



Rapport de recherche

2008

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

**COOLSHIFT : Rafraîchissement passif de bâtiments par ventilation
déphasée et systèmes apparentés**

Gallinelli, Peter Giulio; Hollmuller, Pierre; Lachal, Bernard Marie; Weber, Willi

How to cite

GALLINELLI, Peter Giulio et al. COOLSHIFT : Rafraîchissement passif de bâtiments par ventilation déphasée et systèmes apparentés. 2008

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:22535>



COOLSHIFT

Rafraîchissement passif de bâtiments par ventilation déphasée et systèmes apparentés

Rapport final

Élaboré par

Peter Gallinelli, Université de Genève

7 route de Drize, CH - 1227 Carouge / Genève, peter.gallinelli@unige.ch

Pierre Hollmuller, Université de Genève

7 route de Drize, CH - 1227 Carouge / Genève, pierre.hollmuller@fc.ul.pt

Bernard Lachal, Université de Genève

7 route de Drize, CH - 1227 Carouge / Genève, bernard.lachal@unige.ch

Willi Weber, Université de Genève

7 route de Drize, CH - 1227 Carouge / Genève, willi.weber@unige.ch

Impressum

Date : juin 2008

Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, programme de recherche Energie dans les bâtiments

Mühlestrasse 4, CH - 3063 Ittigen

Adresse postale : CH - 3003 Berne

www.bfe.admin.ch

Source d'acquisition de cette publication : www.recherche-energetique.ch

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Table des matières

1. Introduction.....	1
<i>Contexte</i>	<i>1</i>
<i>Objectifs</i>	<i>1</i>
<i>Structure du rapport.....</i>	<i>1</i>
2. Description du système	2
2.1. Liste des configurations et acronymes	2
2.2. Météo	3
<i>Base de donnée estivale</i>	<i>3</i>
<i>Configurations</i>	<i>3</i>
2.3. Bâtiment.....	5
<i>Typologie architecturale.....</i>	<i>5</i>
<i>Masse thermique et isolation</i>	<i>6</i>
<i>Accès solaire</i>	<i>6</i>
<i>Gains internes</i>	<i>6</i>
<i>Configurations</i>	<i>6</i>
2.4. Ventilation et rafraîchissement passif	8
<i>Stockage jour/nuit</i>	<i>8</i>
<i>Débit d'air et dimensionnement du stockage.....</i>	<i>9</i>
<i>Systèmes complémentaires.....</i>	<i>10</i>
<i>Intégration et mode de ventilation</i>	<i>10</i>
<i>Configurations</i>	<i>10</i>
3. Outil de simulation.....	14
<i>Méthodologie</i>	<i>14</i>
<i>Indicateurs</i>	<i>14</i>
4. Fonctionnement type	16
<i>Configurations considérées.....</i>	<i>16</i>
<i>Indicateurs</i>	<i>16</i>
<i>Sans rafraîchissement auxiliaire (mode flottant).....</i>	<i>17</i>
<i>Avec rafraîchissement auxiliaire (mode conditionné).....</i>	<i>17</i>
<i>En guise de synthèse</i>	<i>18</i>
5. Étude de sensibilité	24
5.1. Effet de l'accès solaire	24
<i>Configurations considérées.....</i>	<i>24</i>
<i>Sans rafraîchissement auxiliaire (mode flottant).....</i>	<i>24</i>

<i>Avec rafraîchissement auxiliaire (air conditionné)</i>	25
5.2. Rafrâchissement passif	25
<i>Configurations considérées</i>	25
<i>Sans rafraîchissement auxiliaire (mode flottant)</i>	25
<i>Avec rafraîchissement auxiliaire (mode conditionné)</i>	26
<i>Autres considérations</i>	27
6. Conclusions et recommandations	36
7. Remerciements	37
8. Références	37
Annexes techniques	

Liste des tableaux et figures

Tableau 1 : Liste synoptique des paramètres et acronymes	2
Figure 1 : Températures sèche et humide, dynamique sur une semaine estivale type.....	4
Figure 2 : Températures sèche et humide, valeurs journalières classées.....	4
Figure 3 : Typologie architecturale de référence.	5
Tableau 2 : Masse thermique.	7
Tableau 3 : Protections solaires.	7
Tableau 4 : Débit d'air et dimension du stockage (par bureau de 20 m ²).....	10
Figure 4 : Stockages, section type pour un débit de 100 m ³ /h et exemple de mise en œuvre.....	12
Figure 5 : Stockages, dynamique sur une semaine d'été et données de dimensionnement.	12
Figure 6 : Régulation en mode autonome (Sgl).	13
Figure 7 : Régulation en mode alterné (Dbl).	13
Figure 8 : Modèle Trnsys / IISIBAT.....	15
Tableau 5 : Indicateurs de performance (situation urbaine, été normal et caniculaire).....	16
Figure 9 : Températures classées, situation urbaine en mode flottant (Free).	19
Figure 10 : Puissances classées, situation urbaine en mode conditionné (Hvac).	19
Figure 11 : Semaine d'été standard (2004), mode flottant (Free).....	20
Figure 12 : Semaine d'été caniculaire (2003), mode flottant (Free).....	21
Figure 13 : Semaine d'été standard (2004), mode conditionné (Hvac).	22
Figure 14 : Semaine d'été caniculaire (2003), mode conditionné (Hvac).	23
Tableau 6 : Configurations pour l'étude de l'accès solaire.....	24
Tableau 7 : Configurations pour l'étude du rafraîchissement passif.	25
Figure 15 : Etude protections solaires, sans ventilation nocturne : durée de surchauffe (Free).	28

Figure 16 : Etude protections solaires, sans ventilation nocturne : température de pointe (Free).	28
Figure 17 : Etude protections solaires, sans ventilation nocturne : énergie de rafraîchissement auxiliaire (Hvac).	29
Figure 18 : Etude protections solaires, sans ventilation nocturne : puissance de pointe (Hvac).	29
Figure 19 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : durée de surchauffe (Free).	30
Figure 20 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : température de pointe (Free).	31
Figure 21 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : énergie de rafraîchissement (Hvac).	32
Figure 22 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : puissance de pointe (Hvac).	33
Figure 23 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : consommation d'eau par été (Free).	34
Figure 24 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : consommation d'eau par été (Hvac).	35

1. INTRODUCTION

Contexte

Dans plusieurs parties d'Europe, la demande d'électricité due à la climatisation est en augmentation.

Pour limiter le développement de cette pointe, il s'agit de mettre en œuvre d'une part des mesures architecturales et constructives adéquates (réduction des gains solaires et internes, accès à la masse thermique), d'autre part des techniques de rafraîchissement passifs.

Mis en évidence par le CUEPE, le déphasage contrôlé d'une onde thermique portée par un flux d'air est un phénomène prometteur pour le rafraîchissement à très faible consommation électrique : en retardant le pic de fraîcheur nocturne de 8-12 heures, quasiment sans l'amortir, ce dernier devient disponible au milieu de la journée, lorsque la demande de froid dans le bâtiment est la plus forte.

Malgré cette spécificité temporelle qui rend cette technique fort attrayante, son potentiel doit être comparé à d'autres techniques de rafraîchissement passif, notamment celles qui font également usage du système de ventilation (ventilation nocturne, puits canadiens, humidification adiabatique).

Comme pour toutes ces techniques, le dimensionnement du système ainsi que le potentiel de rafraîchissement auquel on peut s'attendre sont par ailleurs intrinsèquement liés à la réponse thermique et donc à la conception du bâtiment.

Objectifs

Cette étude vise à éclairer les points soulevés ci-dessus, pour le cas de bâtiments administratifs situés en climat modéré, avec pour base une série de météo réelles genevoises. Dans ce contexte, les buts de la recherche sont les suivants :

- Déterminer le potentiel de rafraîchissement du déphaseur en relation avec le bâtiment (gains solaires, capacité thermique, isolation, gains internes).
- Etudier la synergie avec d'autres systèmes de rafraîchissement (ventilation nocturne, puits canadiens, humidification adiabatique), en mode autonome ou en appui à du rafraîchissement auxiliaire.
- Caractériser la sensibilité aux variations climatiques (ville/campagne, été caniculaire).
- Proposer des solutions d'intégration dans le bâtiment et le système de ventilation.

Structure du rapport

Le rapport se structure comme suit :

- Le chapitre 2 donne une description des configurations examinées (météo, bâtiment, système de ventilation et rafraîchissement auxiliaire).
- Le chapitre 3 décrit la méthodologie de simulation numérique qui a été adoptée.
- Le chapitre 4 illustre le fonctionnement des diverses techniques de rafraîchissement, pour une configuration de bâtiment choisie.
- Le chapitre 5 concerne l'étude de sensibilité à proprement parler.
- Le chapitre 6 contient les conclusions et recommandations.
- Les annexes techniques se situent en fin de document.

2. DESCRIPTION DU SYSTÈME

2.1. Liste des configurations et acronymes

Le système faisant l'objet de cette étude se subdivise en trois sous-systèmes : météo, bâtiment, système de ventilation et rafraîchissement. Ces sous-systèmes se déclinent en un ensemble de configurations possibles, qui sont décrites dans les pages qui suivent. Des compléments d'informations se trouvent dans l'annexe 3 (qui contient également un certain nombre de configurations additionnelles, pré programmées mais non utilisées dans le cadre de cette étude).

Le tableau suivant résume l'ensemble de ces configurations et leurs acronymes (auxquels font références certains tableaux et graphiques).

Tableau 1 : Liste synoptique des paramètres et acronymes

Paramètres bâtiment		Paramètres système	
ORN	Orientation	VNT	Source / système de ventilation
SS	Sud-Nord	Direct	ventilation nocturne directe
EE	Est-Ouest	Pipes10m	puits canadien 10m
		Pipes20h	puits canadien 20m
SHF	Ombrage / horizon lointain	Shift08h	déphaseur 8h
5°	horizon bas	Shift12h	déphaseur 12h
GLZ	Taux de vitrage	MOD	Mode de ventilation et humidification
20%	faible	Sgl-Dry	mode simple, sans humidification
50%	moyen	Sgl-Hum	mode simple, avec humidification
80%	élevé	Db1-Dry	mode alterné, sans humidification
		Db1-Hum	mode alterné, avec humidification
SHP	Protections solaires	CNT	Régulation et débit d'air
Off	aucune	Base	débit de base (diurne)
Int	interne	Cnt1	débit régulé, 1 x débit de base
Ext	externe	Cnt2	débit régulé, 2 x débit de base
		Cnt4	débit régulé, 4 x débit de base
MAT	Masse et accès thermique	VAC	Rafraîchissement auxiliaire
HvBoth	structure lourde, accès direct	Free	température flottante
HvNone	structure lourde, accès indirect	Hvac	air conditionné à 26.5°C
LtBoth	structure moyenne, accès direct		
LtNone	structure moyenne, accès indirect		
INS	Isolation thermique		
80s	qualité 1980		
MIN	qualité Minergie		
INT	Gains internes	Paramètres météo	
10W/m ²	faibles	MET	Météo
20W/m ²	moyens	Rur04	situation urbaine, année de référence
35W/m ²	élevés	Rur03	situation urbaine, année caniculaire
		Urb04	situation rurale, année de référence
		Urb03	situation rurale, année caniculaire

2.2. Météo

Base de donnée estivale

Menée en préalable à cette étude, l'analyse comparative des météos estivales genevoises des 15 dernières années (1990 – 2005) fait ressortir les points suivants (Ineichen 2006) :

- Sur les 15 dernières années, à l'exception de la période estivale de l'année 2003 nettement hors statistiques, il ressort clairement que les variations interannuelles sont relativement faibles. Il existe cependant un écart systématique, de l'ordre de 2°C, entre les températures horaires classées mesurées en ville et en campagne.
- Contrairement à la température sèche, la température humide sur les 400 heures les plus chaudes de 2003 ne s'écarte pas de la moyenne des autres années. Ceci montre que même par un été particulièrement chaud comme l'a été celui de 2003, le potentiel de rafraîchissement adiabatique est conservé.
- Au niveau de la composante globale du rayonnement solaire, l'analyse montre que les variations interannuelles et géographiques au sein de la région genevoise ne sont que très faibles, là également exception faite de la période estivale de l'année 2003.
- Cette étude montre qu'une attention particulière doit être apportée à la description du site envisagé de façon à tenir compte au mieux de sa situation climatique. En effet, les valeurs de températures mesurées en différents points du canton et analysées dans cette étude se situent entre les courbes représentatives des mesures en ville et en campagne.
- Lorsqu'il n'existe pas de mesures sur un site proche du lieu où l'on prévoit une simulation, il faut les générer et, dans ce cas, être très critique sur les valeurs obtenues. En effet, le logiciel le plus utilisé pour suppléer aux données mesurées est le logiciel Meteororm et il s'avère que même sur une base de moyennes mensuelles réelles, il sous-estime généralement les valeurs de température sèche. Par ailleurs, les valeurs de température humide sont générées au moyen d'un algorithme générique qui, par essence, ne prend pas en considération les cas particuliers.
- C'est finalement l'année 2004 dont les températures sèche et humide ainsi que le rayonnement se situent le plus proche de la moyenne des 15 dernières années. Cette dernière est donc retenue comme année de référence pour la période estivale, en parallèle à l'année 2003 comme année caniculaire, pour l'instant exceptionnelle.

Configurations

Conformément à ce qui précède, nous considérerons dans cette étude les quatre météos suivantes, mesurées respectivement à Cointrin et à la Jonction :

- météo rurale, année standard et caniculaire (2004 et 2003).
- météo urbaine, année standard et caniculaire (2004 et 2003).

Les figures 1 et 2 font bien ressortir les points évoqués plus haut et leur relevance quant au problème de confort estival :

- Tant en ville qu'en campagne, l'année 2003 se distingue par une quinzaine de jours avec des pointes de température atteignant et dépassant les 35°C.
- Tant pour cette année caniculaire que pour l'année de référence, la météo urbaine se différencie essentiellement de la météo rurale par une température nocturne plus élevée, alors que les pointes diurnes restent très proches.

- La température humide de l'année 2003 reste par contre très proche de celle de 2004, indiquant une stabilité du potentiel de rafraîchissement par humidification adiabatique. Etant donné la faible variation jour/nuit de la température humide, la variation ville/campagne est par ailleurs fortement atténuée, surtout pour les jours les plus chauds.

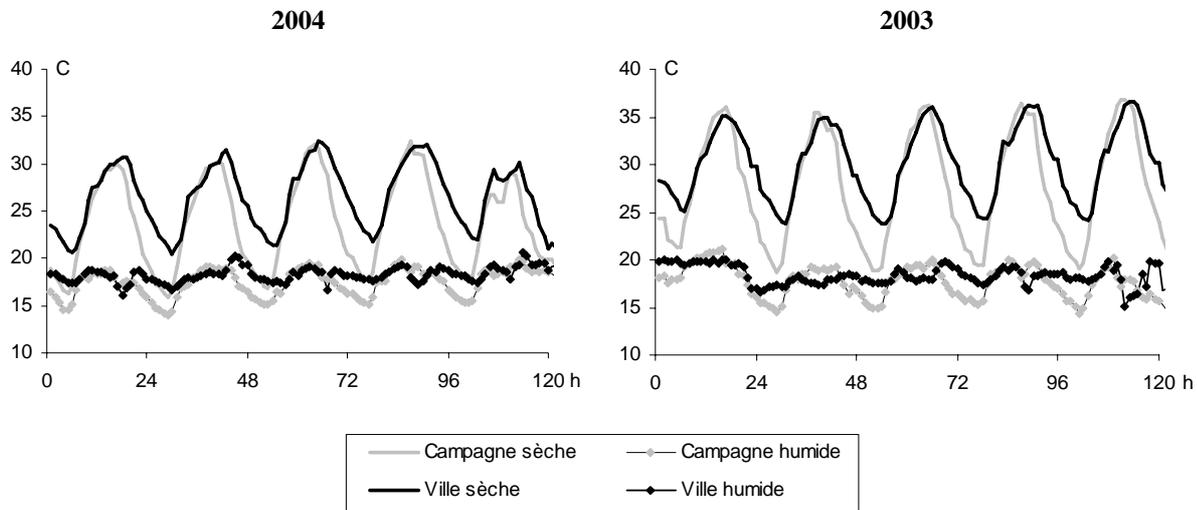


Figure 1 : Températures sèche et humide, dynamique sur une semaine estivale type.

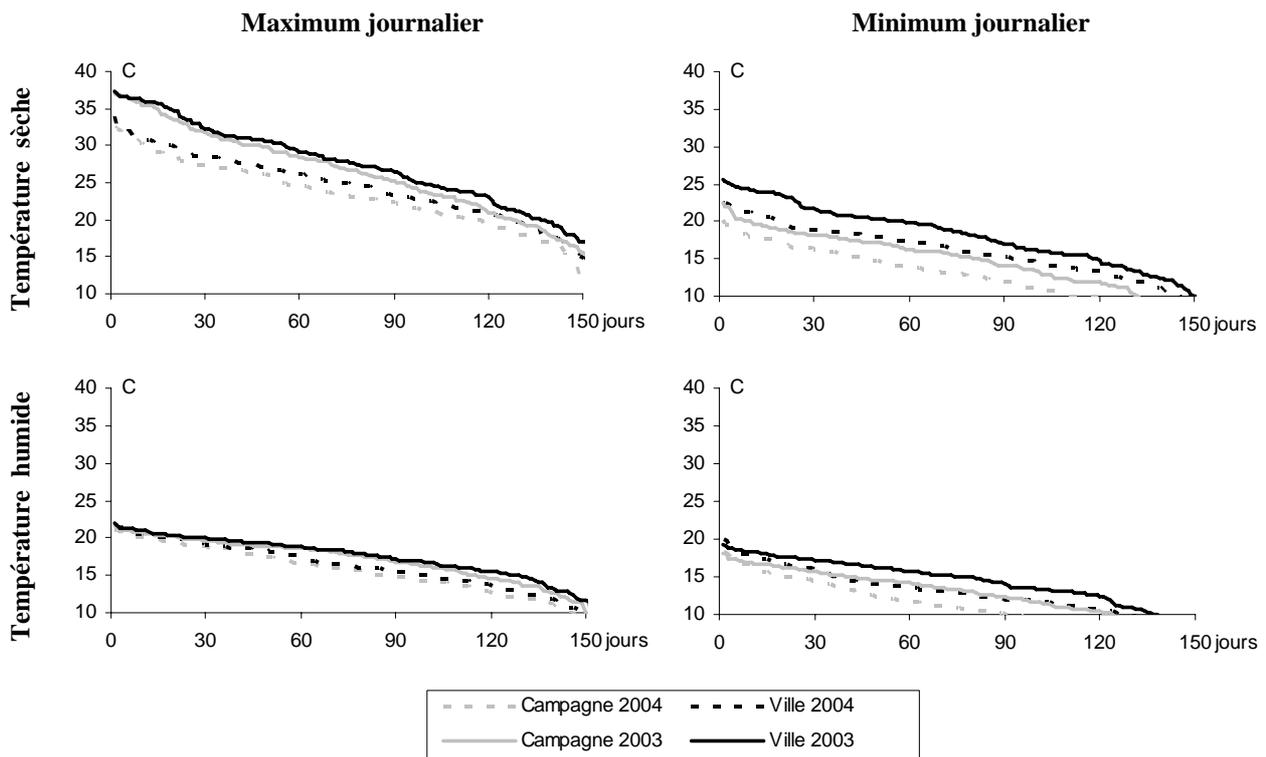


Figure 2 : Températures sèche et humide, valeurs journalières classées.

2.3. Bâtiment

Typologie architecturale

Cette étude se concentre sur le cas de bâtiments administratifs, avec occupation diurne (8 – 18 h).

La détermination d'une typologie réaliste a été guidée par un inventaire de critères architecturaux et de physique du bâtiment, ainsi que par l'analyse d'une quinzaine de bâtiments étudiés dans le cadre de projets antérieurs, qui se subdivisent en deux grandes catégories (annexe 2):

- Bâtiments linéaires à profondeur faible à moyenne, avec organisation cellulaire.
- Bâtiment à grande profondeur disposant de cours intérieures ou d'atriums (lumière naturelle) et d'espaces d'avantage ouverts.

En raison de leur bonne représentativité, nous nous limiterons dans cette étude à la première de ces catégories, pour laquelle une typologie de référence a été arrêtée.

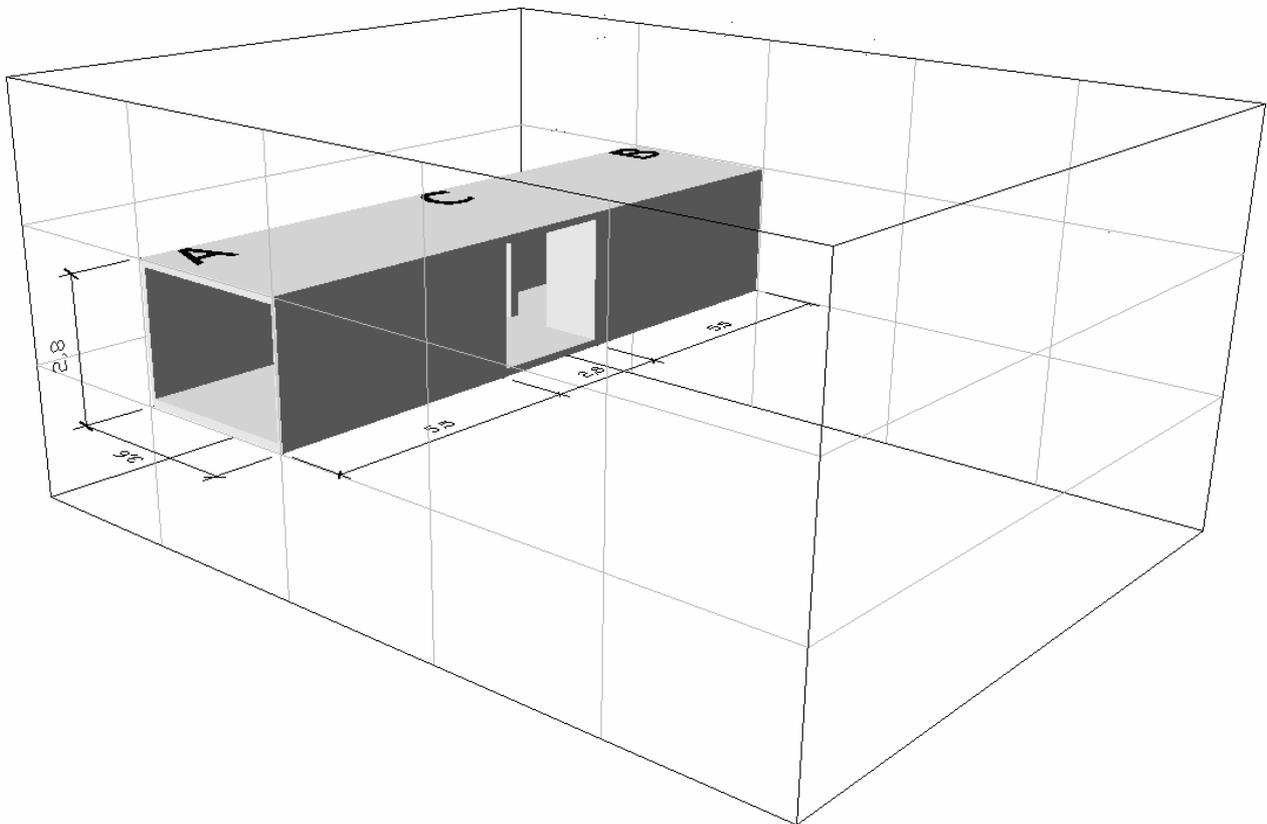


Figure 3 : Typologie architecturale de référence.

