

Effet de différentes solutions techniques sur les températures de non-chauffage et de non-refroidissement et sur le potentiel de free cooling dans les bâtiments de bureaux

Marcello Caciolo¹, Dominique Marchio¹, Pascal Stabat¹, Sila Filfli¹

¹ CEP – Centre Energétique et Procédés
Ecole des Mines de Paris: 60, Boulevard Saint-Michel 75272 Paris
marcello.caciolo@ensmp.fr

RESUME. Dans cette étude, on analyse au moyen de la simulation dynamique l'effet de différentes combinaisons de paramètres sur les températures de non-chauffage et de non-refroidissement des bâtiments de bureaux climatisés. Les paramètres qui influencent ces températures sont le niveau d'isolation, l'inertie thermique, les protections solaires, le ratio de surface vitrées, le type de fenêtres et de protections solaires, la perméabilité à l'air, le type de ventilation, les apports des équipements de bureautique et de l'éclairage et les températures de consigne. Le but est de proposer des solutions constructives conduisant à des bâtiments présentant trois saisons bien distinctes : une saison de chauffage, deux intersaisons sans besoin de chauffage ni de rafraîchissement, une courte saison de rafraîchissement. Ainsi, on analysera si un recours à la ventilation naturelle est suffisant durant l'intersaison pour éviter les surchauffes. Cette étude constitue un préambule de la définition d'un nouveau concept de bâtiments climatisés, optimisés tant au niveau de l'enveloppe qu'au niveau des systèmes, appelé CLIMHYBU (CLIMatisation HYBride dans les immeubles de BUreaux).

MOTS-CLÉS : free cooling, température de non chauffage, température de non climatisation

ABSTRACT. In this paper we analyse by means of building simulation the effect of different parameter combinations on the non-heating and non-cooling temperatures of a typical air-conditioned office building. The examined parameters are: thermal insulation, thermal inertia, ratio of glazed surfaces, type of windows and shading devices, envelope permeability, ventilation type, installed appliances and lighting power, heating and cooling set point temperatures. The paper suggests the constructive solutions that lead to concept buildings with three distinct seasons: a heating season, two mid seasons without the need for heating or cooling and a cooling season. Moreover, we analyse the possibility to use free cooling during the heating and the mid seasons to avoid overheating. This study is an introduction to the definition of a new concept of air-conditioned buildings, with optimised envelope and HVAC systems, called CLIMHYBU (Hybrid air-conditioning of office buildings).

KEYWORDS: free cooling, non-heating temperature, non-cooling temperature.

1. INTRODUCTION

L'amélioration de l'isolation thermique et de l'imperméabilité à l'air de l'enveloppe, l'augmentation du taux de surfaces vitrées et l'emploi d'un très grand nombre d'équipements électriques conduisent, dans les bâtiments modernes de bureaux, à des effets contradictoires sur les besoins thermiques. D'une part, la période de chauffage se trouve en général diminuée; d'autre part, la période et la demande de rafraîchissement augmentent significativement. Dans certains cas, on peut avoir des besoins de chauffage et de rafraîchissement concomitants pendant les saisons intermédiaires.

Dans ce papier, on montre comment les choix architecturaux, thermiques et de gestion du bâtiment modifient les saisons de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment de bureaux choisi comme

référence. Une fois caractérisé à travers des simulations son comportement thermique et défini des paramètres qui quantifient la durée et la superposition des saisons de chauffage et de refroidissement, on étudie l'effet de la variation des caractéristiques du bâtiment sur ces paramètres pour identifier les solutions les plus favorables. De là, on définit un bâtiment modifié qui réduit considérablement la superposition des saisons et ainsi les besoins thermiques. Ensuite, on étudie la possibilité d'effectuer du free cooling par ouverture des fenêtres dans les deux bâtiments afin d'estimer son effet sur la température de non refroidissement et sur les besoins de climatisation.

2. LE BATIMENT DE REFERENCE

Le bâtiment de référence analysé dans ce papier correspond à un immeuble de bureaux climatisé typique issu de la typologie définie par (Filfli *et al.*, 2006). Il est composé de douze étages identiques d'une surface totale au sol de 15 000 m², dont 12 500 m² climatisés. La figure 1 montre le plan et le découpage en zones (UTH) du bâtiment. Les WC et les couloirs (UTH 1 et 5) ne sont pas climatisés.

