



**HAL**  
open science

## **Fiche 1-2 : Recherche d'un indice de confort thermique adapté à La Réunion. Intégration à CODYRUN**

François Garde, Alain Bastide, Harry Boyer, Frédéric Miranville, Mathieu David

### ► To cite this version:

François Garde, Alain Bastide, Harry Boyer, Frédéric Miranville, Mathieu David. Fiche 1-2 : Recherche d'un indice de confort thermique adapté à La Réunion. Intégration à CODYRUN. Alizés : Revue angliciste de La Réunion, 2007, Colloque " Equilibres environnementaux, énergies renouvelables et développements urbains ", 29-II Sciences, pp.95-116. hal-02343108

**HAL Id: hal-02343108**

**<https://hal.univ-reunion.fr/hal-02343108>**

Submitted on 1 Nov 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## PROGRAMME PLURIANNUEL 2003-2005

# FICHE 1-2

## RECHERCHE D'UN INDICE DE CONFORT THERMIQUE ADAPTÉ À LA RÉUNION INTÉGRATION À CODYRUN

---

### Membres impliqués :

François GARDE	Professeur, LPBS, Université de La Réunion ;
Alain BASTIDE	Maître de Conférences, LPBS, Université de La Réunion ;
Harry BOYER	Professeur, LPBS, Université de La Réunion ;
Frédéric MIRANVILLE	Maître de Conférences, LPBS, Université de La Réunion ;
David MATHIEU	Chercheur associé au LPBS, Université de La Réunion ;

### Partenaires

BET Locaux (INSET, IMAGEEN, Sicle AB) ;  
Région Réunion ;  
ARER.

## RÉSUMÉ

---

Le travail présenté dans cette fiche porte sur le confort thermique des personnes dans une ambiance donnée, en traitant à la fois les aspects modélisation et expérimentation. De nombreux indices de confort thermique existent tels que le PMV, mais ne sont pas adaptés au climat tropical. La bibliographie effectuée a permis d'identifier l'indice PMV\* comme étant le plus adapté au climat tropical. Les zones de confort de Givoni constituent également un outil intéressant et pédagogique pouvant être facilement utilisé par les bureaux d'étude et cabinets d'architecte pour prédire ou évaluer la sensation thermique d'un occupant. Ces indices de confort ont été intégrés dans le code de simulation thermique de bâtiment CODYRUN. Par ailleurs, un programme dédié au confort thermique a également été développé sous environnement MATLAB. Ces deux logiciels sont utilisés actuellement par plusieurs bureaux d'études locaux et deux cabinets d'Architecte dans le cadre des projets de bâtiments qu'ils ont en étude. En terme de valorisation de la recherche et de création de valeur ajoutée, ceci constitue un transfert de connaissance intéressant de la recherche vers les pratiques professionnelles. Par ailleurs, un système d'acquisition dédié à la mesure du confort thermique a été mis en place. Le BET IMAGEEN dispose également du même appareillage. Nous pourrions grâce à cela mener des campagnes de mesure communes afin d'avoir un retour d'expérience sur la qualité thermique des bâtiments. Des premières mesures ont été effectuées et ont porté sur la qualité thermique d'un bureau et sur l'efficacité des brasseurs d'air dans une salle de travaux dirigés. Les résultats montrent que les conditions de confort sont bonnes dans le bureau. Concernant la salle de TD, les brasseurs d'air permettent de générer une vitesse d'air moyenne de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , ce qui permet d'être en situation de confort jusqu'à des températures de  $31^\circ\text{C}$ .

## 1 INTRODUCTION

---

Ce travail de recherche a consisté à définir un indice local représentant la sensation de confort thermique d'un individu dans une ambiance donnée. Cet indice permettra par exemple de prédire la sensation thermique des occupants, ie chaud, froid ou neutre.

La sensation de confort thermique d'un individu dépend de plusieurs paramètres :

- Température de l'air ;
- Température radiante moyenne (moyenne des températures de surface des parois de la pièce étudiée) ;
- Humidité ;
- Vitesse de l'air ;
- L'activité et vêtue de l'individu.

De nombreux indices de confort thermique existent tels que le PMV, mais ne sont pas adaptés au climat tropical. Il n'existe pas à ce jour d'indice permettant de caractériser la qualité thermique d'une ambiance. Le développement d'un indice de confort propre à l'île de La Réunion et son intégration dans un code de simulation tel que CODYRUN donneront ainsi un outil aux bureaux d'étude locaux capable de prédire la qualité thermique d'une ambiance donnée.