Il s'agit d'un ensemble de bureaux mitoyens de 3.6 x 5.5 x 2.8 m (20 m², 55 m³), répartis de part et d'autre d'un couloir central de 2.8 m de large. En terme de simulation numérique, cette typologie se traduit par un modèle composé de trois zones thermiques (figure 3): deux bureaux types, sur façades opposées et séparés par le couloir central, avec pour condition latérale des bureaux mitoyens aux conditions de climat intérieur identiques.

A cette typologie sont associés diverses variantes au niveau de la construction, de l'accès solaire et de l'exploitation, ainsi qu'explicité ci-dessous (voir annexe pour plus de détails).

Masse thermique et isolation

La masse thermique du bâtiment est essentiellement déterminée par les dalles entre étages, pour lesquelles nous considérerons les deux structures suivantes :

- Une structure lourde, composée de dalle de béton armé (18 cm), avec finition en chape de béton (10 cm) et linoléum (0.5 cm).
- Une structure moyenne, composée en ossature bois (18 cm), avec même finition en chape de béton (10 cm) et linoléum (0.5 cm).

Chacune de ces variantes se conjugue soit avec un accès direct à la masse thermique, soit avec un accès indirect (faux plancher et faux plafond, avec lame d'air).

Les bâtiments à structure légère ont été écartés, la majorité des bâtiments en Suisse comportant au moins des murs de refend et de chapes en maçonnerie. En ce sens, la masse thermique des deux variantes reste relativement similaire (510 versus 350 kJ/K par m² de bureau, cf. tableau 2), cela d'autant plus que s'y ajoutent les cloisons internes, identiques dans les deux cas (170 kJ/K par m² de bureau).

Le mur extérieur reste léger et sert surtout d'isolation thermique, selon l'une des deux variantes suivantes :

- Isolation de qualité 1980 (6 cm), avec fenêtres en double vitrage isolant (4/18/4 mm).
- Isolation de qualité Minergie (20 cm), avec fenêtres en triple vitrage isolant (4/18/4/18/4 mm) muni d'une couche sélective.

Accès solaire

En un premier lieu, l'accès solaire est défini par le choix entre deux orientations possibles des façades (sud-nord ou est-ouest, sur un horizon à 5°) et trois possibilités de taux de vitrage (20, 50 ou 80%).

Il est surtout déterminé par le choix entre 3 types de protection solaire (tableau 3), en association à l'un des vitrages définis ci-dessus:

- Protection solaire extérieure de haute qualité (facteur g intrinsèque : 14% ; facteur g total : 13% avec vitrage 1980, 7% avec vitrage Minergie).
- Protection solaire intérieure (facteur g intrinsèque : 95% ; facteur g total : 46% ou 37%).
- Protection solaire absente (facteur g intrinsèque : 100% ; facteur g total : 68% ou 42%).

Les protections sont activées lorsque le rayonnement direct en façade excède 10 W/m² :

Gains internes

On considère finalement 3 niveaux d'apports internes (sur la période d'occupation, 8 – 18 h) :

- 10 W/m², correspondant à 1 personne, 1 ordinateur et l'éclairage.
- 20 W/m², correspondant à 2 personnes, 2 ordinateurs et l'éclairage
- 35 W/m², correspondant à 3 personnes, 5 ordinateurs et l'éclairage

Configurations

Le bâtiment se conjugue donc finalement selon les configurations suivantes :

- 2 orientations : sud-nord ou est-ouest, sur un horizon bas.
- 3 taux de vitrage : 20, 50 ou 80%.

- 3 types de vitrage et protection solaires (activées lorsque le rayonnement direct en façade excède 10 W/m^2):
 - vitrage double, sans protections solaires (valeur g : 7 – 13 %, selon vitrage).
 - vitrage double, avec protection solaire intérieure (valeur g : 37 – 46 %, selon vitrage).
 - vitrage double, avec protection solaire extérieure (valeur g : 42 – 68 %, selon vitrage).
- 2 types de structure :
 - structure lourde (environ 680 kJ/K.m^2).
 - structure moyenne (environ 520 kJ/K.m^2).
- 2 types d'accès à la masse thermique :
 - accès thermique direct (plancher et plafonds brut).
 - accès thermique indirect (faux plancher et faux plafond, avec lame d'air).
- 2 épaisseurs d'isolation thermiques :
 - qualité 1980 (6 cm d'isolation avec double vitrage isolant)
 - qualité Minergie (20 cm d'isolation avec triple vitrage isolant et couche sélective).
- 3 variantes pour les apports internes : 10, 20 ou 35 W/m^2 (8 – 18 h).

Tableau 2 : Masse thermique.

		Surface [m ²]	Capacité [kJ/K.m ²]	
			unit.	spec.
Plancher / Plafond				
- structure lourde	béton armé / chape ciment / linoleum (18 / 10 / 0.5 cm)	39.6	511	511
- structure moyenne	ossature bois / chape ciment / linoleum (18 / 10 / 0.5 cm)	39.6	351	351
Cloisons internes				
	panneau plâtre / épicea / panneau plâtre (3 / 10 / 3 cm)	40.9	161	166
Mur extérieur				
- avec 20% vitrage	verre / isolation / panneau plâtre (0.5 / 6-20 / 3 cm)	8.1	34	7
- avec 50% vitrage	idem	5.1	34	4
- avec 80% vitrage	idem	2.0	34	2

Notes : 1) la capacité unitaire se reporte à la surface respective (paroi, sol, plafond) ; la capacité spécifique se rapporte à la surface au sol (20 m^2 par bureau), en tenant compte que la masse est partagée entre bureaux attenants. 2) La capacité thermique de l'isolation (qui varie selon le type d'enveloppe) n'est pas prise en compte dans ce tableau.

Tableau 3 : Protections solaires.

		U [W/K.m ²]	g [-]		
			Protections solaires		
			sans	int	ext
			100%	95%	14%
qualité 1980	double vitrage isolant (4/18/4 mm)	3.02	68%	46%	13%
qualité Minergie	triple vitrage isolant (4/18/4/18/4 mm) + couche sel.	1.23	42%	37%	7%

2.4. Ventilation et rafraîchissement passif

Stockage jour/nuit

En alternative à de la ventilation nocturne directe, nous considérerons ici le puits canadien et le déphaseur, deux systèmes de rafraîchissement basés sur le stockage de l'oscillation météo jour/nuit porté par la ventilation (figure 4 et 5). Le premier a fait l'objet de plusieurs études de cas en situation réelle (Hollmuller 2002), alors que le deuxième a donné lieu à plusieurs essais en laboratoire (Hollmuller et al. 2004 et 2005). Ils ont par ailleurs tous deux fait l'objet de développements théoriques, notamment en terme de modèles analytiques bien validés (Hollmuller 2003 ; Hollmuller et al. 2005), qui servent de base de simulation de cette étude.

Les caractéristiques de ces systèmes de stockage se résument comme suit :

- Dans le cas du puits canadien, l'air passe par un ensemble de tubes enterrés sous ou à côté ou du bâtiment, de telle sorte que l'oscillation météo jour/nuit se trouve amortie par stockage/déstockage dans la masse thermique du terrain. La propagation de l'onde de chaleur journalière s'effectuant sur environ 15-20 cm autour des tubes, ceux-ci peuvent être disposés avec un entre-axe d'environ 50 cm, immédiatement sous le bâtiment et éventuellement en multicouche.

Dans le cas présent, nous portons notre choix sur un diamètre de tube de 12 cm, pour un débit spécifique de 100 m³/h par tube (2.5 m/s). Ce système permet de réduire l'amplitude jour/nuit à 41% avec 10 m de tube, respectivement à 17% avec 20 m (amortissement exponentiel), pour un déphasage qui reste inférieur à une heure.

- Dans le cas du déphaseur, le matériau de stockage est distribué de façon homogène à l'intérieur du canal de ventilation, de façon à augmenter la surface d'échange et de diminuer la distance d'accès à la masse thermique. A condition de garantir un flux homogène et un bon échange convectif, il devient alors possible de retarder l'oscillation jour/nuit portée par le flux d'air, quasiment sans l'amortir, de façon à ce que le pic de fraîcheur nocturne soit disponible au milieu de la journée.

Dans le cas présent, nous portons notre choix sur un système prototype testé en laboratoire. Le matériau de stockage est composé de tubes en pvc de diamètre 13/16 mm remplis d'eau, empilés perpendiculairement au flux d'air, avec un écartement régulier entre tubes de 2 mm (à ne pas confondre avec l'empilement aléatoire avant disposition dans la gaine, visible dans la partie supérieure de la figure 4). Pour une section de 50 x 50 cm traversée par un débit spécifique de 100 m³/h (0.11 m/s dans la gaine vide, 0.39 m/s de moyenne interstitielle), le système permet d'atteindre un déphasage de 8h avec 1.6 m de longueur, respectivement de 12 h avec 2.4 m (déphasage linéaire), pour une amplitude résiduelle supérieure à 80%. Ce système se différencie donc du puits canadien non seulement par un comportement thermique très différent, mais encore par un volume de stockage presque 10 fois inférieur.

Il convient de compléter cette description par les remarques suivantes :

- La technique du puits canadien relève avant tout du génie civil, alors que le déphaseur relève de l'ingénierie mécanique. Alors que le premier gardera toujours un côté « prototype » et devra être adapté à chaque situation, le second se prête à être standardisé et industrialisé. Par ailleurs, l'implantation d'un puits canadien se fait sous le bâtiment ou dans ses alentours, alors que le déphaseur sera en principe localisé à l'intérieur de ce dernier. Le choix entre les deux systèmes se fera sur des bases autres qu'uniquement thermiques : espace à disposition, possibilité d'intervention, coûts, maturité des technologies, consommation électrique, etc.
- Le dimensionnement retenu dans cette étude n'est pas univoque, et peut être adapté aux dimensions de terrain / bâtiment à disposition :

- Dans le cas du puits canadien, des tubes de diamètres supérieurs permettent de traiter des débits spécifiques plus élevés, avec des longueurs de tube également plus importantes. Quelque soit l'option choisie, il faut cependant toujours compter avec 15-25 m de tube (4-8 m³ d'excavation) par 100 m³/h de débit (Hollmuller et Lachal 2008).
- De même, le dimensionnement du déphaseur peut en principe être adapté, de façon notamment à réduire la section au profit de la longueur. L'enjeu majeur est alors l'augmentation de la vitesse et donc des pertes de charges. Afin de rester compatible avec les exigences d'un système à faible consommation d'énergie, il est alors nécessaire de passer à un diamètre et à un écartement de tube plus important, ce pourquoi des recherches sont en cours. Quelque soit l'option retenue, on se situera néanmoins dans la un volume de stockage spécifique d'environ 0.6 m³ par 100 m³/h de débit.
- Bien que les puits canadiens puissent en principe également être prévus pour amortir l'oscillation météo été/hiver, ce genre de dimensionnement s'avère généralement trop onéreux et incompatible avec le terrain à disposition (entre-axe : ~ 4 m ; profondeur : ~ 2 m), du moins pour un immeuble d'une certaine dimension. Encore plus prohibitif, le déphasage sur 6 mois de l'oscillation été/hiver se heurte non seulement à des problèmes de taille liés au stockage saisonnier, mais encore à la nécessité de réduire quasiment à zéro les pertes de stockage.
- Enfin, il faut soigneusement traiter l'utilisation ou le by-pass de tels systèmes en période de chauffage. Dans le cas de puits canadiens implantés sous le bâtiment, il faut en particulier veiller à soigneusement isoler le bâtiment du sous-sol, faute de quoi on risque de provoquer une perte nette, en soutirant plus de chaleur au bâtiment qu'on arrive à en déstocker du sol.

Débit d'air et dimensionnement du stockage

Tout comme pour la ventilation nocturne directe, dont le débit peut être augmenté de nuit pour amener de l'air frais dans le bâtiment, on peut considérer le puits canadien ou le déphaseur en relation avec des débits de ventilation plus importants que le strict débit de base (aération).

En se basant sur une occupation moyenne de 2 personnes par bureau et conformément aux exigences normatives (SIA 2007), le débit de base en période diurne est fixé à 72 m³/h par bureau (renouvellement d'air : 1.3 vol/h), pour chuter à 6 m³/h (0.1 vol/h) en période nocturne.

En alternative, nous considérerons 3 variantes de débit régulé thermiquement :

- Le même débit nominal de base (72 m³/h), également activé en période nocturne si la source de ventilation (météo, puits canadien, déphaseur) est plus fraîche que le bâtiment.
- Un débit nominal deux fois plus important (144 m³/h), activé selon la même condition thermique (ou alors réduit au débit de base).
- Un débit nominal quatre fois plus important (288 m³/h), activé selon la même condition thermique (ou alors réduit au débit de base).

Au niveau du dimensionnement du système de ventilation, l'utilisation de ces débits accrus implique tout d'abord un système de distribution adapté (gainés, ventilateur), cela également en ventilation nocturne directe (sauf ventilation naturelle, non considérée dans cette étude). Dans le cas du puits canadien et du déphaseur il s'agit également d'adapter les dimensions du stockage, selon les valeurs données au tableau 4.

Ces dimensionnements accrus impliquent inévitablement une surconsommation électrique, qu'il s'agit de maintenir aussi bas que possible. Nous nous limiterons ici à étudier l'apport thermique de ces systèmes dits passifs, tout en soulignant que le problème de l'électricité devra le cas échéant être étudié avec soin.

Dans la mesure d'une part de l'intérêt porté au couplage avec de l'humidification adiabatique, d'autre part des outils de simulation mis en œuvre, nous ne traitons par ailleurs pas ici la ventilation naturelle (qui possède le grand avantage d'être électriquement neutre, mais qui peut par contre poser des problèmes liés au bruit, aux effractions, aux animaux et aux intempéries).

Tableau 4 : Débit d'air et dimension du stockage (par bureau de 20 m²)

	Débit		Puits canadien			Déphaseur		
	m ³ /h	vol/h	Nb tubes	10m m ³	20m m ³	Section m ²	8h m ³	12h m ³
base, nocturne	6	0.1						
base, diurne	72	1.3						
régulé, 1 x base	72	1.3	0.7	1.8	3.6	0.2	0.3	0.4
régulé, 2 x base	144	2.6	1.4	3.6	7.2	0.4	0.6	0.9
régulé, 4 x base	288	5.2	2.9	7.2	14.4	0.7	1.2	1.7

Note : Le dimensionnement se base sur une section de 50 x 50 cm pour 100 m³/h. Il est adaptée au débit nominal par bureau, en terme de nombre de tubes (puits canadien) ou de section (déphaseur), avec le volume d'excavation / stockage correspondant.

Systèmes complémentaires

En complément à la ventilation nocturne directe ou à la ventilation inertielle que nous venons de décrire, nous nous intéresserons au potentiel de rafraîchissement par humidification adiabatique insérée à l'aval des systèmes de stockage, sur le débit d'air injecté dans le bâtiment. De façon simplifiée, nous simulerons ici un système avec une efficacité de 50% (humidification à 50% du potentiel donné par le différentiel entre température sèche et humide).

Enfin, nous nous intéresserons à ces systèmes d'une part en mode autonome (bâtiment flottant), d'autre part appuyés par du rafraîchissement auxiliaire (bâtiment conditionné à 26.5°C). A cet effet nous considérerons uniquement l'énergie thermique qui doit être délivrée par le système auxiliaire, sans entrer dans le détail de sa production, ni donc de la consommation électrique associée.

Intégration et mode de ventilation

Enfin, les systèmes basés sur le stockage jour/nuit doivent en principe être irrigués 24/24h (faute de quoi la réponse thermique du stockage n'est pas garantie). La régulation du débit injecté dans le bâtiment doit donc avoir lieu par un système de clapet à la sortie du stockage, le ventilateur fonctionnant toujours à débit nominal (figure 6).

Par ailleurs, en périodes nocturnes la température de sortie du stockage est plus élevée que la température météo (figure 5). Pendant ces périodes il peut donc être intéressant d'alterner la ventilation inertielle par de la ventilation nocturne directe. En raison de l'irrigation continue du stockage thermique, cela nécessite cependant la présence d'un deuxième ventilateur et d'un système de by-pass (figure 7).

Configurations

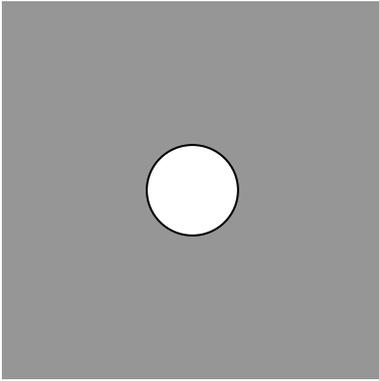
Conformément à ce qui précède, le système de ventilation / rafraîchissement retenu dans cette étude se conjugue donc selon les configurations suivantes :

- 5 sources / systèmes de ventilation :
 - ventilation nocturne directe
 - puits canadien, 10m
 - puits canadien, 20m

- déphaseur, 8h
- déphaseur, 12h
- 4 modes de ventilation : simple ou alternée, combinée ou non à de l'humidification adiabatique (à 50% du potentiel donné par la température humide).
- 4 types de régulation et débit d'air :
 - débit d'aération de base (diurne : $72 \text{ m}^3/\text{h} - 1.3 \text{ vol/h}$; nocturne : $6 \text{ m}^3/\text{h} - 0.1 \text{ vol/h}$)
 - débit de ventilation régulé, 1 x débit de base ($72 \text{ m}^3/\text{h} - 1.3 \text{ vol/h}$, ou débit de base)
 - débit de ventilation régulé, 2 x débit de base ($144 \text{ m}^3/\text{h} - 2.6 \text{ vol/h}$, ou débit de base)
 - débit de ventilation régulé, 4 x débit de base ($288 \text{ m}^3/\text{h} - 5.2 \text{ vol/h}$, ou débit de base)
- 2 modes de rafraîchissement auxiliaire : off / on (température flottante / air conditionné à 26.5°C).

Puits canadien

Section type (50 x 50 cm)

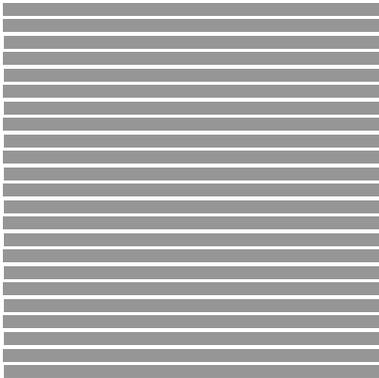


Exemple de mise en œuvre



Déphasseur

Section type (50 x 50 cm)



Prototypé de laboratoire

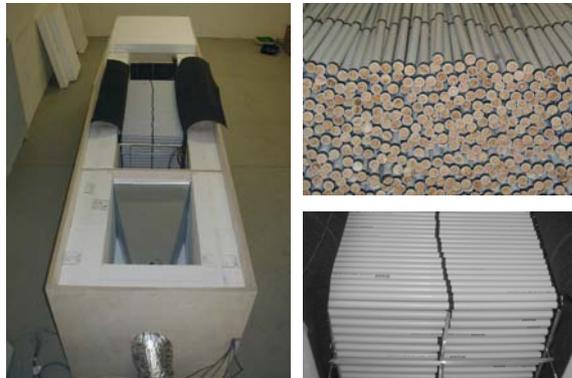


Figure 4 : Stockages, section type pour un débit de 100 m³/h et exemple de mise en œuvre.