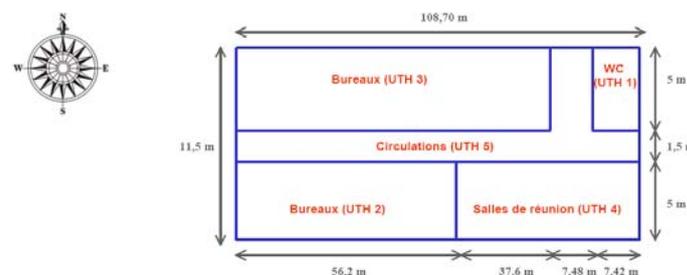


Figure 1 : Plan et découpage en zones du bâtiment

50 % des façades nord et sud du bâtiment sont vitrées. Les caractéristiques thermiques de l'enveloppe respectent les niveaux de la RT2005 et sont résumées dans la tableau 1.

U des parois	0.35 W / m ² K
U de la toiture	0.3 W / m ² K
Inertie thermique	Moyenne (C _m = 110 kJ / m ² K et A _m = 2.5 selon la norme EN ISO 13 786)
Fenêtres	U: 2.7 W / m ² K Facteur solaire (FS): 0.59
Protections solaires intégrées	U: 2.0 W / m ² K Facteur solaire (FS): 0.14
Taux d'occupation nominal	1 personne / 12 m ²
Puissance des équipements de bureautique	15 W / m ²
Puissance installée d'éclairage	12 W / m ²
Perméabilité à l'air	1,7 m ³ / h @ 4 Pa par m ² de surface extérieure
Ventilation hygiénique (en occupation)	Bureaux : 25 m ³ /h par personne, simple flux (extraction par les toilettes) Salle de réunion : 30 m ³ /h par personne, double flux avec récupérateur
Températures de consigne	20 / 25 °C en occupation, 15° C ralenti de nuit

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques du bâtiment de base de l'étude

Les profils d'occupation et d'utilisation des équipements de bureautique sont définis sur base horaire selon (Filfli *et al.*, 2006). On suppose ainsi que l'utilisation des protections solaires et de l'éclairage artificiel dépendent respectivement de la radiance solaire sur la façade et de l'éclairage naturel disponible, sans variations saisonnières (Marchio *et al.*, 2006). Enfin, on suppose que les fenêtres ne sont pas ouvrables, situation plutôt commune dans les bâtiments climatisés.

Dans le tableau 2 sont indiqués les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment de référence et les puissances maximales de chaud et de froid, pour trois climats français, calculés par le logiciel de simulation dynamique des bâtiments ConsoClim (Bohler *et al.*, 2000). Les climats utilisés sont ceux de Trappes (région parisienne, H1 dans le tableau), de La Rochelle (côte Atlantique, H2) et de Nice (côte d'Azur, H3).

	H1	H2	H3
Besoin de chauffage (kWh / m ²)	28	15	6
Besoin de refroidissement (kWh / m ²)	31	42	65
Puissance maximale de chaud (kW)	713	669	609
Puissance maximale de froid (kW)	905	913	877

Tableau 2 : Performance énergétique du bâtiment de référence dans trois zones climatiques.

3. DEFINITION DES TEMPERATURES DE NON CHAUFFAGE ET DE NON REFROIDISSEMENT

La figure 2 montre l'évolution des besoins de chauffage et de refroidissement pour le bâtiment de référence dans le climat de Trappes. Par ailleurs, la figure 3 montre les courbes cumulées des besoins de chauffage et de refroidissement en fonction de la température extérieure.