Les objectifs de ce travail sont donc de :

- Recenser les indices de confort existants dans la bibliographie (PMV, SET, Gagge, DISC) et les comparer pour différentes ambiances simulées ;
- Proposer un indice adapté à La Réunion ;
- Intégrer l'indice au code de simulation CODYRUN.
- Proposer une méthodologie de validation expérimentale de l'indice de confort.

**2 BIBLIOGRAPHIE SUR LES INDICES DE CONFORT  
RECHERCHE D'UN INDICE ADAPTÉ A LA RÉUNION**

---

**2.1 Introduction**

La notion de confort thermique n'est pas une notion simple. Il s'agit d'une notion relativement subjective qui varie d'un individu à un autre. Cette notion intègre des facteurs à la fois physiologiques, psychologiques et sociologiques. En général, le confort thermique est défini par la définition suivante : « pour un individu donné le confort thermique est l'état de satisfaction éprouvé pour une condition environnementale donnée ».

Différentes méthodes utilisées afin d'estimer l'état de confort ou d'inconfort sont développés dans cette section. Dans un premier temps, les modèles basés sur la modélisation des échanges d'énergie entre le corps humain et l'ambiance thermique environnante seront présentés. Dans un second temps, des relations empiriques basées sur des corrélations entre les paramètres de l'ambiance thermique et la sensation de confort (ou d'inconfort) seront abordées.

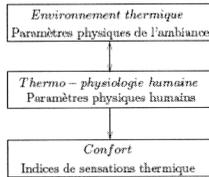


Figure 1 : Démarche de modélisation de la sensation thermique

**2.2 Bilan thermique global du corps humain**

Le corps humain échange en permanence avec son environnement direct suivant les phénomènes :

- de convection entre l'ambiance thermique et la peau ;
- de rayonnement entre l'ambiance thermique et la peau ;
- de conduction entre la peau et les vêtements ;
- d'évaporation via la respiration et la peau.

Ces phénomènes physiques permettent de définir une équation de bilan de flux établie entre le corps humain et son ambiance thermique. Cette relation est la suivante :

$$S = M - W - K - C - R - E \quad (Eq. 1)$$

Où S est la puissance thermique par unité de surface stockée par le corps en  $W.m^{-2}$ . M est la production de chaleur interne. W est le travail apporté de l'extérieur. K, R, C, E représentent, respectivement, des échanges de chaleur par conduction, rayonnement, convection et évaporation.

Si  $S = 0$  alors l'état d'équilibre est atteint entre l'ambiance thermique et le sujet. Dans le cas où S est négatif, le sujet perd de l'énergie.

Cette équation est numériquement évaluée à partir des paramètres de l'ambiance thermique et de paramètres liés à l'individu. Ces paramètres sont au nombre de six et définis en deux groupes. Un premier groupe est composé de quatre paramètres liés à l'ambiance thermique. Le dernier groupe est composé de deux paramètres liés à l'individu.

Les paramètres de l'ambiance thermique sont la température sèche de l'air  $T_a$ , la température radiante moyenne  $T_{rm}$ , l'humidité relative HR et la vitesse de l'air  $V_a$ . La température de l'air intervient dans les phénomènes de conduction, convection et d'évaporation. La température radiante moyenne intervient dans la prise en compte du rayonnement. L'humidité relative intervient dans la prise

en compte des échanges évaporatoires cutanés et respiratoires. Et enfin, la vitesse de l'air intervient dans les échanges convectifs et évaporatoires.

Sous des climats tropicaux, la température et l'humidité relative sont élevées par rapport aux climats tempérés. Elles ne favorisent pas les échanges d'énergie entre le corps humain et l'ambiance thermique. La vitesse de l'air à proximité du corps humain prend alors une importance en favorisant les échanges par convection et par évaporation.

Le corps humain produit une énergie plus ou moins importante suivant l'activité physique et les transferts d'énergie sont plus ou moins importants suivant la vêtue. Afin d'évaluer la vêtue et l'activité, un grand nombre d'études ont permis de quantifier la résistance thermique des vêtements et de lier l'activité à une puissance dégagée.

