. Cependant, Codyba semble davantage sensible à des pics de température extérieure.

Afin d'expliquer ces différences des comportements de référence, il peut être intéressant de comparer avec les températures extérieures de chacun des logiciels.

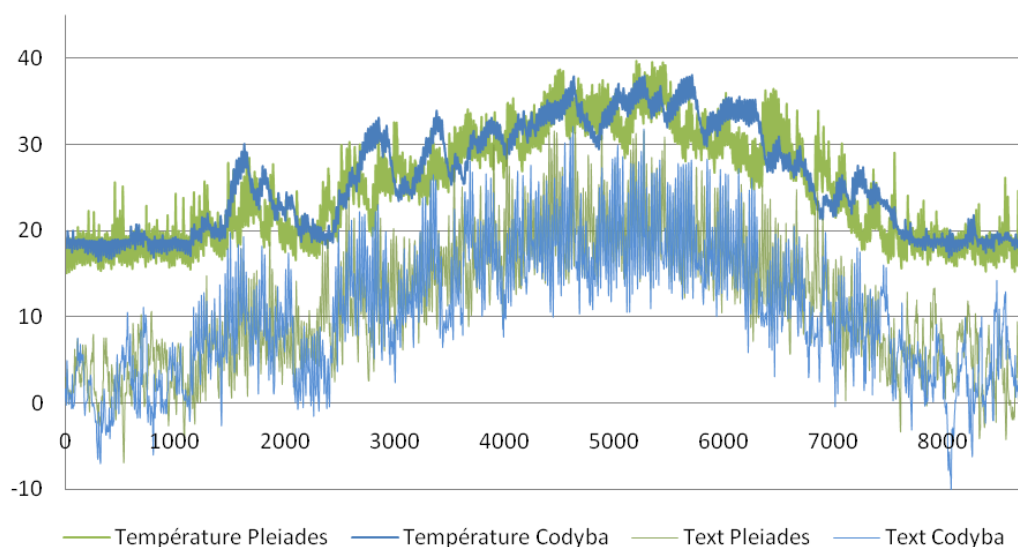


Figure 22 - Températures intérieures et extérieures (°C) avec Pleiades et Codyba

Malgré ce qu'on aurait pu imaginer, les données extérieures de température sont différentes en fonction des logiciels ; il était donc peu probable d'observer les mêmes températures intérieures. Il s'agit donc d'un premier élément de réponse. Il n'était par ailleurs pas possible de tester avec le même fichier météo car en fonction du logiciel utilisé, le format n'était pas le même et difficilement modifiable.



En outre, ce graphique confirme bien l'amortissement de température sous Codyba, mais également une certaine sensibilité à des variations de températures qui se traduisent par des pics notables. Même si les pics à l'intérieur correspondent à des tendances extérieures, ils sont très accentués à l'intérieur.

Une analyse plus fine peut-être réalisée en étudiant l'évolution des températures à une échelle hebdomadaire.

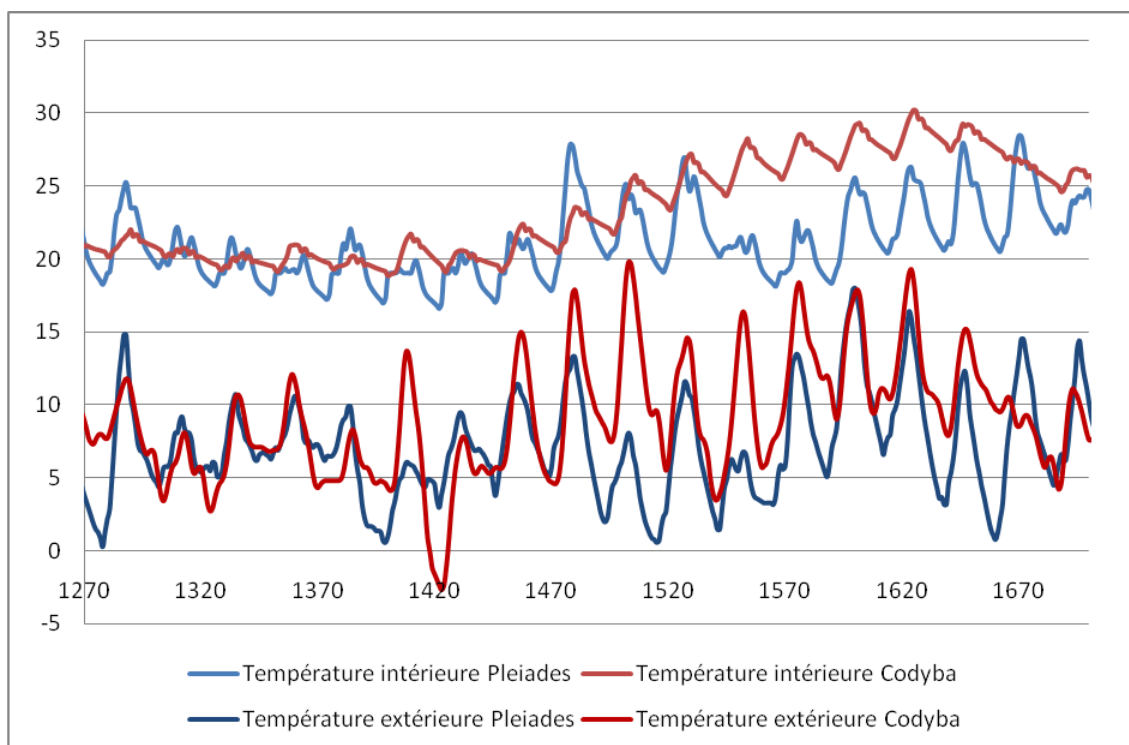


Figure 23 - Températures intérieures et extérieures avec Pleiades et Codyba

Ce zoom valide bien l'amortissement vraiment important sur le logiciel Codyba. Par ailleurs, l'augmentation globale de température que l'on peut observer sur le graphe a été causée par trois pics de chaleur seulement. L'effet observé est proche de l'effet de l'inertie, même si aucun déphasage n'est notable. On peut donc supposer que Codyba est plus sensible à la présence d'inertie dans un bâtiment.

En ce qui concerne Pleiades, l'amortissement est également présent même s'il est moins important. Aucun déphasage n'est notable. Les variations de températures extérieures se retrouvent directement sur la courbe de température intérieure.

Nous pouvons donc conclure que Pleiades suit d'assez près les variations de températures extérieures, avec un léger amortissement. Codyba montre un amortissement plus important des variations de températures extérieures.

Il est également intéressant de comparer l'évolution des besoins en climatisation donnée par chacun des logiciels.

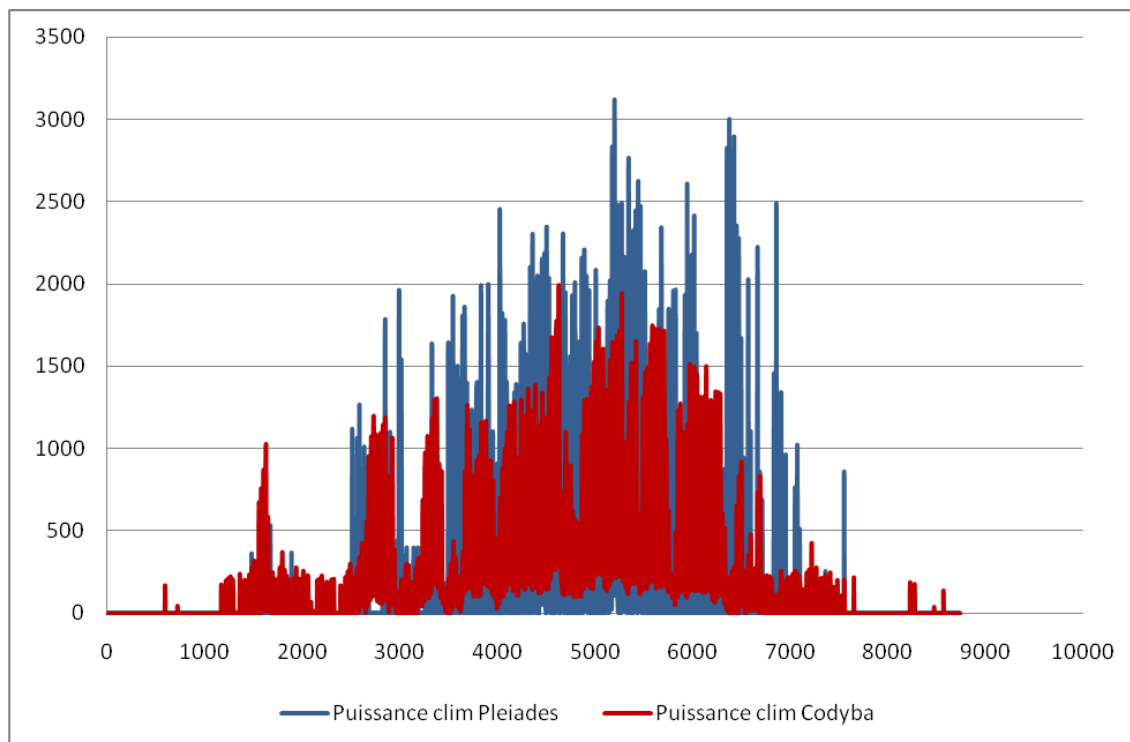


Figure 24 - Puissances nécessaires en climatisation avec Pleiades et Codyba (kW/h)

Comme les températures extérieures sont moins amorties avec Pleiades, il paraît logique que les besoins en climatisation soient plus importants. De même, la climatisation s'arrête et redémarre puisque la température diminue la nuit. Cependant, avec Codyba, la chaleur est également présente la nuit. Elle ne s'arrête donc pas pendant l'été.

Pleiades apparaît donc comme le cas le plus défavorable au niveau des besoins en climatisation.

### 3.2.2 Différences dans l'action des solutions

Il est par ailleurs intéressant de comparer la réponse du bâtiment à la mise en place d'un système selon le logiciel utilisé. Comme les bâtiments de référence ont des comportements différents, il est nécessaire pour comparer l'influence des systèmes de se rapporter à des valeurs neutres, ce que sont les critères mis en place précédemment.

J'ai choisi de vous présenter ici les résultats des modélisations en comparant à chaque fois la valeur du critère pour chaque logiciel.

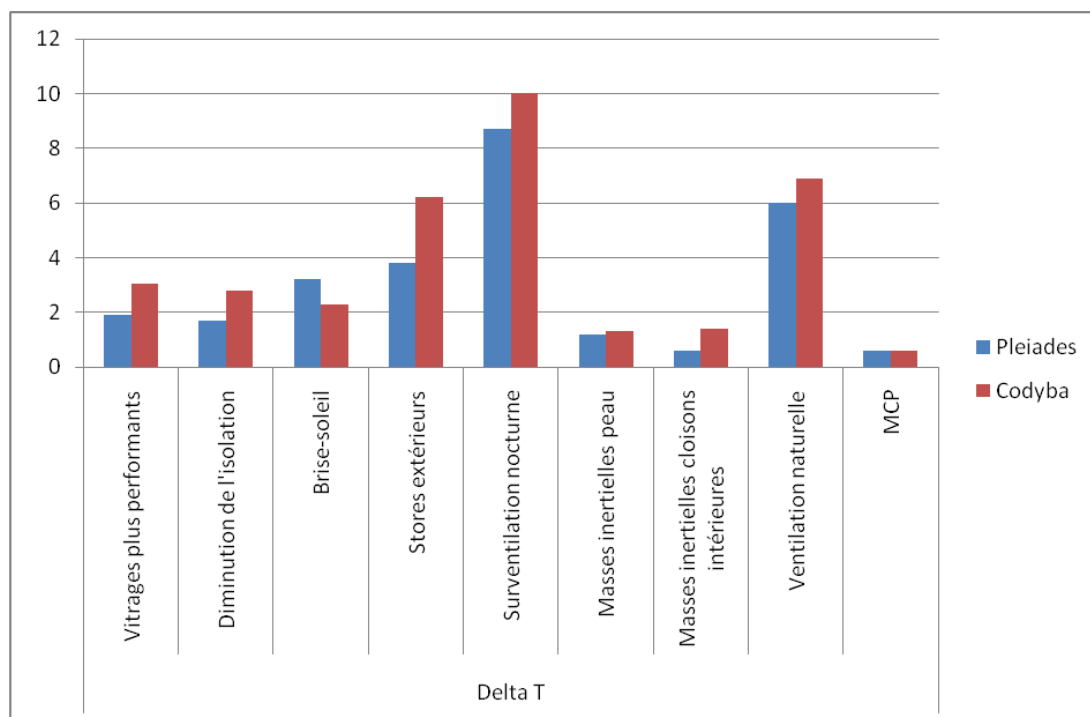


Figure 25 - Abaissement moyen de température avec Pleiades et Codyba (°C)

Voici l'abaissement moyen de température lorsqu'on est en surchauffe, observé pour chaque système et pour chaque logiciel. On observe que le logiciel Codyba donne des abaissements de température moyen toujours supérieurs à Pleiades, sauf pour les brise-soleil. Les systèmes semblent donc globalement plus efficaces avec Codyba qu'avec Pleiades. Pleiades est donc encore une fois le logiciel présentant des cas les plus défavorables.

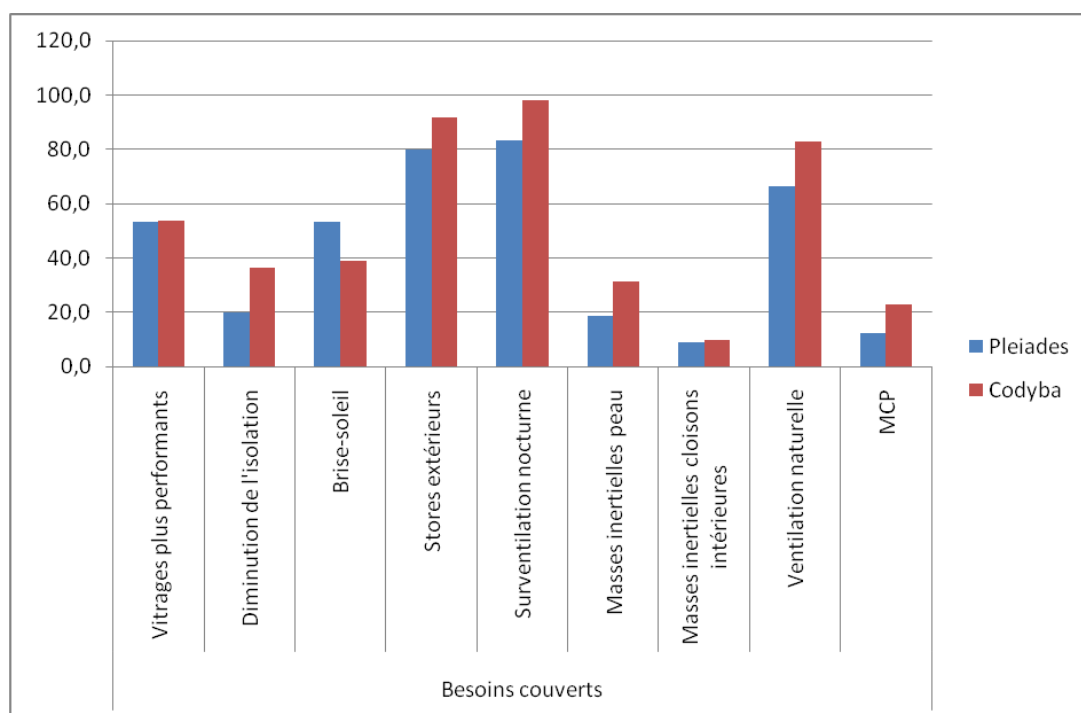


Figure 26 - Couverture des besoins par les systèmes avec Pleiades et Codyba (°C)

De même sur les besoins couverts par le système, Pleiades est le cas le plus défavorable.

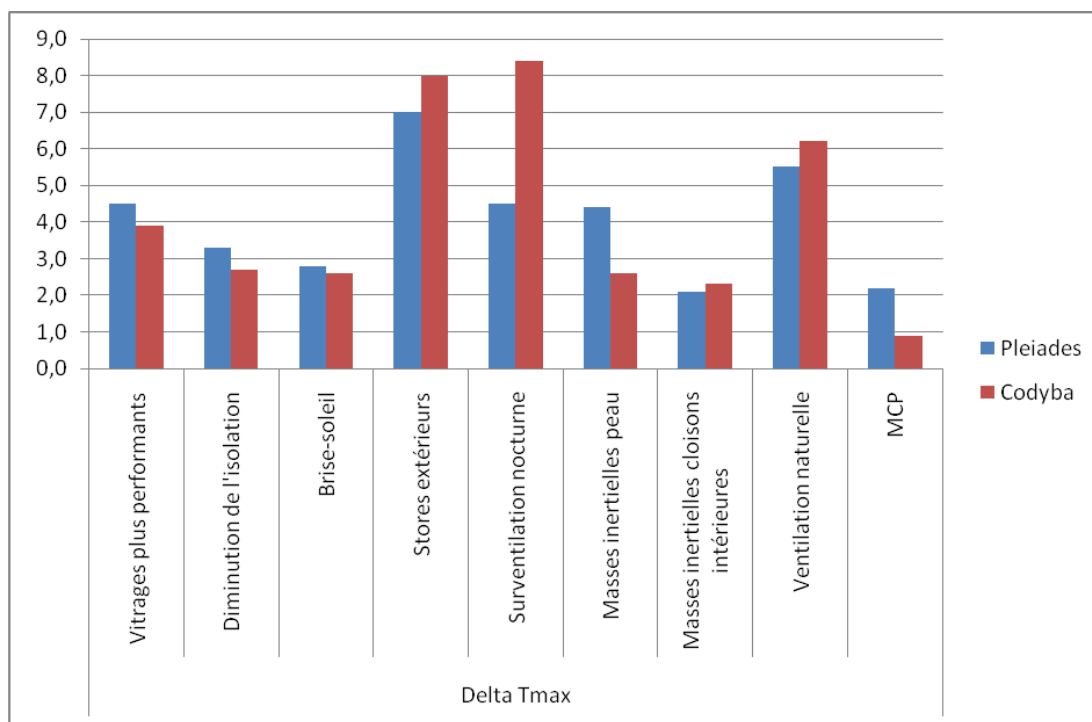


Figure 27 - Abaissement de températures maximales avec Pleiades et Codyba (°C)

En ce qui concerne la différence de températures maximales, les tendances sont différentes. Elle est plus grande sur Pleiades pour cinq systèmes, et plus grande pour Codyba pour les quatre autres.

Il faut penser à mettre en perspective ces observations avec le fait que Codyba amortit davantage les variations de température extérieures. La température maximale de référence est donc moins élevée sur Codyba. Seulement, il en sera de même pour la solution. Cela devrait donc être peu influent.

### 3.3 Choix du logiciel utilisé pour la suite de l'étude

Les différences observées sont donc assez importantes et l'idéal serait de pouvoir comparer avec la réalité afin de connaître quel logiciel permet la modélisation la plus réelle. Ce n'était cependant pas le but de ce TFE, ni à ma portée. Le choix est donc de prendre le logiciel qui présente des cas les plus défavorables afin de ne pas sur-estimer la réalité. Je ne pourrais pas expliquer ces différences de résultats, elles proviennent certainement de différences d'équations concernant la modélisation thermique des échanges de chaleur et d'impact sur les ambiances intérieures. L'objet de ce TFE était de constater ces différences et de pouvoir mettre en garde les utilisateurs des logiciels.

Quant aux différences de résultats observées, elles peuvent être liées à de nombreuses raisons, une étude plus détaillée serait nécessaire pour expliquer les écarts qui peuvent être liés soit à la différence sur l'écriture des modèles ou l'entrée des données, mais les résultats nous montrent surtout la prudence qu'il convient d'observer dans l'interprétation de résultats de simulation.

L'analyse de ces différences permet alors de choisir un logiciel pour la suite de l'étude. Pour des raisons de capacités, mais également de simplicité d'utilisation, seul le logiciel Pleiades+Comfie sera utilisé dans les parties suivantes. Il était en effet important de pouvoir modéliser rapidement des solutions qui se complexifiaient, notamment les couplages, mais également de pouvoir optimiser

plus facilement les maisons évolutives. Il s'agit également du cas de référence le plus défavorable. Par ailleurs, ce logiciel permet de modéliser davantage de systèmes que Codyba.

Nous devons cependant nous assurer que les résultats relatifs avec l'un et l'autre des logiciels sont assez semblables afin d'assurer la cohérence de la suite de l'étude. J'ai tracé les courbes avec les valeurs de critères d'un des logiciels en abscisse et de l'autre en ordonnée. Cela permet alors de voir la correspondance entre les résultats.