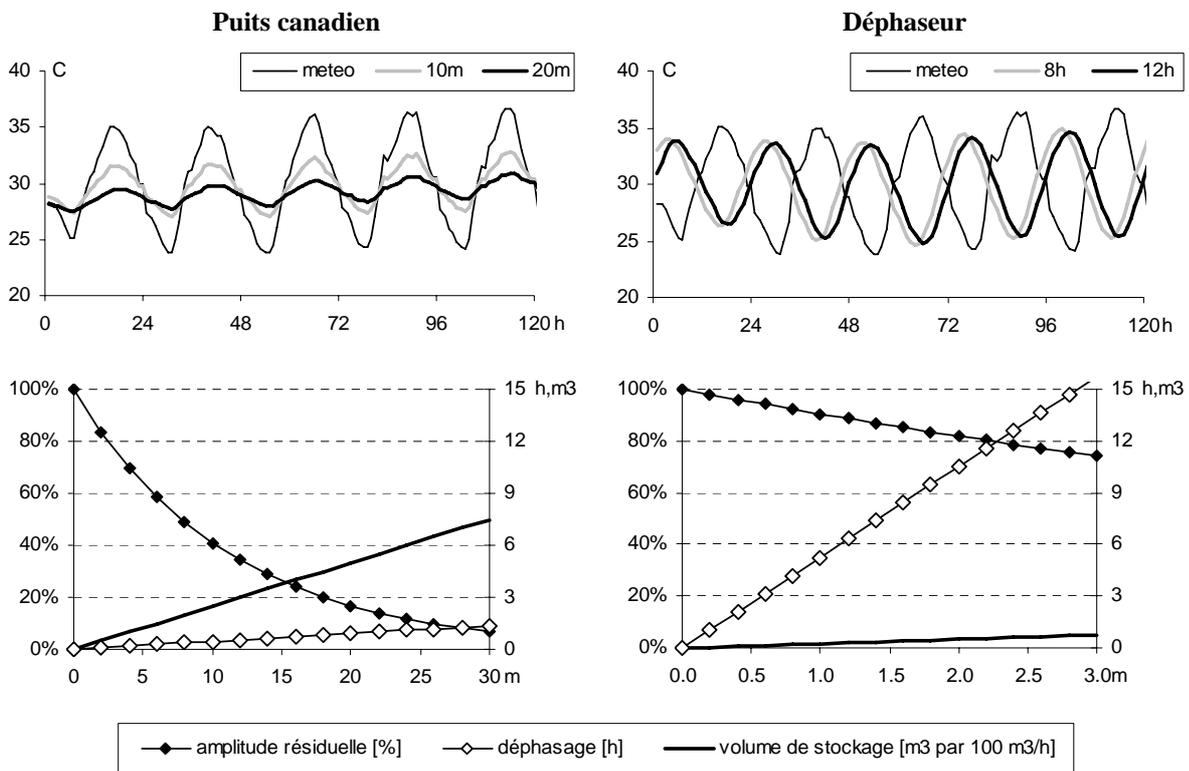
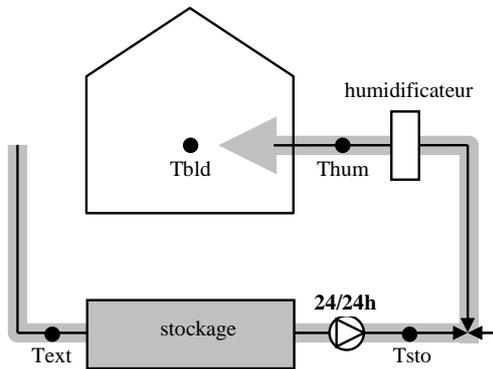
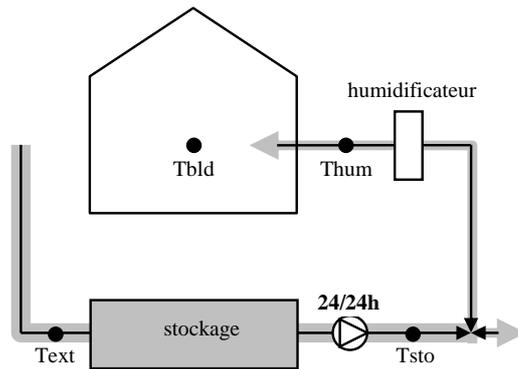


Figure 5 : Stockages, dynamique sur une semaine d'été et données de dimensionnement.

Si $T_{hum} < T_{bld}$: ventilation



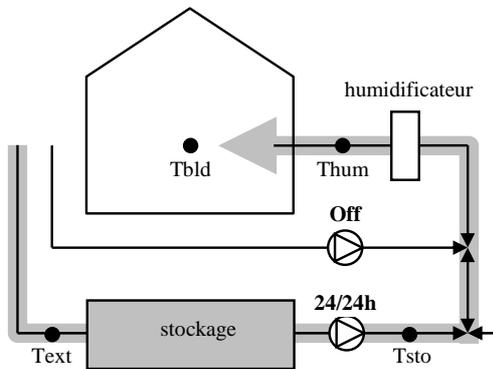
Si $T_{hum} > T_{bld}$: aération



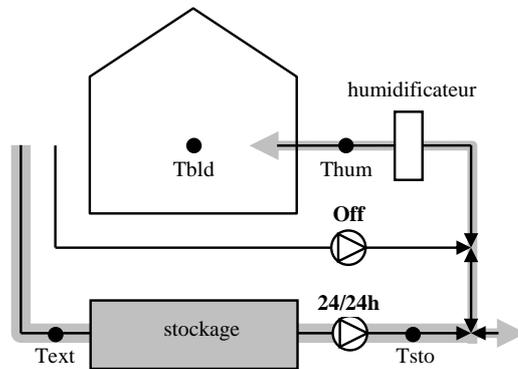
■ débit de ventilation ■ débit d'aération

Figure 6 : Régulation en mode autonome (Sgl).

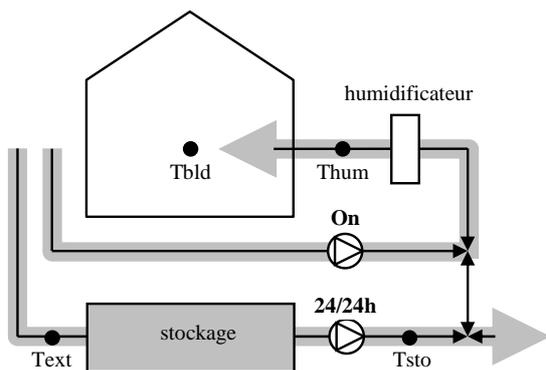
Si $T_{sto} < T_{text}$ et $T_{hum} < T_{bld}$: ventilation via stock



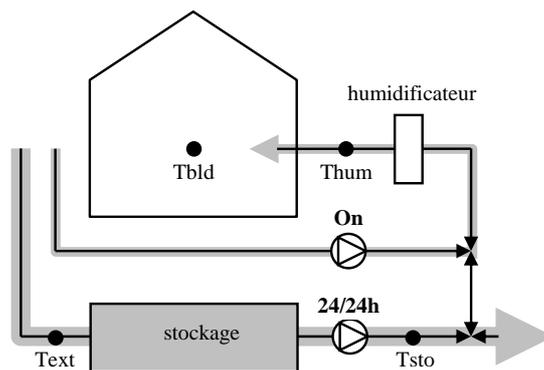
Si $T_{sto} < T_{text}$ et $T_{hum} > T_{bld}$: aération via stock



Si $T_{sto} > T_{text}$ et $T_{hum} < T_{bld}$: ventilation directe



Si $T_{sto} > T_{text}$ et $T_{hum} > T_{bld}$: aération directe



■ débit de ventilation ■ débit d'aération

Figure 7 : Régulation en mode alterné (Dbl).

Note : Lorsque la température à la sortie du système est plus fraîche que le bâtiment, la ventilation se fait avec un débit accru (colonne de gauche) ; dans le cas contraire le débit est limité au minimum d'aération nécessaire pour les besoins sanitaires (colonne de droite). Le stock (déphaseur ou puits canadien) est par contre ventilé avec un débit continu, afin de garantir un cycle de stockage/déstockage correct.

3. OUTIL DE SIMULATION

Méthodologie

La simulation en pas de temps horaire (mai – septembre) est effectuée en deux temps :

- Pour chacune des quatre météo, les systèmes de stockage (puits canadien, déphaseur) sont pré-simulé via des modèles analytiques spécifiques, développé précédemment (Hollmuller 2003 ; Hollmuller et al. 2004).
- La régulation de ces systèmes, l'humidification et la réponse du bâtiment sont alors simulés avec Trnsys (figure 8).

La combinaison des diverses configurations possibles (tableau 1) représente un potentiel de 276'480 variantes (et monte à 65 million de variantes si l'on inclut les configurations alternatives, pré programmées mais non utilisées, décrites dans l'annexe 3). Afin de pouvoir sélectionner, générer et analyser de façon flexible un certain nombre de ces variantes, nous avons développé une interface de simulation Java/Excel (annexe 3) qui permet de :

- sélectionner une combinaison de variantes et de générer automatiquement les fichiers paramètres pour la simulation dynamique (Trnsys), puis de les exécuter.
- visualiser et traiter les fichiers résultats, notamment pour en extraire les indicateurs permettant la comparaison des variantes.

Outre l'intérêt pour cette recherche particulière, cet outil générique possède un grand potentiel qui pourra certainement être utilisé dans d'autres projets.

Indicateurs

Etant donné le grand nombre de simulations effectuées, nous utiliserons par la suite les indicateurs synthétiques suivants.

Pour le mode free-floating (Free) :

- Nsup : la durée de surchauffe, soit le nombre d'heures en période d'occupation pendant lesquelles la température des bureaux dépasse le seuil de confort de 26.5°C. Afin de respecter la norme, cette durée ne doit pas dépassée 100 h pour une météo standard (SIA 2007).
- Tmax : la température estivale maximale, en période d'occupation des bureaux (8 – 18 h).

Pour le mode air-conditionné (Hvac) :

- Qtot : l'énergie de rafraîchissement auxiliaire (énergie thermique délivrée par le système, à ne pas confondre avec l'énergie électrique nécessaire à la produire).
- Pmax : la puissance de pointe pour le rafraîchissement auxiliaire (puissance thermique).

coolShift

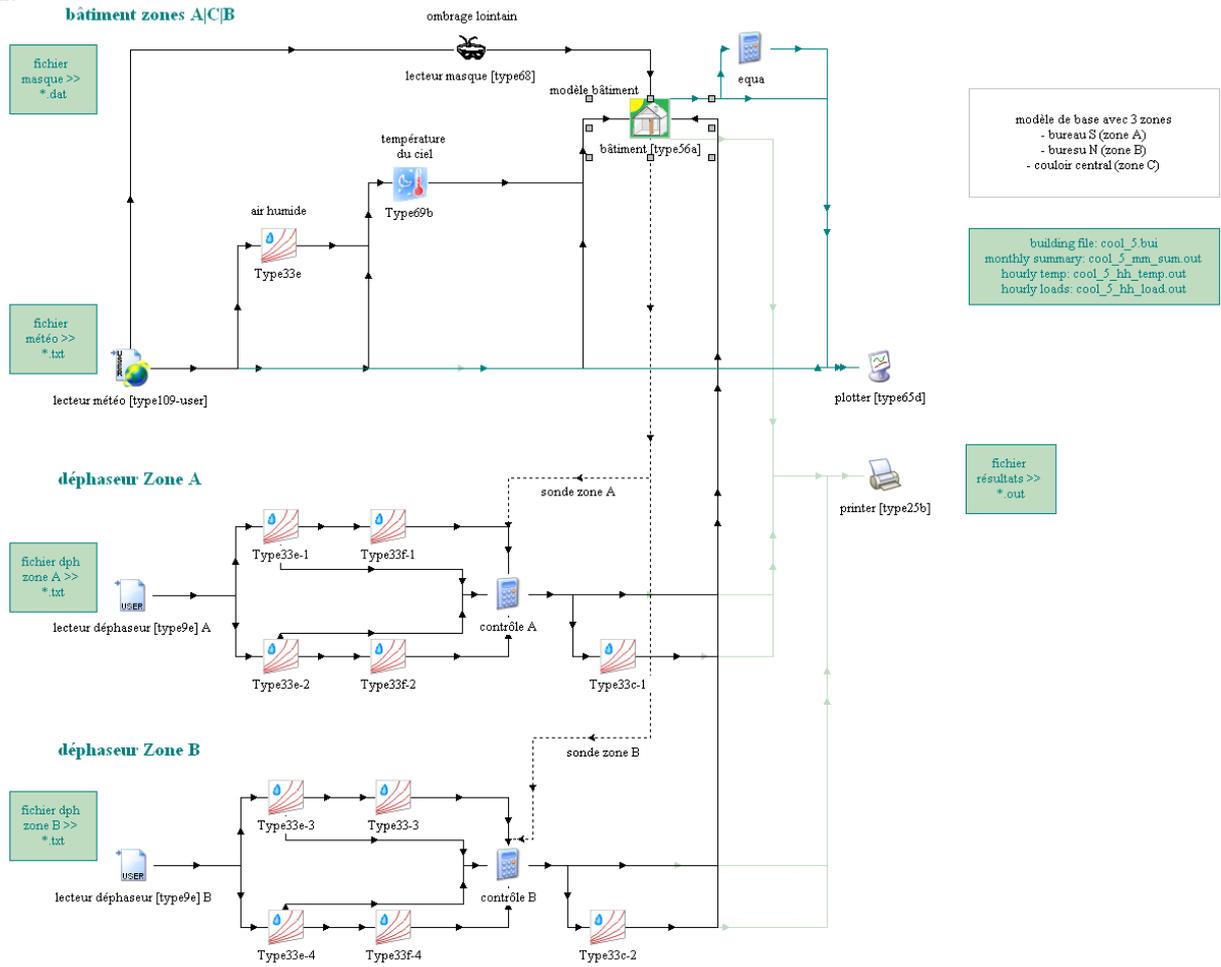


Figure 8 : Modèle Trnsys / IISIBAT.

4. FONCTIONNEMENT TYPE

Configurations considérées

Ce chapitre permet d'illustrer et comparer le fonctionnement des différents systèmes de ventilation en situation urbaine, pour un été normal ou caniculaire (Urb04, Urb03).

Nous nous focaliserons pour cela sur un bâtiment à taux de vitrage moyen et bien protégé (50% – Ext), orienté à l'est sur un horizon bas (EE – 5°) et soumis à apports internes moyens (20W/m²). Le bâtiment est muni d'une structure lourde et accessible, dotée d'une forte isolation thermique (HvBoth – MIN).

Nous comparons alors les systèmes de ventilation suivants : ventilation nocturne directe, puits canadien de 20m et déphasage de 12h (Direct, Pipe20m, Shift12h), considérés en mode simple ou alterné, ainsi qu'avec ou sans humidification (Sgl-Dry, Dbl-Dry, Sgl-Hum, Dbl-Hum). Les systèmes en question sont dimensionnés et régulés pour un débit de ventilation deux fois plus important que le débit d'aération de base (Cnt2, soit 2.6 vol/h). Pour référence, nous considérerons par ailleurs une ventilation nocturne directe en débit de base, avec ou sans humidification adiabatique.

Enfin, ces 12 systèmes sont considérés avec et sans rafraîchissement auxiliaire (Free, Hvac).

Indicateurs

La performance de ces configurations sera discutée au moyen des indicateurs définis au chapitre 3, qui sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Indicateurs de performance (situation urbaine, été normal et caniculaire).

		2004				2003			
		Free		Hvac		Free		Hvac	
		Nsup	Tmax	Qtot	Pmax	Nsup	Tmax	Qtot	Pmax
		h	°C	kWh/m ²	W/m ²	h	°C	kWh/m ²	W/m ²
Dry	Base	1276	34.5	11.1	29.0	1383	37.9	19.0	35.4
	Direct	242	29.8	1.6	24.0	885	33.4	10.6	34.0
	Pipe20m-Sgl	205	28.7	1.3	17.5	898	32.6	11.8	26.4
	Shift12h-Sgl	184	28.8	0.9	18.4	821	32.2	8.6	26.2
	Pipe20m-Dbl	96	27.9	0.4	13.6	734	31.8	7.1	26.1
	Shift12h-Dbl	25	26.9	0.1	5.5	519	30.6	4.3	24.8
Hum	Base	1071	31.8	5.7	20.0	1211	34.2	11.6	24.0
	Direct	4	26.8	0.0	4.2	240	28.8	1.5	19.9
	Pipe20m-Sgl	0	26.0	0.0	0.0	172	28.1	0.8	13.3
	Shift12h-Sgl	0	26.1	0.0	0.4	148	28.0	0.6	15.7
	Pipe20m-Dbl	0	25.4	0.0	0.0	50	27.2	0.2	8.0
	Shift12h-Dbl	0	24.8	0.0	0.0	1	26.7	0.0	3.3

Ces indicateurs sont également représentés graphiquement, par l'intermédiaire de courbes classées sur l'ensemble de la période estivale :

- Pour le mode flottant (Free), la figure 9 représente la réponse thermique du bâtiment (heures d'occupation uniquement). Cette courbe permet de repérer la température estivale maximale

Tmax (intersection avec l'axe y) ainsi que le nombre d'heures au dessus du seuil de confort Nsup (intersection avec la température de confort de 26.5 °C).

- Pour le mode conditionné (Hvac), la figure 10 représente la puissance thermique pour de rafraîchissement auxiliaire. Cette courbe permet de repérer la puissance de pointe Pmax (intersection avec l'axe y) ainsi que l'énergie totale sur la période estivale (intégrale, c'est à dire surface sous la courbe).

La discussion qui suit se réfère également à la dynamique sur la semaine d'été la plus chaude de l'été 2004 et 2003, qui permet plus particulièrement de visualiser la régulation du débit d'air :

- Pour le mode flottant (Free), les figures 11 et 12 retracent météo, ventilation et réponse thermique du bâtiment (avec heures d'occupation marquée par des points).
- Pour le mode conditionné (Hvac), en sus de ces mêmes courbes, les figures 13 et 14 retracent également la puissance thermique de rafraîchissement auxiliaire.

Sans rafraîchissement auxiliaire (mode flottant)

Pour un été normal :

- Avec la seule aération de base, limitée aux heures d'occupation, la réponse thermique des bureaux dépasse la température météo (figure 11), et se situe pendant plus de 500 h au-delà du seuil de 30°C (figure 9).
- Pris directement sur l'extérieur, un débit deux fois plus important, régulé sur les heures fraîches, permet de réduire considérablement la température diurne des bureaux (figure 11). La durée de surchauffe se réduit alors à quelques 240 h, pour une température de pointe d'environ 30°C (figure 9).
- Par amortissement de l'oscillation jour/nuit, le puits canadien permet quant à lui une sur-ventilation en continu du bâtiment, alors que le déphaseur permet quant à lui de déplacer la sur-ventilation nocturne sur les heures chaudes de la journée (figure 11). L'un et l'autre de ces systèmes permettent de réduire la température de pointe d'un degré. Avec quelques 200 h, la durée de surchauffe excède cependant toujours les 100 h fixées par la norme (figure 9).
- Seule l'implémentation de ces systèmes en mode alterné permet de réduire la durée de surchauffe en dessous des 100 h, pour une température de pointe qui ne dépasse pas 28°C.
- Le plus fort potentiel de rafraîchissement va cependant à l'humidification adiabatique (figure 11, droite). Sauf pour l'aération de base, toutes les configurations avec débit accru (ventilation nocturne directe, puits canadien, déphaseur, en mode simple ou alterné) permettent de largement respecter la norme, pratiquement sans ne jamais dépasser le seuil de 26.5°C.

Pour un été caniculaire :

- Bien que ce genre d'été ne soit à strictement parler pas concerné par la norme, et constitue par ailleurs pour l'instant une exception, force est de constater que sans humidification adiabatique l'ensemble des systèmes dimensionnés pour un débit de 2.6 vol/h résultent en plus de 500 h de surchauffe, pour une température de pointe supérieure à 30°C (figure 9).
- Avec humidification adiabatique, la réponse du bâtiment correspond par contre grosso modo à celle d'un été standard sans humidification adiabatique, avec un nombre d'heures de surchauffe proche ou en dessous des 100 h.

Avec rafraîchissement auxiliaire (mode conditionné)

Pour un été normal :

- Avec la seule aération de base (1.3 vol/h diurne), le maintien strict du seuil de 26.5°C nécessite quelques 10 kWh/m² de rafraîchissement auxiliaire, pour une puissance de pointe d'environ 30 W/m² (tableau 5 et figure 10).
- Sans recours à l'humidification adiabatique, tous les systèmes dimensionnés pour de la ventilation accrue (2.6 vol/h régulé) permettent de réduire l'énergie thermique auxiliaire d'au moins un facteur 10, pour des puissances de pointe aux alentours de 20 W/m² en mode simple, respectivement 10 W/m² en mode alterné. Ces ordres de grandeur ouvrent en principe la porte à des systèmes de rafraîchissement auxiliaire à « haute température », avec les divers avantages que cela comporte : amélioration du coefficient de performance, utilisation de sources tempérées, possibilité d'utiliser le même système de distribution que pour le chauffage.
- Conformément à ce que nous avons vu plus haut, la mise en œuvre de l'humidification adiabatique permet quant à elle de se passer complètement de système de rafraîchissement auxiliaire.

Pour un été caniculaire :

- Par rapport à un été normal, l'énergie thermique de rafraîchissement pour le cas de base est 2 fois plus importante (environ 20 kWh/m²), pour une puissance de pointe à peine un peu plus élevée (environ 35 W/m²).
- Sans recours à l'humidification adiabatique, les systèmes dimensionnés pour de la ventilation accrue permettent de réduire l'énergie de rafraîchissement environ d'un facteur 2, voir plus pour les systèmes de stockage mis en œuvre en mode alterné. Etant donné la température météo élevée, ces systèmes de stockage ne permettent par contre plus toujours de sur-ventiler pendant la journée, de sorte que la pointe de puissance thermique de pointe ne baisse pas ou très peu (figure 14, gauche).
- Avec humidification adiabatique, le rafraîchissement auxiliaire correspond par contre grosso modo à celui d'un été standard sans humidification adiabatique, avec les avantages discutés ci-dessus.

En guise de synthèse

En situation urbaine, un bâtiment administratif muni de protections solaires irréprochables, bien isolé et sujet à des gains internes ne dépassant pas 20 W/m², bénéficiera largement d'un système de ventilation régulée, basée sur un débit d'environ 2.5 vol/h, comprenant de préférence un stock thermique jour/nuit (puits canadien ou déphaseur) et/ou un système d'humidification adiabatique.

- Dans le cas d'un été standard, le seul stock thermique permet de fortement réduire le rafraîchissement auxiliaire (90% pour l'énergie, 60% pour la puissance de pointe), voir de s'en passer complètement si le stock est utilisé en alternance avec de la ventilation nocturne directe. L'humidification adiabatique peut quant à elle être mise en œuvre avec de la ventilation nocturne directe, sans besoin de stock, ce qui permet déjà de garantir le confort de 26.5°C sans recours à du rafraîchissement auxiliaire.
- Dans le cas d'un été caniculaire, seul le recours à l'humidification adiabatique permet de réduire de façon conséquente à la fois énergie et puissance de pointe nécessaire au rafraîchissement auxiliaire. La combinaison de l'humidification adiabatique et du stockage thermique, surtout lorsque mis en œuvre en mode alterné, permet même de se passer complètement de rafraîchissement auxiliaire.

Notons à ce propos que la consommation d'eau pour l'humidification adiabatique (dans tous les cas moins de 50 litre/m² par été, cf. chapitre suivant) reste suffisamment faible pour ne pas être un enjeu.