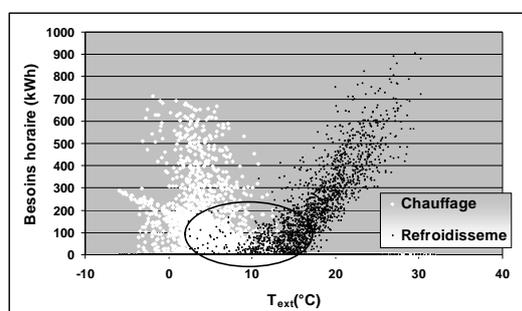


Figure 2 : Besoins horaires du bâtiment de référence à Trappes

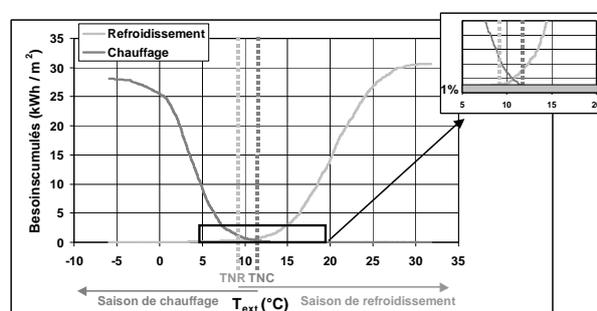


Figure 3 : Courbe cumulée des besoins en fonction de la température extérieure

La figure 3 permet de mettre en évidence deux températures caractéristiques, qu'on appelle température de non chauffage (TNC) et de non refroidissement (TNR). On les définit ici comme les températures au dessus (ou au dessous) desquelles les besoins de chauffage (ou de refroidissement) sont inférieurs à 1% des besoins annuels. La différence entre TNR et TNC est un paramètre qui quantifie la durée de la saison intermédiaire, correspondante à la période de demande simultanée de chauffage et de refroidissement si la différence est négative ou bien la période sans demandes de chauffage et de refroidissement si elle est positive.

Le tableau 3 montre les températures de non refroidissement et de non chauffage et leur différence pour les trois climats considérés.

On note que pour le bâtiment de référence la différence TNR-TNC est toujours négative. Cela implique des besoins de chauffage et de refroidissement simultanés ou en rapide succession, et qu'il n'existe pas une saison intermédiaire.

	H1	H2	H3
TNC	11.4	12.1	12.8
TNR	9.7	7.1	11.3
TNR-TNC	-1.7	-4	-1.5

Tableau 3. TNC et TNR du bâtiment de référence.

4. ETUDE PARAMETRIQUE

Sur la base du bâtiment de référence (tableau 1), on étudie l'effet de la variation de huit paramètres sur la différence entre les températures de non chauffage et de non refroidissement. Pour chaque

paramètre, on sélectionne jusqu'à deux niveaux de performance, correspondant à des solutions techniques disponibles sur le marché français. Les paramètres sont modifiés un par un par rapport à la solution de base. Les 12 cas résultants sont montrés au tableau 4.

Paramètre	Valeur	Symbole
Fenêtres – Protections solaires	U: 1.4 - 1.3 W/m ² K FS: 0.48 - 0.12	FEN1
	U: 1.1 - 1.2 W/m ² K FS: 0.36 - 0.09	FEN2
Inertie thermique	Lourde (C _m =260 kJ/m ² K et A _m =3)	INE1
	Légère (C _m =85 kJ/m ² K, A _m =2)	INE2
Isolation toiture - parois	U: 0.15 - 0.14 W/m ² K	IS
Perméabilité	0.7 m ³ /h	PERM
Ventilation	Double flux avec récupérateur	DF
Bureautique / éclairage	7.5 - 8 W/m ²	BE
Taux de surface vitrées sur la façade	30 %	TSV1
	70 %	TSV2
Températures de consigne	19 / 26 °C	TC1
	21 / 24 °C	TC2

Tableau 4 : Liste des variations au bâtiment de référence étudiées

Les figures de 4 à 9 montrent l'évolution de la différence TNR-TNC, des besoins de chauffage et de refroidissement et de leur somme pour les 12 cas identifiés.