#### Niveau d'activité

Les paramètres de l'individu sont principalement le niveau d'activité et la tenue vestimentaire. A un niveau d'activité, nommée *Met*, est lié une production d'énergie *M*. Une correspondance entre ces deux quantités est donnée dans le tableau (Tableau 1) suivant :

**Tableau 1 : Correspondance entre Métabolisme et production d'énergie interne [ASHRAE 55] et [ISO 7933]**

Type d'activité	Puissance dégagée Métabolisme	
	$W_{m^{-2}}$	<i>Met</i>
Couché	45 – 46	0.8
Assis	58 – 60	1
Debout au repos	65 – 70	1.1 – 1.2
Travail sédentaire	70 – 75	1.2 – 1.3
Travail léger debout	90 – 93	1.5 – 1.6
Travail moyen assis	140	2.4
Travail moyen debout	116	2
Travail soutenu	174 – 186	3 – 3.2
Travail lourd	> 250	> 4

Dans le cas de l'étude de salle de classe en saison chaude et humide, ce tableau nous renseigne sur l'influence de l'activité sur la production d'énergie interne suivant les personnes étudiées. Par exemple, un enseignant au tableau qui fait un cours et ayant une activité du type Travail moyen debout produit près de 40% de plus d'énergie, à corpulence équivalente, qu'un étudiant assis et passif. Cette énergie doit être dissipée en favorisant les phénomènes physiques d'écrits précédemment au moyen de modifications de la vêtue ou de l'architecture du bâtiment en vue d'améliorer la ventilation.

#### Vêtue

Les vêtements possèdent un double rôle dans les échanges entre le corps humain et l'ambiance thermique. Dans un premier temps, les vêtements jouent le rôle d'isolant thermique. Une résistance thermique équivalente  $R_{cl}$  (ou  $i_{cl}$ ) est associée à chaque type de vêtement. Une échelle de vêtue est associée à la résistance globale des vêtements, elle est nommée *Clo*. Des tables complètes de correspondance entre  $R_{cl}$  et *Clo* sont disponibles dans le Standard ASHRAE 55 [ASHRAE 55] et dans la norme ISO 7933 [ISO 7933]. Le deuxième rôle est un rôle dynamique de création d'un microclimat sous vestimentaire par des phénomènes radiatifs et convectifs entre la peau et les vêtements. Ces derniers peuvent à eux seuls induire une situation de confort ou d'inconfort thermique.

A titre informatif, un nombre de *Clo* de 1 représente la tenue vestimentaire comprenant des sous vêtements, chemise, pantalon, veste, chaussettes et chaussures. Cette valeur correspond à une vêtue adaptée aux climats tempérés en moyenne saison. Sous les climats tropicaux la vêtue est plus légère et prend des valeurs comprises entre 0.4 et 0.6.

### 2.3 Le système de thermo-régulation

Les modèles visant à modéliser de manière fine le corps humain sont complexes ceci étant du à leurs nombres de paramètres et à la modélisation d'un nombre important de phénomènes.

Les modèles de thermo-physiologie sont adaptés aux conditions de l'ambiance étudiée et aux niveaux de modélisation nécessaires à une description réaliste des phénomènes physiques prépondérants à ces conditions. Le choix du modèle et de son niveau de détail doit prendre en compte les paramètres spatiaux et temporels de l'ambiance, et ceux du corps humain. De plus, le modèle doit être utilisable par un non physiologiste [Thellier 99].

Le modèle de Stolwijk [Stolwijk 70] est un modèle multi-nœuds mis au point pour la NASA dans les années 1970. Le corps humain est divisé en 25 compartiments. Il permet d'évaluer les températures en différents points (membres, muscles, sang, graisse et peau). Ce modèle est trop fin pour des ambiances thermiques où les paramètres extérieurs au corps humain varient assez peu dans l'espace. D'autres modèles plus complexes développés par Thellier [Thellier 99] dérivés du modèle de Stolwijk sont adaptés à des environnements où les contraintes thermiques sont dissymétriques.