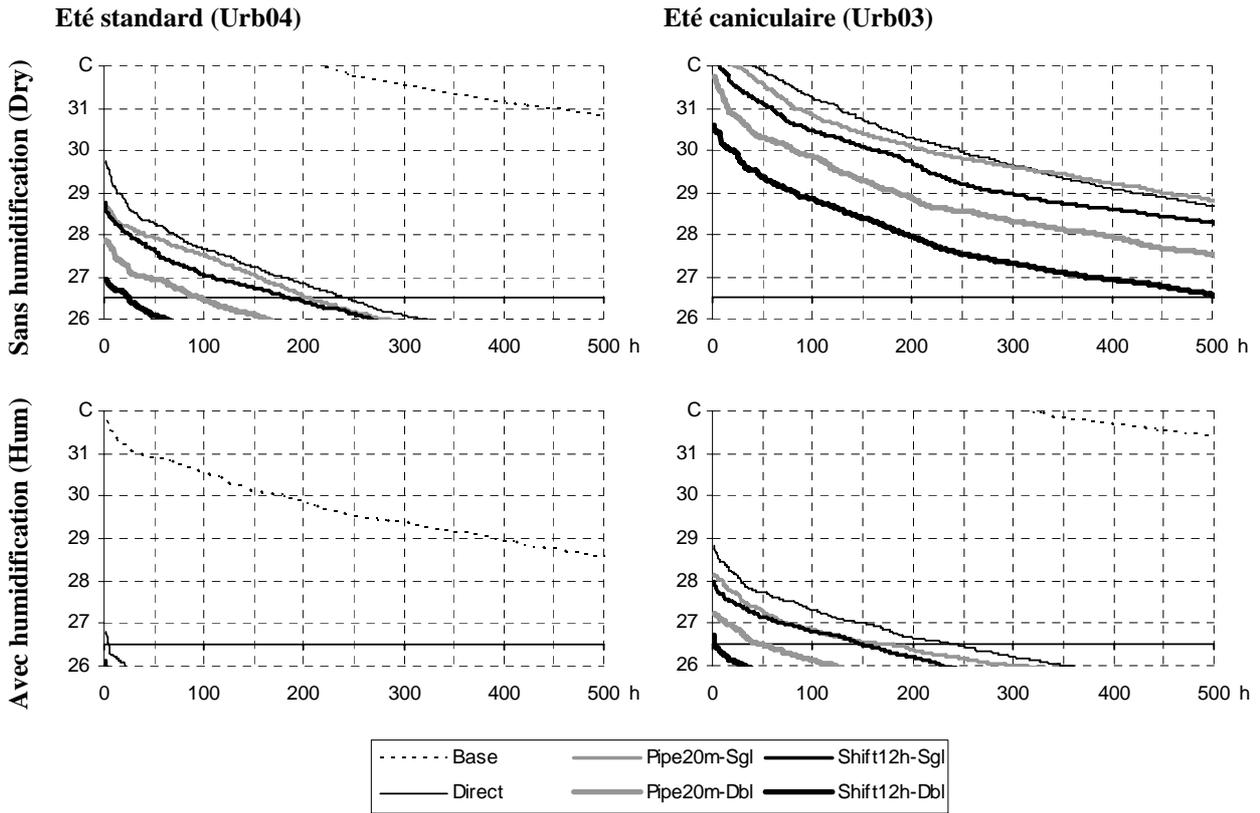


Figure 9 : Températures classées, situation urbaine en mode flottant (Free).

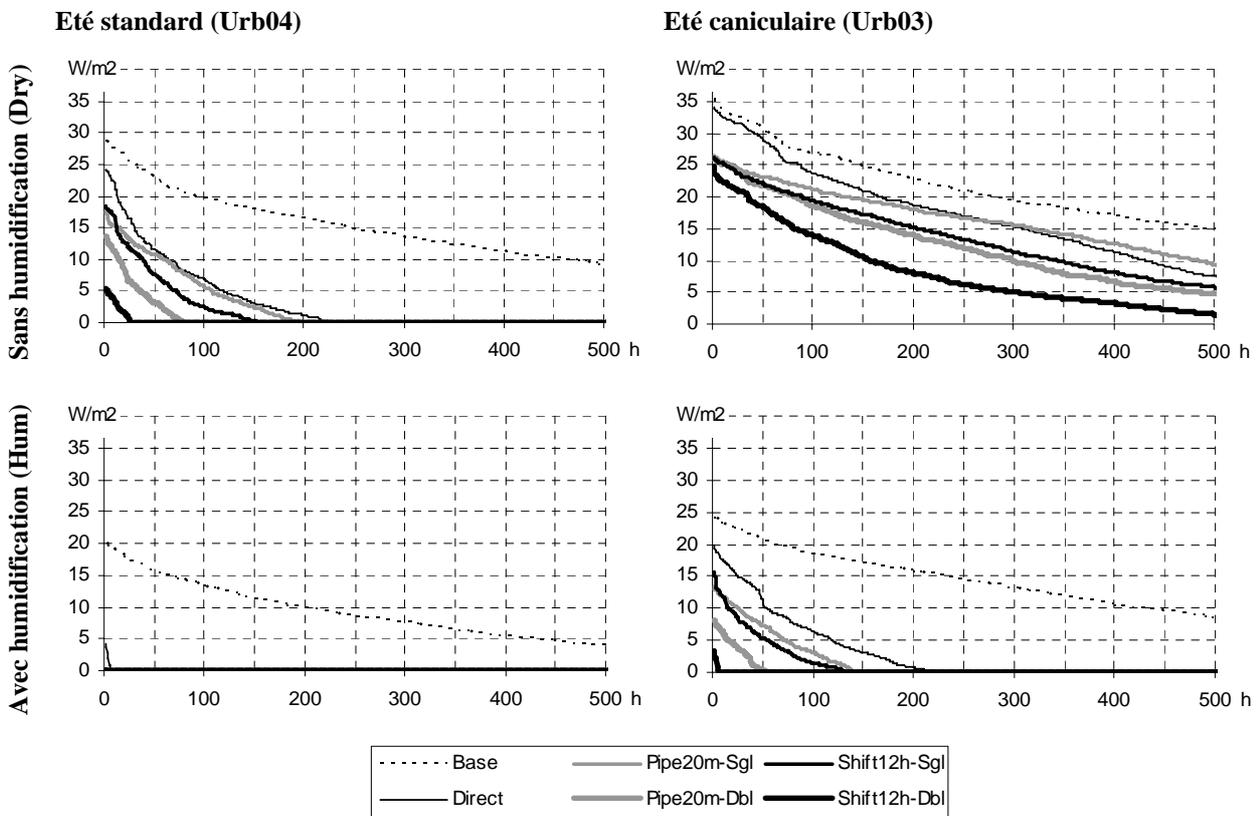


Figure 10 : Puissances classées, situation urbaine en mode conditionné (Hvac).

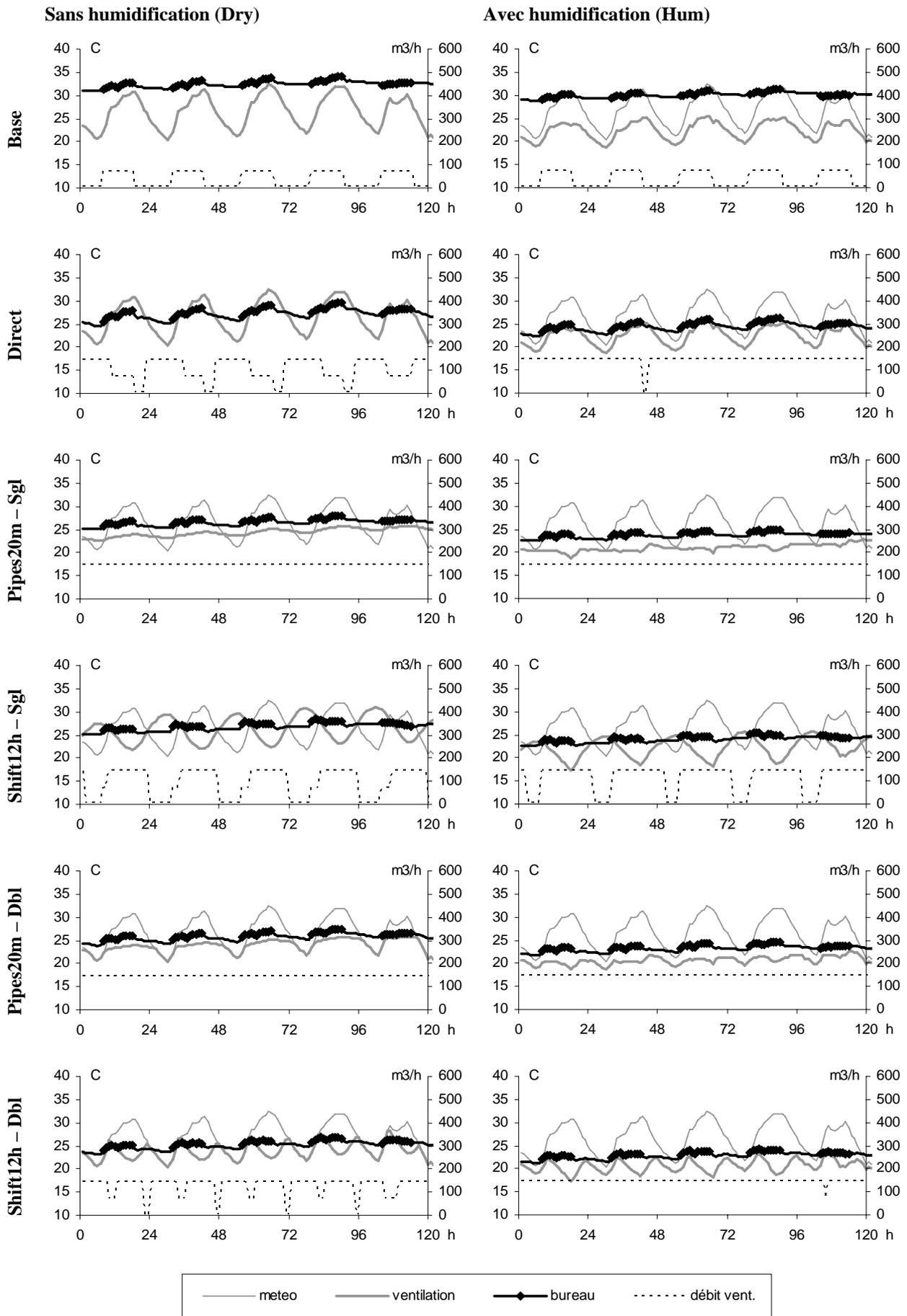


Figure 11 : Semaine d'été standard (2004), mode flottant (Free).

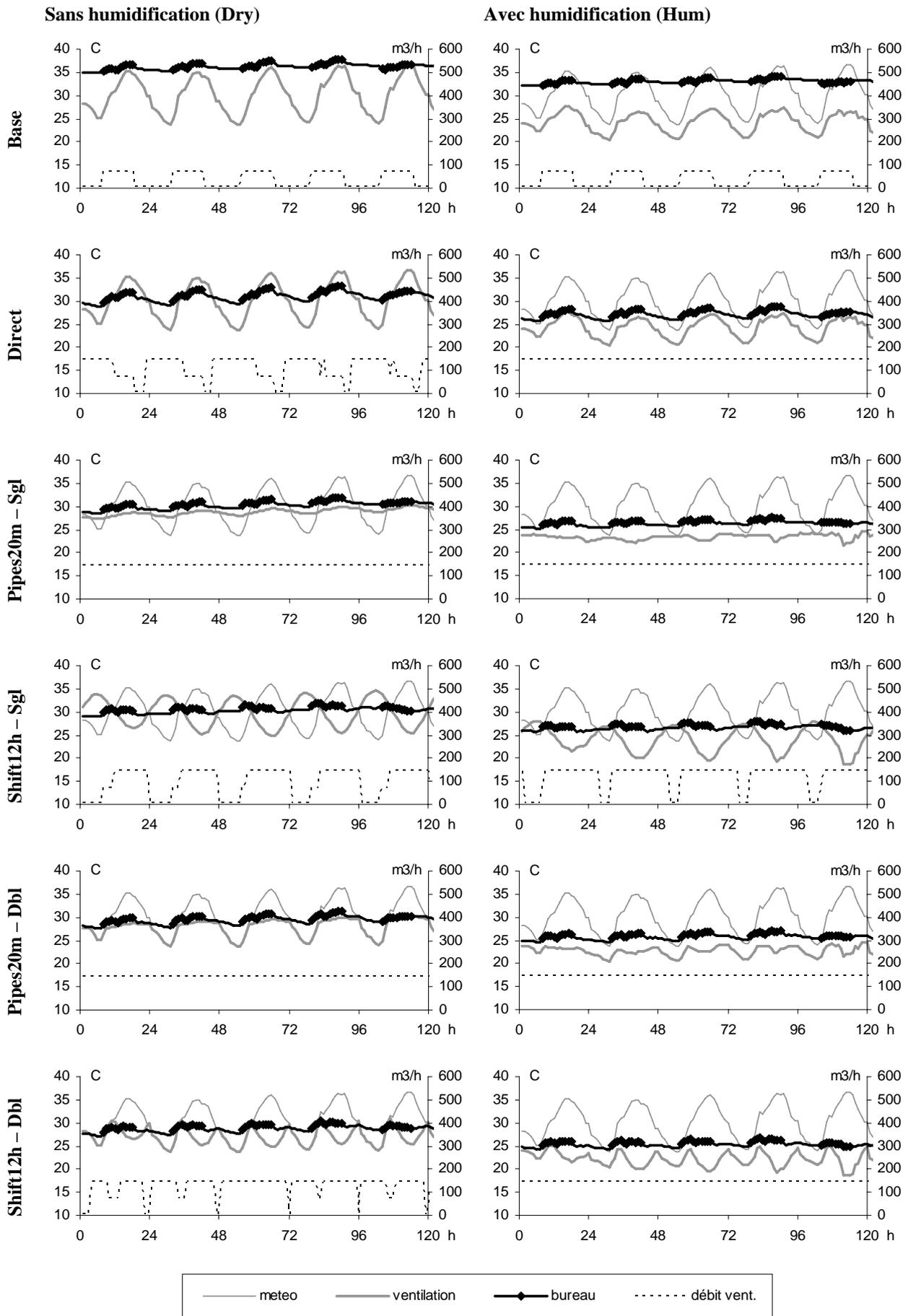


Figure 12 : Semaine d'été caniculaire (2003), mode flottant (Free).

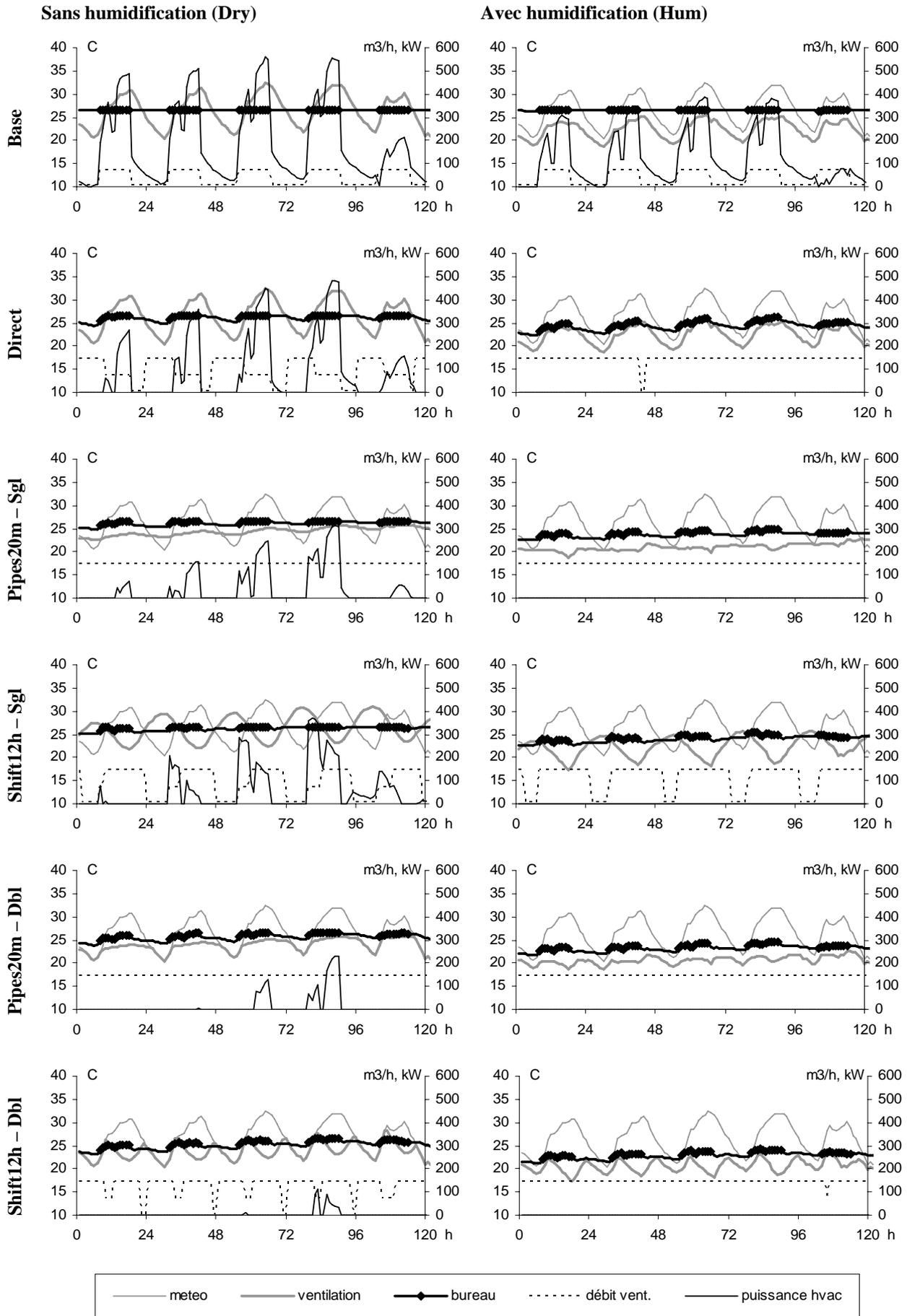


Figure 13 : Semaine d'été standard (2004), mode conditionné (Hvac).

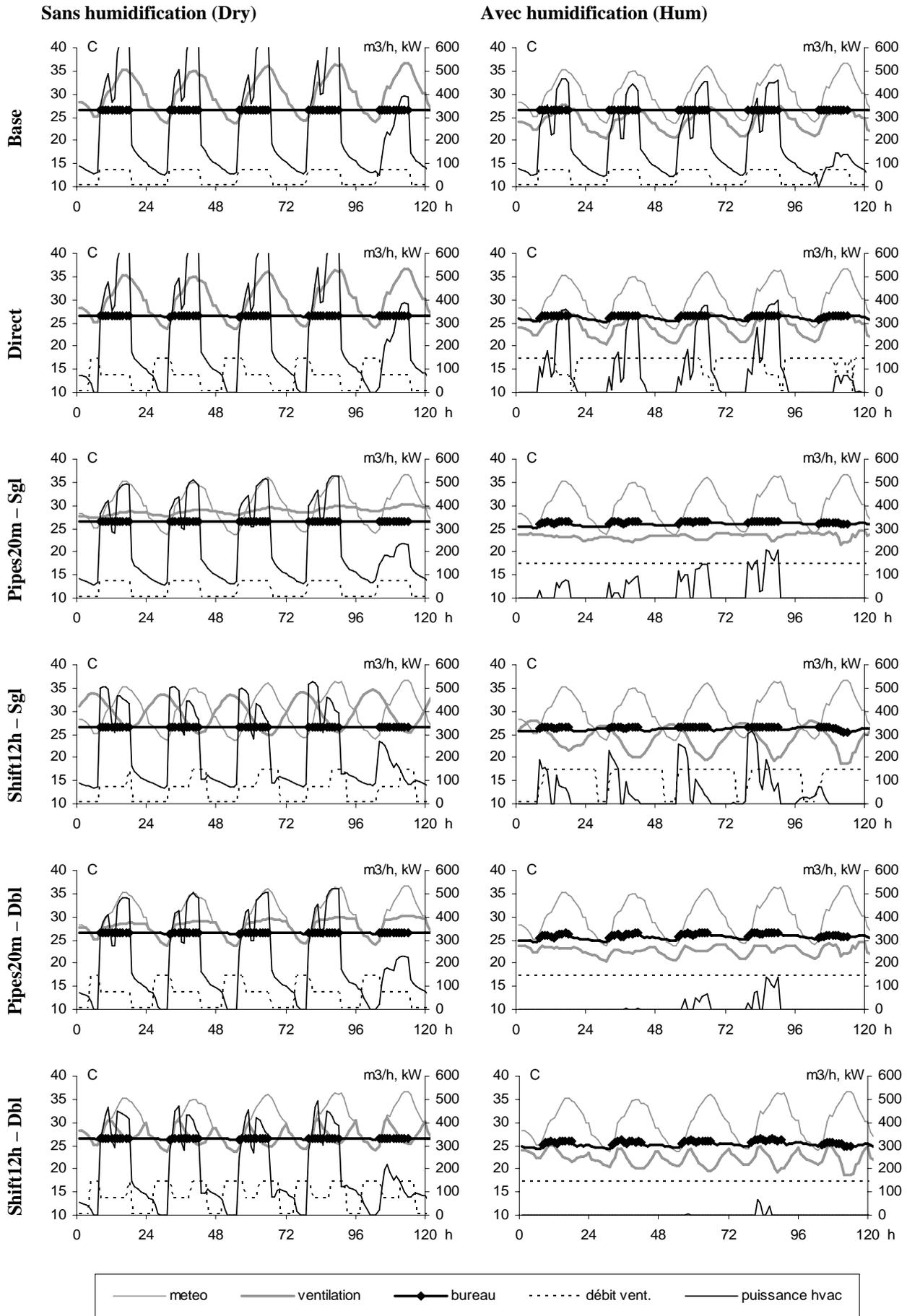


Figure 14 : Semaine d'été caniculaire (2003), mode conditionné (Hvac).

5. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

5.1. Effet de l'accès solaire

Configurations considérées

Dans un premier temps, l'étude de sensibilité vise à appréhender la réponse du bâtiment en mode d'aération de base (External – Base – SglDry). Effectuée pour une météo de campagne et une année standard (Rur04), cette étude permet de délimiter les variantes potentiellement candidates à du rafraîchissement passif.

L'étude concerne en particulier l'accès solaire (orientation, taux de vitrage, type de protection solaire), et sa mise en relation avec une palette élargie de gains internes et de variantes constructives (masse thermique et isolation).

La combinaison des configurations retenues (tableau 6) donne lieu à 864 variantes.

Tableau 6 : Configurations pour l'étude de l'accès solaire.

MET	ORN	GLZ	SHF	SHP	INT	MAT	INS	VNT	MOD	CNT	VAC
Rur04	SS	20%	05°	Off	10W/m ²	LtNone	80s	Direct	Sgl-Dry	Base	Free
	EE	50%		Int	20W/m ²	LtBoth	MIN				Hvac
		80%		Ext	35W/m ²	HvNone					
						HvBoth					

Les résultats de simulation sont analysés ci-dessous, en mode flottant ainsi qu'en mode conditionné. L'analyse se base sur les figures 15 à 18 (en fin de chapitre), qui représentent les indicateurs définis plus haut :

- en mode flottant, durée de surchauffe (Nsup) et température maximale (Tmax).
- en mode conditionné, énergie totale (Qtot) et puissance de pointe (Pmax) pour le rafraîchissement auxiliaire.