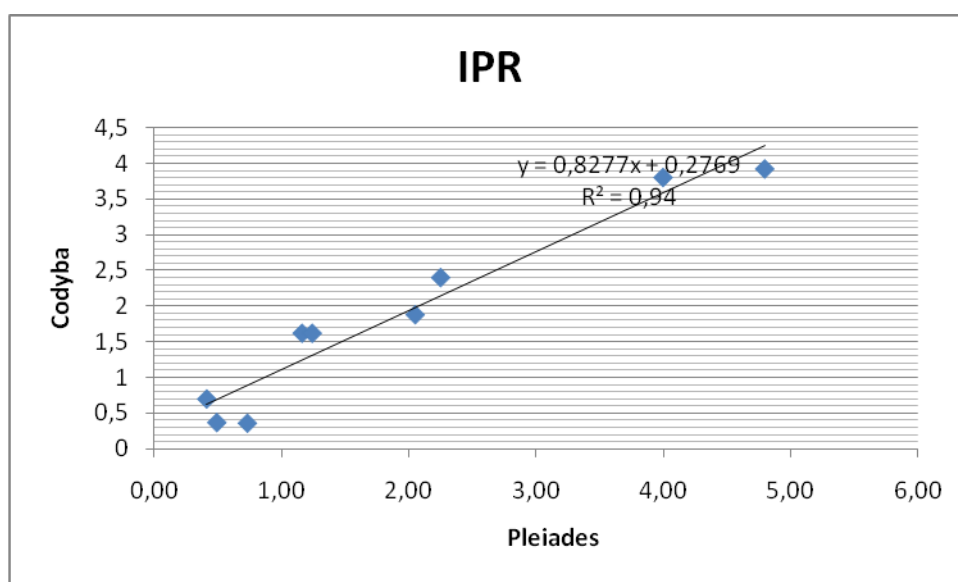


Figure 28 - Indice de performance sur Codyba en fonction de l'indice de performance sur Pleiades

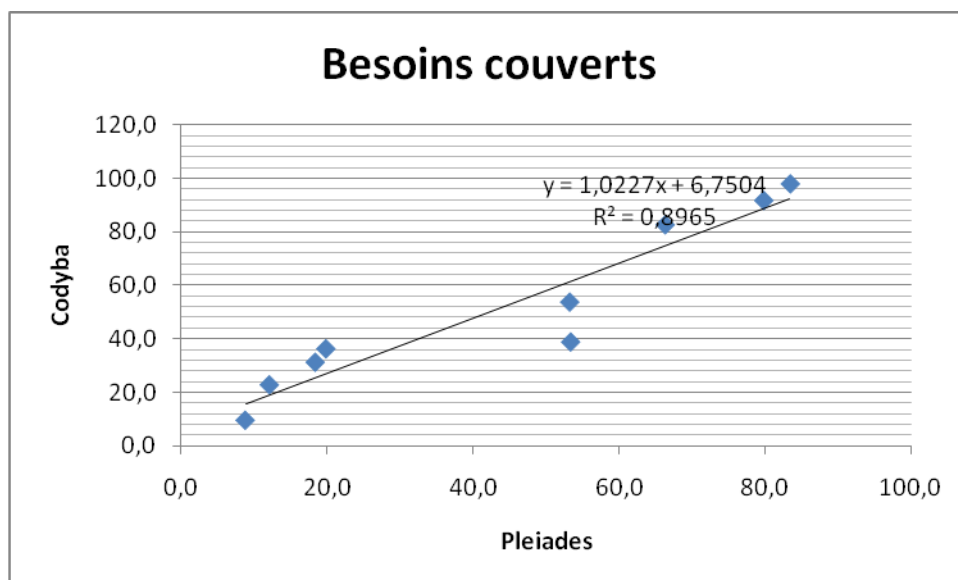


Figure 29 - Besoins couverts sur Codyba en fonction des besoins couverts sur Pleiades

Nous pouvons observer sur ces deux graphiques extraits une corrélation plutôt correcte entre les résultats des deux logiciels. Nous pouvons donc analyser les résultats de l'un sans s'éloigner trop des résultats de l'autre.

Cela permet donc d'assurer la cohérence de la suite de l'étude, même si seuls seront analysés les résultats issus du logiciel Pleiades+Comfie.

## 4 ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DU BÂTIMENT SELON LES SYSTEMES MIS EN ŒUVRE

Après avoir mis en avant les différences de fonctionnement des deux logiciels, nous allons nous atteler à l'étude de l'action des systèmes sur le fonctionnement thermique global du bâtiment.

Rappelons que nous observons ici des tendances. Le choix du bâtiment de référence est en effet déterminant dans l'obtention des résultats. Par ailleurs, les systèmes n'ont pas été optimisés.

Il s'agit réellement d'observer les actions des systèmes, et de les comparer. Nous analyserons dans un premier temps les résultats issus d'une première série de modélisations où chaque système a été modélisé de façon indépendante. Les critères d'évaluation mis en place seront ensuite analysés afin d'adopter un point de vue critique sur les résultats obtenus. Une série de modélisations de couplages de solutions sera ensuite présentée ; elle permettra de compléter l'analyse des premiers résultats. Il sera alors possible de conclure sur les actions des systèmes sur le comportement thermique du bâtiment.

### 4.1 Analyse de l'action des différents systèmes sur le fonctionnement thermique global du bâtiment

Après avoir effectué les modélisations de chaque système, nous allons observer de façon plus approfondie les résultats observés. Nous n'étudierons que les résultats issus du logiciel Pleiades+Comfie comme il l'a été justifié et expliqué dans la partie précédente. Je vous présenterai dans un premier temps les courbes de température observées pour chaque système, puis dans un second temps les valeurs des critères associés. Ces deux types d'informations complémentaires permettront d'avoir un bon premier aperçu des capacités de chaque système.

#### 4.1.1 Analyse des courbes de température

J'ai regroupé les systèmes qui ont pu être modélisés sur Pleiades par action : agir sur les apports solaires, apporter de la masse thermique et ventiler. Les systèmes sont alors ainsi regroupés :

- Agir sur les apports solaires : brise-soleil, stores, vitrages plus performants, façade double peau, diminution de l'isolation.
- Apporter de la masse thermique : masses inertielles peau, masses inertielles intérieures, matériaux à changement de phase.
- Ventiler : ventilation naturelle, surventilation nocturne, puits canadien.

J'ai donc créé trois graphes de températures, une par système.

##### 4.1.1.1 *Agir sur les apports solaires*

Le premier graphe représente l'évolution de la température à l'intérieur du bâtiment pour la solution de référence, et pour chaque système qui agit sur les apports solaires, sur une année. Un zoom a été réalisé sur quatre jours d'été afin de mieux évaluer l'action des systèmes.

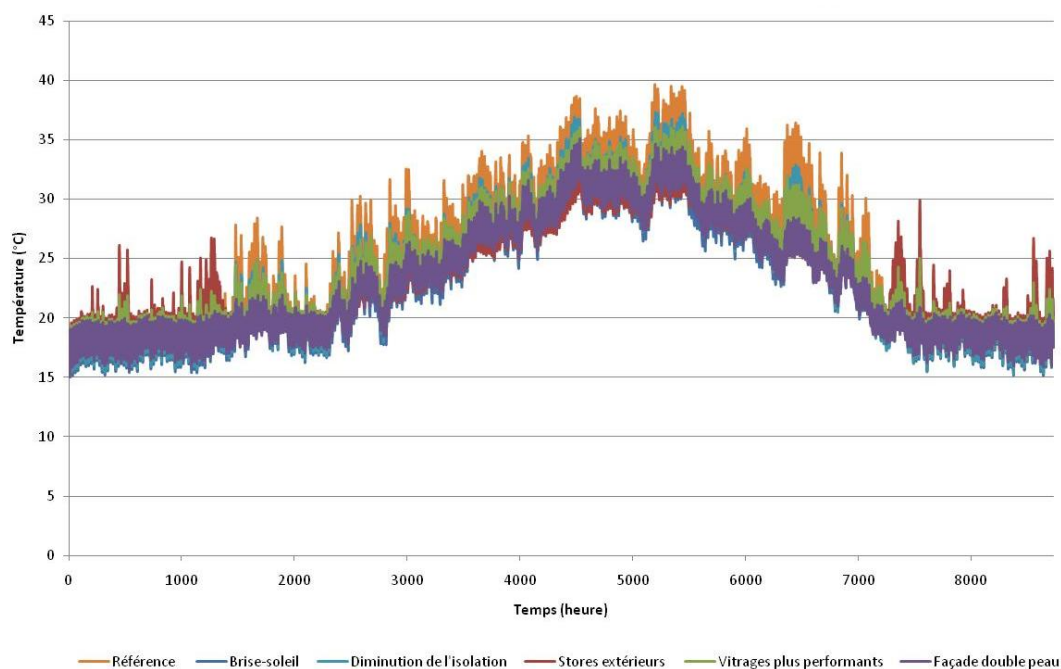


Figure 30 - Températures résultantes avec des systèmes contrôlant les apports solaires

Ce graphe nous montre que tous les systèmes permettent une diminution de la température en été. C'est la façade double peau qui permet des températures les moins élevées en été ; elles atteignent tout de même les 35°C. Ces systèmes se montrent donc insuffisants afin d'atteindre des conditions de confort à l'intérieur du bâtiment.

Par ailleurs, l'observation de ces courbes traduit une évolution de température très proche de celle de température de référence, comme si la courbe de référence avait été translatée vers le bas.

Nous pouvons donc en conclure que ces systèmes ne perturbent pas le fonctionnement interne du bâtiment, ce qui semble cohérent puisqu'ils agissent uniquement sur le contrôle des apports solaires à l'intérieur du bâtiment. La température se voit donc diminuer sans être modifiée dans ses variations.

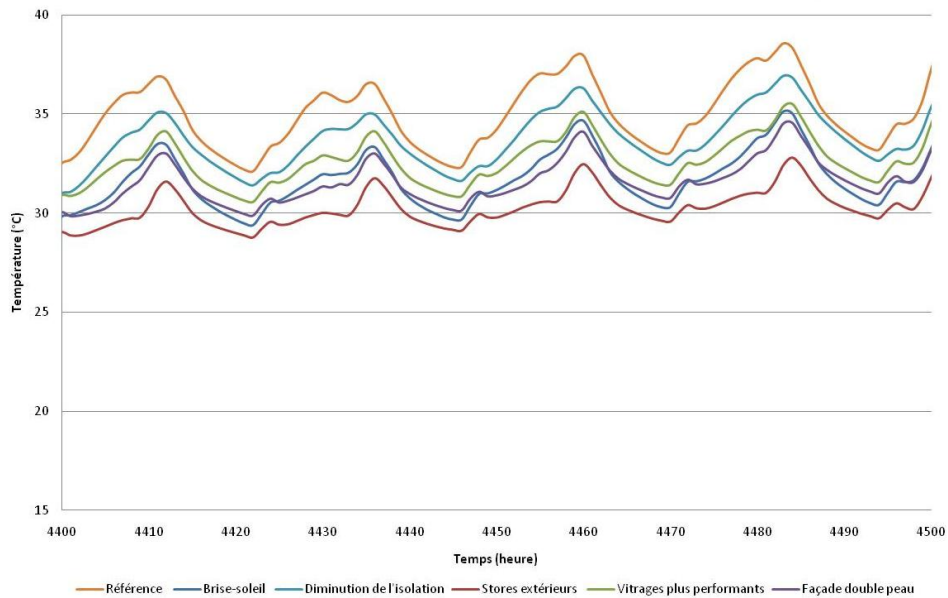


Figure 31 - Zoom températures résultantes - contrôle des apports solaires

Ce zoom permet de compléter notre analyse. En effet, on peut bien remarquer qu'à l'échelle d'une journée, la température est bien diminuée par rapport au bâtiment de référence. Alors qu'elle atteint 38°C le quatrième jour de ce graphique dans le bâtiment de référence, elle est de 36°C environ en diminuant l'isolation, d'environ 35°C avec des brise-soleil, des vitrages plus performants ou une façade double peau, et de 32°C avec des stores extérieurs.

Une diminution de l'amplitude des températures est par ailleurs observée avec l'usage de stores. Rappelons que le système « stores extérieurs » correspond à un scénario de fermeture de 80 % pendant la journée et de 100 % la nuit, c'est-à-dire un scénario où les stores sont beaucoup fermés.

Cependant, la température pendant la nuit ne descend pas en-dessous de 30°C, quel que soit le système utilisé. On est donc loin d'obtenir des conditions de confort satisfaisantes avec le seul usage de ces systèmes. Des couplages seront donc à réaliser.

#### 4.1.1.2 Apporter de la masse thermique

Ce graphe représente les courbes de températures résultantes dans le bâtiment avec une mise en place de systèmes à inertie.



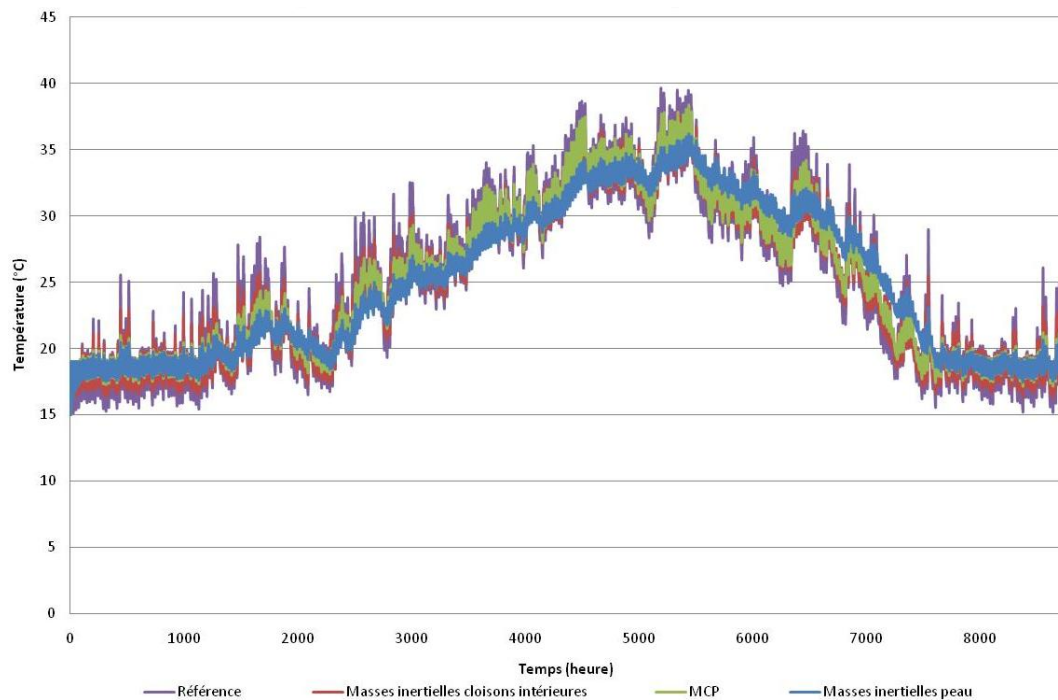


Figure 32 - Températures résultantes avec des systèmes à inertie

Nous pouvons observer que ces systèmes ont une action assez semblable : ils permettent une diminution des amplitudes de température, aussi bien en été qu'en hiver. Cela se traduit donc par des températures maximales plus faibles, mais également des températures minimales plus élevées. Le rôle de l'inertie est donc très bien traduit sur ces courbes.

En termes de comparaison, on peut dénoter une efficacité plus importante des masses inertielles sur les parois extérieures, que des masses inertielles à l'intérieur ou des matériaux à changement de phase, qui semblent avoir un effet assez similaire. Le zoom ci-dessous permet de préciser ces conclusions.

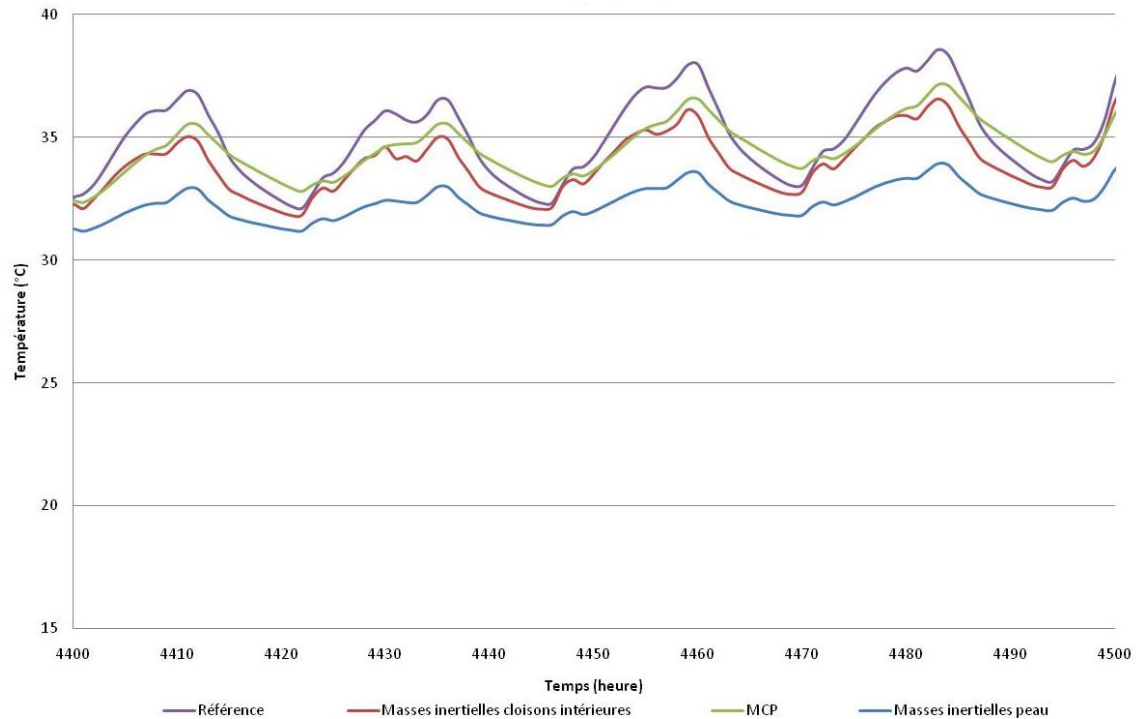


Figure 33 - Zoom - Températures résultantes avec des systèmes à inertie

On remarque bien en effet que l'inertie au niveau des parois extérieures est plus efficace au niveau de l'amortissement que les autres systèmes. La masse inertielle au niveau des cloisons intérieures et les matériaux à changement de phase semblent bien avoir une action assez similaire. Les matériaux à changement de phase semblent d'ailleurs lisser la courbe et avoir une action assez similaire à l'inertie extérieure mais avec des températures plus élevées.

Par ailleurs, alors que les systèmes agissant sur les apports solaires atteignaient des minima de 30°C, ils ne sont pas atteints par les systèmes à inertie. Encore une fois, ces systèmes permettent une réelle action en termes de rafraîchissement passif, mais le test de couplages devraient nous permettre d'en savoir plus sur leur fonctionnement et les actions qu'ils peuvent avoir sur le confort d'été.

#### 4.1.1.3 Ventiler

En troisième lieu, je vous présente ici les courbes de températures issues de la mise en place de différents systèmes de ventilation.

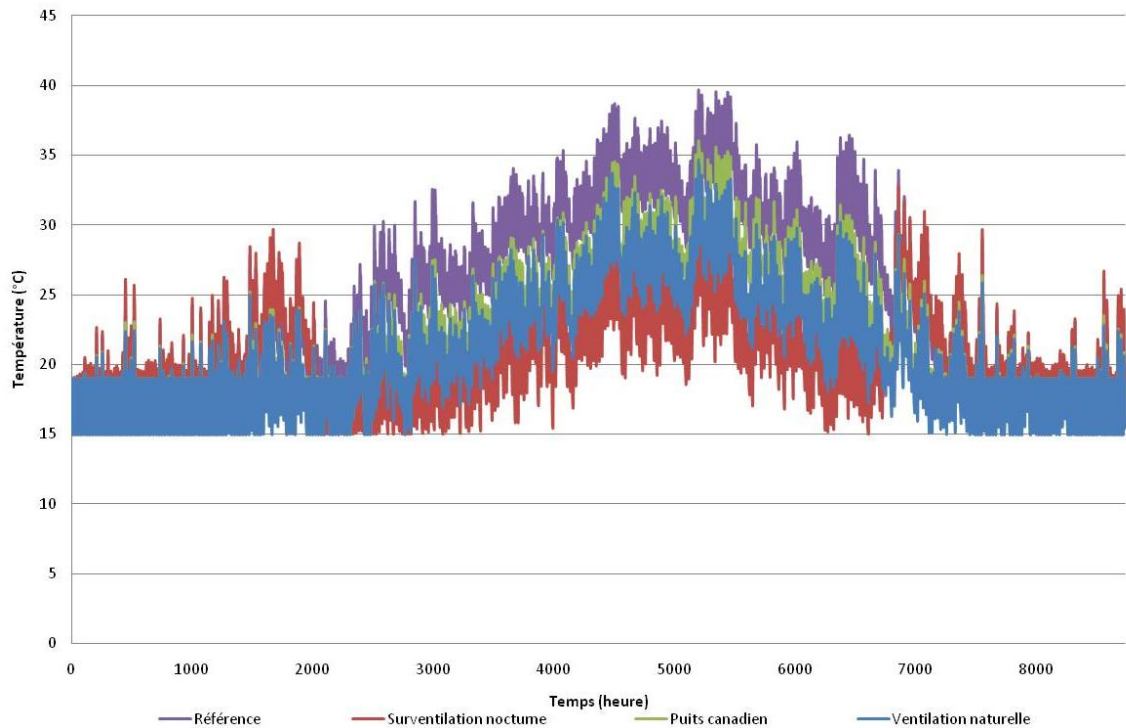


Figure 34 - Températures résultantes avec des systèmes de ventilation

La première remarque que nous inspire ce graphique est une importante amplification des variations de température, mais également une diminution assez forte des températures. Le puits canadien permet de diminuer les températures d'environ 5°C, la ventilation naturelle de quelques degrés de plus, et la surventilation nocturne d'une dizaine de degrés.

Ces systèmes semblent donc très efficaces vis-à-vis de la diminution de température mais peut-être assez peu générateurs de confort vu les variations de température que l'on peut observer. Un couplage avec une autre solution vue précédemment pourrait donc être intéressant.