Dans le cas d'ambiances thermiques relativement homogènes et instationnaires, un modèle développé par Gagge [Gagge 86] basé sur la modélisation de la thermorégulation humaine à deux nœuds est souvent utilisé [Sangkertadi 94], [Kindangen 97]. Ce modèle dérive directement du modèle de Stolwijk et bénéficie des recherches effectuées sur le modèle multi-nœuds. Les deux nœuds du modèle de Gagge sont la peau et le noyau qui symbolise tout ce qui n'est pas de la peau. L'avantage de ce modèle est de prendre en compte le corps humain de manière globale. Ce modèle se prête assez bien à la modélisation des phénomènes de thermorégulation en climat tropical humide en raison de sa prise en compte d'intervalles de variation d'humidité relative importants (15% - 100%), et pour son caractère dynamique. De plus, ce modèle est valide pour des ambiances thermiques relativement homogènes, ce qui est généralement le cas dans les bâtiments. La bibliographie sur la vêtue, l'activité et les équations qui modélisent les phénomènes physiques globaux est assez riche. Elle permet d'alimenter facilement le modèle en paramètres. Le modèle de Gagge est implémenté dans le code de simulation thermo-aéraulique développé au sein du LPBS. Le modèle de Gagge est utilisé dans ce document pour alimenter les indices de confort (PMV) ou d'inconfort thermiques (DISC) de la littérature.

### 2.4 Indices de sensation thermique

A partir des paramètres liées au sujet, un certain nombre d'études ont été menées dans le but de les relier à la sensation de confort ou d'inconfort. Dans cette section, les modèles adaptés aux climats à la fois tempérés et tropicaux sont abordés.

#### 2.4.1 Modèle adapté aux climats tempérés

Le modèle le plus utilisé à l'heure actuelle pour évaluer le confort thermique est l'indice Predicted Mean Vote (PMV) ou vote moyen prévisible. Il a été développé à partir d'une étude sur près de 1300 sujets [Fanger 72] placés dans une chambre climatique où les conditions thermiques étaient homogènes et stabilisées. Il présente l'avantage d'être une norme internationale : la Norme Internationale ISO 7730 [ISO 7730].

L'équation du PMV est définie à partir de la charge thermique  $S$  de l'équation (Eq. 1) et prend la forme suivante :

$$PMV = \alpha \cdot S \quad (Eq.2)$$

$\alpha$  est un terme pondérateur. L'intervalle de variations du PMV est compris entre -3 et +3. -3 correspond à une sensation très froide. +3 correspond à une sensation très chaude. L'optimum est 0 et correspond à un état de neutralité thermique. On considère qu'entre -0,5 et +0,5 les sujets sont dans un état de confort thermique.

Vienne a montré que le PMV n'est pas adapté à des climats chauds et humides. Sangkertadi, quant à lui, préconise son utilisation la nuit et la saison froide lorsque les températures sont faibles et que l'ambiance thermique est relativement homogène et stable dans le temps. La vitesse d'air influe sur le PMV par l'intermédiaire de la modélisation des échanges convectifs entre le sujet et l'ambiance thermique.

Au PMV est associé le pourcentage prédictible d'insatisfaits ou Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD). Ce nombre est déterminé à partir du PMV.

#### 2.4.2 Modèles adaptés aux climats tropicaux

La notion d'inconfort (DISComfort) est liée à la capacité évaporative de la peau. L'indice DISC donne une valeur adimensionnelle fonction de la mouillure cutanée de l'inconfort dû à des températures et (ou) humidités élevées de l'ambiance thermique.

De nombreux auteurs ont développé des modèles *DISC*. Sangkertadi en donne un certain nombre. Dans cette section, seul le modèle de Gagge est développé.

Gagge a donné la relation suivante pour l'indice DISC :

$$DISC = \beta \frac{w - W_0}{W_{crit} - W_0}$$

Avec le  $\beta$  facteur d'inconfort,  $w$  la mouillure cutanée,  $W_{crit}$  la valeur critique de la mouillure cutanée et  $W_0$  le seuil de la mouillure cutanée qui est égal à :

$$W_0 = \frac{E_{confort} + E_{diffus}}{E_{max}}$$

Où  $E_{diffus}$  est l'évaporation par diffusion,  $E_{confort}$  est l'évaporation par sudation, et  $E_{max}$  l'évaporation maximale.

Il est à noter que la mouillure cutanée critique dépend de la vitesse de l'air. L'avantage de cet indice est d'avoir été développé pour des températures et humidités élevées.