Ces indicateurs sont représentés en fonction variante de construction / exploitation du bâtiment (colonnes de gauche) et de l'accès solaire (lignes du haut). La valeur de l'indicateur est mise en relief par un système de couleur reflétant l'échelle de gradation situé en dessus du graphique.

Sans rafraîchissement auxiliaire (mode flottant)

L'analyse des figures 15 et 16 donne lieu aux constats suivants.

- Pour tous les cas considérés ici, c'est-à-dire en se limitant à un débit d'aération uniquement sur les heures d'occupation diurnes, sans apport de fraîcheur nocturne, la durée de surchauffe dépasse largement la valeur de 100 h fixée par la norme, et la température estivale de pointe excède en général les 30°C.
- Cela étant, on vérifie l'inefficacité des protections solaires internes (Int), qui induisent la même surchauffe que l'absence de protection (None). La situation est toute différente pour une protection solaire extérieure, du moins pour des gains internes limités à 10 W/m².
- A cet égard, l'orientation nord-sud est un peu plus clémente que l'orientation est-ouest. Les deux composantes de cette dernière ne présentent par contre pas de différence notable.

Avec rafraîchissement auxiliaire (air conditionné)

Dans le cas d'une orientation est-ouest, et sauf pour le cas de bonnes protections solaires (Ext) et de gains internes limités (10 W/m^2), le maintien de la consigne de 26.5°C nécessite plus de 5 kWh/m^2 de rafraîchissement auxiliaire, avec une puissance de pointe supérieure à 20 W/m^2 (figures 17 et 18). Pour le reste, les effets de l'orientation et de la protection solaire sont encore plus marqués qu'en mode flottant.

5.2. Rafrâichissement passif

Configurations considérées

Etant donné ce qui précède, nous nous focalisons en un deuxième temps sur un bâtiment muni de protections solaires extérieures et à taux de vitrage moyen (Ext – 50%), pour une orientation choisie en l'occurrence à l'est, sur un horizon bas (EE – 5°).

L'étude concerne une palette élargie des systèmes de rafraîchissement passif présentées au chapitre 2 (ventilation nocturne directe, puits canadien de 10 et 20m, déphasage de 8 et 12h, avec ou sans humidification adiabatique), avec un dimensionnement pour des débits 1, 2 ou 4 fois celui de l'aération de base. L'étude est menée pour les quatre météo de référence, ainsi que pour diverses variantes de gains internes et de variantes constructives (masse thermique et isolation).

La combinaison des configurations retenues (tableau 7) donne lieu à 5'760 variantes.

Tableau 7 : Configurations pour l'étude du rafraîchissement passif.

MET	ORN	GLZ	SHF	SHP	INT	MAT	INS	VNT	MOD	CNT	VAC
Rur04	EE	50%	05°	Ext	10W/m^2	LtBoth	80s	Direct	Sgl-Dry	Cnt1	Free
Urb04					20W/m^2	HvBoth	MIN	Pipes10m	Dbl-Dry	Cnt2	Hvac
Rur03					35W/m^2			Pipes20m	Sgl-Hum	Cnt4	
Urb03								Shift08h	Dbl-Hum		
								Shift12h			

Les résultats de simulations sont analysés ci-dessous, en mode flottant ainsi qu'en mode conditionné. L'analyse se base sur les figures 19 à 22 (en fin de chapitre), qui représentent les mêmes indicateurs que précédemment. Ceux-ci sont représentés ici en fonction du système de ventilation (colonnes de gauche) et de la variante de construction / exploitation (lignes du haut). La valeur de l'indicateur est mise en relief par le même système de couleur que précédemment.

Pour analyse complémentaire, se référer également aux figures de l'annexe 1.

Sans rafraîchissement auxiliaire (mode flottant)

Toutes météo confondues, pour un bâtiment muni de protections solaires irréprochables, les figures 19 et 20 permettent les constats suivants :

- Au niveau du bâtiment, le paramètre déterminant est la maîtrise des gains internes, qu'il s'agit de maintenir aussi bas que possible. L'isolation est un facteur de deuxième ordre, qui soulève cependant les remarques suivantes. A gains internes égaux, une forte isolation (MIN) donne de meilleurs résultats qu'une faible isolation (80s), cela du moins pour les plages de configurations compatibles avec la norme (donc pour une température de bureau inférieure à la météo). Cela est particulièrement vrai pour les météo caniculaires. Enfin, du moment qu'elle reste accessible, une masse thermique moyenne se différencie relativement peu d'une masse thermique lourde (du moins dans la plage de variation restreinte retenus dans cette étude).

- Au niveau du système de ventilation, les paramètres principaux sont le débit d'air (contrôlé thermiquement) et le complément par humidification adiabatique, qui permettent de réduire considérablement durée de surchauffe et température de pointe. Cependant, lorsque la ventilation nocturne directe (sèche ou humidifiée) ne permet pas le respect de la norme, les systèmes de stockage inertiel (puits canadien, déphasage thermique) permettent dans plusieurs cas de gagner les quelques dizaine d'heures manquantes, respectivement de gagner 1 à 2°C supplémentaires sur la température estivale de pointe. Cela est particulièrement le cas lorsque ces systèmes sont implantés en mode alterné avec de la ventilation nocturne directe (Dbl).
- Cela étant, pour une occupation diurne (8 – 18 h), le système de stockage fournissant la meilleure prestation est clairement le déphasage de 8h (voir également annexe 1).
- Enfin, de façon tout à fait générale, il existe une bonne corrélation entre durée de surchauffe et température maximale (figure 19 et 20). Pour les quatre météo, l'étude confirme en particulier qu'aux configurations permettant de respecter la norme de confort ($N_{sup} < 100h$) correspond en général (94% des cas) une température estivale de pointe en dessous de 28°C.

Parmi les diverses configurations permettant de maintenir un seuil de confort défini comme acceptable (durée de surchauffe inférieure à 100 h), nous identifions en particulier les solutions de rafraîchissement passives suivantes (figure 19 et 20, zones encadrées), qui permettent une certaine robustesse par rapport aux étés caniculaires.

En situation urbaine :

- Avec des gains internes ne dépassant pas 20 W/m² et une bonne isolation thermique, de très bons résultats sont obtenus avec une stratégie de ventilation régulée, basée sur un débit d'environ 2.5 vol/h avec humidification adiabatique modérée (Cnt2 – Hum). En vue des étés caniculaires, un tel système bénéficiera de surcroît d'un stockage jour/nuit (puits canadien ou déphaseur), qui permettra de maintenir proche ou en dessous de 100 h le dépassement du seuil de 26.5°C.
- Le même type de solution est en principe envisageable pour des gains internes supérieurs, à condition cependant de prévoir des débits de ventilation plus importants (de l'ordre de 5 vol/h pour 35 W/m²), avec les conséquences induites sur le système de distribution d'air, la dimension du stock thermique et la consommation d'électricité auxiliaire.

En situation rurale, ce même type de systèmes peut prendre des dimensions plus petites :

- Pour des gains internes ne dépassent pas 10 W/m², il suffit d'un système dimensionné pour l'aération de base, muni de régulation et humidification (Cnt1 – Hum).
- En été standard ce système fera également l'affaire pour des gains internes de 20 W/m², mais aura du mal à suivre sur un été caniculaire, sauf en présence de stockage jour/nuit utilisé en mode alterné. De façon alternative, ainsi que pour des gains internes de 35 W/m², on se reportera sur un système de 2.5 vol/h.

Avec rafraîchissement auxiliaire (mode conditionné)

Les configurations identifiées ci-dessus permettent non seulement de s'affranchir du rafraîchissement auxiliaire (figure 21 et 22, zones encadrées), mais également de réduire fortement ce dernier lors de mises en œuvre alternatives :

- Sans humidification adiabatique (Cnt2 – Dry en situation urbaine, Cnt1 – Dry en situation rurale), ces systèmes de ventilation accrue permettent encore de subvenir au confort lors d'étés normaux, mais non lors d'étés caniculaires. Par contre, lorsqu'ils comportent un stock

thermique, ils permettent de réduire alors d'environ 50% l'énergie thermique de rafraîchissement, et d'environ 30% la puissance de pointe associée.

- Tels quels (Cnt2 – Hum en situation urbaine, Cnt1 – Hum en situation rurale), ces systèmes permettent également de réduire fortement le rafraîchissement auxiliaire pour le cas de gains internes plus importants, ici de 35 W/m^2 . La réduction est de l'ordre de 80% pour l'énergie, et 40% pour la puissance de pointe.

Autres considérations

Pour finir, les constatations qui précèdent font l'objet des remarques suivantes :

- La mise en œuvre de ces systèmes de ventilation accrue nécessite une attention particulière à la consommation électrique additionnelle, qui n'a pas été abordée dans cette étude. A cet égard, ce sont souvent moins les systèmes de stockage que la distribution d'air dans le bâtiment qui peuvent constituer le goulet d'étranglement.
- La quantité d'eau absorbée par l'humidification adiabatique (dans la grande majorité des cas moins de 50 litre/m^2 par été, cf. figures 23 et 24) reste par contre suffisamment faible pour ne pas être un enjeu.
- A priori, le potentiel de l'humidification adiabatique pourrait encore être augmenté, puisqu'il n'a été considéré ici que de façon modérée (efficacité de 50%). A ce point, la question de l'hygiène et de l'humidité interne du bâtiment n'a par contre pas été abordée.

Nsup [h] > 0 50 100 150 200 400 600 800

Building	Est								Ouest								Sud								Nord							
	Shading and glazing								Shading and glazing								Shading and glazing								Shading and glazing							
	Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None									
20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%						
10W 80s	HvBoth	363	375	396	1174	1440	1465	1179	1446	1466	368	402	423	1169	1436	1473	1173	1442	1477	243	227	204	927	1217	1324	944	1224	1343				
	HvNone	367	391	403	1175	1440	1470	1184	1447	1479	370	419	445	1166	1431	1474	1172	1442	1478	252	230	208	912	1206	1328	922	1217	1340				
	LiBoth	409	435	454	1194	1449	1466	1202	1450	1469	418	460	475	1171	1424	1473	1181	1436	1477	285	253	236	944	1220	1355	958	1229	1362				
	LiNone	458	453	468	1198	1449	1467	1207	1451	1469	451	476	492	1184	1429	1476	1194	1439	1482	303	269	244	972	1225	1358	981	1240	1370				
	Min	HvBoth	659	742	782	1200	1456	1500	1201	1464	1501	662	752	799	1193	1443	1494	1194	1448	1495	527	486	457	995	1251	1313	996	1253	1315			
	HvNone	642	738	758	1201	1455	1506	1202	1459	1506	641	744	775	1193	1429	1497	1195	1435	1497	515	495	472	985	1245	1319	987	1247	1321				
LiBoth	704	771	779	1205	1464	1501	1208	1466	1503	705	781	817	1196	1456	1503	1198	1459	1506	556	529	508	1047	1265	1385	1051	1269	1392					
LiNone	765	807	822	1225	1472	1507	1227	1472	1509	766	812	846	1207	1465	1509	1211	1467	1511	613	575	536	1061	1273	1386	1061	1278	1389					
20W 80s	HvBoth	915	811	705	1320	1489	1500	1323	1490	1501	917	815	757	1305	1481	1505	1314	1487	1505	747	540	412	1206	1323	1426	1208	1333	1431				
	HvNone	903	804	718	1321	1489	1501	1326	1491	1506	905	818	762	1301	1482	1502	1305	1487	1505	728	557	435	1190	1328	1421	1195	1336	1427				
	LiBoth	927	817	725	1368	1478	1498	1382	1482	1502	926	830	765	1347	1479	1493	1359	1484	1497	775	588	464	1206	1380	1431	1217	1392	1441				
	LiNone	952	835	742	1373	1483	1501	1387	1483	1504	954	844	787	1359	1485	1496	1372	1486	1500	818	614	479	1225	1383	1432	1233	1396	1439				
	Min	HvBoth	1159	1149	1134	1340	1494	1513	1342	1494	1516	1156	1149	1142	1340	1486	1513	1341	1486	1513	1094	1036	971	1259	1341	1462	1259	1344	1465			
	HvNone	1139	1125	1106	1342	1501	1517	1343	1502	1517	1136	1129	1124	1335	1486	1516	1337	1487	1517	1072	1013	956	1263	1342	1444	1264	1343	1445				
LiBoth	1170	1157	1121	1435	1508	1522	1440	1509	1523	1170	1160	1132	1417	1509	1523	1426	1510	1524	1113	1048	972	1290	1421	1492	1292	1425	1494					
LiNone	1185	1171	1140	1438	1509	1522	1442	1511	1525	1182	1170	1147	1425	1508	1524	1430	1510	1524	1133	1063	991	1304	1421	1493	1304	1425	1494					
35W 80s	HvBoth	1318	1224	1121	1500	1521	1534	1501	1523	1535	1318	1227	1142	1489	1521	1530	1492	1523	1531	1276	1115	966	1429	1495	1517	1437	1499	1520				
	HvNone	1321	1220	1111	1503	1527	1538	1505	1528	1540	1318	1231	1138	1487	1524	1537	1492	1525	1537	1277	1094	951	1415	1491	1510	1417	1495	1516				
	LiBoth	1352	1238	1117	1510	1528	1537	1510	1530	1542	1348	1243	1142	1513	1526	1538	1513	1528	1542	1299	1114	963	1478	1515	1528	1484	1516	1530				
	LiNone	1357	1245	1132	1513	1531	1539	1513	1532	1542	1353	1246	1151	1514	1528	1540	1514	1530	1543	1310	1127	974	1477	1513	1529	1483	1516	1531				
	Min	HvBoth	1436	1436	1416	1506	1522	1538	1507	1523	1539	1435	1435	1414	1500	1525	1537	1500	1526	1537	1411	1374	1331	1469	1509	1525	1469	1510	1525			
	HvNone	1423	1420	1396	1508	1529	1544	1509	1529	1545	1423	1420	1398	1497	1527	1538	1500	1527	1538	1398	1374	1332	1468	1509	1527	1470	1511	1529				
LiBoth	1473	1456	1441	1520	1539	1557	1521	1541	1558	1475	1457	1438	1518	1537	1553	1518	1537	1553	1460	1420	1374	1507	1526	1538	1508	1527	1538					
LiNone	1475	1461	1440	1521	1542	1557	1521	1543	1558	1475	1460	1439	1518	1537	1553	1520	1537	1553	1458	1421	1377	1508	1526	1538	1509	1526	1539					

Figure 15 : Etude protections solaires, sans ventilation nocturne : durée de surchauffe (Free).

Tmax [C] < 22 24 26 28 30 35 40 50

Building	Est								Ouest								Sud								Nord							
	Shading and glazing								Shading and glazing								Shading and glazing								Shading and glazing							
	Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None		Ext	Int	None									
20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%						
10W 80s	HvBoth	29.7	30.1	30.3	33.5	37.8	40.5	33.6	38	40.7	29.8	30.2	30.3	33.9	38.6	41.5	34.1	38.7	41.6	29.1	29.1	29.1	31.9	34.8	36.8	32	34.9	36.9				
	HvNone	29.9	30.4	30.6	33.7	38.3	41.2	33.8	38.4	41.4	29.9	30.4	30.6	34.3	39.2	42.4	34.5	39.4	42.6	29.3	29.4	29.4	32.2	35.3	37.5	32.3	35.4	37.6				
	LiBoth	30.4	30.8	31	34.4	39	42	34.5	39.2	42.3	30.4	30.9	31.1	35.1	40	43.3	35.2	40.2	43.5	29.8	29.8	29.7	32.8	35.8	37.9	32.8	35.9	38				
	LiNone	30.5	30.8	31.1	34.5	39.1	42.1	34.6	39.3	42.3	30.5	30.9	31.2	35.2	40.1	43.3	35.3	40.3	43.5	29.9	29.9	29.8	32.9	35.9	38	33	36	38.1				
	Min	HvBoth	30.2	30.7	31.1	33.3	37.1	40.2	33.3	37.2	40.3	30.2	30.7	31.1	33.5	37.7	40.9	33.6	37.8	41	29.8	29.9	30	31.7	34.3	36.2	31.8	34.4	36.3			
	HvNone	30.3	30.9	31.3	33.4	37.4	40.6	33.5	37.5	40.8	30.3	30.9	31.3	33.7	38.2	41.5	33.7	38.3	41.6	29.9	30.1	30.2	31.9	34.6	36.7	31.9	34.6	36.7				
LiBoth	30.9	31.4	31.7	34	38.1	41.5	34.1	38.2	41.6	30.9	31.4	31.8	34.3	39	42.4	34.4	39.1	42.5	30.5	30.6	30.7	32.6	35.2	37.3	32.6	35.3	37.3					
LiNone	31.1	31.5	31.9	34.2	38.3	41.6	34.3	38.3	41.7	31.1	31.5	31.9	34.5	39.1	42.5	34.6	39.2	42.6	30.7	30.7	30.8	32.7	35.3	37.4	32.8	35.4	37.5					
20W 80s	HvBoth	31.7	31.7	31.7	35.5	39.4	41.9	35.7	39.6	42.1	31.8	31.8	31.7	36	40.2	42.9	36.1	40.4	43	31.2	30.8	30.5	34	36.4	38.2	34	36.5	38.3				
	HvNone	32	32	32	35.8	39.9	42.6	35.9	40.1	42.8	32	32.1	32.1	36.5	40.9	43.9	36.6	41.1	44.1	31.4	31.1	30.8	34.3	36.9	38.9	34.3	37.1	39				
	LiBoth	32.4	32.5	32.5	36.5	40.7	43.5	36.6	40.9	43.7	32.5	32.6	32.6	37.2	41.8	44.7	37.3	42	44.9	31.9	31.5	31.2	34.8	37.4	39.3	34.9	37.5	39.4				
	LiNone	32.6	32.6	32.6	36.6	40.7	43.5	36.8	40.9	43.7	32.7	32.7	32.7	37.3	41.8	44.8	37.4	42	45	32	31.6	31.3	35	37.5	39.4	35	37.6	39.5				
	Min	HvBoth	32.8	33	33	35.9	39.4	42.1	35.9	39.5	42.2	32.8	33	33.1	36.1	40	42.9	36.2	40.1	43	32.4	32.2	32	34.4	36.5	38.2	34.4	36.6	38.3			
	HvNone	33	33.2	33.3	36.1	39.6	42.6	36.1	39.7	42.7	33	33.2	33.3	36.3	40.5	43.6	36.4	40.6	43.7	32.7	32.8	32.9	33.9	36.5	38.7	34.6	36.9	38.7				
LiBoth	33.6	33.7	33.8	36.7	40.4	43.5	36.8	40.5	43.6	33.6	33.7	33.8	37.1	41.3	44.5	37.2	41.4	44.6	33.2	32.9	32.7	35.2	37.5	39.3	35.3	37.6	39.3					
LiNone	33.8	33.9	33.9	36.9	40.5	43.6	37	40.6	43.7	33.8	33.9	33.9	37.3	41.5	44.6	37.3	41.5	44.7	33.4	33.1	32.9	35.4	37.6	39.4	35.5	37.7	39.5					
35W 80s	HvBoth	35.5	34.7	34.3	39.4	42.4	44.4	39.5	42.6	44.6	35.6	34.8	34.3	39.9	43.3	45.5	40	43.5	45.6	34.9	33.8	33.1	37.7	39.4	40.7	37.8	39.5	40.8				
	HvNone	35.8	35.2	34.8	39.7	42.9	45.2	39.8	43.1	45.4	35.9	35.2	34.9	40.4	44.1	46.6	40.5	44.3	46.8	35.2	34.2	33.5	38.1	40	41.5	38.1	40.1	41.6				
	LiBoth	36.4	35.8	35.3	40.5	43.8	46.1	40.6	44	46.3	36.5	35.9	35.4	41.2	45	47.5	41.3	45.2	47.7	35.8	34.7	34	38.7	40.5	41.9	38.7	40.6	42				
	LiNone	36.5	35.9	35.4	40.6	43.8	46.1	40.8	44	46.3	36.6	35.9	35.5	41.3	45.1	47.6	41.4	45.2	47.8													