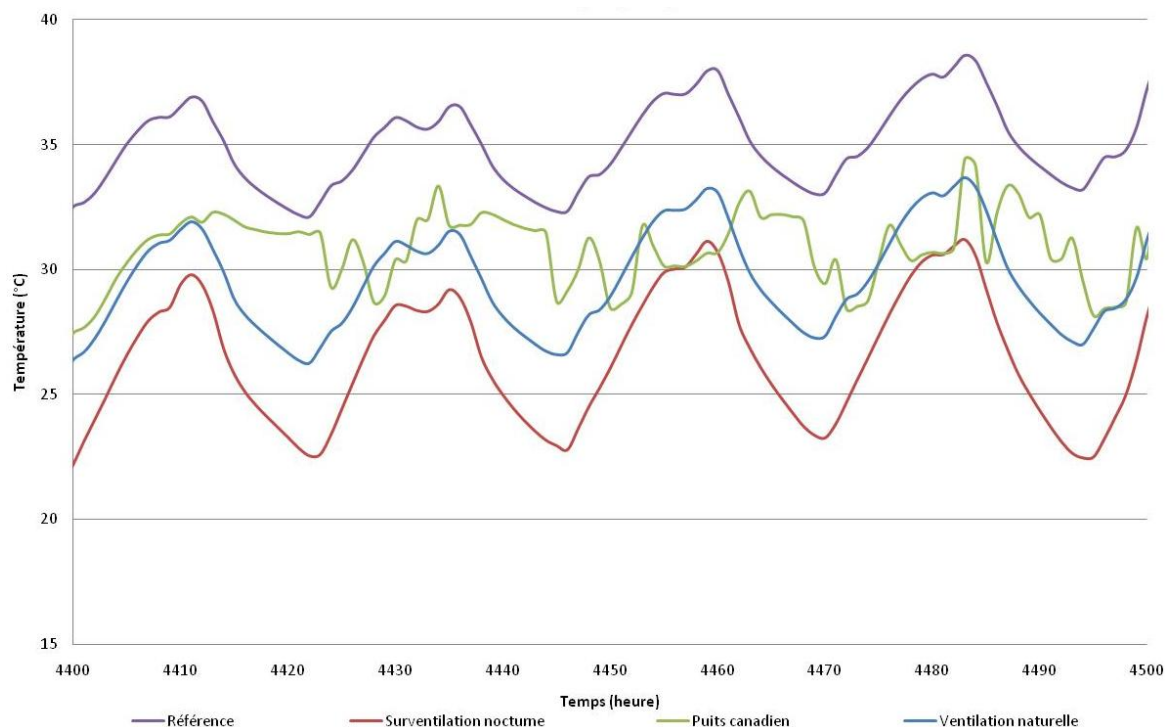


Figure 35 - Zoom - Températures résultantes avec des systèmes de ventilation

Ce zoom permet de confirmer le fait que les températures obtenues sont assez satisfaisantes au niveau du confort, notamment avec de la surventilation nocturne. Cependant, les oscillations ont une amplitude assez importante, plus grande que la température de référence. On observe bien une amplification de l'amplitude de températures avec ce système.

En outre, ce zoom permet d'observer une courbe inattendue pour les puits canadiens. On observe un déphasage important et une amplitude de 2 ou 3 degrés avec des variations fréquentes et peu régulières. Le déphasage observé semble plutôt cohérent avec le fonctionnement du puits canadien. L'air extérieur passe en effet à quelques mètres sous terre avant d'arriver dans le bâtiment. Cependant, les fluctuations sont importantes et de ce fait, le confort dans le bâtiment risque de s'en trouver détérioré.

La courbe de température avec de la ventilation naturelle est également amplifiée par rapport à la courbe de température de référence. La température est cependant plus élevée de quelques degrés par rapport à la surventilation nocturne.

Ces systèmes permettent donc une réelle baisse des températures, mais ils nécessitent un couplage avec d'autres solutions afin d'atténuer les variations de températures qui ne permettront pas un confort d'été satisfaisant.

#### 4.1.2 Analyse des valeurs des critères

L'analyse des courbes de température avec les différents systèmes a permis de mettre en avant quelques caractéristiques de leur action. Nous allons désormais observer les valeurs obtenues par chacun pour les critères d'évaluation mis en place, afin d'obtenir davantage d'informations sur le comportement qu'ils peuvent engendrer. Rappelons que ces résultats sont issus de l'étude d'un bâtiment bien particulier et que les conclusions formulées ici n'ont pas de valeur universelle.

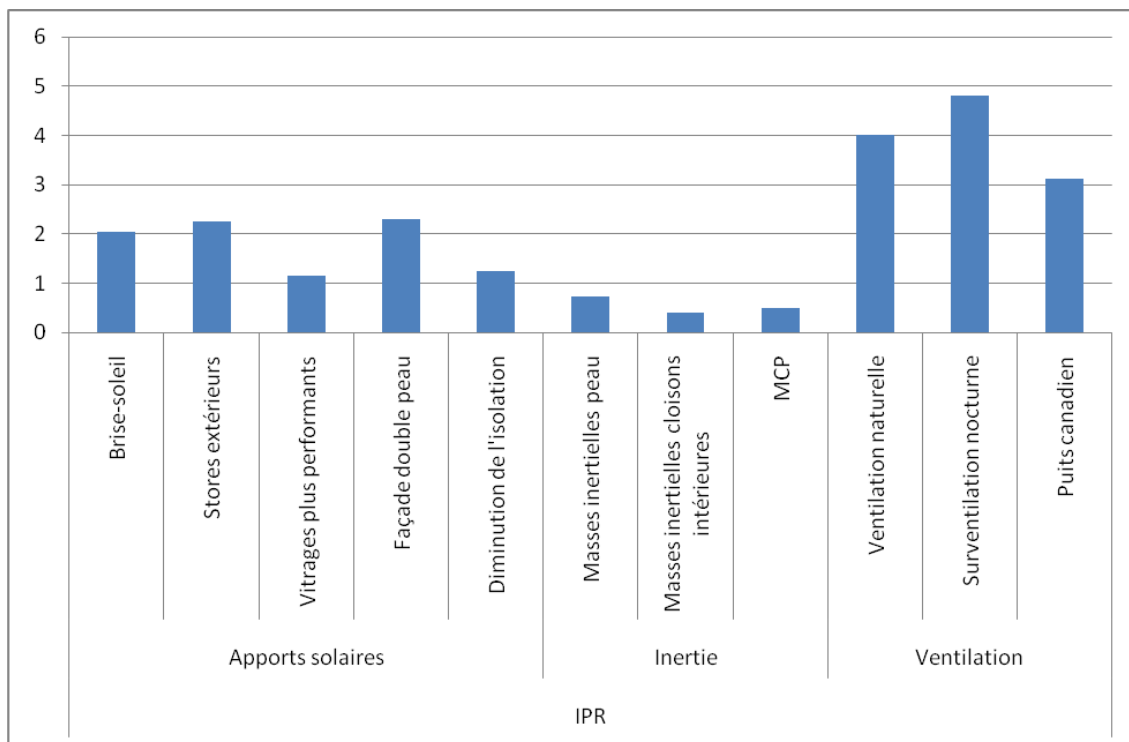


Figure 36 - Indice de performance de rafraîchissement

L'indice de performance de rafraîchissement traduit la performance du système au niveau de la température et en fonction de l'atteinte de la température de consigne fixée à 27°C. On peut observer que les systèmes de ventilation sont plus performants que les systèmes gérant les apports solaires, eux-mêmes plus performants que les systèmes à inertie. En sachant que ce critère ne prend en compte que des exigences en termes d'abaissement de température, les résultats obtenus ici semblent assez cohérents avec les observations réalisées précédemment.

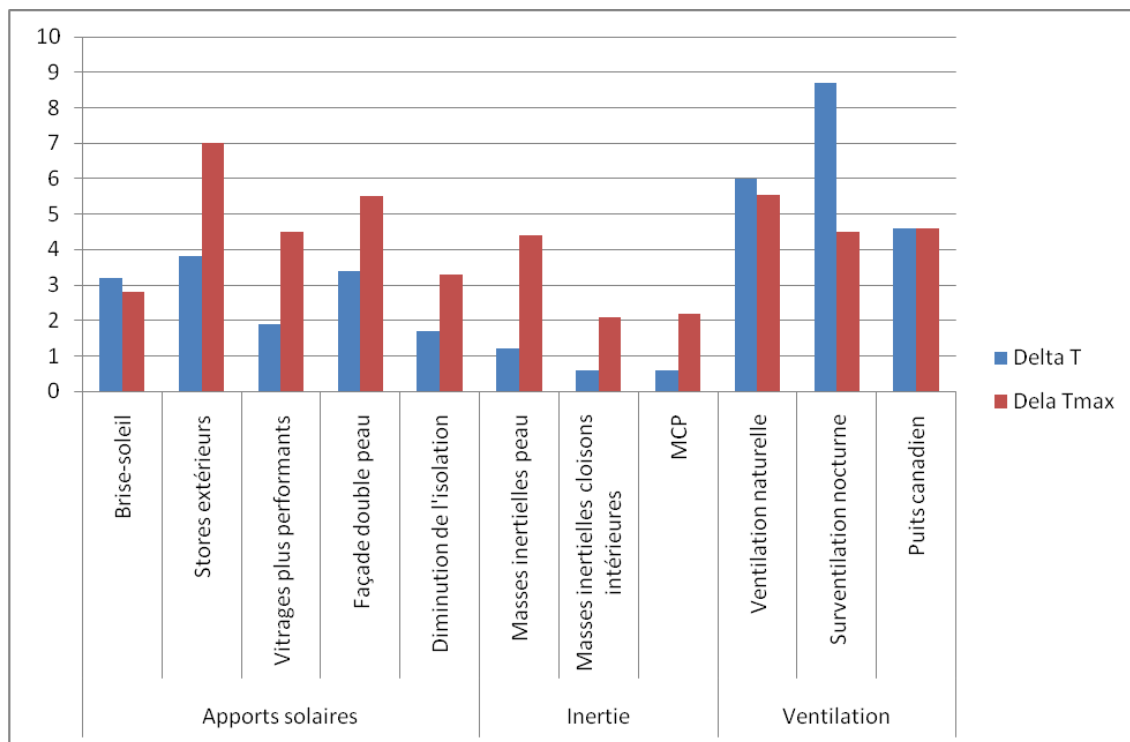


Figure 37 - Abaissement de température moyen et abaissement de températures maximales

Deux des autres critères à observer sont la diminution moyenne de température lors de surchauffe par rapport à la température de consigne, et la diminution de la température maximale par rapport au comportement de référence.

On observe que l'abaissement moyen de température est plus important pour des systèmes de ventilation, alors que l'abaissement de températures maximales est plus élevé pour les systèmes gérant les apports solaires.

Pour les systèmes à inertie, l'abaissement de température maximale est plus important que l'abaissement de température moyen. Cela traduit l'amortissement observé pour ces systèmes.

Pour les systèmes de ventilation, l'abaissement de température maximale est inférieur à l'abaissement de température moyen. Cela traduit l'amplification de température par rapport à la température de référence.

Bien que la température soit un paramètre important à prendre en compte dans l'évaluation de l'action des systèmes, il est également nécessaire d'évaluer des critères s'appuyant sur d'autres données issues des logiciels, notamment les besoins en climatisation. Voilà donc les valeurs observées pour les critères de couverture des besoins en rafraîchissement et de taux de réponse à ses besoins.

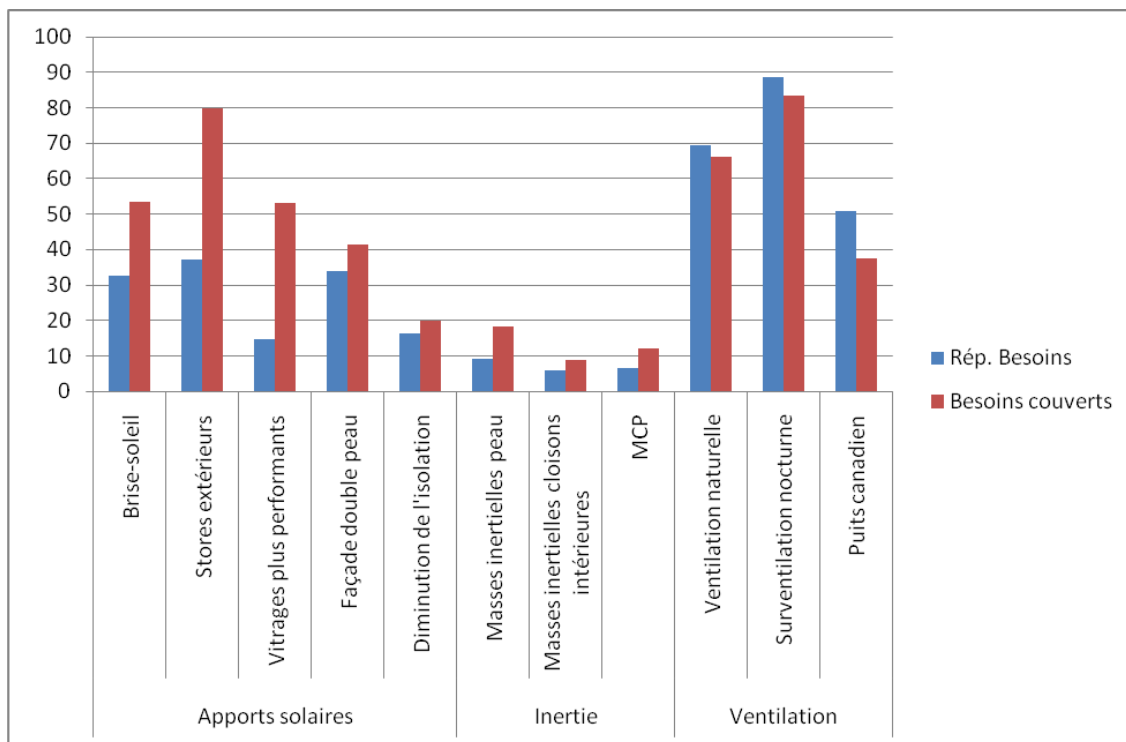


Figure 38 - Taux de réponse aux besoins en rafraîchissement et couverture des besoins

Ce graphique permet de remarquer que les systèmes de ventilation permettent d'atteindre la température de consigne un pourcentage assez élevé de fois (critère de réponse aux besoins), alors que les autres systèmes, notamment les systèmes à inertie, ne permettent d'atteindre la température de consigne moins de 10% des fois où le bâtiment est en surchauffe.

En ce qui concerne les systèmes gérant les apports solaires, la température de consigne est peu atteinte (entre 10 et 35 %), alors que les besoins en climatisation sont plutôt bien couverts (entre 40 et 80 %). La diminution de l'isolation ne permet de couvrir que 20 % des besoins. On a en effet pu observer sur les courbes précédentes que ce système était le moins performant parmi les systèmes gérant les apports solaires.

#### 4.1.3 Premières conclusions sur l'action des systèmes

L'analyse de ces courbes et graphiques a pu mettre en avant différentes caractéristiques de l'action des systèmes. De manière générale, on a pu dénoter une meilleure efficacité des systèmes de ventilation afin de rafraîchir le bâtiment. Cependant, on observe un bon amortissement des variations de températures de la part des systèmes à inertie et de certains gérant les apports solaires, alors qu'une amplification a lieu avec les systèmes de ventilation.

Par ailleurs, l'évaluation des critères mis en place a permis de mettre en relation l'action des systèmes et les courbes observées. On a pu cependant remarquer des comportements différents selon les critères utilisés, par exemple pour la couverture des besoins et le taux de réponse aux besoins. Une analyse des critères va permettre de donner des conclusions plus précises sur l'action des systèmes.

## 4.2 Pertinence des critères d'évaluation thermique

Cette analyse des résultats obtenus pour les critères a pu mettre en avant quelques remarques concernant la pertinence des critères et leur complémentarité. Nous allons donc essayer dans cette partie d'analyser plus en détail les critères mis en place. Cela permettra dans un second temps

d'évaluer de manière plus précise les modélisations de couplages nécessaires afin d'avoir un point de vue plus complet sur l'action de chacun des systèmes.

#### 4.2.1 Indice de performance de rafraîchissement et besoins en chauffage

Lorsque nous avons défini cet indice de performance de rafraîchissement, nous avons noté que cette performance était optimale lorsqu'on se rapprochait de 1. C'est en effet la moyenne des rapports entre la différence de température réelle et celle souhaitée. Cependant, les calculs peuvent être faussés lorsqu'on a un cas limite (différence de température souhaitée très faible). Ce critère peut donc observer des cas de divergence qu'il serait intéressant de supprimer mais c'est difficilement réalisable.

Afin de palier ce problème de divergence, il faut coupler l'analyse de ce critère à celle d'un autre critère. L'écart moyen de température peut notamment permettre de veiller à la non divergence du critère ; il faut qu'il y ait adéquation entre ces deux critères lorsqu'on compare deux solutions.

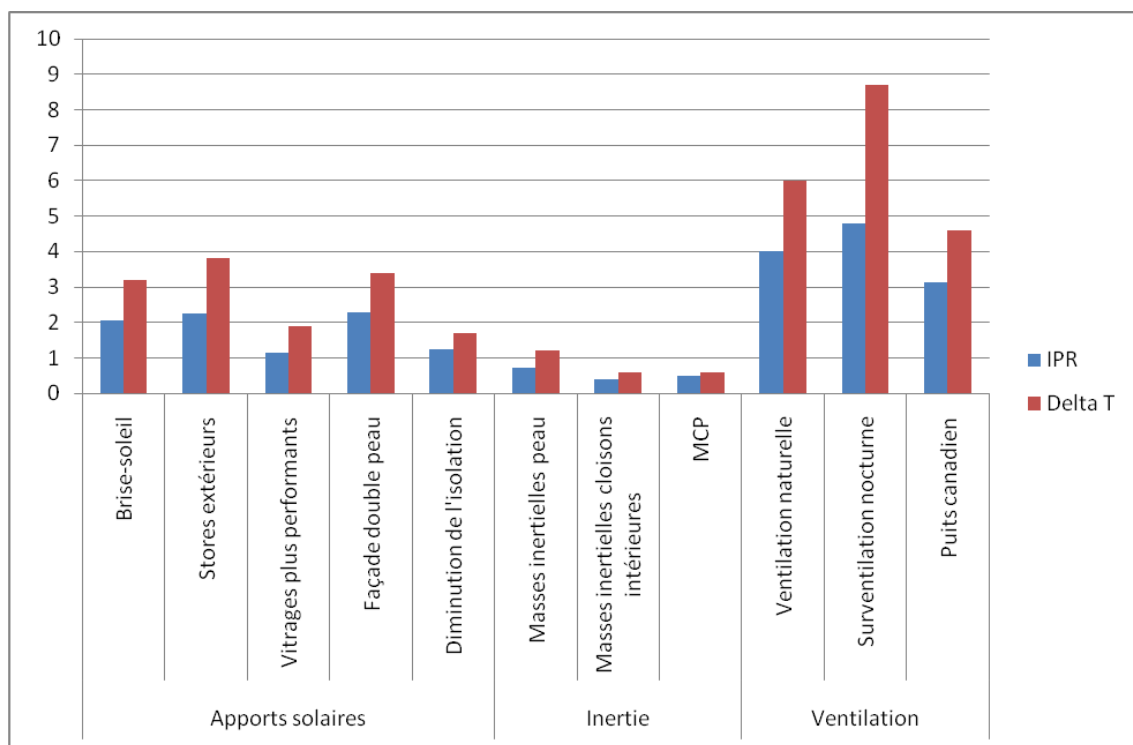


Figure 39 - Indice de performance de rafraîchissement et abaissement moyen de température

Nous pouvons observer sur ce graphique une certaine cohérence entre ces deux critères.

Pour rappel, les deux critères observés sont déterminés par les formules suivantes :

$$IPR = \frac{1}{N} \sum \frac{T_{réf} - T_{sys}}{T_{réf} - T_{cons}} \quad \text{et} \quad \Delta T = \frac{1}{N} \sum T_{réf} - T_{sys}$$

Il n'existe donc pas normalement de relation de proportionnalité entre les deux, mais un rapport devrait cependant exister.

Le graphique ci-dessous représente les systèmes dans un repère avec pour axes IPR et delta T.



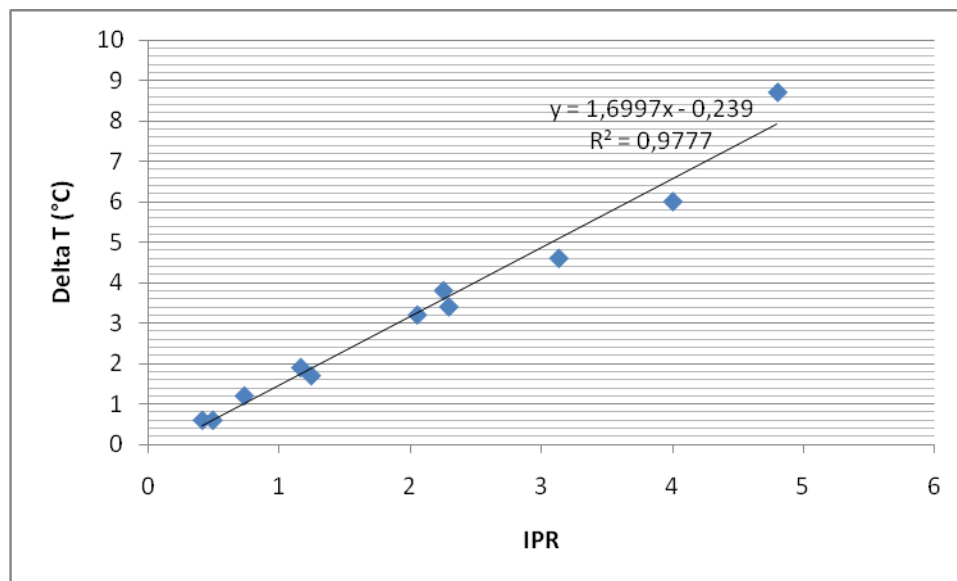


Figure 40 - Abaissement moyen de température en fonction d'indice de performance de rafraîchissement

Une régression linéaire permet de confirmer la relation entre ces deux critères. Elle n'est pas directement proportionnelle, ce qui était prévisible au vu des formules. Nous pouvons donc conclure qu'il existe une relation entre ces deux critères, même si les points semblent s'éloigner de la droite lorsque les valeurs augmentent.