Gagge propose un PMV évalué à partir de son modèle à deux noeuds, le PMV\*. L'indice de sensation thermique PMV\* est basé sur le calcul de la température effective ET\* au lieu de la température opérative de la norme ISO 7730. ET\* est obtenue à partir d'un modèle à deux noeuds de Gagge modifié par Doherty [Doherty 88]. ET\* permet de prendre en compte à la fois les transferts radiatifs et les transferts de chaleur latente.

D'après Gagge, ces modèles présentent l'avantage de prendre mieux en compte la vitesse d'air et l'humidité que le PMV de la norme ISO 7730. Cependant, le PMV\* présente le désavantage d'avoir été peu confronté avec des expériences. Néanmoins, un certain nombre d'auteurs l'utilisent dans leurs études, notamment Kindangen et Prianto.

D'autres indices existent dans la littérature et Sangkertadi en fait une synthèse bibliographique très complète. En particulier, il extrait de sa synthèse un certain nombre d'indices validés en milieu tropical humide.

2.4.3 Autres outils adaptés au climat tropical permettant de caractériser le confort : les zones de confort de Givoni [Givoni 78]

Un outil intéressant est le diagramme de confort. Ce diagramme permet de visualiser rapidement si un individu est en situation de confort dans une ambiance donnée.

Pour chaque simulation, nous reportons tous les points température résultante/humidité relative intérieures sur le diagramme de l'air humide.

Nous avons auparavant représenté les trois zones de confort sur le diagramme de la Figure 2 ci-dessous.

- La première zone de confort correspond à une vitesse d'air de  $0 \text{ m.s}^{-1}$  ;
- La seconde zone de confort correspond à une vitesse d'air de  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  ;
- La troisième zone de confort correspond à une vitesse d'air de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ .

Pour les couples température/humidité se trouvant dans la 1<sup>ère</sup> zone de confort, il n'est pas nécessaire d'avoir une vitesse d'air importante pour que les occupants soient en situation de confort.

Pour les couples température/humidité se trouvant dans la 2<sup>ème</sup> zone de confort, il est nécessaire d'avoir une vitesse d'air égale à  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (équivalent à un léger courant d'air ou à une vitesse de brasseur d'air en position intermédiaire).

Enfin, pour la troisième zone, il est nécessaire d'avoir une vitesse d'air égale à  $1 \text{ m.s}^{-1}$  (équivalente à une brasseur d'air en vitesse maximale) pour que les occupants soient en situation de confort. Cette vitesse de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  est considérée comme une vitesse limite au-delà de laquelle les papiers commencent à s'envoler.

Par ailleurs, pour chaque simulation, nous donnons le pourcentage de points compris dans les trois zones pendant les heures de fonctionnement du bâtiment. Ainsi les croix bleues (ou noires) correspondent à la période 8h00 – 12h00, les croix rouges (ou grises) à la période 12h00-14h00 et les cercles noirs à la période 15h00-18h00.

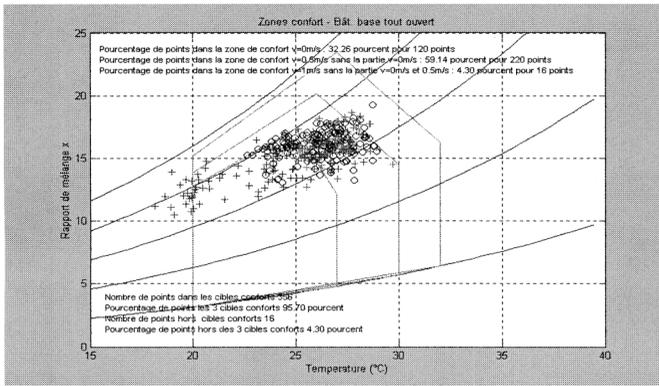


Figure 2 : Illustration d'un diagramme de confort pour différentes vitesse de vent ( $0 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $0.50 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ).

#### 2.4.4 Abaques simplifiées

Certaines abaques très simples peuvent également être utilisées pour avoir une idée des conditions de confort dans une ambiance, dont celle proposée par le Centre Scientifique et technique du Bâtiment. Sur la figure ci-contre, nous pouvons voir que les conditions de confort peuvent être atteintes pour des températures de l'ordre de 31°C à condition d'avoir les vitesses d'air suffisantes. Ces vitesses d'air peuvent être créées soit par ventilation naturelle, soit avec l'usage des brasseurs d'air.