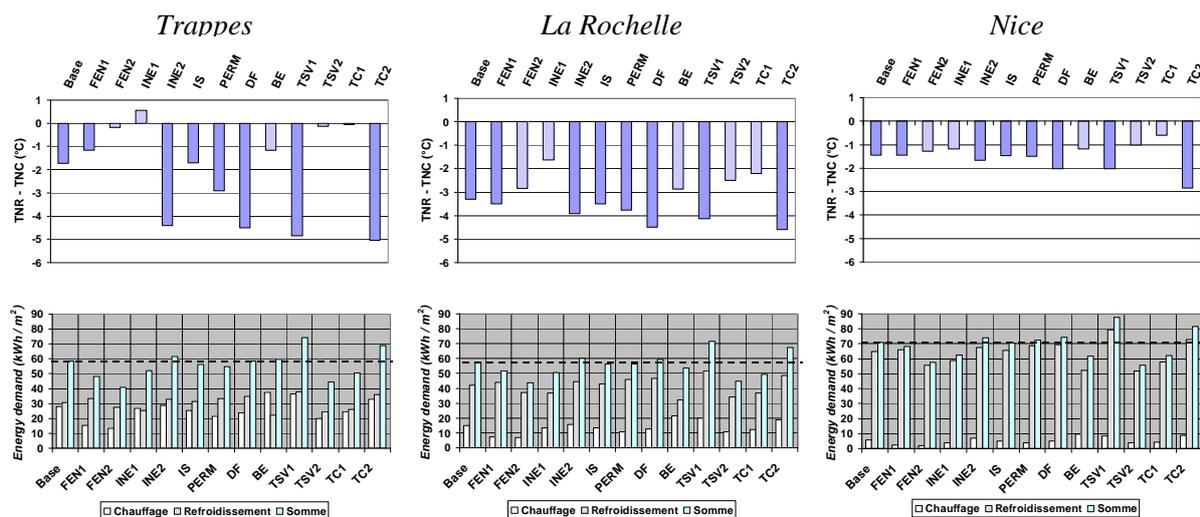


Figure 4 – 9 : Evolution de la différence entre les températures de non chauffage et de non refroidissement et des besoins de chauffage et de refroidissement pour les 12 cas identifiés.

Les résultats montrent des évolutions similaires dans les trois climats :

- Le type de fenêtre FEN2 montre une meilleure performance par rapport au type FEN1 et au cas de base en terme des besoins de chauffage et de refroidissement et de différence TNR-TNC, grâce à ses meilleurs U et facteurs solaires ;
- L'inertie thermique affecte légèrement les besoins, mais elle s'avère être un des paramètres qui influence le plus la différence TNR – TNC. En effet, une inertie lourde peut amener à une différence TNR-TNC positive à Trappes et fortement réduite à La Rochelle et Nice ;
- L'isolation a un effet légèrement positif sur les besoins mais un effet légèrement négatif sur la différence TNR – TNC. Cela s'explique par le fait que le bâtiment de référence est déjà bien isolé;

- La réduction de la perméabilité produit un impact positif sur les besoins totaux à cause de la réduction du besoin de chauffage (sauf à Nice), mais un impact négatif sur la différence TNR-TNC, à cause de l'augmentation des surchauffes pendant la saison froide ;
- La ventilation double flux avec récupération augmente légèrement les besoins totaux et dégrade la différence TNR-TNC. En effet, le by-pass de l'échangeur est commandé sur la base de la température extérieure. Par conséquent, quand on a des besoins de refroidissement à basse température le récupérateur est en marche et empêche au bâtiment d'évacuer la chaleur par ventilation ;
- L'utilisation des équipements de bureautique et de l'éclairage à basse consommation a un effet positif sur la différence TNR-TNC et légèrement positif sur les besoins. En effet, les besoins de chauffage augmentent mais ils sont compensés par une diminution des besoins de refroidissement, sauf à Trappes où cette diminution n'est pas suffisante. Par ailleurs, il faut noter que la réduction des consommations électriques correspondant à cette solution n'est pas prise en compte;
- Le taux des surfaces vitrées influence fortement les besoins et la différence TNR-TNC. Une diminution de la surface vitrée amène à une amélioration de ces deux paramètres;
- Le changement des températures de consigne influence les deux paramètres de la même manière. Le besoin total d'énergie diminue de 10% et la différence TNR-TNC approche zéro en passant des températures de 20/25 °C à 19/26 °C.

Sur la base de ces résultats, on sélectionne les variations qui réduisent la différence TNR-TNC : FEN2, INE1, BE, TSV2, et TC1. L'application de toutes ces variations au bâtiment de référence amène à la courbe des besoins à Trappes représenté sur la Figure 10 (cf. Figure 3).