Cette régression permet de valider la pertinence du critère Indice de Performance en Rafraîchissement (IPR) vis-à-vis de l'abaissement moyen de température.

Il est également intéressant d'observer le couplage de ce critère avec l'augmentation des besoins en chauffage. Le graphique ci-dessous permet de mettre en avant les solutions performantes vis-à-vis du rafraîchissement passif mais qui n'augmentent pas trop les besoins en chauffage.

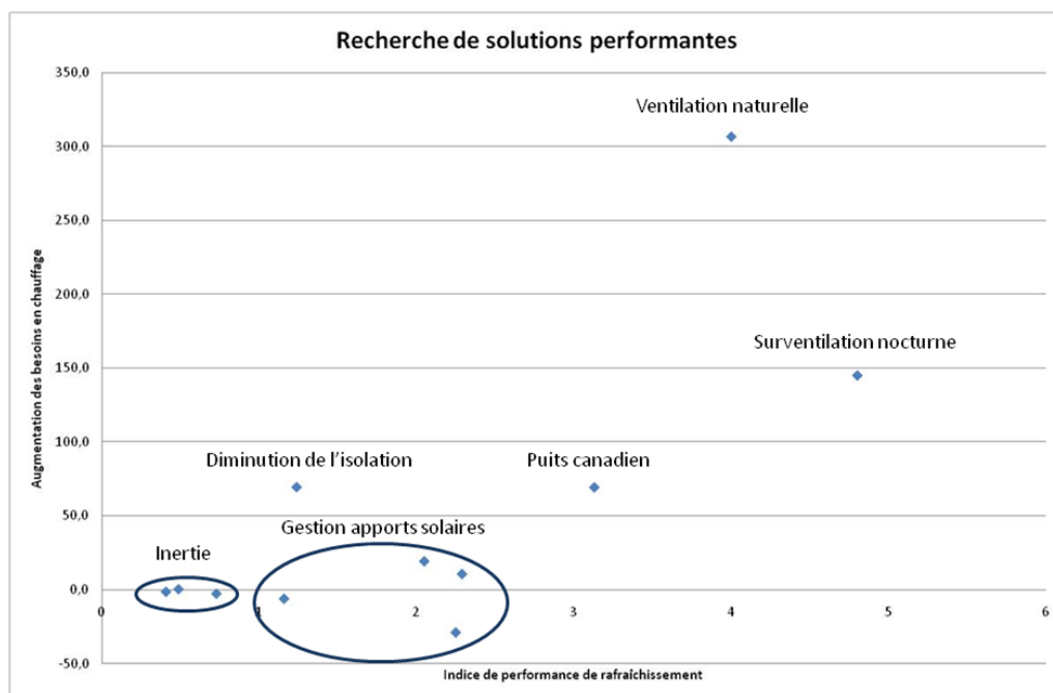


Figure 41 - Répartition des solutions dans le diagramme augmentation des besoins en chauffage en fonction de l'indice de performance de rafraîchissement

Même si les systèmes ne sont pas optimisés au niveau du comportement en hiver dans notre cas d'étude, ce graphique semble être tout de même intéressant pour la suite afin de pouvoir privilégier l'une ou l'autre solution. On peut mettre en place un graphique de référence dans lequel on peut placer les solutions afin de connaître rapidement leur action.

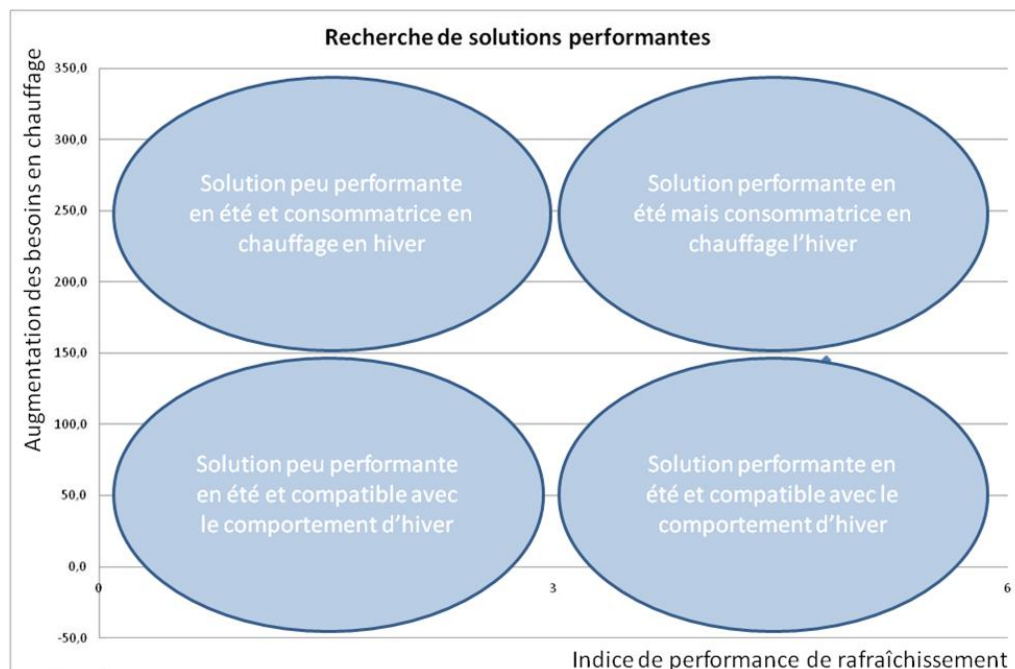


Figure 42 - Recherche de solutions performantes

Cette première analyse permet de conclure que le critère IPR mis en place est pertinent ; il est le reflet de l'abaissement moyen de température, critère que l'on pourrait supprimer. Par ailleurs, nous avons pu mettre en place un graphe permettant de connaître grossièrement le comportement d'une solution vis-à-vis de sa performance en été et de son adéquation avec le comportement d'hiver.

Nous allons désormais observer les critères d'abaissement moyen de température et d'abaissement de température maximal par rapport au comportement de référence afin d'établir une cohérence entre ces critères ou pas et de noter quelles conclusions peuvent en découler.

## 4.2.2 Abaissement moyen de température et abaissement de températures maximales

L'abaissement moyen de température est un critère important, à comparer à la différence des températures maximales afin d'observer l'amortissement des pics de chaleurs par le système.

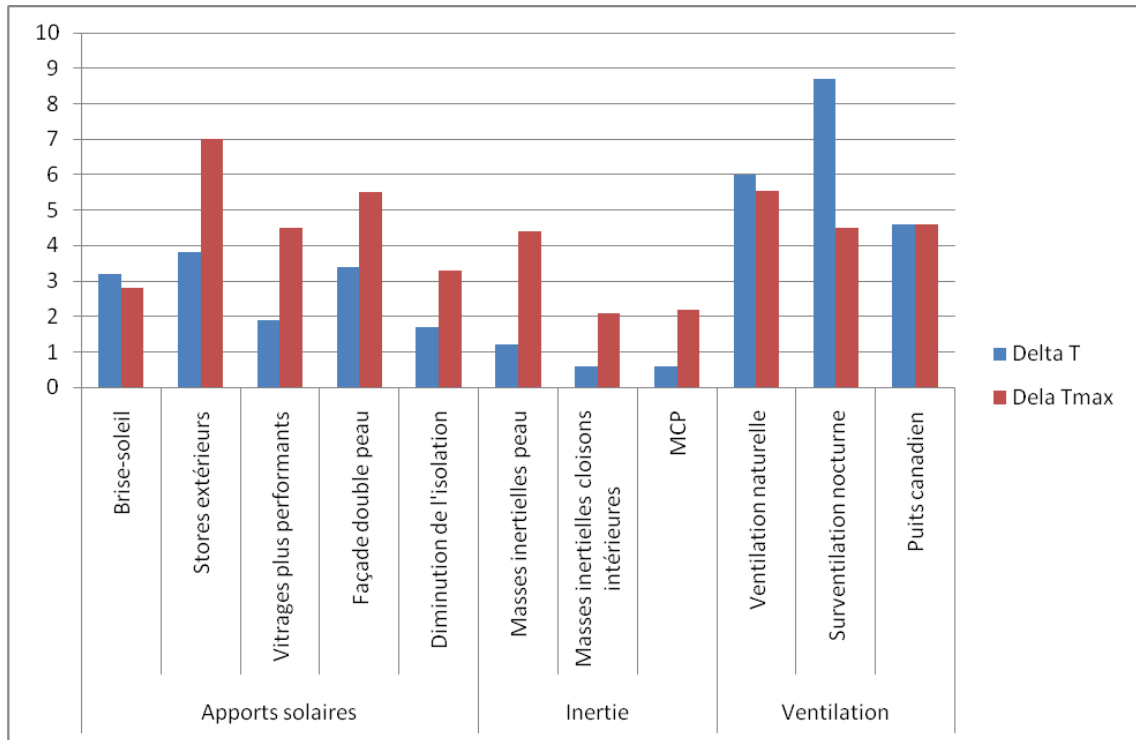


Figure 43 - Abaissement moyen de température et abaissement de températures maximales

En effet, si la différence de températures maximales est supérieure à la différence moyenne de températures, cela signifie que les températures extrêmes sont amorties et donc que l'amplitude de température sera moins importante. On peut rapprocher cette observation au principe physique de l'inertie. A l'inverse, si la différence moyenne de températures est supérieure à la différence des températures maximales, cela signifie que l'amplitude de températures a été augmentée. On obtient les résultats suivants (par rapport au comportement de référence) :

Brise-soleil	amplification
Stores extérieurs	amortissement
Vitrages plus performants	amortissement
Façade double peau	amortissement
Diminution de l'isolation	amortissement
Masses inertielles peau	amortissement
Masses inertielles cloisons intérieures	amortissement
MCP	amortissement
Ventilation naturelle	amplification
Surventilation nocturne	amplification
Puits canadien	amplification

Figure 44 - Amortissement ou amplification des systèmes par rapport au bâtiment de référence

Le graphique ci-dessous permet de valider ces affirmations :

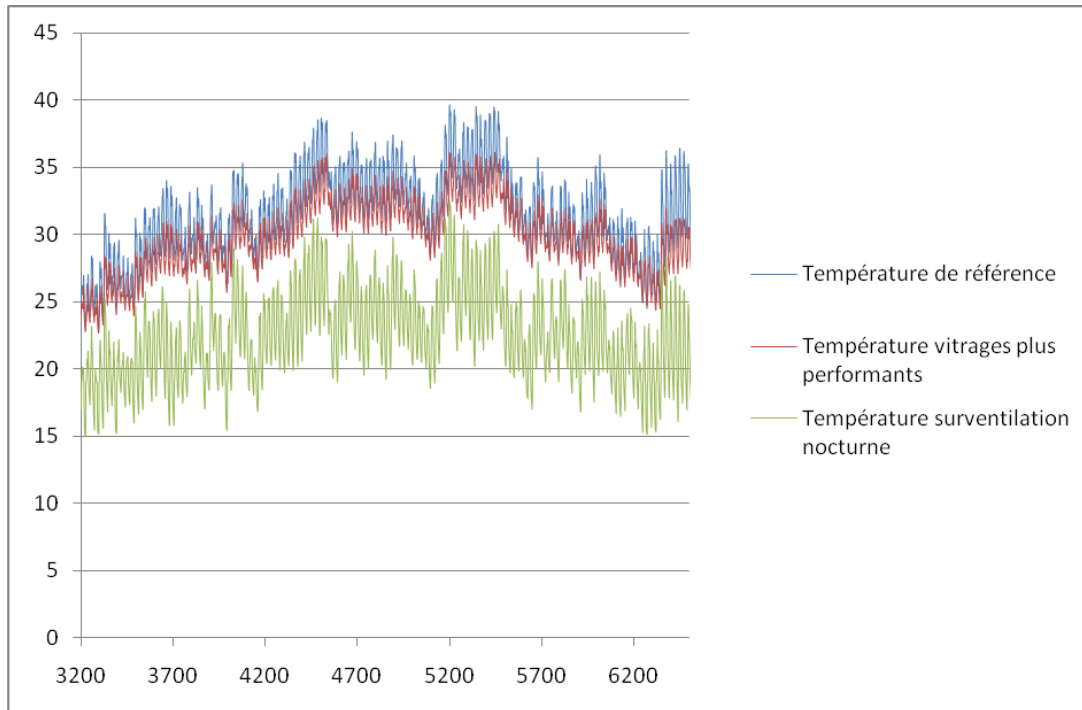


Figure 45 - Observation de l'amortissement ou de l'amplification par rapport au bâtiment de référence

On observe bien avec le changement des vitrages un amortissement de l'amplitude de températures. La surventilation nocturne, même si elle permet un rafraîchissement plus important, accentue en réalité l'amplitude de températures. Cet élément vient donc entraver le confort de l'habitant puisqu'une stabilisation de la température intérieure est importante pour l'assurer.

Il s'agit donc d'un élément important à prendre en compte. Nous pouvons alors mettre en place un critère d'amortissement qui serait le rapport entre l'abaissement moyen de températures et l'abaissement de températures maximales.

$$\text{Critère d'amortissement} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}}$$

$$\text{Si } \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} > 1, \text{ amplification et si } \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} < 1, \text{ amortissement.}$$

Plus ce critère d'amortissement est faible, plus l'amortissement est fort.

Nous pourrions donc abandonner les critères d'abaissement de température moyen et de température maximale, mais les conserver afin d'avoir accès à ce nouveau critère : le facteur d'amortissement.

#### 4.2.3 Taux de réponse aux besoins en rafraîchissement et besoins en froid couverts par le système

Il est également intéressant de comparer le taux de réponse aux besoins en refroidissement, c'est-à-dire le pourcentage de temps où le système de rafraîchissement passif mis en place permet de faire descendre la température en-dessous de la température de consigne de 27°C, et le pourcentage de besoins en froid couverts par le système.

Le graphique ci-dessous permet de voir si le lien entre les deux est important :

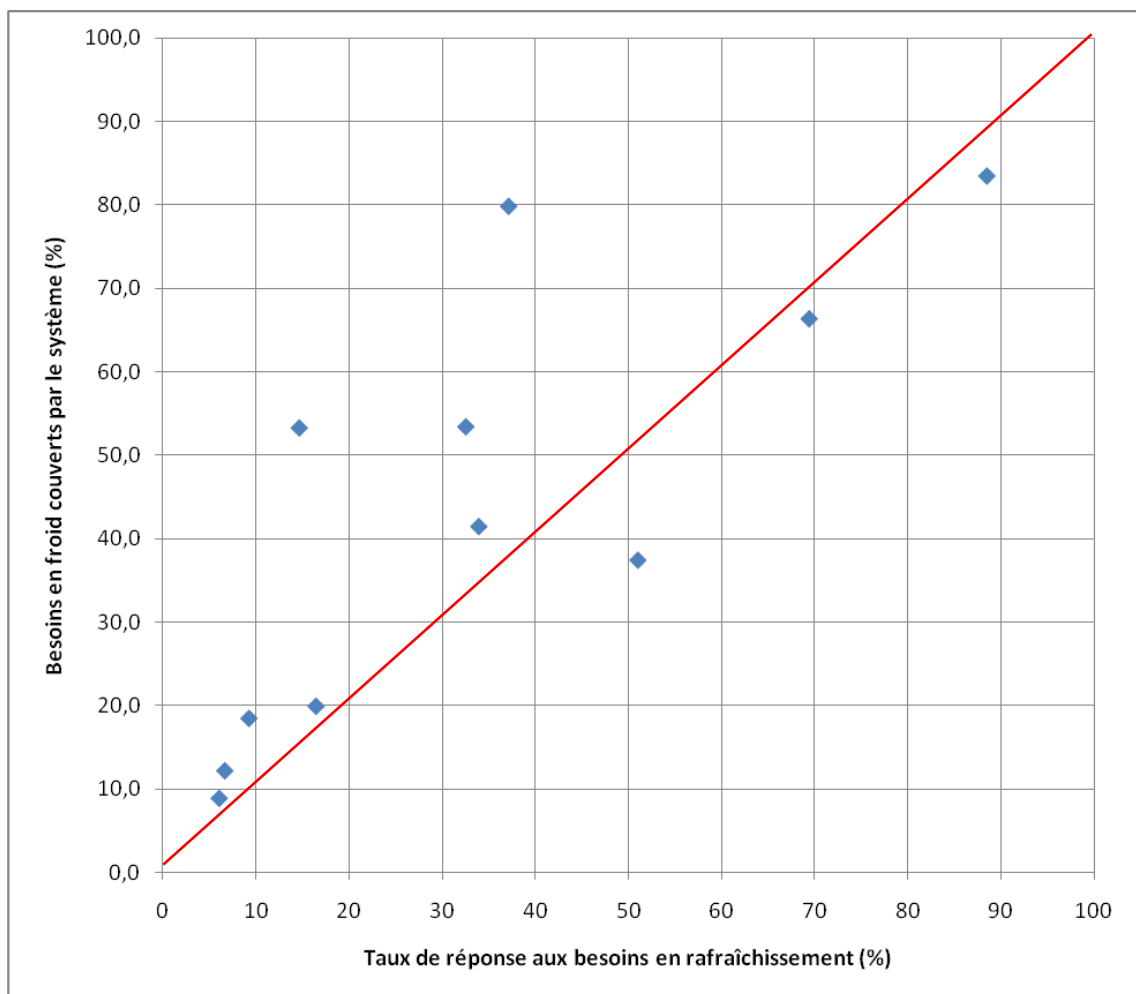


Figure 46 - Besoins en froid couverts par le système en fonction du taux de réponse aux besoins en rafraîchissement

On observe une répartition des systèmes autour de la droite de régression linéaire  $y = x$ . On observe cependant des systèmes qui couvrent davantage de besoins en froid mais ne permettent pas toujours d'atteindre la température de consigne.

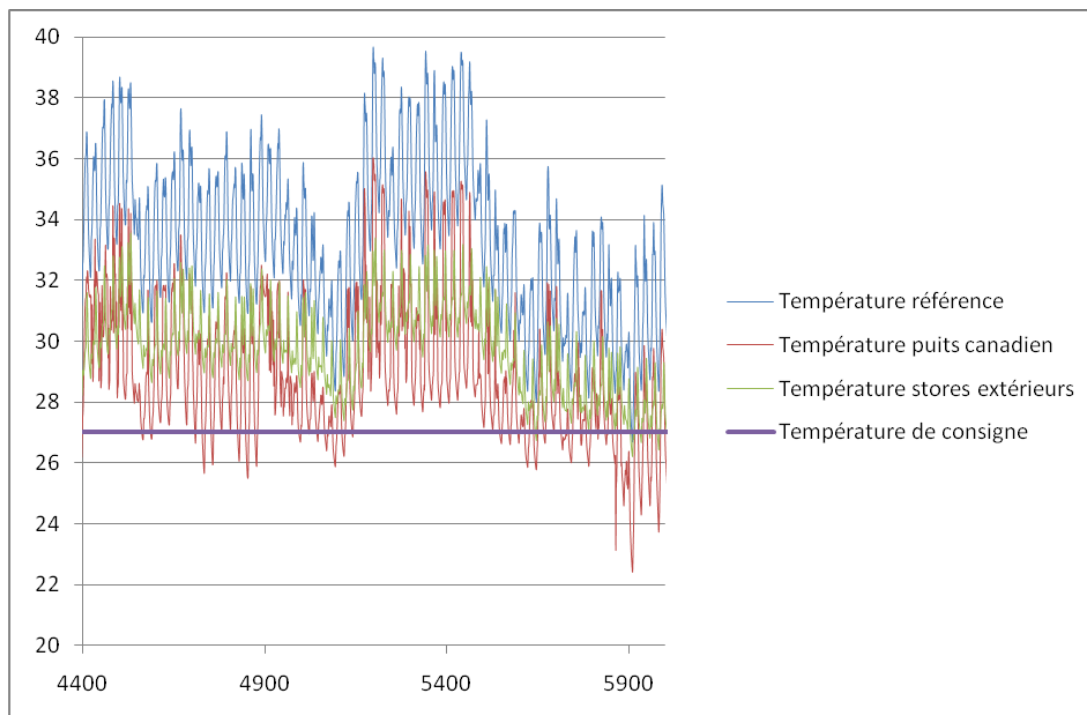


Figure 47 - Observation de l'atteinte ou non de la température de consigne

On observe que le bâtiment équipé d'un puits canadien conserve des pics de température supérieurs à celui équipé de stores extérieurs. Cependant, on y observe des températures inférieures à la température de consigne, alors que les stores extérieurs ne permettent pas de le faire. C'est à nouveau une question d'amortissement de l'amplitude de température.