Q [kWh/m2] > 0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 5.0 10.0

Building	Est	Shading and glazing								None	20%	50%	80%	Ext	20%	50%	80%	None	20%	50%	80%	Ext	20%	50%	80%	None	20%	50%	80%	Ext	20%	50%	80%	None	20%	50%	80%																
		Int				None																																Int				None				Int				None			
		20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%																													80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%
10W 80s	HvBoth	1.5	2.0	2.5	9.6	25.4	40.5	9.9	26.2	41.5	1.5	2.1	2.6	9.8	26.1	41.2	10.1	26.9	42.3	0.9	0.8	0.8	6.6	17.9	29.3	6.8	18.5	30.2	1.1	1.7	2.4	2.1	4.4	6.6	2.1	4.6	6.8																
		HvNone	1.5	2.2	2.7	9.7	25.6	40.8	10.0	26.4	41.8	1.5	2.2	2.9	10.0	26.3	41.6	10.3	27.1	42.6	0.9	0.9	0.9	6.8	18.4	30.2	7.0	18.9	31.0	1.1	1.9	2.7	2.1	4.6	6.9	2.2	4.7	7.2															
		LiBoth	1.8	2.4	3.1	10.0	26.2	41.4	10.4	27.0	42.4	1.8	2.5	3.3	10.4	27.0	42.2	10.7	27.7	43.3	1.1	1.0	1.0	7.1	18.7	30.7	7.3	19.3	31.5	1.4	2.1	3.0	2.4	4.9	7.2	2.5	5.1	7.5															
	Min	LiNone	1.9	2.6	3.2	10.4	26.6	41.8	10.7	27.4	42.9	2.0	2.7	3.4	10.7	27.3	42.6	11.0	28.1	43.7	1.2	1.1	1.1	7.5	19.2	31.2	7.7	19.7	32.1	1.5	2.3	3.1	2.6	5.1	7.5	2.7	5.3	7.7															
		HvBoth	2.1	2.9	3.6	7.7	18.5	29.6	7.8	18.8	30.0	2.1	3.0	3.8	7.8	18.9	30.1	7.9	19.2	30.5	1.5	1.5	1.5	5.6	13.5	21.7	5.7	13.7	22.0	1.8	2.6	3.4	2.7	4.9	7.0	2.8	5.0	7.1															
		HvNone	2.1	2.9	3.7	7.6	18.5	29.7	7.7	18.8	30.1	2.1	3.0	3.9	7.8	18.9	30.2	7.9	19.2	30.6	1.5	1.6	1.6	5.6	13.6	21.9	5.7	13.7	22.2	1.9	2.7	3.5	2.8	5.0	7.1	2.8	5.1	7.2															
	20W 80s	LiBoth	2.4	3.3	4.0	6.0	19.1	30.4	8.1	19.4	30.8	2.4	3.4	4.2	8.2	19.5	30.8	8.3	19.8	31.2	2.0	1.9	1.9	6.4	14.3	22.8	6.5	14.5	23.1	2.1	3.0	3.9	3.1	5.3	7.4	3.1	5.4	7.5															
		LiNone	2.7	3.5	4.3	8.4	19.5	30.8	8.5	19.8	31.2	2.7	3.6	4.5	8.6	19.9	31.2	8.7	20.2	31.7	2.0	1.9	1.9	6.4	14.3	22.8	6.5	14.5	23.1	2.4	3.2	4.1	3.3	5.6	7.7	3.4	5.6	7.8															
		HvBoth	4.7	5.0	5.3	15.0	31.6	46.6	15.3	32.4	47.7	4.8	5.3	5.7	15.1	32.1	47.2	15.5	32.9	48.3	3.4	2.6	2.1	11.8	24.1	35.9	12.0	24.7	36.8	3.9	4.5	5.2	5.6	8.3	10.5	5.7	8.5	10.8															
	35W 80s	HvBoth	4.8	5.2	5.7	15.0	31.7	46.9	15.4	32.5	48.0	4.9	5.5	6.1	15.2	32.2	47.5	15.5	33.0	48.6	3.6	2.9	2.4	11.9	24.5	36.6	12.2	25.1	37.5	4.1	4.9	5.7	5.7	8.5	10.9	5.8	8.7	11.2															
			HvNone	5.2	5.6	6.0	15.5	32.3	47.5	15.9	33.2	48.6	5.3	5.9	6.4	15.7	32.8	48.1	16.1	33.6	49.2	3.9	3.1	2.7	12.3	25.0	37.2	12.5	25.6	38.1	4.4	5.2	6.0	6.0	8.8	11.2	6.1	9.0	11.5														
			LiBoth	5.5	5.8	6.2	15.9	32.7	48.0	16.2	33.5	49.0	5.6	6.1	6.7	16.1	33.2	48.5	16.5	34.0	49.7	4.1	3.3	2.9	12.7	25.4	37.7	13.0	26.0	38.6	4.7	5.4	6.3	6.3	9.0	11.5	6.4	9.3	11.8														
Min		LiNone	6.4	7.2	7.8	13.2	24.8	36.0	13.3	25.1	36.5	6.5	7.4	8.2	13.3	25.1	36.5	13.4	25.4	36.9	5.4	5.0	4.6	11.1	19.7	28.5	11.2	19.9	28.8	6.1	7.0	7.8	7.2	9.6	11.8	7.3	9.7	11.9															
		HvBoth	6.5	7.2	7.9	13.1	24.8	36.1	13.3	25.1	36.6	6.5	7.5	8.3	13.3	25.1	36.5	13.4	25.4	37.0	5.5	5.1	4.8	11.1	19.7	28.5	11.1	20.0	28.8	6.1	7.1	8.0	7.3	9.7	11.9	7.3	9.8	12.0															
		HvNone	6.8	7.6	8.2	13.7	25.4	36.7	13.8	25.7	37.1	6.9	7.8	8.7	13.8	25.6	37.1	13.9	26.0	37.5	5.8	5.4	5.1	11.5	20.3	29.1	11.5	20.5	29.5	6.5	7.5	8.3	7.6	10.0	12.2	7.7	10.1	12.3															
35W 80s		LiBoth	7.2	7.9	8.6	14.1	25.8	37.2	14.2	26.1	37.6	7.2	8.1	9.0	14.2	26.0	37.6	14.3	26.3	38.0	6.2	5.7	5.3	11.9	20.7	29.6	12.0	20.9	29.9	6.9	7.8	8.7	8.0	10.3	12.6	8.0	10.5	12.7															
		HvBoth	13.9	13.4	13.0	26.3	43.4	58.3	26.7	44.2	59.4	14.2	13.9	13.8	26.5	43.9	58.8	26.8	44.7	60.0	12.1	9.8	8.1	23.2	36.4	48.4	23.4	37.1	49.4	12.9	13.1	13.3	15.0	17.6	19.6	15.1	17.8	20.0															
		HvNone	14.1	13.8	13.6	26.4	43.5	58.7	26.8	44.3	59.8	14.3	14.4	14.4	26.5	43.9	59.1	26.9	44.7	60.3	12.3	10.2	8.7	23.3	36.7	48.9	23.6	37.4	49.8	13.1	13.5	14.0	15.2	17.9	20.1	15.3	18.1	20.4															
10W 80s		HvBoth	14.5	14.2	14.0	26.9	44.0	59.2	27.3	44.9	60.3	14.7	14.7	14.8	27.0	44.5	59.6	27.4	45.3	60.8	12.6	10.4	8.9	23.8	37.3	49.5	24.1	37.9	50.4	13.5	13.8	14.3	15.6	18.2	20.4	15.7	18.5	20.8															
			HvNone	14.9	14.5	14.3	27.4	44.5	59.6	27.8	45.3	60.7	15.2	15.1	15.1	27.5	44.9	60.1	27.8	45.7	61.3	13.0	10.7	9.2	24.2	37.7	50.0	24.6	38.4	50.9	13.9	14.2	14.6	16.0	18.5	20.8	16.1	18.8	21.1														
			LiBoth	17.1	17.5	17.8	25.0	36.9	48.2	25.1	37.2	48.6	17.2	17.9	18.5	25.1	37.2	48.7	25.2	37.5	49.2	15.8	14.6	13.6	22.9	32.2	41.2	23.0	32.5	41.6	16.8	17.5	18.1	18.0	20.4	22.4	18.1	20.5	22.6														
	Min	LiNone	17.2	17.7	18.0	25.0	36.9	48.3	25.1	37.2	48.7	17.3	18.0	18.6	25.1	37.2	48.8	25.2	37.5	49.2	15.9	14.8	13.8	22.9	32.2	41.2	23.0	32.4	41.5	16.8	17.6	18.3	18.1	20.5	22.6	18.1	20.6	22.8															
		HvBoth	17.7	18.1	18.5	25.5	37.5	48.9	25.7	37.8	49.3	17.8	18.5	19.1	25.6	37.8	49.3	25.8	38.1	49.7	16.5	15.2	14.2	23.4	32.8	41.8	23.5	33.0	42.1	17.3	18.0	18.7	18.6	20.9	23.0	18.6	21.1	23.2															
		HvNone	18.1	18.5	18.9	26.0	37.9	49.3	26.1	38.2	49.8	18.2	18.8	19.5	26.1	38.2	49.8	26.2	38.5	50.2	16.8	15.6	14.6	23.9	33.2	42.3	24.0	33.5	42.6	17.7	18.4	19.1	19.0	21.3	23.5	19.1	21.4	23.6															

Figure 17 : Etude protections solaires, sans ventilation nocturne : énergie de rafraîchissement auxiliaire (Hvac).

Pmax [W/m2] > 0 5 10 15 20 25 30 40

Building	Est	Shading and glazing								None	20%	50%	80%	Ext	20%	50%	80%	None	20%	50%	80%	Ext	20%	50%	80%	None	20%	50%	80%										
		Int				None																								Int				None					
		20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%																					80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%	20%	50%	80%
10W 80s	HvBoth	20	24	27	27	47	67	27	48	68	20	23	26	33	55	75	33	55	75	18	19	20	30	45	62	30	45	62	19	23	27	20	26	30	20	26	30		
		HvNone	20	24	28	29	53	76	29	53	76	20	24	27	36	62	86	36	62	86	19	20	21	32	49	71	32	50	72	19	24	28	21	26	31	21	27	31	
		LiBoth	21	25	29	30	54	77	30	54	77	21	25	28	36	62	87	36	62	87	20	21	23	32	50	71	32	50	72	20	25	29	21	27	32	21	27	32	
	Min	LiNone	21	25	29	30	54	77	30	55	78	21	25	28	36	62	87	36	63	87	20	21	23	32	50	72	32	51	73	20	25	30	21	27	32	21	27	32	
		HvBoth	19	22	24	22	34	47	23	34	47	18	20	23	26	40	55	26	39	54	18	19	20	24	33	44	24	33	44	19	21	24	19	22	25	19	22	25	
		HvNone	19	22	25	23	37	53	23	37	53	18	21	23	27	44	61	27	44	61	18	19	20	25	36	50	25	36	50	19	22	25	19	23	26	19	23	26	
	20W 80s	HvBoth	20	22	25	23	37	53	23	37	53	19	21	24	27	44	61	27	44	61	18	20	21	25	36	49	25	36	49	19	22	25	20	23	26	20	23	26	
			HvNone	20	23	25	23	38	53	23	38	53	19	21	24	28	44	62	28	44	62	19	20	21	25	36	50	25	36	50	19	22	25	20	23	27	20	23	27
			LiBoth	26	30	33	33	53	73	33	53	73	26	29	32	39	60	81	39	60	81	25	26	27	36	51	68	36	51	69	25	30	34	26	32	36	26	32	36
		Min	LiNone	27	31	34	35	58	81	35	59	82	27	30	34	42	68	92	42	68	93	26	27	28	38	56	78	38	56	78	26	30	35	27	32	37	27	33	37
			HvBoth	27	31	35	36	59	82	36	60	82																											

Nsup [h] > 0 50 100 150 200 400 600 800

System	Campagne, été standard (Rur04)														Campagne, été caniculaire (Rur03)														Ville, été standard (Urb04)														Ville, été caniculaire (Urb03)													
	Building		10W				20W				35W				Building		10W				20W				35W				Building		10W				20W				35W				Building		10W				20W				35W			
	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	80s	MIN												
Base Dry	Sgl	Direct	375	742	435	771	811	1149	817	1157	1224	1436	1238	1456	957	1061	972	1047	1056	1272	1033	1241	1327	1499	1333	1559	889	1097	873	1109	1138	1276	1130	1298	1405	1475	1414	1511	1071	1219	1037	1180	1121	1383	1212	1437	1512	1593	1532	1613						
Hum	Sgl	Direct	151	199	187	228	369	739	411	787	1036	1300	1037	1348	873	897	870	915	954	1081	972	1050	1182	1401	1179	1445	413	512	456	550	881	1071	865	1080	1268	1406	1271	1439	966	1013	977	989	1057	1211	1031	1194	1382	1485	1389	1561						
Cnt1	Dry	Sgl	Direct	82	60	114	98	221	250	266	280	680	879	700	861	776	799	777	780	908	909	891	929	1002	1079	1013	1056	363	354	423	407	665	775	675	776	1054	1189	1059	1211	968	950	966	970	996	1034	1007	1017	1196	1322	1208	1337					
		Pipes10m	54	24	83	64	192	207	235	247	625	842	662	850	807	794	782	816	886	897	903	906	1001	1073	994	1061	332	341	366	378	627	738	673	785	1074	1210	1054	1215	955	944	971	966	1000	1047	982	1031	1175	1318	1203	1345						
		Pipes20m	28	16	69	56	173	206	216	237	609	825	660	846	806	789	803	827	892	906	890	900	1009	1077	997	1074	317	338	355	392	610	733	668	765	1065	1217	1069	1221	953	958	963	959	1025	1043	998	1046	1163	1319	1202	1348						
		Shift08h	19	3	43	19	156	156	199	203	546	764	584	764	650	557	651	618	847	865	851	870	975	1036	974	1018	296	265	333	303	567	645	600	688	1011	1156	1022	1179	952	905	958	951	976	1020	985	987	1149	1295	1172	1299						
		Shift12h	26	2	60	25	163	178	220	234	584	797	632	800	717	629	697	689	863	878	854	886	976	1048	983	1028	326	286	374	335	638	713	656	761	1041	1168	1056	1204	961	915	971	964	982	1037	986	997	1178	1316	1189	1337						
		Dbl	12	24	7	100	94	149	135	440	606	517	641	587	465	607	524	820	832	807	840	958	1005	960	993	235	202	275	241	451	498	506	530	958	1087	955	1088	927	902	930	920	970	985	977	972	1100	1198	1122	1225							
		Pipes10m								387	536	468	587	524	366	550	451	794	797	773	805	937	979	946	976	212	175	251	213	410	448	446	484	922	1064	927	1062	910	895	915	894	961	964	971	964	1088	1182	1103	1179							
		Pipes20m								276	328	335	375	239	108	323	161	538	426	563	489	897	904	895	919	155	85	197	115	319	300	364	340	834	962	821	947	830	805	839	782	962	920	950	958	1037	1120	1048	1107							
		Shift08h								257	306	315	367	223	109	313	165	531	398	581	479	904	905	889	919	160	85	195	119	316	297	365	337	845	965	828	941	830	808	832	777	960	917	959	961	1044	1123	1051	1114							
		Shift12h								314	383	382	430	276	162	354	175	601	482	616	550	920	927	923	949	99	22	138	65	233	206	290	243	763	871	758	865	702	543	726	583	909	859	889	863	1010	1081	1041	1068							
		Dbl								218	88	292	337	209	66	268	110	564	458	585	512	898	936	905	929	107	16	116	54	244	202	262	231	739	861	747	878	737	552	721	616	895	865	907	859	1020	1089	1020	1073							
		Pipes10m								284	361	328	412	209	66	268	110	564	458	585	512	898	936	905	929	107	16	116	54	244	202	262	231	739	861	747	878	737	552	721	616	895	865	907	859	1020	1089	1020	1073							
		Pipes20m								269	318	323	376	182	42	240	86	489	331	519	400	888	904	894	917	76	5	110	29	232	184	257	215	677	788	723	800	671	390	663	505	868	814	881	818	999	1042	1015	1031							
		Shift08h								277	332	323	371	192	53	263	106	535	373	564	447	899	909	902	920	83	10	118	29	239	200	261	231	715	810	736	838	700	448	685	548	890	824	890	829	999	1061	1023	1046							
		Shift12h								9	24	7	235	252	270	301	131	16	190	45	382	228	436	315	862	878	852	884	52	76	12	197	128	217	173	621	662	640	710	589	321	612	385	816	780	824	780	987	1025	997	1015					
		Dbl								203	216	238	271	103	152	25	331	173	393	253	844	853	828	858	33	37	64	7	186	108	196	145	581	629	605	666	554	260	578	332	796	739	801	747	980	1011	990	1003								
		Pipes10m								135	124	173	172	21	64		193	40	251	96	712	697	716	715	8	32	128	39	150	74	492	529	539	582	388	126	445	183	710	519	716	590	969	968	964	981										
		Pipes20m								134	138	171	178	13	54		176	37	245	92	707	681	718	710	8	32	128	39	150	74	492	529	539	582	396	114	477	182	706	554	720	599	968	962	964	978										
		Shift08h								204	197	267	250	435	322	476	377	607	563	621	577	828	829	810	822	166	117	199	152	276	242	337	294	562	580	602	607	786	748	784	757	898	885	887	874	983	985	1016	1007							
		Shift12h								159	156	201	189	449	325	475	364	632	576	620	600	854	862	843	857	158	139	191	153	257	223	287	264	526	558	562	596	833	801	839	802	924	900	920	902	974	983	980	978							
		Dbl								143	138	168	167	411	304	453	360	615	570	630	592	852	858	850	855	151	126	175	158	230	205	263	242	513	555	556	593	835	811	836	804	923	898	923	896	974	1000	974	989							
		Pipes10m								82	68	122	102	168	63	211	110	337	221	387	288	678	669	668	664	83	30	103	59	195	138	230	177	422	425	476	471	694	609	688	626	816	785	834	785	959	1050	950	956							
		Pipes20m								98	82	148	133	208	97	271	152	382	277	452	342	730	722	735	725	104	65	146	92	235	184	274	231	481	481	539	542	732	681	760	685	861	821	861	842	971	971	967	973							
		Shift08h								213	123	271	166	361	251	418	313	657	616	668	636					89	31	107	65	173	124	201	161	383	365	430	410	683	629	700	621	809	763	798	755	941	940	937	929							
		Shift12h								158	91	199	119	285	187	330	244	598	552	613	571					63	10	82	29	134	96	163	122	330	318	380	358	666	570	650	574	771	734	757												