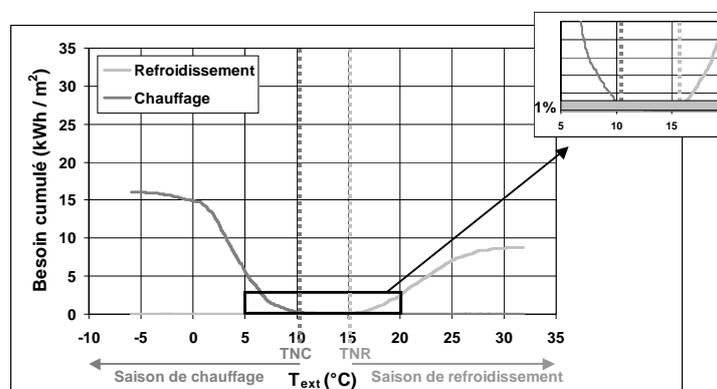


Figure 10 : Courbe cumulée des besoins en fonction de la température extérieure pour le bâtiment modifié

Sur la figure, on peut noter l'apparition d'une plage de températures sans besoins de chauffage et de refroidissement. L'évolution est similaire pour les deux autres climats. Dans le tableau 5, la différence TNR-TNC est reportée pour le bâtiment modifié dans les trois climats, ainsi que les besoins de chauffage et de refroidissement et les puissances maximales.

	H1	H2	H3
Température de non refroidissement (°C)	15.1	15.6	15.4
Température de non chauffage (°C)	10.7	12.7	13
<i>Différence TNR-TNC</i>	4.5	2.9	2.4
Besoin de chauffage (kWh / m ²)	16	8	2
<i>Réduction du besoin de chauffage</i>	43%	47%	67%
Besoins de refroidissement (kWh / m ²)	9	14	25
<i>Réduction du besoin de refroidissement</i>	71%	67%	62%
Puissance maximale en chaud (kW)	582	572	320
<i>Réduction de la puissance maximale en chaud</i>	18%	14%	47%
Puissance maximale de refroidissement (kW)	408	439	423
<i>Réduction de la puissance de refroidissement</i>	55%	52%	52%

Tableau 5 : Performance énergétique du bâtiment modifié

La différence TNR-TNC est positive pour tous les climats. De plus, les besoins et les puissances maximales de chauffage et de refroidissement sont fortement réduits par rapport au bâtiment de référence.

5. LE POTENTIEL DU FREE COOLING PAR OUVERTURE DES FENETRES

Le free cooling consiste à introduire, dans l'espace à refroidir, de l'air extérieur quand celui-ci est plus frais qu'à l'intérieur. On parle alors de surventilation, car le débit d'air s'ajoute au débit hygiénique.

Les débits d'air de surventilation nécessaires au refroidissement peuvent être calculés de manière simplifiée en fonction de la température extérieure et du besoin de refroidissement horaire $Q_{\text{refroidissement}}$:

$$q = \frac{Q_{\text{refroidissement}}}{\rho_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} \cdot \Delta T} \quad (1)$$

où ρ_{air} et $c_{p,\text{air}}$ sont la masse volumique et la chaleur spécifique de l'air et ΔT est la différence entre la température de consigne et la température extérieure.

On peut alors calculer le débit de surventilation nécessaire pour annuler tous les besoins de refroidissement au dessous d'une température extérieure donnée, c'est-à-dire pour élever la température de non refroidissement (actif) à cette valeur. Cela correspond au débit calculé pour le besoin horaire maximal de refroidissement correspondant à cette température, qu'on appelle ici débit de dimensionnement. A partir des débits de dimensionnement, on peut s'intéresser au potentiel de free cooling par ouverture de fenêtre dans les deux bâtiments. On considère deux configurations, représentées dans les figures 11 et 12.