En zoomant, on peut observer :

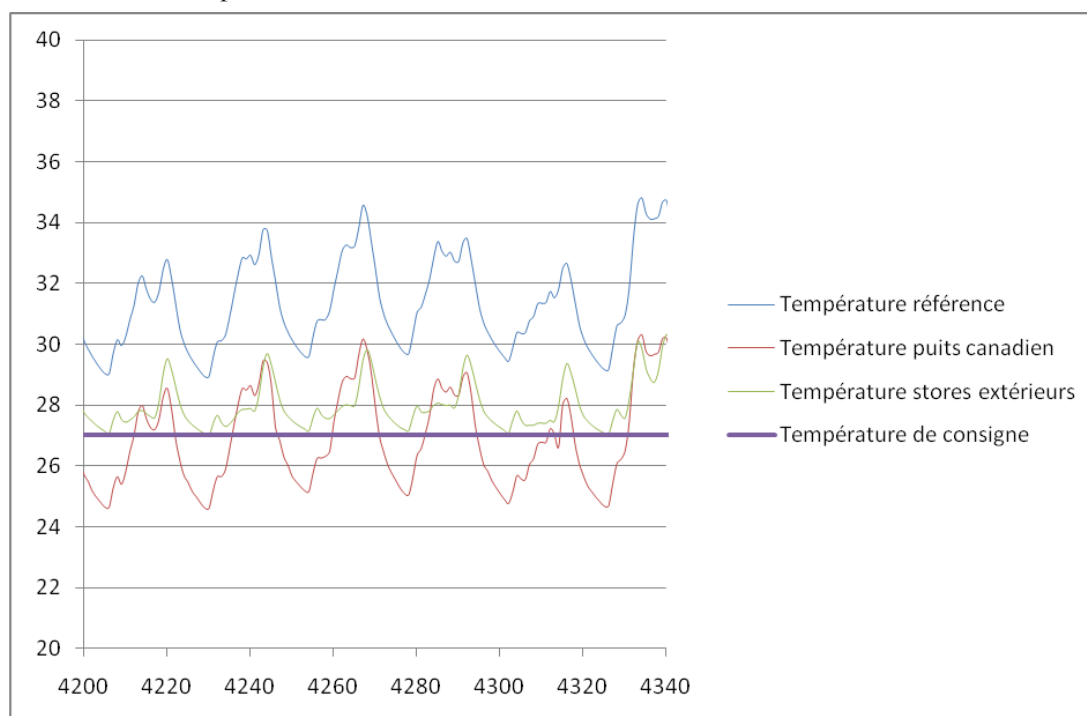


Figure 48 - Zoom - Atteinte ou non de la température de consigne

Avec les stores extérieurs, on comprend bien pourquoi le taux de réponse aux besoins de rafraîchissement est moins élevé que le pourcentage de besoins couverts par le système.

On peut donc voir si l'interaction entre l'amortissement et le rapport entre les besoins couverts et le taux de réponse est effective.

Les quatre systèmes qui entraînent une amplification sont brise-soleil, surventilation nocturne, ventilation naturelle et puits canadien. Les systèmes qui couvrent moins les besoins qu'ils ne répondent aux besoins sont le puits canadien, la ventilation naturelle et la surventilation nocturne. On retrouve donc bien un lien. Une seule anomalie existe : les brise-soleil mais ils sont l'objet d'autres anomalies.

#### 4.2.4 Critères conservés pour la suite de l'étude

On pourrait donc mettre en place un nouveau critère en faisant le rapport entre les besoins couverts et le taux de réponse aux besoins mais il me semble que le critère d'amortissement mis en place précédemment me semble plus pertinent.

Ce critère de taux de réponse aux besoins ne semble donc pas un critère de confort très pertinent puisque, comme nous l'avons vu sur les courbes de température, la température peut rester juste au-dessus de la courbe de température de consigne et le taux de réponse aux besoins est alors faible, alors que le niveau de confort peut être satisfaisant. Seule la question de l'amortissement peut être intéressante mais elle est déjà prise en compte avec le critère vu précédemment. La couverture des besoins semble être un critère plus pertinent afin de connaître la performance des systèmes. Il est donc nécessaire de voir s'il existe bien une relation entre l'indice de performance de rafraîchissement et la couverture des besoins.

	Indice de performance de rafraîchissement	Besoins en froid couverts par le système (%)	Taux de réponse aux besoins en rafraîchissement (%)
Masses inertielles cloisons intérieures	0,41	8,9	6
MCP	0,49	12,2	6,6
Masses inertielles peau	0,73	18,4	9,2
Vitrages plus performants	1,16	53,2	14,6
Diminution de l'isolation	1,24	19,9	16,4
Brise-soleil	2,05	53,4	32,5
Stores extérieurs	2,25	79,8	37,10
Façade double peau	2,29	41,4	33,9
Puits canadien	3,13	37,4	51
Ventilation naturelle	4	66,3	69,4
Surventilation nocturne	4,8	83,4	88,5

Figure 49 - Tableau regroupant l'IPR, la couverture des besoins en rafraîchissement et le taux de réponse aux besoins

J'ai classé dans ce tableau les solutions par ordre croissant d'indice de performance de rafraîchissement. On remarque alors que les besoins en froid couverts par le système ne sont pas en relation avec l'IPR, c'est le taux de réponse aux besoins en rafraîchissement ! Cela semble en fait assez logique puisque l'IPR se rapporte à la température de consigne comme le taux de réponse aux besoins.

Il est donc important de conserver le critère de couverture des besoins en froid afin d'avoir une évaluation de la performance absolue du système, sans prendre en compte la température de consigne. Le taux de réponse aux besoins en rafraîchissement est déjà pris en compte avec l'IPR.

Nous conserverons donc l'indice de performance de rafraîchissement, le critère d'amortissement et la couverture des besoins afin d'évaluer l'action des systèmes mis en place.

		Indice de performance de rafraîchissement	Critère d'amortissement	Besoins en froid couverts par le système (%)
Apports solaires	Brise-soleil	2,05	1,14	53,4
	Stores extérieurs	2,25	0,54	79,8
	Vitrages plus performants	1,16	0,42	53,2
	Façade double peau	2,29	0,62	41,4
	Diminution de l'isolation	1,24	0,52	19,9
Inertie	Masses inertielles peau	0,73	0,27	18,4
	Masses inertielles cloisons intérieures	0,41	0,29	8,9
	MCP	0,49	0,27	12,2
Ventilation	Ventilation naturelle	4	1,08	66,3
	Surventilation nocturne	4,8	1,93	83,4
	Puits canadien	3,13	1,00	37,4

Figure 50 - Valeurs des critères retenus pour chacun des systèmes modélisés

Ce tableau donne les valeurs des trois critères retenus pour chaque système. On peut tirer rapidement des conclusions sur l'action des systèmes grâce à l'analyse des critères réalisés.

En ce qui concerne l'indice de performance de rafraîchissement, c'est-à-dire la réponse vis-à-vis de la température de consigne, les systèmes issus d'un même principe de rafraîchissement passif ont des valeurs assez proches. Ce sont les systèmes de ventilation qui sont les plus performants, suivis des systèmes gérant les apports solaires et enfin les systèmes à inertie.

L'amortissement par rapport au bâtiment de référence est cependant meilleur avec les systèmes à inertie, suivi par les systèmes gérant les apports solaires, et enfin les systèmes de ventilation. On sent bien le lien entre ces deux critères. Il est difficile de combiner un amortissement et des performances satisfaisantes. Les couplages prévus ensuite pourront peut-être pallier à ces actions non complètes.

La couverture des besoins en froid par les systèmes dépend vraiment de chaque système et la répartition par principe de rafraîchissement observée précédemment n'est plus observée pour ce critère. Comme nous avons en effet pu le remarquer dans l'analyse, un système qui amortit bien n'atteint pas forcément la température de consigne mais peut couvrir une bonne part des besoins en froid, et inversement. Nous pouvons noter les bonnes performances des stores extérieurs et de la surventilation nocturne. Les systèmes à inertie sont cependant assez décevants dans cette couverture des besoins. Un couplage leur permettrait peut-être d'améliorer ces performances.

### 4.3 Modélisation de couplages

Afin de préciser les premières observations sur l'action des systèmes testés et grâce aux conclusions sur les critères d'analyse obtenues, nous avons mis en place différents couplages. Le but était de voir l'effet combiné de deux systèmes afin de repérer les avantages de l'un et ceux de l'autre. Il est en effet intéressant de simuler chacun des systèmes séparément puis ensemble ; cela permet d'avoir une vision assez globale des systèmes. Ces couplages avaient aussi pour objectif de comprendre plus précisément l'action de chaque système, mais également de constater si certains systèmes en dominant d'autres, dans le sens où la combinaison avec un autre système n'influence que très peu l'action observée. Ces couplages devaient également permettre de repérer certaines synergies entre systèmes, c'est-à-dire une amélioration importante des performances grâce au couplage. Nous utiliserons les critères mis en place dans la partie précédente afin d'évaluer les systèmes.

Grâce aux tableaux présentés dans la première partie, il a été possible de choisir des couplages qui devraient a priori être davantage stratégiques au niveau de la complémentarité des actions. Tous



les couplages entre systèmes modélisés n'ont pas été réalisés, seuls les plus pertinents l'ont été, afin de voir l'effet combiné de systèmes vraiment caractéristiques pour chacune des actions de base (gérer les apports solaires, apporter de la masse thermique, ventiler). Le but de ces couplages était réellement de voir comment les systèmes pouvaient influencer l'un sur l'autre et il était plus intéressant de le faire avec des systèmes efficaces et représentatifs de l'action qu'ils pouvaient réaliser. En annexe A se trouvent les courbes pour chaque système et les couplages réalisés avec ce système. Elles ont permis d'avoir une première approche sur les conclusions à avoir.

### 4.3.1 Apporter de la masse thermique et ventiler

Un des premiers couplages à tester est l'association de masse thermique et de ventilation. Cet élément avait déjà été précisé dès la présentation des systèmes : le couplage semble cohérent avec le principe de chacun de ces systèmes. La masse thermique permet en effet un déphasage et un amortissement de la température extérieure. La chaleur emmagasinée pendant la journée est stockée dans la paroi et est évacuée aux heures plus fraîches de la nuit grâce à un apport de fraîcheur avec la mise en place d'une ventilation efficace.

Au niveau de la ventilation, j'ai conservé seulement deux systèmes : la ventilation naturelle et la surventilation nocturne. Je n'ai pas effectué de couplage avec le puits canadien qui est moins efficace au niveau du rafraîchissement. En ce qui concerne les systèmes de masse thermique, je n'ai gardé que l'inertie au niveau des parois extérieures et des parois intérieures. Les matériaux à changement de phase ont été abandonnés car ils étaient également moins efficaces et sont utilisés de façon marginale.

Voilà les résultats obtenus pour les différents critères au niveau des couplages. Les valeurs des systèmes seuls ont été rappelées afin de pouvoir comparer. Par ailleurs, un code couleur a été employé afin de dire si le couplage permet une amélioration par rapport à chacun des systèmes seul (vert), une amélioration par rapport à un seul des systèmes (jaune) ou dégrade les résultats des deux systèmes (rouge).

IPR		Ventilation naturelle	Surventilation nocturne		Amortissement		Ventilation naturelle	Surventilation nocturne
		4	4,8				1,08	1,93
Inertie peau	0,73	4,2	5,5		Inertie peau	0,27	0,63	0,72
Inertie intérieure	0,41	4,3	5,2		Inertie intérieure	0,29	0,78	0,86

Couverture besoins		Ventilation naturelle	Surventilation nocturne
		66,3	83,4
Inertie peau	18,4	85,5	99,7
Inertie intérieure	8,9	76,4	94,4

Figure 51 - Valeurs obtenues pour les couplages entre inertie et ventilation

La complémentarité des systèmes semble très intéressante. En effet, l'indice de performance et la couverture des besoins sont améliorés. La synergie est réelle ; cela se ressent bien au niveau de la couverture des besoins. Alors que les systèmes de ventilation sont déjà très efficaces, la couverture des besoins augmente encore, et les systèmes à inertie qui semblent peu efficaces à ce niveau-là deviennent très performants couplés à des systèmes de ventilation.

Les systèmes à inertie permettent d'accroître l'amortissement des systèmes de ventilation par rapport à la solution de référence. L'amortissement reste cependant inférieur à l'amortissement possible avec les systèmes à inertie seuls.

Ces couplages se révèlent donc très intéressants vis-à-vis des deux systèmes et la complémentarité des actions est observée.

### 4.3.2 Minimiser les apports solaires et faciliter l'évacuation des apports internes

Un deuxième couplage d'actions semblait intéressant au niveau de la limitation des apports solaires et internes. En effet, si on met en place des protections solaires, les apports de chaleur externes se verront limités. Les apports internes seront cependant toujours présents et si on ne met pas en place un système pour veiller à les évacuer, le bâtiment très isolé dont le comportement se rapproche d'une bouteille thermos va surchauffer de façon importante. J'ai donc d'une part couplé les protections solaires avec de la ventilation, et d'autre part avec une diminution de l'isolation.

#### 4.3.2.1 Minimiser les apports solaires et ventiler

J'ai donc associé des systèmes limitant les apports solaires (vitrages, brise-soleil et stores) et de ventilation (ventilation naturelle et surventilation nocturne). Je n'ai pas couplé la façade double peau avec la ventilation car il s'agissait d'un système moins efficace au niveau de la couverture des besoins.

IPR		Ventilation naturelle	Surventilation nocturne		Amortissement		Ventilation naturelle	Surventilation nocturne
		4	4,8				1,08	1,93
Vitrages	1,16	4,71	5,27		Vitrages	0,42	0,83	0,95
Brise-soleil	2,05	5,02	5,55		Brise-soleil	1,14	0,9	0,98
Stores	2,25	5,46	5,89		Stores	0,54	0,82	1,09

Couverture besoins		Ventilation naturelle	Surventilation nocturne
		66,3	83,4
Vitrages	53,2	88,4	96,1
Brise-soleil	53,4	86,6	94,2
Stores	79,8	97,3	98,7

Figure 52 - Valeurs obtenues pour les couplages entre protections solaires et ventilation

Les systèmes semblent bien complémentaires puisque l'indice de performance de rafraîchissement, ainsi que la couverture des besoins sont améliorés par rapport aux deux systèmes. Par ailleurs, on observe également une amélioration de l'amortissement pour les brise-soleil couplés. L'amortissement est cependant moins bon pour les stores et l'amélioration des vitrages couplés. Mais il était plutôt mauvais pour les brise-soleil, il a donc été plus facile de l'améliorer. Les couplages ont alors tous un amortissement assez proche.

Les couplages de ces deux actions sont donc très performants d'un point de vue thermique ; les valeurs obtenues pour les différents critères deviennent intéressantes et la compétence des systèmes est vraiment reconnue.

#### 4.3.2.2 Minimiser les apports solaires et isoler moins

Une autre solution pour éviter des surchauffes trop importantes dans le bâtiment serait de diminuer son isolation. Nous avons donc couplé des systèmes limitant les apports solaires avec une diminution de l'isolation du bâtiment. Nous obtenons les résultats suivants.

IPR		Diminution de l'isolation		Amortissement	Diminution de l'isolation
		1,24			0,52
Vitrages	1,16	1,58		Vitrages	0,42
Brise-soleil	2,05	2,86		Brise-soleil	1,14
Stores	2,25	2,64		Stores	0,54

	Couverture besoins	Diminution de l'isolation
		19,9
Vitrages	53,2	52,6
Brise-soleil	53,4	61,2
Stores	79,8	85

Figure 53 - Valeurs obtenues pour les couplages entre protections solaires et la diminution de l'isolation

Les couplages ne se révèlent pas aussi fructueux que les précédents. Malgré une amélioration de l'indice de performance de rafraîchissement, le critère d'amortissement est de manière générale moins bon et la couverture des besoins n'est pas tellement améliorée vis-à-vis des systèmes de protections solaires. Ces couplages ne sont donc pas les plus judicieux à réaliser. Cela peut cependant s'expliquer par le fait que comme l'isolation est diminuée, les amplitudes de température sont moins amorties et davantage de chaleur extérieure peut pénétrer dans le bâtiment par les parois, malgré les protections solaires mises en place au niveau des ouvertures.

#### 4.3.3 Minimiser les apports solaires et apporter de la masse thermique

Un dernier type de combinaison d'actions a été réalisé en couplant des protections solaires (brise-soleil et stores) avec un apport de masse thermique (inertie peau et inertie intérieure). Il s'agit de diminuer les apports solaires directs par les vitrages et de déphaser et amortir les apports de chaleur. Ce sont deux actions qui ne sont pas réellement complémentaires, mais plutôt additive. L'un limite les apports de chaleur par les ouvertures, le second par les parois.

IPR		Inertie peau	Inertie intérieure		Amortissement	Inertie peau	Inertie intérieure
		0,73	0,41			0,27	0,29
Brise-soleil	2,05	2,34	2,31		Brise-soleil	1,14	0,45
Stores	2,25	2,45	2,59		Stores	0,54	0,48

	Couverture besoins	Inertie peau	Inertie intérieure
		18,4	8,9
Brise-soleil	53,4	65,1	58,3
Stores	79,8	84,1	82,2

Figure 54 - Valeurs obtenues pour les couplages entre protections solaires et inertie

Nous observons dans tous les cas une amélioration au niveau de l'indice de rafraîchissement et de la couverture des besoins. L'amortissement qui était bon avec les systèmes de masses thermiques se détériore pour eux lors du couplage. Il s'améliore cependant pour les protections solaires. Les résultats ne constituent pas des améliorations très importantes. Ce couplage est donc intéressant mais nous avons pu observer précédemment de meilleurs résultats.

## 4.4 Conclusion sur les actions des systèmes modélisés

Les couplages réalisés ont été de manière générale des améliorations par rapport à l'utilisation de systèmes seuls. L'indice de performance en rafraîchissement et la couverture des besoins étaient toujours meilleurs. Cependant, généralement, lorsque l'un des deux systèmes couplés avait un

amortissement meilleur que l'autre, il se trouve généralement moins bon lors du couplage. Les performances ne se cumulent pas en matière d'amortissement.

Voici un tableau permettant de regrouper les valeurs des critères pour les couplages réalisés :

		Indice de performance de rafraîchissement	Critère d'amortissement	Besoins en froid couverts par le système (%)
Apporter de la masse thermique et ventiler	Inertie peau et ventilation naturelle	4,2	0,63	85,5
	Inertie peau et surventilation nocturne	5,5	0,72	99,7
	Inertie intérieure et surventilation nocturne	5,15	0,86	94,4
	Inertie intérieure et ventilation naturelle	4,27	0,78	76,4
Minimiser les apports solaires et ventiler	Vitrages et surventilation nocturne	5,27	0,95	96,1
	Vitrages et ventilation naturelle	4,71	0,83	88,4
	Brise-soleil et surventilation nocturne	5,55	0,98	94,2
	Brise-soleil et ventilation naturelle	5,02	0,90	86,6
	Stores extérieurs et surventilation nocturne	5,89	1,09	98,7
	Stores extérieurs et ventilation naturelle	5,46	0,82	97,3
Minimiser les apports solaires et diminuer l'isolation	Vitrages et diminution de l'isolation	1,58	0,45	52,6
	Brise-soleil et diminution de l'isolation	2,86	0,66	61,2
	Stores extérieurs et diminution de l'isolation	2,64	0,58	85,0
Minimiser les apports solaires et apporter de la masse thermique	Brise-soleil et inertie peau	2,34	0,45	65,1
	Brise-soleil et inertie intérieure	2,31	0,53	58,3
	Stores extérieurs et inertie peau	2,45	0,48	84,1
	Stores extérieurs et inertie intérieure	2,59	0,51	82,2

Figure 55 - Valeurs des critères obtenues pour les couplages

On observe clairement de très bonnes performances pour les couplages entre masse thermique et ventilation, ainsi qu'entre limitation des apports solaires et ventilation.

Nous allons désormais replacer les systèmes et couplages étudiés dans un contexte plus large afin d'observer comment ils se positionnent les uns par rapport aux autres une fois pris en compte les aspects économiques et environnementaux notamment. Nous pourrions ainsi valider ou non la dominance des solutions avec de bonnes performances thermiques une fois pris en compte d'autres critères. Cela permettra ensuite de réaliser une optimisation du bâtiment d'étude.

## 5 ETUDE DE CAS : OPTIMISATION DES MAISONS EVOLUTIVES

Il s'agit désormais de donner des stratégies de choix de solutions de rafraîchissement passif. Il est nécessaire de remettre les systèmes proposés dans un contexte plus large, et ainsi les évaluer vis-à-vis de critères autres que thermiques. Seuls les systèmes qui ont pu être modélisés sur les logiciels vont pouvoir être évalués ; il est en effet nécessaire de connaître les caractéristiques thermiques de chacun. Notons que cette évaluation globale du bâti est à mettre en perspective avec la qualité environnementale du bâti qui adopte une vision transversale concernant la construction d'un bâtiment. Nous allons donc effectuer une analyse multicritère des différents systèmes et couplages, puis nous utiliserons cette analyse afin d'optimiser les maisons évolutives, cas d'étude proposé par Arbor&Sens.

### 5.1 Prise en compte d'autres critères

Nous avons d'ores et déjà retenu les critères qui permettront d'évaluer l'aspect thermique des systèmes. La prise en compte d'autres critères, notamment économiques et environnementaux, est nécessaire afin d'avoir un point de vue plus large et complet sur chaque système.

#### 5.1.1 Pertinence de la solution vis-à-vis du fonctionnement global du bâtiment

Comme nous l'avons abordé dans la première partie, il est intéressant d'observer le système dans son rapport avec l'ensemble du bâtiment et de son fonctionnement. Il devient en effet nécessaire, dans un souci d'économie, de privilégier des solutions qui assurent plusieurs fonctions et qui n'en contredisent pas d'autres. Par exemple, une approche synthétique et multicritère de la paroi qui assure plusieurs fonctions est à rechercher ; la paroi doit résoudre plusieurs problèmes simultanément : constructif, thermique,... de façon économique ; il faut éviter d'avoir une pensée additive ou corrective.