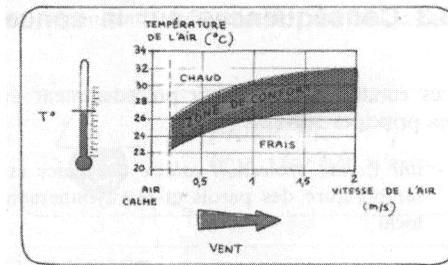


Figure 3 : Corrélation température résultante/vitesse d'air. Source CSTB

#### 2.5 Synthèse sur les indices de confort adaptés à La Réunion

Des indices de sensation thermique adaptés aux climats tempérés, chauds et humides existent dans la littérature et doivent être alimentés par les paramètres de l'ambiance thermique afin d'évaluer les paramètres physiques associés au sujet.

Les paramètres tels que la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité relative sont des sorties standard des codes classiques de simulation de thermique, en revanche la vitesse de l'air proche du sujet n'est pas une sortie usuelle de ces codes.

En conséquence, une estimation de la vitesse d'air intérieure est nécessaire. Elle est obtenue à partir soit d'expérimentations sur site ou sur maquettes, soit en utilisant la mécanique des fluides numérique.

En l'état actuel de nos connaissances, nous pouvons conclure que les indices les plus adaptés au climat tropical sont le PMV\* et les zones de confort de Givoni. La connaissance de la vitesse d'air intérieure sera alors supposée connue (donnée par une mesure sur site ou fixée à une valeur arbitraire) ou fera l'objet de modélisation spécifique à la configuration du bâtiment étudié [Bastide 04].

### 3 INTÉGRATION AU CODE DE CALCUL CODYRUN ET DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL CODYCONF

En interne au laboratoire, nous avons intégré les indices de confort PMV, PMV\* et PPD au logiciel Codyrun [Boyer 98] et développé un outil dédié sous l'environnement MATLAB®.

#### 3.1 Présentation du logiciel de simulation : CODYRUN

D'une manière globale, le logiciel CODYRUN permet la simulation thermo aéraulique de bâtiments multi zones et est doté d'une interface évoluée (sous Windows) permettant de décrire le système (bâtiment) étudié en le décomposant en éléments tels que zones thermiques, composants parois, etc. Classiquement, au départ d'un fichier de sollicitations météorologiques horaires, il permet de connaître l'évolution temporelle de grandeurs physiques liées au bâtiment décrit (températures, flux, humidités, pressions,...).

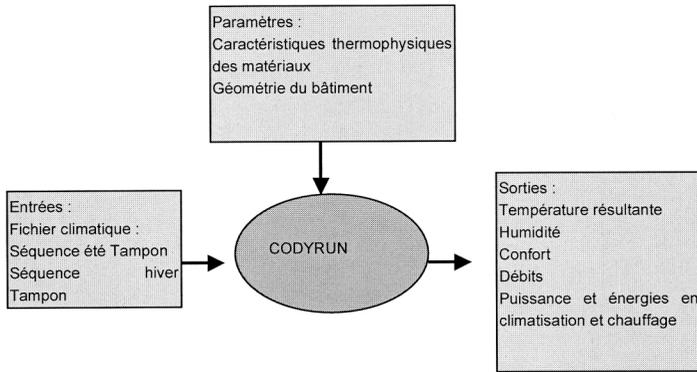


Figure 4 : Organigramme des simulations effectuées sous CODYRUN

Concernant les aspects thermiques et hydriques, le logiciel est multizone, dans le sens où le noyau de calcul thermique calcule les paramètres (températures, puissances, humidités...) liés aux différentes zones thermiques (les pièces, dans le cas le plus détaillé) définies lors de la description. Pour mémoire, les logiciels monozones ne considèrent qu'un seul jeu de paramètres, pour l'ensemble du bâtiment.

Le modèle aéraulique intégré permet le calcul effectif des débits aérauliques, entre les différentes zones et avec l'extérieur. Basé sur un modèle en pression, il intègre les effets du vent, du tirage thermique ainsi que les grandes ouvertures. Les débits issus de ce module sont couplés au système thermique, permettant donc la prise en compte simultanée de tous les modes de transfert thermique.