Tmax [C] < 22 24 26 28 30 35 40 50

		Campagne, été standard (Rur04)												Campagne, été caniculaire (Rur03)												Ville, été standard (Urb04)												Ville, été caniculaire (Urb03)											
System	Building	10W				20W				35W				10W				20W				35W				10W				20W				35W															
		HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth																		
		80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN												
Base Dry	Sgl Direct	30.1	30.7	30.8	31.4	31.7	33.0	32.5	33.7	34.7	37.1	35.8	38.0	34.2	34.8	34.9	35.5	35.6	36.9	36.6	37.8	38.7	41.1	39.8	42.2	31.8	32.2	32.4	32.9	33.4	34.5	34.1	35.2	36.4	38.6	37.3	39.5	35.3	35.7	36.1	36.4	36.8	37.9	37.8	38.7	39.9	42.1	41.0	43.1
	Hum Sgl Direct	28.3	28.3	28.9	28.9	29.9	30.5	30.6	31.2	32.9	34.7	33.7	35.5	31.4	31.1	32.1	31.8	33.0	33.4	33.8	34.2	36.1	37.6	37.1	38.6	29.8	29.6	30.4	30.2	31.4	31.8	32.1	32.5	34.4	36.0	35.2	36.8	32.4	31.9	33.1	32.5	34.1	34.2	34.9	34.9	37.1	38.4	38.1	39.3
Cnt1 Dry	Sgl Direct	28.1	27.7	28.9	28.4	29.4	29.4	30.4	30.1	32.0	32.4	33.1	33.4	32.0	31.5	32.8	32.3	33.2	33.0	34.3	34.0	35.8	36.1	37.0	37.3	30.1	29.8	30.8	30.5	31.5	31.5	32.2	32.2	34.0	34.5	35.1	35.4	33.9	33.4	34.7	34.2	35.1	35.0	36.2	36.0	37.6	38.1	38.9	39.3
	Pipes10m	27.5	27.0	27.9	27.6	28.8	28.7	29.4	29.4	31.3	31.8	32.1	32.6	31.2	30.7	31.9	31.4	32.3	32.4	33.3	33.1	34.8	35.2	36.0	36.3	29.6	29.2	30.1	29.8	30.9	30.8	31.5	31.5	33.4	33.9	34.2	34.7	33.5	32.9	34.0	33.6	34.5	34.6	35.3	35.3	36.8	37.4	38.0	38.3
Db1	Pipes20m	27.2	26.9	27.7	27.4	28.5	28.5	29.2	29.2	31.1	31.6	31.9	32.5	30.9	30.5	31.5	31.1	32.1	32.0	32.8	32.7	34.4	35.0	35.5	35.8	29.3	29.0	29.9	29.6	30.6	30.7	31.3	31.3	33.1	33.8	34.0	34.6	33.0	32.7	33.6	33.4	34.2	34.2	34.9	35.0	36.5	37.2	37.5	38.0
	Shift08h	27.1	26.6	27.7	27.2	28.5	28.4	29.3	29.1	31.2	31.7	32.1	32.4	30.6	29.9	31.2	30.6	32.0	31.8	32.8	32.5	34.7	35.0	35.7	36.0	29.3	28.8	29.9	29.4	30.7	30.6	31.4	31.2	33.2	33.7	34.2	34.5	32.9	32.3	33.5	33.0	34.3	34.1	35.1	34.8	36.8	37.1	37.9	38.1
Hum Sgl	Shift12h	27.0	26.5	27.5	27.1	28.4	28.3	29.0	29.0	31.1	31.5	31.8	32.3	30.6	29.9	31.1	30.5	31.9	31.6	32.5	32.3	34.4	34.7	35.2	35.5	29.2	28.9	29.7	29.4	30.6	30.6	31.2	31.2	33.1	33.7	33.9	34.5	33.1	32.5	33.7	33.2	34.4	34.1	35.0	34.8	36.8	37.0	37.6	37.9
	Pipes10m	26.9	26.2	27.3	26.8	28.1	27.9	28.8	28.5	30.7	31.0	31.5	31.8	30.4	29.7	31.1	30.4	31.6	31.2	32.6	32.1	34.2	34.3	35.3	35.4	28.9	28.5	29.6	29.1	30.4	30.1	31.0	30.8	32.9	33.2	33.8	34.1	32.8	32.2	33.5	32.9	34.0	33.8	34.9	34.6	36.4	36.7	37.5	37.7
Db1	Pipes20m	26.5	25.9	27.1	26.5	27.8	27.6	28.6	28.3	30.5	30.7	31.2	31.5	30.0	29.3	30.7	30.0	31.2	30.9	32.1	31.6	33.6	33.7	34.8	34.7	28.7	28.2	29.3	28.8	30.1	29.9	30.7	30.5	32.6	33.0	33.4	33.8	32.4	31.8	33.1	32.6	33.6	33.4	34.4	34.2	36.0	36.3	37.0	37.2
	Shift08h	25.8	25.0	26.5	25.6	27.2	26.7	27.9	27.3	29.7	29.8	30.7	30.6	29.2	28.1	29.9	28.7	30.5	29.7	31.3	30.4	33.0	32.8	34.1	33.7	28.2	27.5	28.9	28.0	29.5	29.2	30.4	29.8	32.1	32.3	33.1	33.1	31.8	30.9	32.4	31.6	33.0	32.5	33.9	33.2	35.6	35.5	36.6	36.5
Hum Sgl	Shift12h	25.7	24.8	26.2	25.4	27.0	26.5	27.6	27.1	29.5	29.6	30.4	30.4	29.0	27.9	29.5	28.5	30.2	29.4	30.7	30.0	32.9	32.3	33.4	33.1	28.0	27.4	28.7	27.9	29.4	29.1	30.1	29.7	31.9	32.1	32.8	32.9	31.4	30.9	32.4	31.6	33.1	32.4	33.7	33.1	35.3	35.2	36.4	36.2
	Direct	26.3	25.5	26.8	26.0	27.7	27.1	28.2	27.7	30.1	30.1	30.9	30.9	29.0	27.9	29.9	28.6	30.4	29.6	31.3	30.4	32.4	32.8	34.0	33.8	28.0	27.1	28.6	27.7	29.2	28.7	30.0	29.4	31.7	31.9	32.5	32.7	30.4	29.3	31.2	30.0	31.6	31.3	32.7	31.7	34.4	34.1	35.4	35.1
Cnt2 Dry	Pipes10m	25.9	25.2	26.4	25.7	27.2	26.8	27.7	27.5	29.9	29.9	30.5	30.7	28.4	27.4	29.2	28.0	29.8	29.0	30.6	29.8	32.3	32.1	33.3	33.0	27.7	26.8	28.0	27.3	29.0	28.4	29.4	29.1	31.5	31.5	32.0	32.3	30.0	29.0	30.6	29.4	31.2	30.6	32.0	31.1	33.7	33.7	34.7	34.4
	Pipes20m	25.8	25.0	26.3	25.6	27.2	26.7	27.7	27.3	29.8	29.8	30.4	30.6	28.2	27.4	28.9	27.8	29.5	29.0	30.3	29.5	32.0	32.1	33.0	32.8	27.5	26.7	27.8	27.2	28.8	28.3	29.2	29.0	31.3	31.4	31.9	32.2	29.8	29.0	30.3	29.4	31.0	30.6	31.7	31.1	33.4	33.7	34.4	34.4
Db1	Shift08h	25.8	25.0	26.2	25.5	27.2	26.7	27.7	27.3	29.7	29.8	30.3	30.6	28.4	27.2	29.1	27.8	29.8	28.9	30.5	29.6	32.4	32.1	33.2	33.0	27.4	26.6	28.0	27.1	28.8	28.3	29.3	28.9	31.1	31.4	31.8	32.1	29.9	28.7	30.6	29.2	31.3	30.2	31.9	31.0	33.8	33.3	34.8	34.2
	Shift12h	25.7	24.9	26.2	25.4	27.1	26.6	27.7	27.2	29.7	29.7	30.3	30.5	28.3	27.1	28.8	27.6	29.6	28.7	30.2	29.2	31.9	31.7	32.9	32.6	27.5	26.6	28.0	27.1	28.7	28.2	29.1	28.8	31.1	31.3	32.0	32.1	30.0	28.7	30.5	29.2	31.3	30.2	31.8	30.9	33.5	33.3	34.4	34.0
Hum Sgl	Pipes10m	25.5	24.6	26.0	25.2	26.9	26.3	27.4	26.9	29.5	29.4	30.1	30.2	28.0	26.7	28.7	27.4	29.3	28.4	30.2	29.1	31.8	31.5	32.9	32.4	27.1	26.3	27.8	26.9	28.6	28.0	29.1	28.6	31.1	31.1	31.7	31.9	29.6	28.5	30.3	29.0	30.9	30.0	31.8	30.7	33.5	33.1	34.5	34.0
	Pipes20m	25.3	24.4	25.8	25.0	26.7	26.1	27.3	26.7	29.3	29.2	29.9	30.0	27.6	26.4	28.4	27.0	29.0	28.0	29.8	28.7	31.5	31.1	32.5	32.0	27.3	26.2	27.6	26.7	28.2	27.8	28.9	28.4	30.9	30.9	31.5	31.7	29.4	28.2	30.0	28.7	30.6	29.7	31.4	30.3	33.1	32.8	34.1	33.6
Cnt2 Dry	Shift08h	24.7	23.8	25.3	24.3	26.3	25.4	26.8	26.1	28.8	28.5	29.4	29.3	27.2	25.7	27.9	26.3	28.6	27.3	29.4	28.0	31.1	30.5	32.1	31.4	26.5	25.6	27.0	26.1	28.0	27.2	28.3	27.8	30.5	30.4	31.1	31.1	29.0	27.5	29.7	28.1	30.4	29.2	31.1	29.9	32.8	32.4	33.8	33.3
	Shift12h	24.7	23.8	25.2	24.1	26.1	25.3	26.6	25.9	28.7	28.4	29.3	29.2	26.9	25.4	27.4	25.9	28.1	27.0	28.9	27.6	30.6	30.0	31.6	30.9	26.6	25.6	27.0	26.0	28.0	27.2	28.3	27.8	30.5	30.4	31.1	31.1	29.0	27.5	29.5	28.0	30.2	29.1	30.9	29.8	32.7	32.2	33.6	33.0
Db1	Direct	26.9	26.2	27.8	26.9	28.0	27.5	29.0	28.3	30.2	29.8	31.3	30.9	30.7	29.9	31.6	30.8	31.8	31.2	32.9	32.2	34.0	33.6	35.2	34.9	28.0	28.5	29.8	29.1	30.1	29.8	31.1	30.5	32.2	32.2	33.2	33.0	33.2	32.9	33.9	33.4	35.0	34.4	36.1	35.8	37.1	36.9		
	Pipes10m	26.3	25.8	26.7	26.2	27.2	26.8	27.7	27.3	29.0	28.8	29.6	29.3	30.3	29.7	30.9	30.3	31.2	30.7	31.8	31.3	32.8	32.5	33.8	33.4	28.4	28.0	28.8	28.4	29.4	29.0	29.8	29.5	31.1	31.0	31.8	31.6	32.5	31.9	33.0	32.5	33.3	32.9	33.9	33.5	34.9	34.8	35.8	35.4
Hum Sgl	Pipes20m	25.9	25.4	26.3	25.8	26.9	26.5	27.3	27.0	28.7	28.5	29.3	29.1	29.8	29.3	30.4	29.9	30.7	30.4	31.2	30.9	32.3	32.1	33.1	32.8	28.1	27.6	28.5	28.0	29.0	28.7	29.5	29.2	30.8	30.7	31.4	31.3	32.1	31.6	32.5	32.1	32.9	32.6	33.5	33.2	34.5	34.4	35.2	35.1
	Shift08h	25.6	24.7	26.2	25.2	26.7	26.0	27.4	26.6	28.7	28.3	29.5	29.1	29.0	28.1	29.5	28.6	30.0	29.3	30.7	29.9	32.1	31.6	32.9	32.5	27.7	27.0	28.3	27.5	28.8	28.3	29.5	28.9	30.8	30.5	31.6	31.3	31.3	30.5	31.9	31.1	32.4	31.8	33.1	32.4	34.3	34.0	35.2	34.8
Db1	Shift12h	25.4	24.9	25.6	25.3	26.4	26.2	26.7	26.6	28.3	28.4	28.8	28.8	28.9	28.2	29.3	28.7																																

Q [kWh/m2] > 0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 5.0 10.0

System	Campagne, été standard (Rur04)													Campagne, été caniculaire (Rur03)													Ville, été standard (Urb04)													Ville, été caniculaire (Urb03)												
	Building						Building						Building						Building						Building						Building																					
	10W		20W		35W		10W		20W		35W		10W		20W		35W		10W		20W		35W		10W		20W		35W																							
	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth	HvBoth	LtBoth																						
Base Dry	Sgl	Direct	2.0	2.9	2.4	3.3	5.0	7.2	5.6	7.6	13.4	17.5	14.2	18.1	11.4	10.5	11.9	10.8	15.7	15.2	16.1	15.6	25.0	26.4	25.7	27.1	5.7	6.0	6.2	6.4	10.0	11.1	10.5	11.5	20.0	22.3	20.6	22.8	16.3	13.5	16.6	13.8	21.1	19.0	21.5	19.4	32.0	31.1	32.6	31.7		
Hum	Sgl	Direct	0.5	0.6	0.7	0.7	1.9	2.9	2.4	3.3	8.7	11.9	9.4	12.5	6.0	4.8	6.6	5.2	9.9	9.0	10.4	9.4	18.3	19.0	18.9	19.6	2.1	1.8	2.5	2.1	5.3	5.7	5.8	6.1	14.1	15.8	14.7	16.3	9.8	7.0	10.2	7.3	14.1	11.6	14.5	11.9	23.7	22.6	24.5	23.2		
Cnt1	Dry	Sgl	Direct	0.3	0.2	0.6	0.4	1.2	1.2	1.7	1.5	5.6	6.6	6.7	7.4	6.8	5.1	7.5	5.7	10.3	8.7	11.0	9.3	17.7	16.5	18.5	17.2	2.5	1.9	3.1	2.3	5.2	4.8	6.0	5.5	12.8	13.2	13.9	14.0	13.1	10.0	13.7	10.5	17.3	14.2	17.8	14.7	26.0	23.5	26.9	24.3	
		Pipes10m	0.1	0.1	0.3	0.2	0.9	0.9	1.2	1.2	4.8	5.9	5.8	6.7	5.8	4.3	6.5	4.8	9.3	8.0	10.0	8.5	16.8	15.8	17.5	16.3	2.1	1.6	2.5	1.9	4.5	4.3	5.2	4.9	12.1	12.8	13.1	13.4	12.9	9.8	13.3	10.2	17.2	14.2	17.5	14.5	25.6	23.3	26.3	23.9		
		Pipes20m	0.1	0.0	0.2	0.1	0.8	0.8	1.1	1.1	4.5	5.7	5.4	6.4	5.5	4.1	6.1	4.6	9.1	7.8	9.6	8.3	16.6	15.6	17.1	16.0	1.9	1.5	2.3	1.8	4.3	4.2	4.9	4.7	11.9	12.6	12.7	13.3	12.8	9.8	13.2	10.1	17.0	14.0	17.4	14.3	25.4	23.2	26.1	23.9		
		Shift08h	0.1	0.0	0.2	0.1	0.6	0.6	0.9	0.8	4.2	5.1	5.1	5.8	3.9	2.4	4.5	2.9	7.2	5.8	7.7	6.3	14.6	13.5	15.2	14.0	1.7	1.1	2.1	1.4	4.0	3.6	4.6	4.1	11.3	11.7	12.1	12.3	10.4	7.3	10.9	7.7	14.6	11.6	15.0	11.9	23.1	20.5	23.7	21.2		
		Shift12h	0.0	0.0	0.1	0.1	0.6	0.6	0.9	0.8	4.2	5.2	5.1	5.9	4.2	2.6	4.7	3.1	7.5	6.0	8.1	6.5	15.0	13.8	15.5	14.2	1.9	1.3	2.2	1.6	4.3	3.8	4.9	4.4	11.7	12.0	12.5	12.7	11.3	8.1	11.8	8.5	15.5	12.4	15.9	12.7	23.9	21.4	24.7	22.1		
		Pipes10m	0.0	0.0	0.1	0.0	0.4	0.3	0.7	0.5	3.2	3.8	4.1	4.6	3.7	2.2	4.4	2.7	6.8	5.2	7.5	5.8	13.8	12.5	14.6	13.1	1.3	0.9	1.7	1.1	3.3	2.8	3.9	3.2	10.0	10.2	11.0	10.9	10.4	7.4	11.0	7.8	14.5	11.4	14.9	11.9	22.6	19.9	23.3	20.6		
		Pipes20m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.5	0.4	2.7	3.2	3.5	3.9	3.1	1.6	3.7	2.1	6.1	4.5	6.7	5.1	12.9	11.6	13.6	12.2	1.1	0.7	1.5	0.9	2.8	2.4	3.4	2.8	9.2	9.5	10.2	10.1	9.7	6.7	10.3	7.1	13.7	10.6	14.2	11.1	21.7	18.9	22.4	19.6		
		Shift08h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	1.7	1.8	2.4	2.3	1.4	0.4	2.0	0.7	3.6	2.2	4.3	2.7	9.8	8.5	10.7	9.2	0.7	0.2	0.9	0.4	2.0	1.5	2.6	1.8	7.7	7.7	8.6	8.3	7.6	4.6	8.2	5.1	11.4	8.3	11.9	8.8	19.2	16.4	19.9	16.9		
		Shift12h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.5	1.6	2.1	2.1	1.3	0.3	1.8	0.6	3.4	1.9	4.1	2.5	9.5	8.2	10.3	8.9	0.6	0.2	0.9	0.4	2.0	1.4	2.5	1.8	7.6	7.5	8.5	8.2	7.7	4.7	8.3	5.2	11.4	8.4	12.0	8.9	19.2	16.4	19.9	17.0		
		Hum	Sgl	Direct	0.0	0.2	0.1	0.3	0.2	2.1	2.3	2.9	2.9	1.5	0.4	2.2	0.7	3.9	2.3	4.7	2.9	10.4	8.9	11.2	9.6	0.4	0.1	0.6	0.2	1.3	0.9	1.9	1.1	6.5	6.2	7.2	6.9	5.1	2.3	5.8	2.9	8.5	5.6	9.2	6.1	16.1	13.3	16.9	14.0			
		Pipes10m	0.1	0.0	0.2	0.1	1.8	2.0	2.4	2.6	1.1	0.3	1.5	0.5	3.3	2.0	4.0	2.5	9.6	8.6	10.5	9.2	0.3	0.0	0.4	0.1	1.3	0.8	1.5	1.0	6.0	5.8	6.8	6.5	4.5	2.0	5.0	2.5	8.0	5.3	8.5	5.8	15.7	13.0	16.2	13.6						
		Pipes20m	0.1	0.0	0.2	0.1	1.8	1.9	2.3	2.4	0.9	0.2	1.3	0.4	3.1	1.8	3.7	2.3	9.5	8.4	10.2	9.0	0.2	0.0	0.3	0.1	1.2	0.8	1.4	1.0	5.8	5.7	6.6	6.4	4.4	1.9	4.7	2.3	7.8	5.2	8.3	5.7	15.5	12.9	15.9	13.4						
		Shift08h	0.1	0.0	0.2	0.1	1.7	1.8	2.2	2.2	0.9	0.1	1.3	0.3	2.9	1.5	3.4	2.0	9.0	7.8	9.7	8.4	0.2	0.0	0.4	0.1	1.1	0.6	1.4	0.9	5.6	5.3	6.4	6.0	4.2	1.6	4.8	2.1	7.6	4.7	8.1	5.2	15.1	12.4	15.7	12.9						
		Shift12h	0.0	0.0	0.1	0.1	1.7	1.7	2.2	2.2	0.8	0.1	1.2	0.3	2.9	1.5	3.4	2.0	9.0	7.8	9.7	8.4	0.2	0.0	0.4	0.1	1.1	0.6	1.4	0.9	5.7	5.4	6.5	6.1	4.3	1.6	4.8	2.1	7.6	4.8	8.2	5.3	15.2	12.5	15.8	13.0						
		Pipes10m	0.0	0.0	0.1	0.0	1.3	1.3	1.8	1.7	0.6	0.0	0.9	0.1	2.2	0.9	2.8	1.4	7.9	6.6	8.7	7.3	0.1	0.2	0.0	0.9	0.4	1.1	0.7	4.8	4.5	5.6	5.2	3.4	1.1	4.0	1.6	6.6	3.9	7.2	4.4	13.8	11.2	14.5	11.8							
		Pipes20m	0.0	0.0	0.1	0.0	1.2	1.1	1.6	1.5	0.4	0.0	0.7	0.0	1.8	0.7	2.4	1.1	7.3	6.1	8.2	6.8	0.1	0.2	0.0	0.8	0.4	1.0	0.5	4.4	4.1	5.2	4.8	3.0	0.8	3.5	1.2	6.1	3.4	6.7	4.0	13.2	10.6	13.8	11.2							
		Shift08h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.6	1.2	0.9	0.1	0.2	0.9	0.1	1.5	0.4	1.5	0.4	5.6	4.3	6.6	5.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.7	0.3	3.6	3.2	4.5	3.8	2.1	0.4	2.6	0.6	4.8	2.3	5.5	2.9	11.8	9.1	12.6	9.7								
		Shift12h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.6	1.1	0.9	0.1	0.2	0.8	0.1	1.2	0.3	1.5	0.4	5.4	4.1	6.2	4.8	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.7	0.2	3.6	3.1	4.3	3.7	2.0	0.3	2.6	0.6	4.8	2.3	5.4	2.8	11.8	9.1	12.3	9.7							
Cnt2	Dry	Sgl	Direct	0.0	0.1	0.0	0.3	0.1	0.5	0.3	1.7	1.5	2.5	2.1	3.9	2.2	4.7	2.9	6.4	4.6	7.4	5.4	12.3	10.5	13.4	11.5	1.1	0.6	1.5	0.8	2.3	1.6	3.1	2.2	6.9	6.1	8.0	7.1	10.3	7.2	11.1	7.9	13.8	10.6	14.6	11.3	21.1	18.0	22.0	18.7		
		Pipes10m	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	1.0	1.6	1.4	3.6	2.3	4.2	2.6	6.1	4.6	6.9	5.2	12.1	10.6	13.0	11.3	0.9	0.5	1.2	0.7	2.0	1.5	2.5	1.9	6.0	5.4	7.0	6.3	11.0	8.0	11.5	8.4	14.7	11.6	15.2	12.1	22.2	19.2	22.7	19.6						
		Pipes20m	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.9	1.3	1.2	3.2	2.0	3.7	2.4	5.7	4.3	6.3	4.8	11.7	10.4	12.4	11.0	0.8	0.4	0.9	0.6	1.8	1.3	2.1	1.6	5.4	5.1	6.4	5.8	11.0	8.1	11.4	8.4	14.7	11.8	15.2	12.2	22.2	19.3	22.7	19.7						
		Shift08h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	1.0	0.8	1.2	0.3	1.6	0.6	2.8	1.5	3.4	2.1	7.8	6.4	8.7	7.1	0.4	0.1	0.6	0.2	1.2	0.7	1.6	1.0	4.6	4.0	5.5	4.7	7.2	4.3	7.8	4.9	10.6	7.6	11.2	8.1	17.7	14.6	18.2	15.1						
		Shift12h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.5	1.0	0.8	1.3	0.5	1.7	0.7	3.0	1.8	3.6	2.3	8.2	6.8	8.9	7.4	0.5	0.2	0.7	0.3	1.4	0.9	1.9	1.2	5.1	4.5	6.0	5.2	8.2	5.2	8.7	5.8	11.5	8.6	12.2	9.1	18.6	15.7	19.2	16.2						
		Pipes10m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.8	0.6	1.6	0.6	2.2	1.0	3.3	1.9	4.1	2.5	8.1	6.5	9.2	7.3	0.4	0.1	0.6	0.3	1.1	0.7	1.5	0.9	4.0	3.3	5.0	4.1	7.7	4.8	8.4	5.4	10.9	7.9	11.6	8.5	17.8	14.7	18.5	15.4						
		Pipes20m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.6	0.4	1.2	0.4	1.6	0.7	2.5	1.3	3.2	1.8	7.0	5.4	7.9	6.2	0.2	0.0	0.4	0.1	0.8	0.4	1.1	0.6	3.3	2.7	4.0	3.3	7.0	4.2	7.6	4.8	10.0	7.1	10.7	7.7	16.7	13.7	17.5	14.4						
		Shift08h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.7	0.1	1.1	0.3	3.3	2.0	4.2	2.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.1	0.5	0.2	2.0	1.4	2.8	1.9	4.3	1.9	5.0	2.4	6.8	4.1	7.6	4.7	12.9	9.9	13.6	10.6						
		Shift12h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.5	0.1	0.9	0.3	3.0	1.8	3.8	2.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.1	0.5	0.2	2.0	1.4	2.7	1.9	4.4	2.1	5.1	2.6	7.0	4.3	7.7	4.9</										

Pmax [W/m²] > 0 5 10 15 20 25 30 40

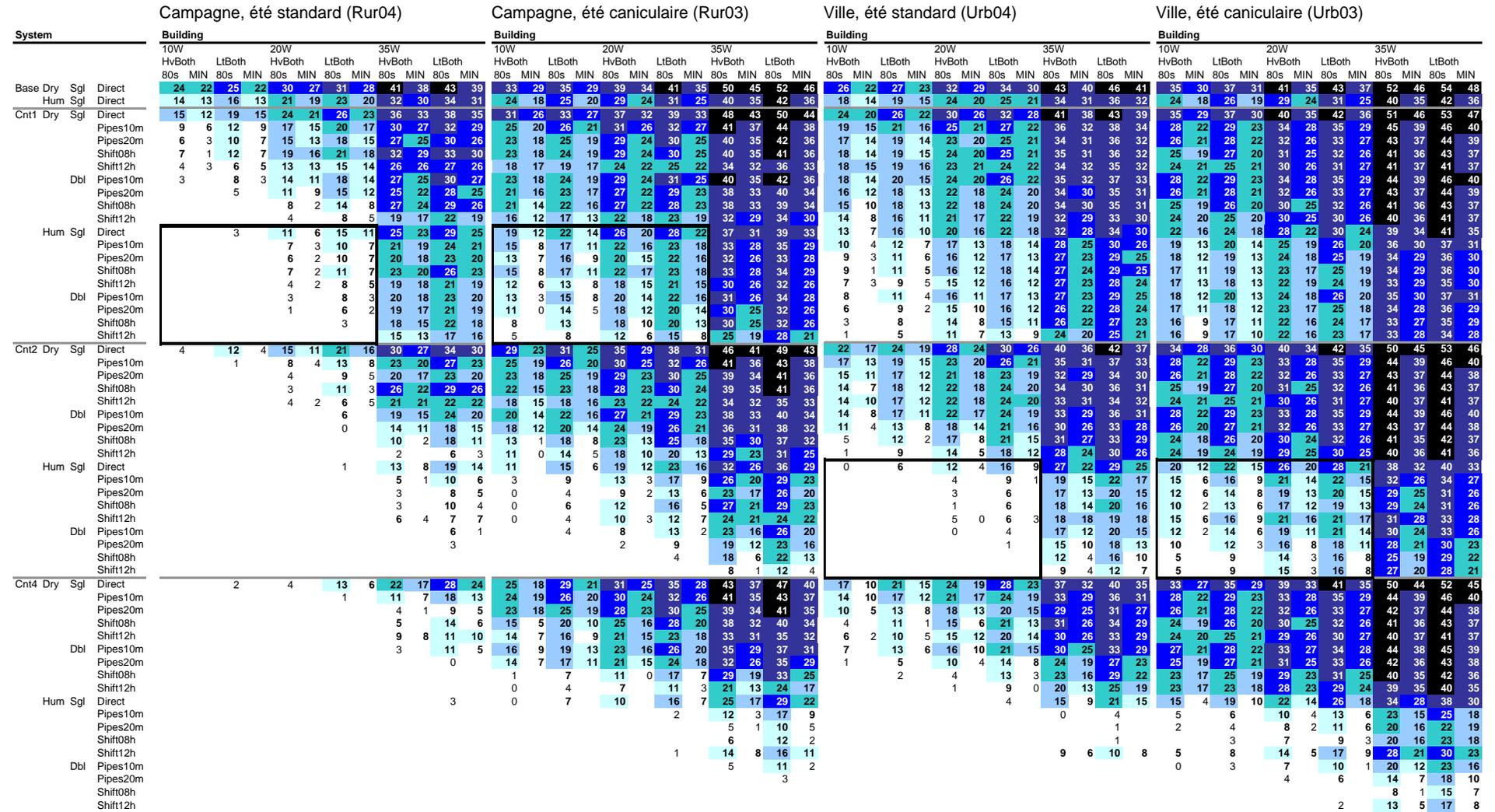


Figure 22 : Etude rafraîchissement passif, avec bonne protection solaire : puissance de pointe (Hvac).