##### 5.1.1.1 Réversibilité été/hiver

Tout d'abord, la réversibilité du système en hiver est à prendre en compte. Il est en effet important que, à l'image de la climatisation dans une maison passive, le système de rafraîchissement passif n'entraîne pas une hausse trop importante du chauffage en hiver. Le bilan global du bâtiment en serait grandement pénalisé. Ce critère est pris en compte avec l'augmentation des besoins en chauffage pour chaque système. Ce critère est pour moi primordial ; il s'agit réellement d'un problème de fond. On pourrait croire que la recherche de confort en hiver et en été sont totalement dissociées et opposées, alors que des solutions réversibles existent et doivent être privilégiées.

##### 5.1.1.2 Interaction avec d'autres paramètres du bâtiment

Un deuxième critère permet de regrouper les autres caractéristiques du bâtiment sur lesquels le système peut influencer.

Nous pouvons en premier lieu noter la lumière naturelle. Il s'agit là d'un choix toujours très subjectif à réaliser entre les apports solaires thermiques et les apports solaires lumineux en été. Soit il fait plus chaud, soit il est nécessaire d'utiliser l'éclairage artificiel. Il s'agit donc d'un critère à prendre en compte.

Par ailleurs, l'intérêt structurel de la solution doit entrer dans les critères de choix. Il est en effet intéressant qu'une solution de rafraîchissement passif puisse simultanément jouer un rôle

structurel, permettant d'économiser alors sur un autre poste. Cette vision globale éviterait alors d'avoir une action corrective sur le bâtiment qui restera nécessairement moins rentable et efficace.

Enfin, les problèmes acoustiques sont parfois en contradiction avec une volonté de rafraîchissement passif. Il est alors intéressant de voir de quelle manière le système interagit avec les problèmes acoustiques qui entrent également dans les paramètres de confort des occupants.

#### 5.1.1.3 Rôle de l'utilisateur

Il est aussi nécessaire de prendre en compte le rôle de l'utilisateur dans le système de rafraîchissement passif étudié. C'est en effet un paramètre important dans les bâtiments performants d'aujourd'hui. Son comportement est primordial en ce qui concerne l'éclairage artificiel, l'ouverture des fenêtres, la fermeture des stores,... afin d'atteindre les consommations d'énergie et le niveau de confort souhaités. Afin d'évaluer correctement les systèmes, il est donc important de noter le niveau de dépendance au comportement de l'utilisateur.

### 5.1.2 Notion de coût du système

Le critère économique est évidemment important dans le cadre d'une évaluation globale d'un système. Ce coût se décompose en plusieurs volets.

Tout d'abord, il est nécessaire de connaître le coût d'investissement, qui comprend la fourniture et pose des éléments. Ces coûts m'ont été donnés par Arbor&Sens en se référant à des projets qu'ils ont réalisés.

Cette notion de coût prend également en compte les charges de chauffage ou de climatisation. Il est en effet intéressant de quantifier en euros le coût annuel d'énergie en considérant la mise en place de chacun des systèmes. Par ailleurs, le choix du type d'énergie pourrait être discuté. Nous avons fait l'hypothèse d'un chauffage électrique et ainsi fixé le prix de l'énergie à 0,126€/kWh (source MEDDTL).

### 5.1.3 Intérêt environnemental

Un dernier critère est enfin à considérer : l'aspect environnemental, au cœur de tous les débats aujourd'hui, mis en avant par tous. On peut le quantifier en se référant aux tonnes de CO<sub>2</sub> évitées par exemple, mais en réalité, les critères précisés précédemment sont aussi importants. L'idéal serait également de quantifier l'énergie grise consommée par les systèmes étudiés. Ce n'est cependant pas toujours très simple, notamment lorsqu'il s'agit de processus techniques, et non uniquement de matériaux. L'équivalent d'émissions de CO<sub>2</sub> pour 1 kWh d'énergie est fixé à 0,09 kg CO<sub>2</sub>, d'après l'Agence Internationale de l'Energie.

## 5.2 Analyse multicritère

Nous avons donc mis en avant différents critères qui vont permettre de mettre en avant des solutions selon l'importance donnée aux différents volets. Cette analyse multicritère n'a évidemment pas de valeur universelle mais elle permet de mettre en avant des caractéristiques pour les solutions modélisables au niveau du bâtiment de référence.

En annexe B se trouve un tableau récapitulant les valeurs attribuées à chaque critère pour chaque solution.

Nous allons cependant mettre en place une notation pour chaque critère avec une valeur de 1, 2 ou 3 afin de simplifier l'évaluation. La note de 1 correspondra à quelque chose de positif au sens du confort et du développement durable, la note de 2 sera une solution moyenne ou avec peu d'influence sur le critère en question, et la note de 3 ira à des solutions ayant un impact négatif.

Voici donc les critères retenus et les notations attribuées correspondantes :

		1	2	3
THERMIQUE	Indice de performance de rafraîchissement	>3,5	entre 2,5 et 3,5	<2,5
	Critère d'amortissement	<0,8	entre 0,8 et 1,2	>1,2
	Besoins en froid couverts par le système (%)	>85%	entre 50 et 85 %	<50%
ECONOMIQUE	Coût investissement	<0€	entre 0 et 3000€	>3000€
	Temps de retour	<10 ans	entre 10 et 20 ans	>20 ans
FONCTIONNEMENT GLOBAL	Réversibilité hiver / été	qualitatif		
	Structure	qualitatif		
	Lumière	qualitatif		
	Implication utilisateur	qualitatif		
ENVIRONNEMENT	kg de CO2 évités	>100	entre 50 et 100	<50

Figure 56 - Etablissement de la notation pour chaque critère

Cela permet alors d'obtenir une note pour chaque système ou couplage. Il s'agit de tester différentes pondérations afin d'observer quel serait le système le plus intéressant globalement.

Nous allons réaliser une première pondération en donnant le même poids aux quatre grands critères étudiés : thermique, économique, fonctionnement global et environnement.

	Poids
THERMIQUE	1
ECONOMIQUE	1
FONCTIONNEMENT GLOBAL	1
ENVIRONNEMENT	1

Figure 57 - Première pondération

Les solutions qui se révèlent les mieux classées sont :

Inertie peau et surventilation nocturne
Inertie peau et ventilation naturelle
Ventilation naturelle et inertie intérieure
Diminution de l'isolation et stores extérieurs
Surventilation nocturne et inertie intérieure

Figure 58 - Classement des solutions en réponse à la première pondération

Une deuxième pondération consiste à donner davantage de poids aux aspects thermique et environnemental.

	Poids
THERMIQUE	3
ECONOMIQUE	1
FONCTIONNEMENT GLOBAL	1
ENVIRONNEMENT	3

Figure 59 - Deuxième pondération

Les solutions qui se révèlent alors les mieux classées sont :

Inertie peau et surventilation nocturne
Inertie peau et ventilation naturelle
Ventilation naturelle et inertie intérieure
Diminution de l'isolation et stores extérieurs
Surventilation nocturne et inertie intérieure

Figure 60 - Classement des solutions en réponse à la deuxième pondération

On retrouve exactement les mêmes couplages qu'avec la pondération précédente. On va donc faire une troisième pondération afin de vérifier les tendances observées où on mettra en avant les critères économiques et le fonctionnement global du bâtiment.

	Poids
THERMIQUE	1
ECONOMIQUE	3
FONCTIONNEMENT GLOBAL	2
ENVIRONNEMENT	1

Figure 61 - Troisième pondération

On observe alors une petite variante dans le classement des cinq meilleures solutions :

Inertie peau et surventilation nocturne
Inertie peau et ventilation naturelle
Ventilation naturelle et inertie intérieure
Diminution de l'isolation et stores extérieurs
Brise-soleil et inertie peau

Figure 62 - Classement des solutions en réponse à la troisième pondération

Les quatre premières solutions restent les mêmes ; les brise-soleil avec de l'inertie en parois extérieures semblent être une solution rentable et s'intégrant bien dans le fonctionnement global du bâtiment.

Cette analyse multicritère a permis de mettre en avant des solutions qui sont intéressantes à tout point de vue et qui semblent bien adaptées à la maison évolutive étudiée. Nous allons ainsi pouvoir passer à l'optimisation.

### 5.3 Optimisation des maisons évolutives

Grâce à l'ensemble de l'étude réalisée, il est désormais possible de proposer une solution afin d'optimiser les maisons évolutives qui ont été mon sujet d'étude tout au long de ce travail.

Il s'agira donc d'optimiser les systèmes pour obtenir un bilan intéressant sur une année complète. Un travail de modélisation est donc à réaliser afin d'optimiser notamment le comportement en hiver. L'impact avait néanmoins été abordé dans le cadre du critère « Réversibilité hiver/été ». Il sera alors possible de regarder l'impact des solutions sur les besoins en chauffage.

Au vu des résultats de l'analyse multicritère réalisée, je ne pense pas modéliser plusieurs optimisations de systèmes. En réalité, les solutions inertie peau avec surventilation nocturne ou avec ventilation naturelle sont basées sur le même principe et une optimisation conduira à une combinaison des deux systèmes. Je modéliserai donc uniquement une solution avec inertie sur les



parois extérieures et de la ventilation en gérant les débits selon les saisons. Par ailleurs, la diminution de l'isolation ne sera pas un bon système vis-à-vis du confort d'hiver et les stores sont fermés à 80% les journées d'été, ce qui semble assez peu viable. Cette solution est en fait un couplage de solutions qui sont peu adaptées au confort d'hiver et peu vivables. Je n'optimiserai donc pas cette solution.

Par ailleurs, comme les solutions avec l'inertie intérieure sont toujours un peu moins performantes que celle avec de l'inertie au niveau des parois extérieures, je n'optimiserai pas non plus les solutions avec de l'inertie à l'intérieur.

J'ai donc repris la modélisation du couplage inertie peau et surventilation nocturne en modifiant les débits afin d'obtenir les résultats en termes de besoins de chauffage et de climatisation les plus faibles.

Le scénario de ventilation mis en place est donc le suivant :

1 Ventilation 0.18 1 Janvier au 7 Janvier	14 Ventilation 0.18 2 Avril au 8 Avril	27 Ventilation 4.1 17h 2 Juillet au 8 Juillet	40 Ventilation 3 17h 1 Octobre au 7 Octobre
2 Ventilation 0.18 8 Janvier au 14 Janvier	15 Ventilation 3 17h 9 Avril au 15 Avril	28 Ventilation 4.1 17h 9 Juillet au 15 Juillet	41 Ventilation 3 17h 8 Octobre au 14 Octobre
3 Ventilation 0.18 15 Janvier au 21 Janvier	16 Ventilation 3 17h 16 Avril au 22 Avril	29 Ventilation 4.1 17h 16 Juillet au 22 Juillet	42 Ventilation 3 17h 15 Octobre au 21 Octobre
4 Ventilation 0.18 22 Janvier au 28 Janvier	17 Ventilation 3 17h 23 Avril au 29 Avril	30 Ventilation 4.1 17h 23 Juillet au 29 Juillet	43 Ventilation 0.18 22 Octobre au 28 Octobre
5 Ventilation 0.18 29 Janvier au 4 Février	18 Ventilation 3 17h 30 Avril au 6 Mai	31 Ventilation 4.1 17h 30 Juillet au 5 Aout	44 Ventilation 0.18 29 Octobre au 4 Novembre
6 Ventilation 0.18 5 Février au 11 Février	19 Ventilation 3 17h 7 Mai au 13 Mai	32 Ventilation 4.1 17h 6 Aout au 12 Aout	45 Ventilation 0.18 5 Novembre au 11 Novembre
7 Ventilation 0.18 12 Février au 18 Février	20 Ventilation 4.1 17h 14 Mai au 20 Mai	33 Ventilation 4.1 17h 13 Aout au 19 Aout	46 Ventilation 0.18 12 Novembre au 18 Novembre
8 Ventilation 0.18 19 Février au 25 Février	21 Ventilation 4.1 17h 21 Mai au 27 Mai	34 Ventilation 4.1 17h 20 Aout au 26 Aout	47 Ventilation 0.18 19 Novembre au 25 Novembre
9 Ventilation 0.18 26 Février au 4 Mars	22 Ventilation 4.1 17h 28 Mai au 3 Juin	35 Ventilation 4.1 17h 27 Aout au 2 Septembre	48 Ventilation 0.18 26 Novembre au 2 Décembre
10 Ventilation 0.18 5 Mars au 11 Mars	23 Ventilation 4.1 17h 4 Juin au 10 Juin	36 Ventilation 4.1 17h 3 Septembre au 9 Septembre	49 Ventilation 0.18 3 Décembre au 9 Décembre
11 Ventilation 0.18 12 Mars au 18 Mars	24 Ventilation 4.1 17h 11 Juin au 17 Juin	37 Ventilation 3 17h 10 Septembre au 16 Septembre	50 Ventilation 0.18 10 Décembre au 16 Décembre
12 Ventilation 0.18 19 Mars au 25 Mars	25 Ventilation 4.1 17h 18 Juin au 24 Juin	38 Ventilation 3 17h 17 Septembre au 23 Septembre	51 Ventilation 0.18 17 Décembre au 23 Décembre
13 Ventilation 0.18 26 Mars au 1 Avril	26 Ventilation 4.1 17h 25 Juin au 1 Juillet	39 Ventilation 3 17h 24 Septembre au 30 Septembre	52 Ventilation 0.18 24 Décembre au 30 Décembre

Figure 63 - Scénario de ventilation dans le bâtiment optimisé

Trois périodes sont donc distinguées. Pendant l'hiver, le débit de ventilation hygiénique avec la VMC double flux est conservé. En mi-saison, un autre scénario a été mis en place : il s'agit plutôt de ventilation naturelle. En effet, la nuit, un débit de 1 vol/h est maintenu et la journée, il atteint les 3 vol/h. En été, on a mis en place une surventilation nocturne avec un débit de 4 vol/h la nuit et de 1 vol/h la journée.

Nous obtenons alors des résultats très satisfaisants. Les besoins en climatisation passent de 14 kWh/an/m<sup>2</sup> à 0 et les besoins en chauffage n'évoluent pas en restant à 14 kWh/m<sup>2</sup>/an. Il aurait certainement été possible de les améliorer. Ce n'était cependant pas l'objet du travail.

Voici le graphique présentant l'évolution de la température au cours de l'année du séjour dans le bâtiment de référence et le bâtiment optimisé.

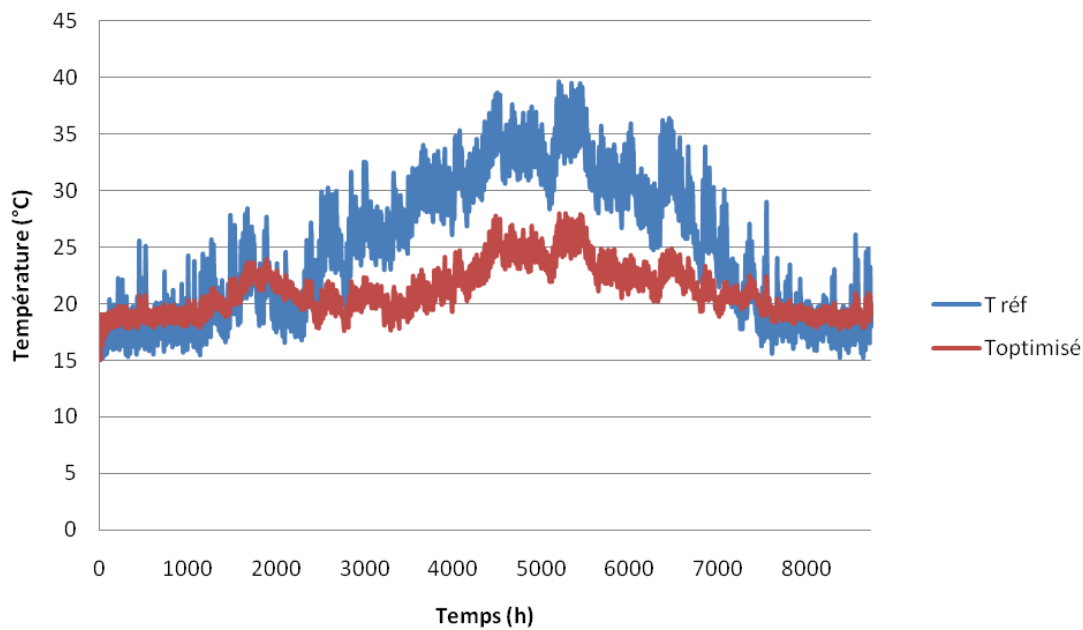


Figure 64 - Température dans le bâtiment de référence et le bâtiment optimisé

Cette solution permet donc de supprimer les besoins en climatisation sans augmenter les besoins de chauffage ce qui est tout à fait positif et montre bien qu'une bonne gestion de la ventilation permet de supprimer les inconforts en été. Notons également les apports de confort par l'inertie qui permet d'amortir les variations de température.

Nous pouvons donc conclure sur les avantages de ce couplage qui est par ailleurs une solution peu coûteuse, s'intégrant bien au bâtiment dans sa globalité et ayant un faible impact sur l'environnement, comme a pu le mettre en avant l'analyse multicritère.

Cette solution nécessite cependant une bonne gestion des débits de ventilation, c'est pourquoi il semble nécessaire d'intégrer un système de régulation car il semble compliqué pour l'utilisateur de le faire. La RGB semble donc un moyen de parvenir à une bonne régulation qui permet d'obtenir effectivement les performances annoncées.

## CONCLUSION

Je vais vous présenter pour conclure un bilan sur les résultats obtenus, les limites à ce travail, un retour d'expérience puis les améliorations et ouvertures qui pourront être apportées.

### Résultats obtenus

Ce travail de fin d'étude a été l'occasion de réaliser un état de l'art sur les systèmes de rafraîchissement passif et leurs actions. Les principes sont généralement assez variés mais complémentaires.

Ce travail a permis d'apporter différents éléments de méthode dans le cadre de l'optimisation du comportement thermique d'un bâtiment.

Il s'agit tout d'abord d'être prudent vis-à-vis des résultats en fonction du logiciel utilisé. Les données climatiques ne sont pas les mêmes et la modélisation d'un bâtiment identique donne des évolutions de températures intérieures différentes ; la sensibilité des logiciels étudiés est en effet différente.

Par ailleurs, les logiciels ne permettent pas de modéliser tous les systèmes de rafraîchissement passif aujourd'hui couramment mis en œuvre, comme les toitures végétalisées ou les façades double peau. La non-prise en compte du micro-climat est également un frein important à la justesse de la modélisation. L'impossibilité de prévoir de façon correcte le comportement d'un bâtiment ne permet pas de dimensionner précisément un bâtiment dans sa globalité. Il est alors nécessaire de surdimensionner les systèmes mis en place ; les éléments non modélisables ne pouvant être qu'une source d'amélioration des performances du bâtiment.

Enfin, ce travail a permis de mettre en avant les difficultés rencontrées lors de la modélisation de certains systèmes. Malgré la présence de modules spécifiques à certains systèmes, d'autres nécessitent de réelles astuces qu'il faut maîtriser pour espérer obtenir une action correcte du système. Ce sont des manipulations qui ne sont pas naturelles pour l'utilisateur. Les développeurs ont donc encore du travail à réaliser pour obtenir un logiciel réellement accessible à l'ensemble des utilisateurs.

Lors de ce travail, différents critères d'évaluation des performances des systèmes de rafraîchissement passif ont été mis en place, analysés, puis évalués. Nous avons retenu trois critères permettant de bien saisir l'action des systèmes de rafraîchissement passif modélisés. Il s'agit d'un outil d'analyse intéressant qui pourra être utilisé à nouveau lors d'autres études.

La modélisation des différents systèmes de rafraîchissement passif et son analyse ont permis de mettre en avant des systèmes et des couplages plus performants vis-à-vis des critères retenus. Les critères étant assez objectifs et les systèmes n'étant pas optimisés, il s'agit réellement d'une analyse de l'action qui a été réalisée. Les conclusions obtenues peuvent donc être élargies, tout en conservant à l'esprit qu'il s'agit d'une maison individuelle plutôt compacte avec de bonnes performances de départ.

L'intégration des solutions modélisées à un contexte global, à la fois économique et environnemental a permis de mettre en avant certains couplages qui se révèlent performants dans tous les domaines. Ces systèmes ont alors été intégrés à l'optimisation de la maison évolutive d'Arbor&Sens.

### Limites de ce travail

La démarche suivie pour ce travail de fin d'étude a été assez complète, avec un état de l'art, la mise en place de critères, une analyse des solutions, mais également des critères, une remise en contexte global et une application à un cas réel. Certaines limites sont cependant à noter.

Tout d'abord, seulement deux logiciels ont été utilisés. Ce travail n'a permis qu'une comparaison entre ces deux-là. On aurait pu envisager de compléter l'étude avec des logiciels plus ou moins précis afin d'affiner la comparaison. En outre, aucune comparaison avec la réalité n'a pu être réalisée, ce qui semble tout de même à la base de la nécessité de modéliser : essayer de prévoir le comportement réel du bâtiment.

Par ailleurs, le support de l'étude était une maison bien particulière et il demeure difficile de tirer des conclusions générales sur les performances des systèmes. Par ailleurs, la prise en compte du micro-climat, de l'orientation, de la typologie de bâtiment conditionnent les résultats que l'on pourrait obtenir. Une vigilance est donc nécessaire : chaque bâtiment est le siège d'une réaction différente à l'ajout d'un système de rafraîchissement passif. Ce travail n'a donc pas permis de mettre en place une méthodologie universelle.