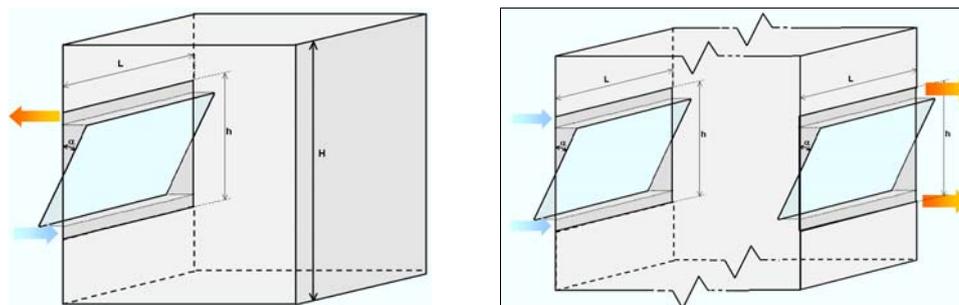


Figure 11-12: Schémas de la ventilation sur une seule façade et traversante

- Ventilation sur une seule façade (Figure 11) : les deux façades du bâtiment sont aérauliquement indépendantes. Dans chaque local, la même fenêtre fonctionne comme entrée d'air (moitié inférieure) et comme sortie (moitié supérieure). La ventilation naturelle s'établit principalement grâce à l'effet du gradient de température sur la hauteur de la fenêtre;
- Ventilation traversante causée par le vent (Figure 12) : elle est possible quand entre les deux façades il n'y a pas de résistances aérauliques significatives. Cela implique des portes ouvertes ou des amples ouvertures spécifiques qui connectent les différents bureaux sur les deux façades. L'air rentre par les fenêtres disposées sur la façade au vent et sort par les fenêtres disposées sur la façade sous le vent. Dans le cas du bâtiment étudié, on suppose une ventilation traversante nord-sud dans la zone de bureaux.

Pour les deux situations, (CIBSE, 2005) donne les formules de dimensionnement suivantes :

$$\text{- Ventilation sur une seule façade : } A = \frac{q}{C_d} \sqrt{\frac{(T_i + 273)}{\Delta T \cdot g \cdot h}} \quad (2)$$

$$\text{- Ventilation traversante provoquée par le vent : } A = q \cdot \left(C_d \cdot U_{wind} \cdot \sqrt{\frac{\Delta C_p}{2}} \right)^{-1} \quad (3)$$

où A est la surface de dimensionnement des ouvertures en m², C_d est le coefficient de décharge, typiquement égal à 0.6, T_i est la température intérieure de l'espace en °C, imposée égale à la température de consigne en froid, ΔT est la différence entre T_i et la température extérieure, g est la constante gravitationnelle en m/s², h est la hauteur de la fenêtre (1.35 m pour le bâtiment de référence, 0.9 m pour le bâtiment modifié), U_{wind} est la vitesse du vent de dimensionnement (2 m/s), ΔC_p est la différence de dimensionnement entre les coefficients de pression sur les deux façades (0.35), et q est le débit de surventilation désiré, dans notre cas celui qu'on a appelé débit de dimensionnement.

Les Figures 13 et 14 présentent l'évolution du taux d'ouverture de la façade nécessaire pour le free cooling pour le bâtiment de référence et celui modifié pour le climat de Trappes, dans le cas de ventilation sur une seule façade et de ventilation traversante provoquée par le vent.

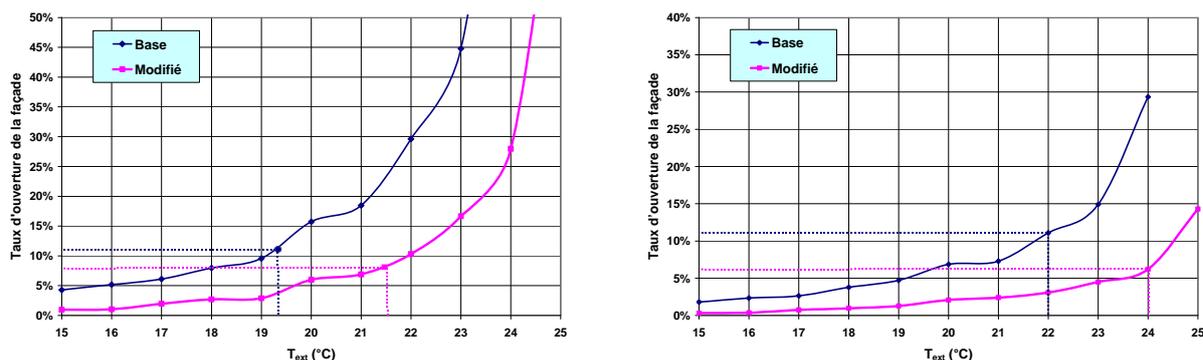


Figure 13 -14: Evolution du taux d'ouverture de la façade nécessaire pour assurer le free cooling dans le cas de ventilation sur une seule façade et traversante