Ainsi, le logiciel nous permet de suivre l'évolution horaire d'un certain nombre de sorties telles que celles représentées par la Figure 4

Depuis 2004, les indices PMV, PMV\* et PPD ont été intégrés au code CODYRUN.

### 3.2 Le module Codyconf

#### 3.2.1 Introduction

Le « module confort » que nous avons développé au sein du LPBS de l'Université de La Réunion a un double objectif, dont la finalité est l'évaluation des conditions de confort dans une ambiance donnée. Cette ambiance est caractérisée par des paramètres, la température d'air, la température radiante moyenne, la température résultante et l'humidité relative, qui vont constituer les données d'entrée du module. La sortie va être au choix, un ensemble de grandeurs représentatives du confort thermique, les indices de confort, ou un indicateur plus visuel, le diagramme de confort.

Du point de vue informatique, le module confort se présente sous la forme d'un programme autonome (« stand-alone »), développé à partir de l'environnement MATLAB®. Il est conçu pour fonctionner sur les plates-formes Windows98, NT4.0, 2000 et XP.

#### Présentation structurelle

Comme mentionné en introduction, le module confort fournit deux types d'indicateurs. Ceux-ci font l'objet de sous modules, dont une description sommaire est proposée ci-après.

#### *Les indices de confort*

Le calcul des indices de confort est effectué à l'aide d'un sous module exploitant les données d'entrée pour fournir les sorties voulues. Plusieurs indicateurs sont disponibles, le PMV, le PPD, le PMV\* et le DISC. Ainsi, au départ des paramètres d'ambiance saisis, l'utilisateur a le choix d'obtenir l'un quelconque, voire l'ensemble, des indices ci-dessus. De plus, il est possible d'utiliser des profils pour la vitesse et la température d'air dans l'ambiance, ce qui permet de se rapprocher de conditions réalistes pour l'évaluation des indices de confort.

#### *Le diagramme de confort :*

Le diagramme de confort est lui aussi calculé à l'aide d'un sous module, dont les entrées sont en partie identiques à celles nécessaires au calcul des indices de confort. Ainsi, au départ de ces entrées, l'utilisateur obtient un indicateur de confort thermique visuel, dans lequel, la qualification de l'ambiance est effectuée relativement à une zone de confort prédéfinie. Cet outil a l'avantage de présenter une vision globale des conditions de confort dans l'ambiance et d'être par la même aisément exploitable.

#### Présentation fonctionnelle

Les deux modules ci-dessus sont regroupés au sein d'une fenêtre générale, qui constitue l'interface utilisateur du module confort. Son principe de fonctionnement est explicité ci-après.

#### *Synoptique général :*

Le fonctionnement général du module confort est simple et synthétise les deux sous module de calcul des indices de confort et de tracé du diagramme de confort, comme le montre la Figure 5 ci-après.

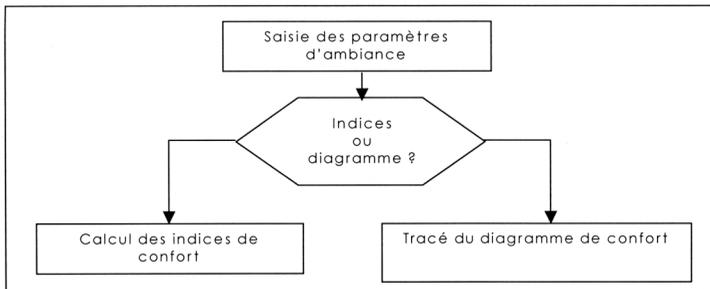


Figure 5 : Synoptique de fonctionnement général du module confort

Les fenêtres de saisie :

Le module confort utilise pour plus de convivialité une interface exploitant le fenêtrage. Au départ d'une fenêtre de saisie de l'ensemble des paramètres, l'utilisateur est guidé selon son choix vers les indices de confort ou le diagramme de confort, comme illustré sur la Figure 6.