Eau [kg] > 0 100 200 400 600 800 1000 1200

		Campagne, été standard (Rur04)												Campagne, été caniculaire (Rur03)												Ville, été standard (Urb04)												Ville, été caniculaire (Urb03)													
System		Building												Building												Building												Building													
		10W				20W				35W				10W				20W				35W				10W				20W				35W																	
		HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN	HvBoth	LtBoth	80s	MIN														
Base Dry	Sgl	Direct																																																	
Hum	Sgl	Direct																																																	
Cnt1	Dry	Sgl	Direct																																																
		Pipes10m																																																	
		Pipes20m																																																	
		Shift08h																																																	
		Shift12h																																																	
		Dbf																																																	
		Pipes10m																																																	
		Pipes20m																																																	
		Shift08h																																																	
		Shift12h																																																	
Hum	Sgl	Direct	191	179	189	181	211	210	214	211	246	250	247	252	281	276	280	273	306	309	303	305	334	340	332	338	283	270	287	273	309	301	311	305	337	340	336	340	402	393	399	390	421	421	419	420	428	428	427	428	
		Pipes10m	189	180	185	182	206	207	207	208	237	243	237	246	274	271	271	269	297	304	294	299	329	338	325	335	281	272	285	273	305	302	306	304	336	339	335	339	402	398	397	394	422	425	420	423	429	429	429	429	
		Pipes20m	189	179	186	182	205	208	206	208	236	242	236	245	271	270	270	268	296	302	293	299	328	338	324	336	278	273	283	272	303	301	305	303	335	338	335	338	403	400	397	396	424	425	421	425	429	429	430	430	
		Shift08h	169	149	170	157	196	197	196	197	236	244	238	245	250	223	250	227	285	283	286	285	333	341	329	340	270	248	273	254	296	291	301	293	336	338	336	339	382	359	381	359	414	407	415	411	428	428	429	428	
		Shift12h	173	154	171	159	198	198	194	198	235	246	235	246	251	229	247	230	285	284	284	284	332	341	326	339	274	254	276	258	298	295	301	296	336	338	335	340	386	367	384	364	415	408	415	410	428	428	427	427	
		Dbf																																																	
		Pipes10m	140	124	141	128	164	160	164	162	192	196	192	196	221	217	221	216	243	244	241	242	270	276	269	274	237	228	239	230	260	255	261	257	293	294	291	295	345	337	341	333	368	366	363	364	378	379	377	379	
		Pipes20m	128	111	129	114	153	148	152	149	181	184	180	183	209	206	208	203	228	229	227	226	256	260	254	259	226	216	227	219	248	241	249	245	280	280	278	282	329	322	326	318	353	350	349	349	366	366	364	366	
		Shift08h	95.5	69.5	99.5	75.4	121	111	121	113	147	148	147	150	172	165	174	165	187	185	184	182	212	215	209	214	202	189	205	191	224	215	225	217	256	258	255	259	297	282	296	281	320	317	317	313	338	338	336	338	
		Shift12h	91.5	63.6	93.4	68	116	106	115	107	142	144	141	144	167	164	167	163	179	179	177	176	204	208	201	206	198	186	200	186	218	211	219	212	250	250	248	251	291	280	287	277	313	311	309	306	331	332	329	331	
Cnt2	Dry	Sgl	Direct																																																
		Pipes10m																																																	
		Pipes20m																																																	
		Shift08h																																																	
		Shift12h																																																	
		Dbf																																																	
		Pipes10m																																																	
		Pipes20m																																																	
		Shift08h																																																	
		Shift12h																																																	
Hum	Sgl	Direct	202	133	219	155	272	227	284	238	359	345	366	346	429	380	454	393	478	431	496	455	556	544	560	549	431	362	441	372	487	451	489	452	560	543	567	549	643	566	659	590	705	662	713	672	784	769	774	765	
		Pipes10m	216	149	220	162	274	234	277	244	356	349	352	345	493	488	493	483	503	496	507	497	546	545	544	543	477	432	464	426	504	486	505	481	564	557	563	560	669	642	666	639	719	699	713	692	783	781	774	774	
		Pipes20m	191	142	206	151	269	222	268	235	354	347	350	345	492	487	491	490	503	504	502	496	543	544	540	540	479	434	469	435	503	491	503	485	562	555	563	559	665	644	663	641	716	689	711	691	784	783	776	776	
		Shift08h	150	85.7	163	93.9	215	161	222	175	327	302	325	305	358	301	364	304	399	350	414	361	492	458	500	469	384	302	382	305	437	391	450	397	532	513	529	512	556	457	578	473	628	555	636	566	749	718	746	715	
		Shift12h	152	91.3	165	98.9	221	171	227	180	329	309	322	306	361	313	365	312	401	364	405	370	484	463	487	465	398	323	395	322	452	407	457	410	542	523	538	523	572	488	587	497	639	577	642	582	751	726	741	720	
		Dbf																																																	
		Pipes10m	134	85.5	150	93.5	192	138	196	152	264	247	268	249	405	382	404	387	412	406	415	401	447	442	448	443	372	309	365	314	413	377	411	375	474	464	473	462	570	543	574	550	608	584	607	583	672	665	663	658	
		Pipes20m	110	74.4	120	78.3	160	116	171	125	239	224	241	224	385	366	381	363	390	385	391	380	420	413	420	413	343	281	343	288	386	348	384	348	450	432	449	429	541	522	544	526	579	557	576	555	644	635	635	628	
		Shift08h	62	37.6	70.4	42.1	96	63	107	69.9	174	147	177	152	299	244	299	251	317	288	321	290	344	328	348	331	274	187	276	204	323	271	325	276	395	370	395	373	481	434	489	448	508	470	518	483	573	551	571	552	
		Shift12h	58.9	37.2	64.2	42.5	89.8	60.2	98.9	63.9	164	138	166	142	298	247	296	252	313	291	309	291	332	322	335	320	270	189	272	202	315	267	314	273	388	361	386	359	481	444	488	455	502	479	507	486	562	544	560	543	
Cnt4	Dry	Sgl	Direct																																																
		Pipes10m																																																	
		Pipes20m																																																	
		Shift08h																																																	
		Shift12h																																																	
		Dbf																																																	
		Pipes10m																																																	
		Pipes20m																																																	
		Shift08h																																																	
		Shift12h																																																	
Hum	Sgl	Direct	152	91.7	186	106	231	146	276	181	397	319	430	358	583	469	622	491	674	567	732	587	856	748	895	811	502	335	548	385	628	486	666	530	803	720	826	743	1020	815	1096	875	1132	961	1205	1035	1289	1194	1319	1246	
		Pipes10m	200	161	216	167	258	200	275	216	395	324	403	339	915	861	908	875	937	908	930	916	963	945	963	942	649	529	658	566	728	649	724	661	848	792	841	788	1224	1155	1232	1192	1250	1203	1255	1222	1303	1281	1311	1282	
		Pipes20m	191	164	193	165	234	194	244	200	359	307	370	318	920	892	917	892	941	916	934	920	965	956	956	945	646	492	644	519	741	628	722	641	846	801	837	789	1216	1178	1220	1189	1233	1200	1240	1208	1302	1279	1301	1283	
		Shift08h	97.4	50.7	110	65	140	95.2	155	105	249	184	265	204	476	346	486	362	541	438	548	446	653	566	659	582	404	242	422	274	485	366	497	386	651	560	667	563	823	645	829	650	890	745	917	764	1047	925	1085	952	
		Shift12h	99.1	57.3	109	67.2	142	95.7	158	109	252	191	265	213	497	370	494	382	558	464	555	465	666	594	656	595	432	266	447	295	519	399	534	417	677	601	681	602	858	701	867	713	934	802	951	814	1077	976	1095	992	
		Dbf																																																	
		Pipes10m	127	80.8	138	95.1	161	123	186	135	251	205	271	219	706	549	704	598	730	655	725	670	770	740	765	744	471	307	485	346	546	431	551	455	650	596	652	603	1062	941	1068	976	1089	1015	1095	1044	1133	1101	1143	1114	
		Pipes20m	110	74.3	113	85.8	132	106	143	111	209	161	219	179	657	546	655	578	683	634	678	635	726	703	718	700	404	261	429	294	497	368	503	382	598	538	601	540	1019	933	1019	944	1037	992	1040	999	1076	1048	1088	1060	
		Shift08h	47.2	12.8	57.1	26.1	66.6	37.4	82	47.6	121	83	139	100	371	188	395	221	442	301	461	322	530	440	535	446	2																								

Eau [kg] > 0 100 200 400 600 800 1000 1200

		Campagne, été standard (Rur04)												Campagne, été caniculaire (Rur03)												Ville, été standard (Urb04)												Ville, été caniculaire (Urb03)													
System		Building												Building												Building												Building													
		10W				20W				35W				10W				20W				35W				10W				20W				35W																	
		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth		HvBoth		LtBoth																			
		80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN	80s	MIN																		
Base Dry	Sgl Direct																																																		
Cnt1 Dry	Sgl Direct																																																		
Hum Sgl	Direct	191	179	189	181	211	210	214	211	246	250	246	251	280	276	279	273	306	308	302	304	334	340	331	338	283	270	287	273	309	301	311	305	337	340	336	340	398	390	395	387	416	417	414	416	423	423	422	423		
		189	180	185	182	206	207	207	208	237	243	237	245	272	271	271	268	295	303	293	299	329	338	325	335	281	272	285	273	305	302	306	304	336	339	335	339	402	398	397	394	422	425	420	423	429	429	429	429		
		189	179	186	182	205	208	206	208	236	242	236	245	271	270	269	268	294	302	292	298	328	338	324	336	278	273	283	272	303	301	305	303	335	338	335	338	402	400	397	396	424	425	421	425	429	429	430	430		
		169	149	170	157	196	197	196	197	236	244	238	245	243	223	241	225	276	273	274	274	317	325	312	323	270	248	273	254	296	291	301	293	336	338	336	339	362	347	359	344	390	386	389	388	402	402	402	402		
		173	154	171	159	198	198	194	198	235	246	235	246	245	229	240	227	279	279	274	276	319	328	312	325	274	254	276	258	298	295	301	296	336	338	335	339	371	357	368	352	397	393	395	393	408	408	407	407		
		140	124	141	128	164	160	164	162	192	196	192	196	221	217	220	216	242	244	240	242	270	275	268	274	237	228	239	230	260	255	261	257	293	294	291	295	344	337	340	332	367	366	363	363	378	379	377	379		
		128	111	129	114	153	148	152	149	180	184	180	183	209	206	208	203	228	229	226	226	255	260	254	259	226	216	227	219	248	241	249	245	279	280	278	282	328	321	325	318	352	350	348	349	366	366	364	366		
		95.5	69.5	99.5	75.4	121	111	121	113	147	148	147	149	172	165	174	165	187	185	185	182	212	215	209	213	202	189	205	191	224	215	225	217	256	258	255	259	296	282	295	281	319	316	316	313	337	338	336	338		
		91.5	63.6	93.4	68	116	106	115	107	142	144	141	144	167	164	167	163	179	179	177	176	204	208	201	206	198	186	200	186	218	211	219	212	250	250	247	251	290	280	288	277	312	310	309	306	331	332	329	331		
		Cnt2 Dry	Sgl Direct																																																
Hum Sgl	Direct	202	133	219	155	272	227	284	238	359	345	366	346	426	380	445	392	468	428	482	449	537	525	539	528	431	362	441	372	487	451	489	452	560	543	567	548	623	559	639	578	684	646	688	651	758	743	745	736		
		216	149	220	162	274	234	277	244	356	349	352	345	493	488	493	483	503	496	507	497	545	545	544	543	477	432	464	426	504	486	505	481	564	557	563	560	670	642	666	639	717	698	713	692	782	780	774	772		
		191	142	206	151	269	222	268	235	354	347	350	345	492	487	491	490	503	504	502	495	543	544	539	540	479	434	469	435	503	491	503	485	562	555	563	559	665	644	663	641	713	689	712	691	782	783	775	776		
		150	85.7	163	93.9	215	161	222	175	327	302	325	305	358	301	364	304	397	350	410	361	474	451	478	456	384	302	382	305	437	391	449	397	532	512	528	512	540	456	554	472	601	547	606	551	704	683	696	673		
		152	91.3	165	98.9	221	171	227	180	329	309	322	306	361	313	365	312	401	364	402	369	470	456	470	453	398	323	395	322	452	407	457	410	541	522	538	522	563	488	571	497	618	571	617	571	712	695	697	683		
		134	85.5	150	93.5	192	138	196	152	264	247	268	249	405	382	404	387	412	406	415	401	447	442	448	442	372	309	365	314	413	377	411	375	474	464	473	462	569	543	574	550	607	584	607	583	671	664	662	656		
		110	74.4	120	78.3	160	116	171	125	239	224	241	224	385	366	381	363	390	385	391	390	420	413	420	413	343	281	343	288	386	348	384	348	450	432	449	429	541	522	544	526	578	557	576	555	644	635	635	627		
		62	37.6	70.4	42.1	96	63	107	69.9	174	147	177	152	299	244	299	251	317	288	321	290	344	328	348	331	274	187	276	204	323	271	325	276	395	370	396	373	481	434	489	448	508	478	518	482	572	551	570	552		
		58.9	37.2	64.2	42.5	89.8	60.2	98.9	63.9	164	138	166	142	298	247	296	252	313	291	309	291	332	322	335	320	270	189	272	202	315	267	314	273	388	361	386	359	481	444	488	455	502	479	507	486	562	544	559	543		
		Cnt4 Dry	Sgl Direct																																																
Hum Sgl	Direct	152	91.7	186	106	231	146	276	181	397	319	430	358	583	469	619	491	671	567	717	587	826	734	855	785	502	335	548	385	628	486	666	530	803	719	826	742	993	812	1060	862	1094	940	1154	999	1229	1142	1261	1184		
		200	161	216	167	258	200	275	216	395	324	403	339	915	861	908	875	937	908	930	916	963	945	963	942	649	529	658	566	728	649	724	661	848	792	841	788	1224	1155	1232	1192	1250	1203	1255	1222	1304	1280	1311	1282		
		191	164	193	165	234	194	244	200	359	307	370	318	920	892	917	892	941	916	934	920	965	956	956	945	646	492	644	519	741	628	722	641	846	801	837	789	1216	1178	1220	1189	1233	1200	1240	1208	1301	1279	1301	1283		
		97.4	50.7	110	65	140	95.2	155	105	249	184	265	204	476	346	486	362	541	438	548	446	652	566	658	582	404	242	422	274	485	366	497	386	651	560	667	563	823	645	829	650	888	745	909	764	1024	922	1053	941		
		99.1	57.3	109	67.2	142	95.7	158	109	252	191	265	213	497	370	494	382	558	464	554	465	666	593	654	594	432	266	447	295	519	399	534	417	677	601	680	602	857	701	863	713	930	802	944	811	1056	965	1067	977		
		127	80.8	138	95.1	161	123	186	135	251	205	271	219	706	549	704	598	730	655	725	670	770	740	765	744	471	307	485	346	546	431	551	455	650	596	652	603	1062	941	1068	976	1089	1015	1095	1044	1132	1101	1142	1114		
		110	74.3	113	85.8	132	106	143	111	209	161	219	179	657	546	655	578	683	634	678	635	726	703	718	700	404	261	429	294	497	368	503	382	598	538	601	540	1019	933	1019	944	1037	992	1040	999	1076	1048	1088	1060		
		47.2	12.8	57.1	26.1	66.6	37.4	82	47.6	121	83	139	100	371	188	395	221	442	301	461	322	530	440	535	446	233	132	267	149	319	199	347	228	456	345	465	362	802	651	815	671	857	728	870	744	943	855	962	868		
		47.3	13.8	57.9	23.9	68.5	35.1	75.9	47.1	115	81.9	128	98.9	370	192	379	215	446	300	455	313	529	449	529	453	238	133	274	162	316	208	338	240	457	348	454	364	825													

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude visait à caractériser et comparer le potentiel de divers systèmes de rafraîchissement passif implantés sur le système de ventilation, pour le cas de bâtiments administratifs situés en climat modéré (basé sur des météo réelles genevoises). Menée sur une large palette de configurations possibles (météo, bâtiment, système technique), cette étude amène aux constats généraux suivants :

1. Il est montré une nouvelle fois que dans une optique d'utilisation rationnelle de l'énergie, une bonne protection solaire reste primordiale pour maintenir des conditions de confort estival acceptables. Les autres paramètres de l'enveloppe sont tous d'une importance moindre (inertie du bâtiment, accès à la masse thermique, orientation, isolation...).
2. Cela étant, si l'on veut obtenir un bon confort estival à moindre coût énergétique, il vaut mieux tendre vers un bâtiment très bien isolé. Autrement dit, et contrairement à un jugement hâtif basé sur l'intuition, il y a totale compatibilité entre les objectifs hivernaux et estivaux. Pour un bon bâtiment administratif, cela est du à ce que la température interne pendant l'occupation est inférieure à la température extérieure, si bien que l'effet de l'isolation est alors positive. Cela peut en principe être étendu à l'habitat, dans la mesure où de nuit, lorsque le différentiel s'inverse, l'ouverture des fenêtres permet l'échange thermique adéquat.
3. L'occupation des locaux joue également un rôle central pour le confort, à travers les charges internes et les apports thermiques des appareils de bureau, qu'il s'agit de maintenir aussi bas que possible. A cet égard, l'étude n'a par contre pas abordé l'effet de la gestion par les occupants des ouvrants, stores, éclairage et autres appareils, gestion qui a été supposée correcte.
4. Au niveau climatique, des résultats significativement différents sont obtenus pour le même bâtiment selon que l'on considère un site urbain ou rural, un été normal ou caniculaire (type 2003).
5. Pour un été normal, un site rural, un bâtiment efficacement protégé du soleil et des charges internes modestes (10 W/m^2), un bon confort peut être garanti par simple ventilation nocturne, avec un débit d'air équivalent au débit minimal d'aération (1.3 vol/h). Dans tous les autres cas, si l'on veut strictement respecter la nouvelle norme (moins de 100h à plus de 26.5°C), sans recourir à du rafraîchissement auxiliaire, il faut impérativement ventiler le bâtiment avec de l'air rafraîchi et un débit de ventilation accru.
6. A cet égard, l'humidification adiabatique présente non seulement le plus grand potentiel, mais encore la plus grande stabilité par rapport à un été caniculaire type 2003. La quantité d'eau absorbée par l'humidification adiabatique (dans la grande majorité des cas moins de 50 litre/m^2 par été) reste suffisamment faible pour ne pas être un enjeu. La question de l'hygiène et de l'humidité interne du bâtiment n'a par contre pas été abordée dans cette étude.
7. En complément aval à l'humidification, mais parfois également en alternative, les systèmes de stockage jour/nuit (puits canadien ou déphaseur thermique) permettent dans plusieurs cas de gagner de gagner 1 à 2°C supplémentaires sur la température estivale de pointe, respectivement les quelques dizaine d'heures de confort qui manquent, cela même en situation d'été caniculaire. Cela est particulièrement le cas lorsque ces systèmes sont implantés en mode alterné avec de la ventilation nocturne directe.
8. Pour une occupation $8 - 18 \text{ h}$, le système de stockage fournissant la meilleure prestation est clairement le déphasage de 8h . Cela étant, le choix entre l'utilisation d'un puits canadien ou

d'un déphaseur se fera également sur des bases autres que thermiques : emplacement à disposition, possibilité d'intervention, coûts, maturité des technologies, consommation électrique, etc.

9. Dans tous les cas, la question du débit de ventilation accru nécessite une attention particulière à la consommation électrique additionnelle, qui n'a pas été abordée dans cette étude. A cet égard, ce sont souvent moins les systèmes de stockage que la distribution d'air dans le bâtiment qui peuvent constituer le goulet d'étranglement.
10. En cas de gains internes élevés ($>30 \text{ W/m}^2$ environ), l'aide d'un système de rafraîchissement complémentaire est possible et permet de maintenir un confort normé (26.5°C en continu). La mise en œuvre des stratégies ci-dessus permettent alors de réduire très considérablement l'énergie nécessaire et dans une moindre mesure la puissance appelée. Dans plusieurs cas le système de froid (surtout la distribution et l'émission) peut être alors très simple et d'un coût bien moindre qu'une climatisation traditionnelle. De plus, ils se prêtent parfaitement à l'utilisation de sources froides à température modérée, disponibles dans l'environnement (lac, geocooling, ...).

7. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'Office fédéral de l'énergie, en particulier Monsieur C. Filleux, pour le soutien financier porté à cette étude.

8. RÉFÉRENCES

1. Hollmuller P., Lachal B. (2008) Air-soil heat exchangers for heating and cooling : dimensioning guidelines, in : Eurosun 2008, 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Lisbon, 7-10 October 2008. *Publication prochaine.*
2. Hollmuller P., Lachal B., Pahud D. (2005) Rafrâichissement par géocooling : bases pour un manuel de dimensionnement. Genève, CUEPE, Université de Genève (Rapports de recherche du CUEPE n° 5).
3. Hollmuller P., Lachal B., Zraggen J.-M. (2005) Rafrâichissement de bâtiments par déphasage thermique contrôlé, in : Conférence internationale Energie solaire et bâtiment, CISBAT 2005, Lausanne, 28-29 septembre 2005, p. 317-322. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
4. Hollmuller P., Lachal B., Zraggen J.-M. (2004) Déphaseur thermique diffusif. Genève, CUEPE, Université de Genève.
5. Hollmuller P. (2003) Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, p. 4303-4317.
6. Hollmuller P. (2002) Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Genève, Université de Genève, Faculté des Sciences (Thèse, Section de physique et Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie).
7. Ineichen P. (2006) M-été-O – données climatiques estivales dans la région genevoise, valeurs moyennes et extrêmes. Genève, CUEPE, Université de Genève (Rapports de recherche du CUEPE n° 7).
8. SIA (2007) Norme SIA 382/1 – Installations de ventilation et de climatisation – Bases générales et performances requises, Zürich, Société suisse des ingénieurs et des architectes.