Les lignes pointillées correspondent à la limite d'ouverture dans les deux bâtiments. En effet, généralement le taux d'ouverture des fenêtres doit être limité pour des raisons de sécurité et de confort (vitesse de l'air). En première approximation, on estime que cette limite correspond à un angle d'ouverture de 30°, pour des ouvertures configurées comme dans les Figures 11 et 12. La valeur correspondant de la surface effective de passage de l'air, hachurée sur les figures 11 et 12, est de 21 %

de la surface vitrée totale sur la façade. Pour le bâtiment de référence, cela correspond à 11% de la façade tandis que pour le bâtiment modifié, cela ne représente plus que 6 %.

Les nouvelles températures de non refroidissement des deux bâtiments pour Trappes, ainsi que les besoins de refroidissement actif (climatisation) sont reportés dans le tableau 6.

<i>Ventilation Bâtiment</i>	<i>Sur une seule façade</i>		<i>Ventilation traversante</i>	
	<i>Référence</i>	<i>Modifié</i>	<i>Référence</i>	<i>Modifié</i>
<i>TNR (°C)</i>	19.5	21.5	22	24
<i>Différence TNR-TNC</i>	8.1	10.8	10.6	13.3
<i>Besoins de climatisation (kWh / m²)</i>	18.2	4.8	10.5	2.5

Tableau 6 : Performance des deux bâtiments avec free cooling

Sur la base de ces résultats on peut affirmer que pour le bâtiment modifié le refroidissement par surventilation diurne est plus efficace que pour le bâtiment de référence. En particulier, avec la ventilation traversante les besoins de refroidissement actif à Trappes s'élèvent à 2.5 kWh / m² par an, soit seulement le 8% des besoins de refroidissement du bâtiment de référence sans free cooling.

6. CONCLUSIONS

Dans ce papier, on a introduit des paramètres quantificateurs de la durée et de la superposition des saisons de chauffage et de refroidissement (TNC, TNR et leur différence). L'analyse de ces paramètres sur les simulations effectuées nous a permis d'identifier 5 solutions techniques qui tendent à réduire le plus les besoins simultanés de chauffage et de refroidissement : la réduction de la surface vitrée, l'amélioration des caractéristiques thermiques des baies, l'augmentation de la masse thermique du bâtiment, l'utilisation d'équipements et d'éclairage à faible consommation et l'imposition de températures de consignes moins strictes. L'application de ces solutions au bâtiment pris comme référence fait apparaître une intersaison sans besoin de chauffage ni de refroidissement, ainsi que des besoins totaux de chauffage et refroidissement fortement réduits.

En outre, une analyse simplifiée du free cooling par ouverture de fenêtres suggère que le bâtiment modifié présente un potentiel de réduction des besoins de refroidissement active considérable par rapport à celui de référence. Naturellement, les hypothèses et les formules simplifiées de dimensionnement utilisées nécessitent une confirmation à travers des modèles plus détaillés pour évaluer l'efficacité des ouvertures avec conditions de température et de vent variables et pour évaluer le confort thermique (vitesse de l'air). Ces analyses sont actuellement en développement avec des modèles aérauliques multi-zones et CFD, couplés avec des modèles thermiques.

7. REFERENCES

- Allard F. (1998). *Natural ventilation in buildings – A design handbook*, James and James, London, 1998.
- Bohler A., Fleury E., Marchio D., Millet J.R. (2000). Méthode de calcul des consommations d'énergie des bâtiments climatisés, CONSOCLIM, rapport CSTB ENEA/CVA-99.176R, janvier 2000
- CIBSE (2005). *Natural ventilation in non-domestic buildings*. CIBSE Application Manual 10, March 2005
- Filfli S., Alessandrini J.M., Fleury E., Damolis P. (2006). Quelles solutions pour les établissements de santé à consommation d'énergie annuelle inférieure à 100 kwh/m² ?, report ADEME
- Marchio D., Fleury E., Filfli S. (2006). Impact de la gestion de l'éclairage et des protections solaires sur la consommation d'énergie de bâtiments de bureaux climatisés, *Climamed*, Lyon, France