Notons également la non-optimisation des systèmes modélisés. J'ai en effet simplement modélisé de façon grossière des systèmes afin d'observer leur action sur le bâtiment. Des résultats un peu différents auraient pu être observés. L'analyse multicritère n'est donc pas tout à fait exacte puisque les performances pourraient être optimisées grâce à une modélisation plus fine.

Il aurait pu être intéressant de réaliser des couplages avec trois systèmes ou plus afin d'être plus proche de la réalité car la complémentarité des systèmes est souvent mise en œuvre. L'étude aurait donc pu être complétée.

## **Retour d'expérience**

Ayant passé cinq mois sur un chantier en tant que conducteur de travaux chez Eiffage Construction en stage MSP, il me paraissait important de réaliser un vrai travail de recherche afin de compléter mon cursus. C'est pourquoi j'ai choisi de réaliser mon TFE dans une entreprise qui me proposait ce type de travail.

L'expérience que j'ai vécue a répondu à mes attentes ; je n'étais pas directement productive pour l'entreprise et avait donc un statut à part me permettant d'organiser mon travail de la manière que je souhaitais. Cela impliquait une certaine liberté mais également une nécessaire organisation vis-à-vis du respect des délais imposés. Marine Morain m'a bien suivie tout au long de ce travail et je l'en remercie car j'ai eu quelques périodes de doute et parfois du mal à me lancer dans des modélisations, sans savoir où j'allais vraiment.

J'ai pris conscience de l'importance du travail de bibliographie qui permet d'avoir une vision assez globale du sujet, de connaître les travaux déjà réalisés et ainsi de pouvoir orienter mon travail. J'ai rencontrées certaines difficultés à voir ce que je pouvais apporter avec ce travail. J'avais parfois l'impression que beaucoup de choses avaient été dites et qu'à mon niveau, avec les outils assez sommaires qui étaient à ma disposition, je ne pourrais pas réaliser des études complémentaires à celles existantes. J'ai lu un certain nombre de thèses et devais donc revoir mes ambitions à la baisse, même si j'aurais aimé parfois aller plus loin.

J'ai également rencontré des représentants pour certains produits (MCP Energain et Intuities Imerys). Ce fut intéressant d'échanger sur le sujet du rafraîchissement passif avec des professionnels impliqués dans la réalité économique et de chantier.

Par ailleurs, ayant utilisé deux logiciels de modélisation thermique dynamique au cours de ces quatre mois, je suis désormais assez à l'aise dans ce domaine. La compréhension de l'architecture des logiciels est également importante car elle s'applique à d'autres logiciels que je serai certainement amenée à utiliser plus tard.

Il s'agissait d'un réel travail d'ingénieur en bureau d'études ; ce fut donc une expérience très importante pour la suite de mon parcours professionnel.

## Ouverture

Nous avons évoqué la nécessité de comparer les résultats obtenus avec la réalité, afin d'observer quel logiciel est le plus proche de la réalité. Nous avons en effet dû nous contenter d'une simple comparaison entre les deux logiciels. L'INES (Institut National de l'Energie Solaire) basé à Chambéry est en train de construire et instrumenter des bâtiments performants réalisés dans différents matériaux et équipés de différents systèmes, les maisons INCAS. Leur objectif est entre autres le développement d'une méthodologie de mesure en continu de la performance énergétique des bâtiments BBC, et ainsi pouvoir comparer la prédiction des logiciels de modélisation thermique dynamique à la réalité. Ces maisons expérimentales permettront également d'évaluer le confort dans ce type de bâtiments.

Ces maisons sont cependant sous-exploitées car l'instrumentation n'est pas encore au point. Le traitement des données des capteurs notamment a posé des problèmes qui n'étaient pas prévus. Par conséquent, l'exploitation n'en est qu'au début. Par ailleurs, il n'est pas encore possible de simuler des gains internes dans les maisons car rien n'est installé. Ainsi, comparer les simulations des logiciels et leurs scénarios d'occupation et de gains internes à la réalité n'est pas encore possible.

Cette plate-forme INCAS est cependant une grande avancée dans le cadre de la modélisation thermique dynamique qui doit s'adapter aux exigences actuelles. Comme nous l'avons vu, il est en effet nécessaire que tous les systèmes, notamment de rafraîchissement passif puissent être modélisables, afin de ne pas surdimensionner des systèmes.

Par ailleurs, afin de poursuivre ce travail, il serait nécessaire d'évoquer le problème de la mi-saison. Le confort d'hiver est plutôt bien traité, celui d'été est en cours de prise en compte, avec notamment la mise en place de la RT 2012. Cependant, le confort en mi-saison n'est que peu évoqué et il s'agit de périodes transitoires qui représentent une période de l'année assez longue. Des procédés particuliers ne sont pas forcément à mettre en place mais il s'agit de ne pas l'oublier et ne pas l'aggraver par des systèmes favorables au confort d'été ou celui d'hiver.

Nous avons pu mettre en avant la place de plus en plus importante de l'utilisateur dans le bon fonctionnement des bâtiments performants. Nous pouvons alors nous poser la question de la régulation automatisée pour être sûr du bon fonctionnement du bâtiment et l'atteinte des performances prévues. L'utilisateur n'est cependant peut-être pas prêt à vivre dans une maison entièrement automatisée et souhaite être actif dans la recherche de confort. Il s'agirait alors de mettre en place des témoins avertissant la nécessité de modifier le débit de ventilation. Il s'agit d'une solution qui pourrait fonctionner et permettre une bonne régulation si l'utilisateur est attentif. Des travaux en RGB (Régulation et Gestion du Bâtiment) pourraient alors d'optimiser un tel système.

Les bâtiments performants promettent alors de belles avancées en matière d'architecture, en parallèle de celles en matière d'ingénierie. Le souci de la cohérence du bâtiment avec son environnement et la recherche d'un confort intérieur, tout en privilégiant une sobriété et une efficacité énergétique du bâtiment, seront recherchés.

La conception des bâtiments devra par exemple permettre la ventilation naturelle des bâtiments, mais également la mise en place stratégique de l'inertie ou de l'isolation. L'esthétique de la façade devra également intégrer des masques architecturaux ou des tailles d'ouvertures adaptées.

La réhabilitation pose également de nouvelles problématiques qui nécessiteront une bonne capacité d'adaptation des concepteurs et la recherche de solutions appropriées.

Plus que jamais, ingénieurs et architectes devront donc travailler dans un but commun d'adaptation à l'environnement et de performance énergétique.

## BIBLIOGRAPHIE

- AHMAD M.**, *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments*, Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2004, 255p.
- ALE** (Agence Locale de l'Energie), *Confort d'été : Solutions innovantes et retours d'expériences*, 2007, 19p.
- ALLARD F.**, *Natural ventilation in buildings, a design handbook*, Ed. James and James, 1998, 356p.
- ARENE PACA**, *Confort d'été en Provence Alpes Côte d'Azur*, publié par l'ARENE, 1998, 50p.
- BELARBI R.**, **SPERANDIO M.**, **ALLARD F.**, *Evaluation des bâtiments munis de systèmes de rafraîchissement passif. Application au cas de l'évaporation adiabatique*, Revue générale de thermique, Université de la Rochelle, 1996, pp. 547-561
- BOURDOUKAN P.**, **WURTZ E.**, **SPERANDIO M.**, **JOUBERT P.**, *Global efficiency of direct flow vacuum collectors in autonomous solar dessicant cooling : simulation and experimental results*, Proceedings : Building Simulation, 2007, pp.342-347
- BREESCH H.**, **BOSSAER A.**, **JANSSENS A.**, *Passive cooling in a low-energy office building*, Solar Energy, 2004, pp. 682-696
- BRUN A.**, **SPITZ C.**, **WURTZ E.**, *Analyse du comportement de différents codes de calcul dans le cas de bâtiments à haute efficacité énergétique*, LOCIE, CEA INES, IX<sup>e</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes à Lille, 2009, 6p.
- CHABERT F.**, **FALGARI J.**, *L'inertie thermique dans le bâtiment*, Formation HQE, ENSAL, 2004
- CHAUVIN A.**, *Dissémination des principes de rafraîchissement passif nocturne à destination des architectes et des concepteurs*, TFE de l'ENTPE, Lyon, 2003, 86p.
- COURGEY S.**, **OLIVA J.P.**, *La conception bioclimatique*, Ed. Terre Vivante, 2006, 239p.
- DERRADJI M.**, **SAHNOUNET T.**, *Conception et modélisation de système de ventilation et de rafraîchissement naturel pour les régions à climat chaud*, Sciences et Technologie D n°27, juin 2008, pp.9-16
- DUFRESNE J.L.**, **LAHELLEC A.**, **CHOUNET L.M.**, *Procédure d'identification inclusive d'un système thermique. Etude de cas : caractérisation d'un capteur solaire à air en régime dynamique*, Equipe RAMSES du CNRS, Revue Physique Appliquée 25, 1990, pp.1139-1160
- DUMBLIAUSKAITE M.**, **SEOUD K.**, *Conception d'une station météorologique bioclimatiques à Rennes*, Rapport ENPC, 2007, 61p.
- DUNSTER B.**, **SIMMONS C.**, **GILBERT B.**, *The Zedbook*, Ed. Taylor et Francis, 2008, 260p.
- FAURE X.**, *Optimisation d'enveloppe hybride pour bâtiment à haute performance énergétique*, Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007, 233p.
- FILFLI S.**, *Optimisation des bâtiments / système pour minimiser les consommations dues à la climatisation*, Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 2006, 200p.
- FERNANDEZ P.**, **LAVIGNE P.**, *Concevoir des bâtiments bioclimatiques – Fondements et méthodes*, Ed. Le Moniteur, 2009, 430p.
- FLORY-CELINI C.**, *Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant*, Thèse de doctorat à l'Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008, 212p.
- FRAISSE G.**, **TRILLAT-BERDAL V.**, **SOUYRI B.**, *Amélioration du confort d'été et réduction des besoins de chauffage dans les maisons à ossature bois*, IBPSA France à la Réunion, 2006, 6p.
- GALLINELLI P.**, **HOLLMULLER P.**, **LACHAL B.**, **WEBER W.**, *Rafraîchissement passif de bâtiments par ventilation déphasée et systèmes apparentés*, Université de Genève, 2008, 43p.
- GIVONI B.**, *Indoor temperature reduction by passive cooling systems*, Solar Energy, 2009, 35p.
- [HOL 2002]

**HOLLMULLER P.**, *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*, Thèse de doctorat, Université de Genève, 2002, 126p.

**HOLLMULLER P.**, LACHAL B., ZGRAGGEN J.M., *Déphaseur thermique diffusif*, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, 2004, 100p.

**HOLLMULLER P.**, LACHAL B., PAHUD D., *Rafraîchissement par geocooling : Bases pour un manuel de dimensionnement*, Rapports de recherche du CUEPE N°5, Université de Genève, Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie (CUEPE), 2005, 96p.

**HOLLMULLER P.**, LACHAL B., *Geocooling : Utilisation d'un collecteur souterrain à eau pour le chauffage et le rafraîchissement d'un bâtiment administratif*, CISBAT 05, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005, 6p.

**HOLLMULLER P.**, GALLINELLI P., LACHAL B., WEBER W., *Extensive sensitivity analysis of diverse ventilation cooling techniques for a typical administrative building in Mid-European climate*, Eurosun 2008, 8p.

**HUSAUNNDEE A.**, *Modélisation des installations du génie climatique en environnement de simulation graphique*, Thèse ENPC, 1999, 174p.

**ISAAC** (Istituto di Sostenibilita Applicata all Ambiente Costruito), *Aymon, bâtiment administratif (Sion) – Utilisation de la cave comme échangeur air-sol*, Geocooling, Fiche d'exemple n°9, 2002, 3p.

**IZARD J.L.**, HUEBER C., *Conception architecturale et confort d'été*, Groupe ABC, 1989, 287p.

**IZARD J.L.**, *Architectures d'été : Construire pour le confort d'été*, Ed. Edisud, 1993, 141p.

**JOUSSELIN F.**, FAURE X., JOHANNES K., QUENARD D., PIERSON P., *Enveloppe hybride pour bâtiment économe*, IUT1 Grenoble et CSTB, 2008, 8p.

**KINAB E.**, *Optimisation des performances non nominales des pompes à chaleur réversibles pour le secteur tertiaire*, Thèse des Mines de Paris, 2009, 195p.

**LEFEBVRE G.**, *Comportement thermique dynamique des bâtiments : simulation et analyse*, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, B 2 041, 1994, 19p.

**LAUGIER S.**, *Façade active, le principe de la façade double peau*, 2007, 7p.

**LEVY P.**, *La rénovation écologique*, Ed. Terre Vivante, 2010, 317p.

**LOYAU F.**, *Puits canadien et ventilation basse énergie*, Ed. L'inédite, 2009, 95p.

**MAEREFAT M.**, HAGHIGHI A.P., *Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney*, Renewable Energy, 2010, pp. 2316-2324

**MAIZIA M.**, *Pompes à chaleur et habitat*, Les cahiers du Club d'Ingénierie Prospective énergie et environnement (CLIP), n°18, 2007, 50p.

**MAZRIA E.**, *Le guide de la maison solaire*, Ed. Parenthèses, 1979, 339p.

**MOUJALLED B.**, *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés*, Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007, 330p.

**MOUNAJED R.**, *La modélisation des transferts d'air dans les bâtiments – Application à l'étude de la ventilation*, Thèse ENPC, 1989, 225p.

**MUNDET S.**, *Application de systèmes de rafraîchissement passif dans un climat chaud et humide*, TFE de l'ENTPE, Lyon, 2006, 101p.

**NAMIAS O.**, *Concevoir avec l'énergie*, Dossier paru dans D'A n°154 – Avril 2006

**NICOLAS J.**, VASEL J.L., *Base de calcul pour le dimensionnement d'une tour de refroidissement à tirage naturel*, European Journal, Vol 37, N°1, 1991, pp.19-29

**PEUPORTIER B.**, THIERS S., *Des éco-techniques à l'éco-conception des bâtiments*, Journée thématique SFT-IBPSA, 2006, 8p.

**PEUPORTIER B.**, GUIAVARCH A., MARCONATO B., SACCHI H., *Murs solaires à isolation renforcée*, ADEME, Journée thématique Enveloppe du Bâtiment, 2011, 24p.

**SAFER N.**, *Modélisation des façades de type double-peau équipées de protections solaires : approches multi-échelles*, Thèse de l'INSA de Lyon, 2006, 316p.

**SALOMON T.**, AUBERT C., *Fraîcheur sans clim'*, Ed. Terre Vivante, 2004, 160p.

**SERRA M.**, *La correction acoustique dans les bâtiments à régulation thermique par inertie de dalles : application au premier immeuble de bureaux à énergie passive en Ile de France*, 10<sup>e</sup> Congrès Français d'Acoustique, 2010, 5p.

**SIDLER O.**, *Rencontres Blue Bat 2009, La Cité de l'Environnement (St Priest), Approche énergétique*, 2009, 49p.

**SIRET D.**, HARZALLAH A., *Architecture et contrôle de l'ensoleillement*, Conférence IBPSA (International Building Performance Simulation Association) France, Saint-Pierre de la Réunion, 2006, 8p.

**THIERS S.**, *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*, Thèse de doctorat à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008, 255p.

**THIERS S.**, PEUPORTIER B., *Bilans énergétique et environnemental simulés d'un bâtiment passif équipé d'un échangeur air-sol en Picardie*, Conférence IBPSA France, Lyon, 2008, 8p.

**TITTELEIN P.**, *Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation*, Thèse de l'Université de Savoie, LOCIE, 2008, 220p.

**VITTE T.**, NOVACQ A., BRAU J., *Etude d'un bâtiment basse énergie ; développement et application du principe de rafraîchissement solaire*, INSA Lyon, 2004, 10p.

**WRIGHT D.**, *Manuel d'architecture naturelle*, Ed. Parenthèses, 1978, 249p.



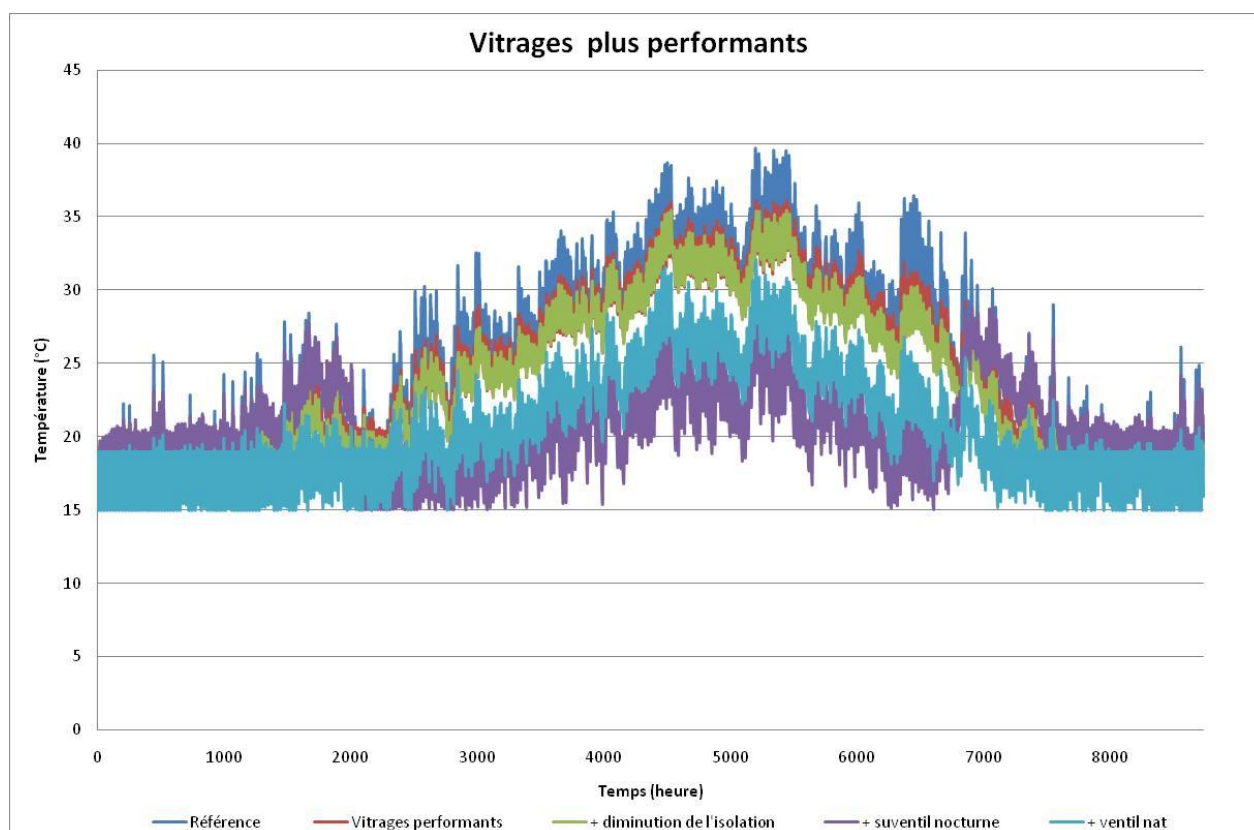
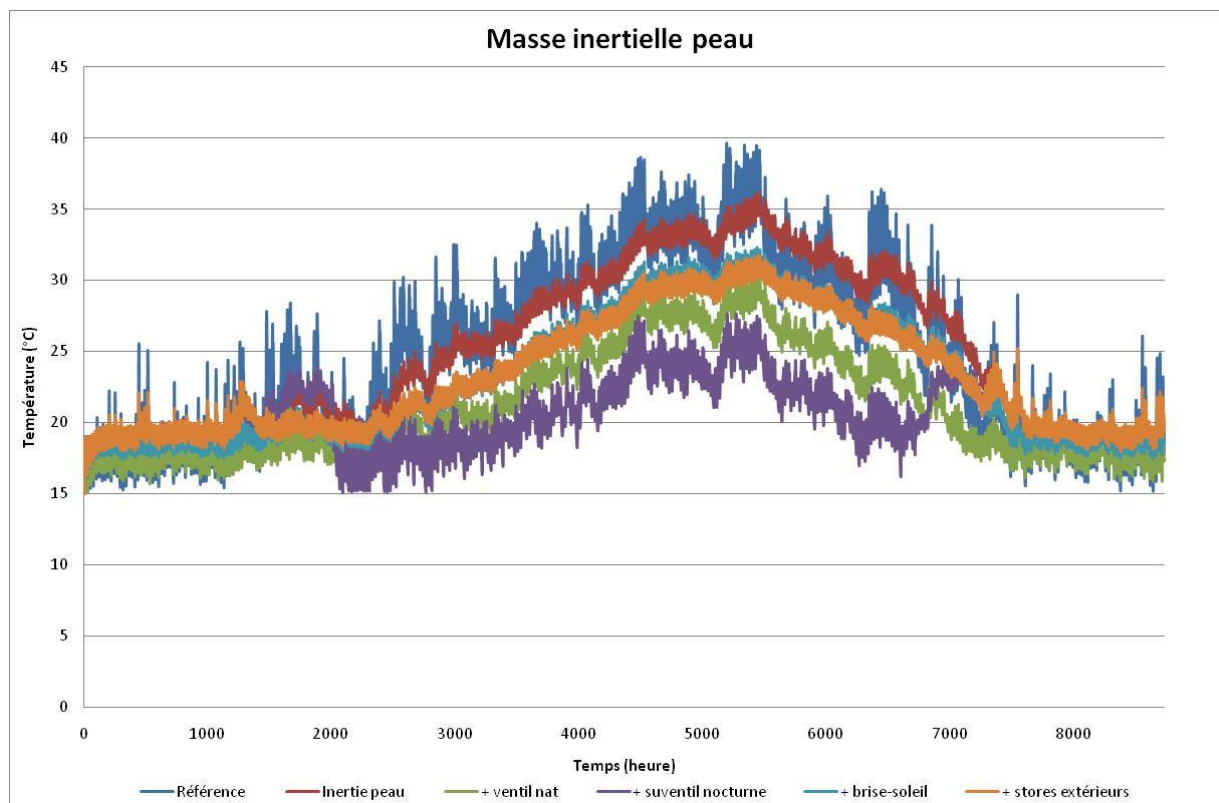
## **ANNEXES**

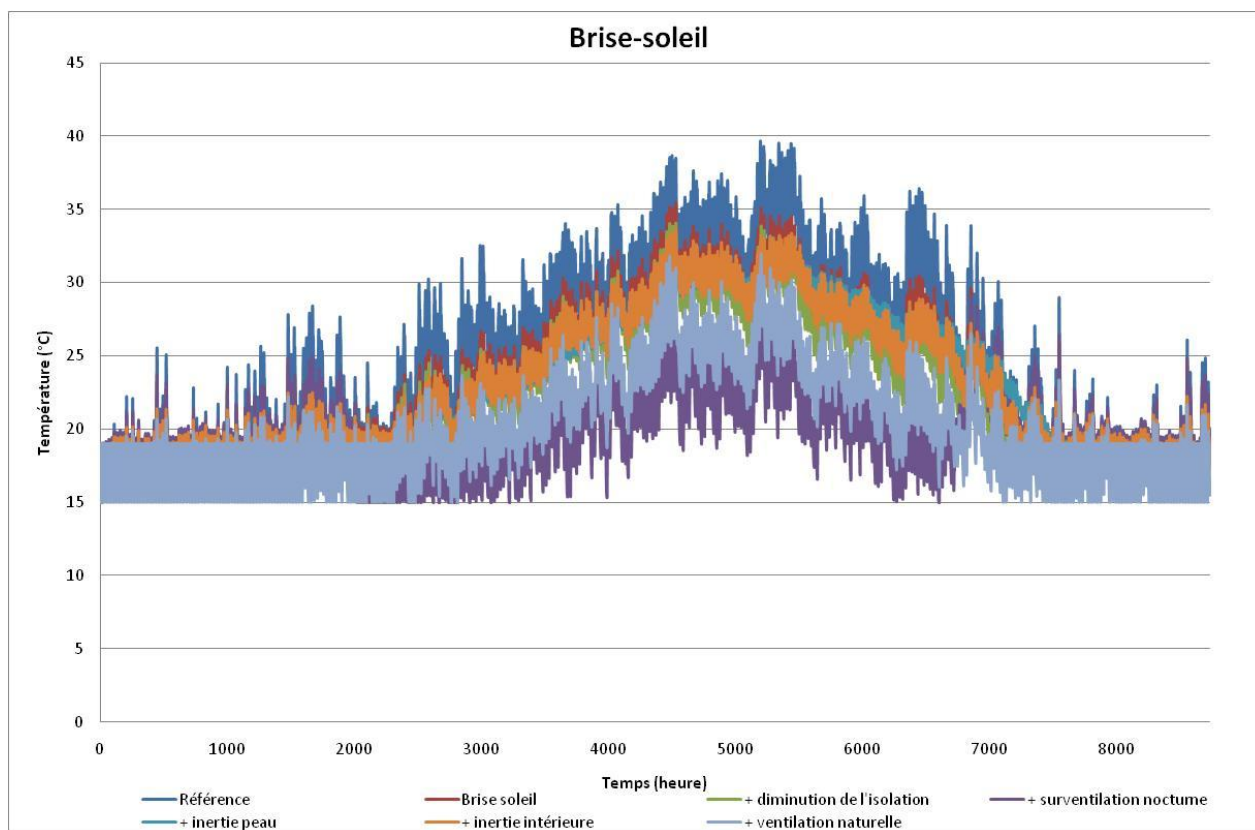
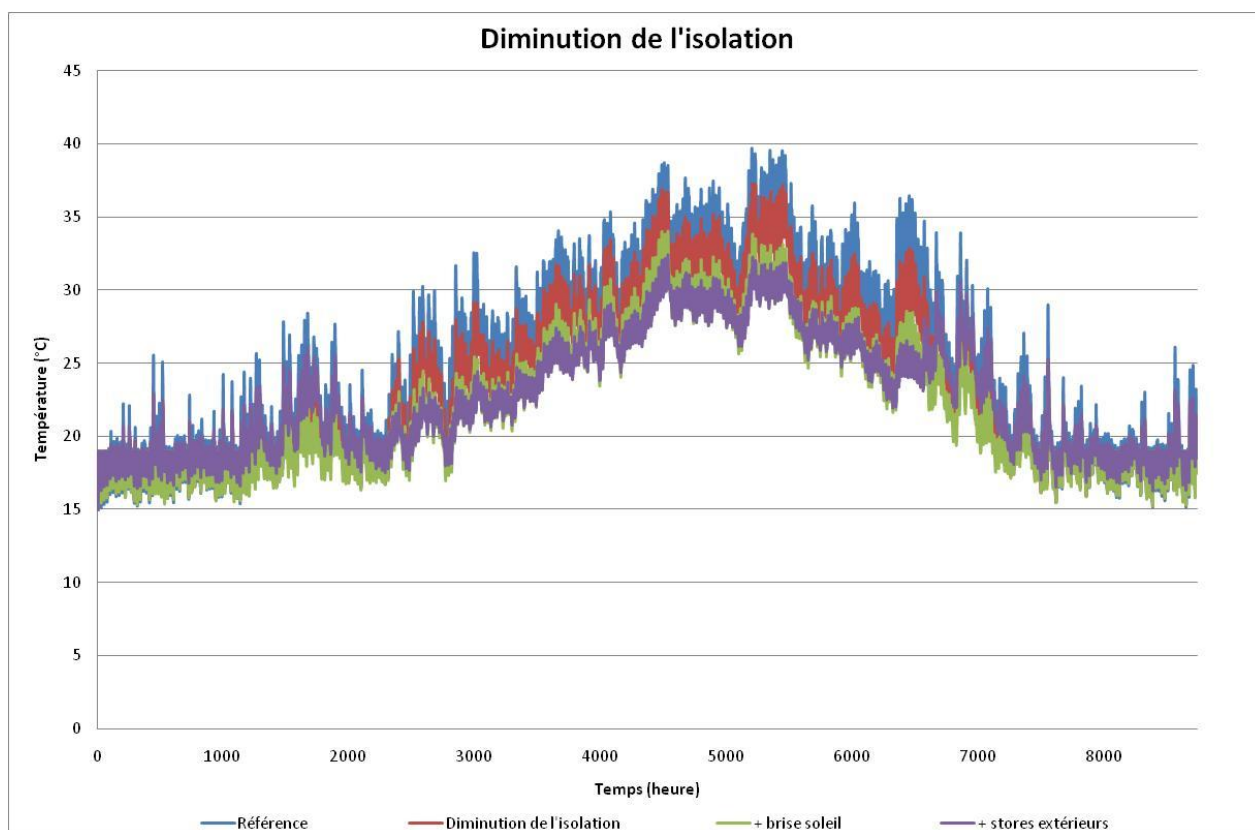
ANNEXE A : Courbes couplages

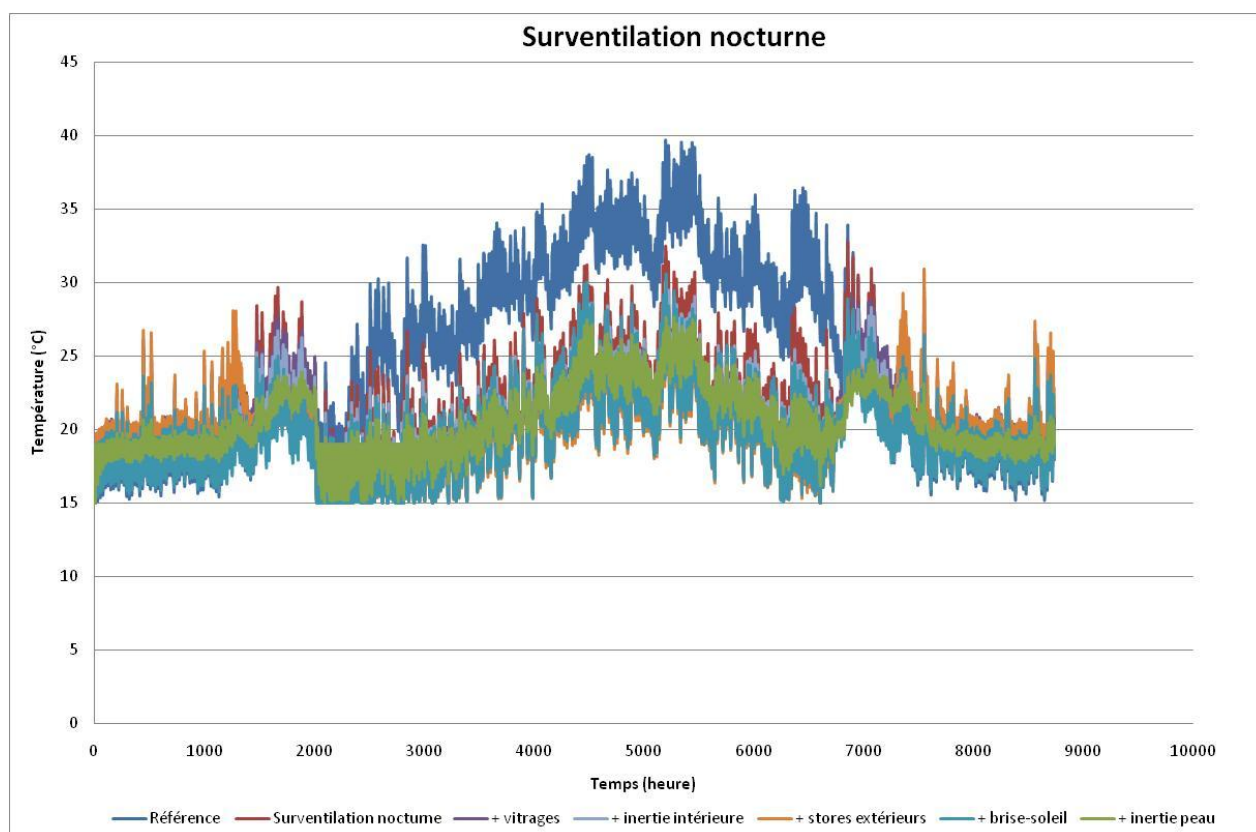
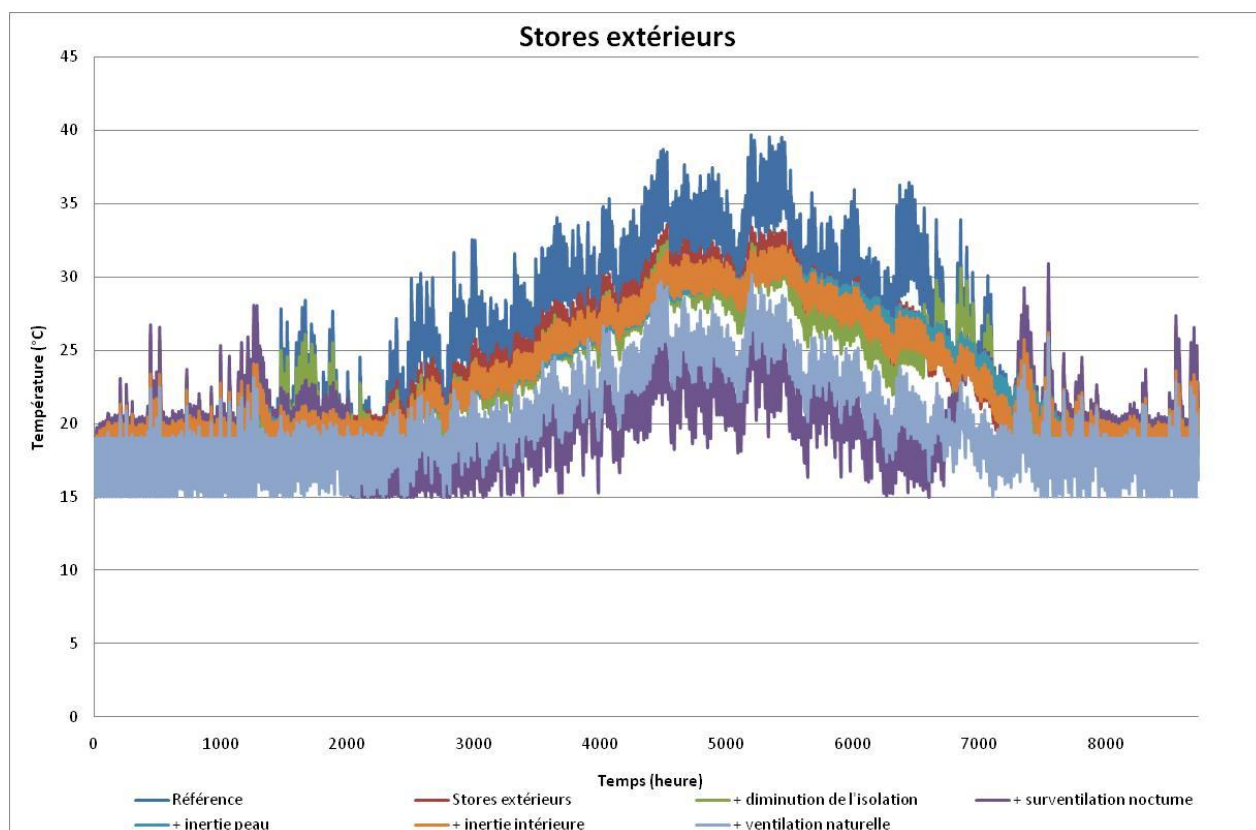
ANNEXE B : Analyse multicritère

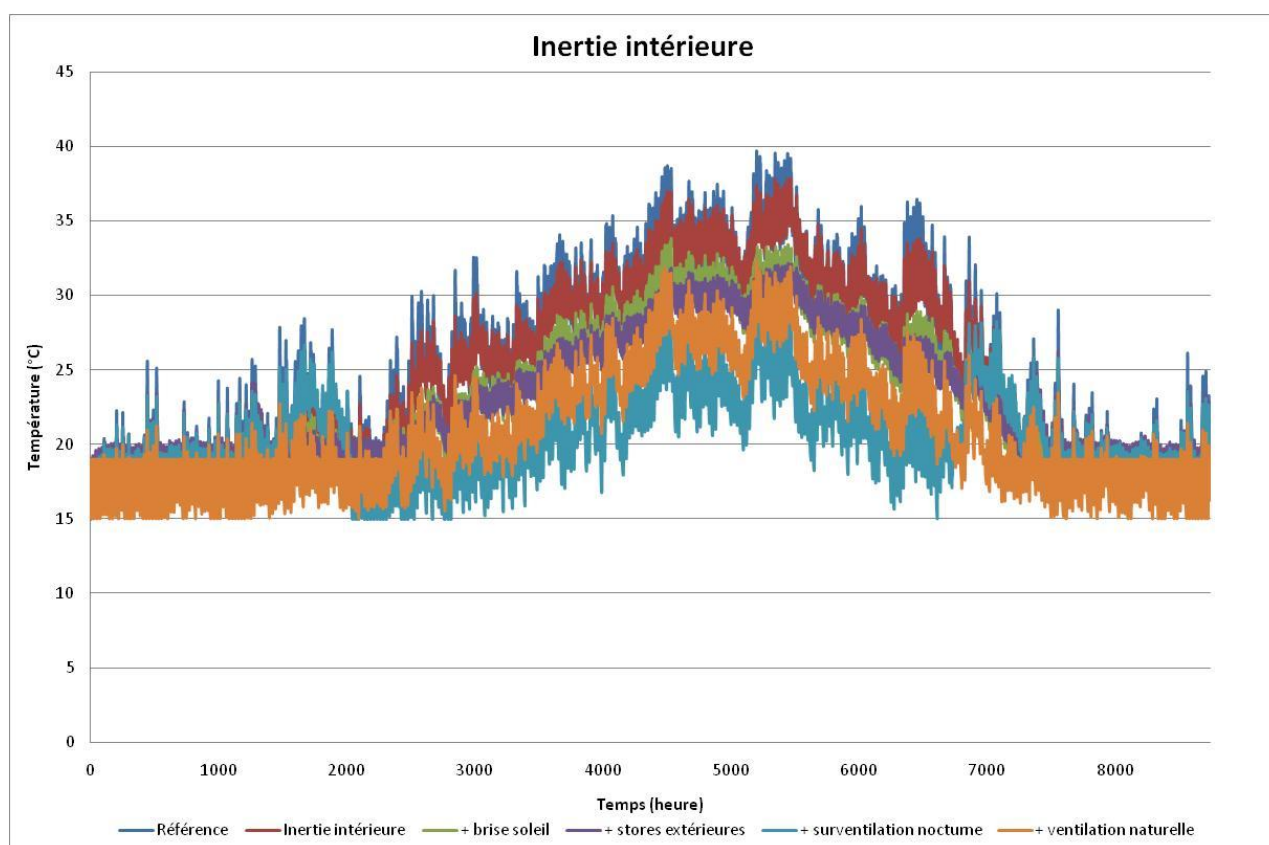


## Annexe A : Courbes couplages









## Annexe B : Analyse multicritère

	THERMIQUE			ECONOMIQUE				FONCTIONNEMENT GLOBAL				ENVIRONNEMENT
	Indice de performance de rafraîchissement	Critère d'amortissement	Besoins en froid couverts par le système (%)	Coût investissement	Besoins en froid	Economies réalisées	Temps de retour	Réversibilité hiver / été	Structure	Lumière	Implication utilisateur	
Vitrages plus performants	1,16	0,42	53,24	1707,00	708,00	107,10	15,94	3	2	3	2	77
Diminution de l'isolation	1,24	0,52	19,88	-13612,00	1213,00	43,47	0,00	3	1	2	2	31
Brise-soleil	2,05	1,14	53,37	3000,00	706,00	107,35	27,95	2	2	3	2	77
Stores extérieurs	2,25	0,54	79,79	4500,00	306,00	157,75	28,53	1	3	3	3	113
Surventilation nocturne	4,8	1,93	83,42	2000,00	251,00	164,68	12,14	2	2	2	2	118
Masses inertielles peau	0,73	0,27	18,43	-8692,28	1235,00	40,70	0,00	1	1	2	2	29
Masses inertielles cloisons intérieures	0,41	0,29	8,85	-912,76	1380,00	22,43	0,00	1	1	2	2	16
Ventilation naturelle	4	1,08	66,31	0,00	510,00	132,05	0,00	2	2	2	3	94
MCP	0,49	0,27	12,15	13798,50	1330,00	28,73	480,32	1	1	2	2	21
Puits canadien	3,13	1,00	37,38	12000,00	948,00	76,86	156,13	1	2	2	2	55
Inertie peau et ventilation naturelle	4,2	0,63	85,54	-8692,28	219,00	168,71	0,00	1	1	2	3	121
Inertie peau et surventilation nocturne	5,5	0,72	99,67	-6692,28	5,00	195,68	0,00	1	1	2	2	140
Vitrages et diminution de l'isolation	1,58	0,45	52,64	-11905,00	717,00	105,97	0,00	3	1	3	2	76
Vitrages et surventilation nocturne	5,27	0,95	96,10	3707,00	59,00	188,87	19,63	3	2	3	2	135
Vitrages et ventilation naturelle	4,71	0,83	88,44	1707,00	175,00	174,26	9,80	3	2	3	3	124
Diminution de l'isolation et brise-soleil	2,86	0,66	61,23	-10612,00	587,00	122,35	0,00	3	1	3	2	87
Diminution de l'isolation et stores extérieurs	2,64	0,58	85,01	-9112,00	227,00	167,71	0,00	3	2	3	2	120
Brise-soleil et surventilation nocturne	5,55	0,98	94,19	5000,00	88,00	185,22	26,99	2	2	3	2	132
Brise-soleil et inertie peau	2,34	0,45	65,13	-5692,28	528,00	129,78	0,00	1	1	3	2	93
Brise-soleil et inertie intérieure	2,31	0,53	58,32	2087,24	631,00	116,80	17,87	1	1	3	2	83
Brise-soleil et ventilation naturelle	5,02	0,90	86,59	3000,00	203,00	170,73	17,57	2	2	3	3	122
Stores extérieurs et surventilation nocturne	5,89	1,09	98,68	6500,00	20,00	193,79	33,54	1	2	3	3	138
Stores extérieurs et inertie peau	2,45	0,48	84,15	-4192,28	240,00	166,07	0,00	1	2	3	3	119
Stores extérieurs et inertie intérieure	2,59	0,51	82,23	3587,24	269,00	162,41	22,09	1	2	3	3	116
Stores extérieurs et ventilation naturelle	5,46	0,82	97,29	4500,00	41,00	191,14	23,54	1	3	3	3	137
Surventilation nocturne et inertie intérieure	5,15	0,86	94,39	1087,24	85,00	185,60	5,86	1	3	2	2	133
Ventilation naturelle et inertie intérieure	4,27	0,78	76,42	-912,76	357,00	151,33	0,00	1	1	2	3	108