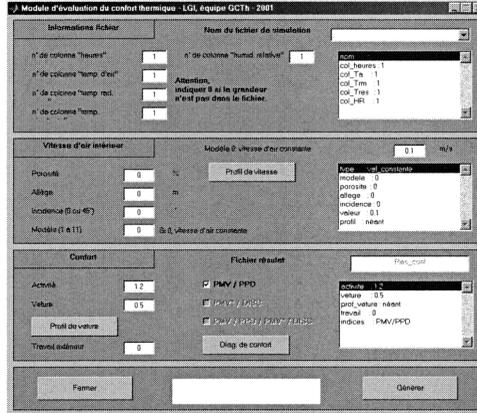


Figure 6 : La fenêtre générale du module confort

### 3.3 Exemples de cas d'étude : utilisation de Codyconf

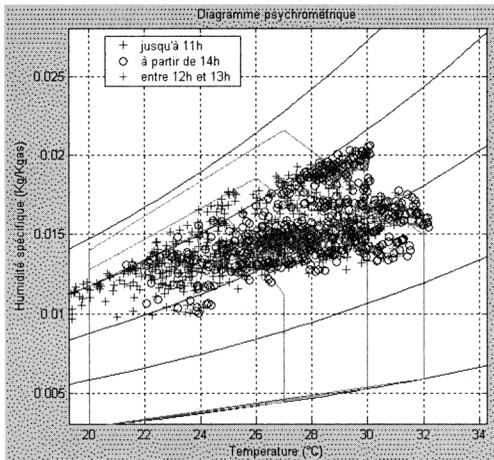


Figure 7 : Confort dans un bureau pour le bâtiment à énergie positive Mastère Génie Civil, Université de La Réunion pendant la saison chaude. Il y a 160 h d'inconfort en dehors du polygone  $v=1\text{m.s}^{-1}$ , soit à peu près 20 jours de travail où la climatisation est nécessaire.

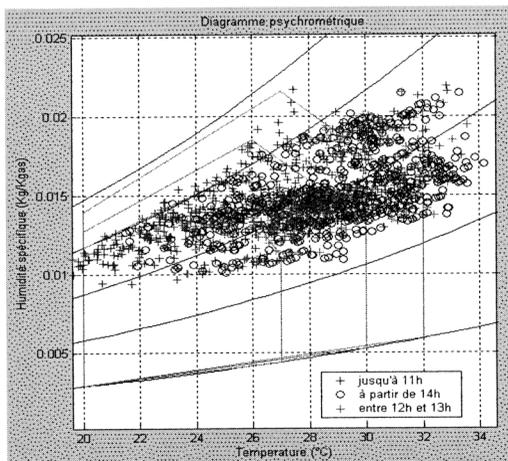


Figure 8 : Confort dans salle informatique pour le bâtiment à énergie positive Mastère Génie Civil, Université de La Réunion pendant la saison chaude. Il y a 335 h d'inconfort en dehors du polygone  $v = 1\text{m.s}^{-1}$ , soit à peu près 40 jours de travail où la climatisation est nécessaire.

#### 4 VALIDATION DES INDICES DE CONFORT – MISE EN PLACE D'UNE INSTRUMENTATION DÉDIÉE

Il est intéressant de comparer les indices de confort retenus avec les votes expérimentaux pour plusieurs gammes de variation de vitesse d'air et de déterminer finement des seuils de vitesse vis à vis de la sensation de confort. Nous avons à ce sujet déjà commencé à faire des instrumentations dans des salles de TD à l'IUT sur le confort thermique des étudiants [Vienne 01]. Mais l'acquisition de matériel plus performant s'est révélée nécessaire et a été possible grâce au financement du conseil Régional dans le cadre de ce travail de recherche.

##### 4.1.1 Méthodologie de validation

La méthodologie de validation d'indices de confort n'est pas chose aisée dans la mesure où, d'une manière générale, le confort est une notion statistique qui fait appel à des données physiques, physiologiques et psychologiques. De plus, le caractère anisotrope des conditions d'ambiance en climat tropical (grandes ouvertures, fort gradient de vitesse dans un local), induit des conditions de confort dans un même local fortement variables.

A défaut de valider le confort d'un individu, nous nous contenterons de valider les indices de confort de type PMV\* et zones de confort de Givoni. Enfin, il faut systématiquement coupler les mesures de l'ambiance avec la sensation thermique de l'utilisateur. De ce fait, un questionnaire « confort » doit être élaboré et remis à l'utilisateur en parallèle à la campagne de mesures.

La méthodologie de validation est donc présentée ci-dessous :

1. Achat d'une centrale d'acquisition dédiée à l'étude du confort thermique et visuel, tests et premières mesures ;
2. Mise en place d'une campagne de mesure dans des locaux types et élaboration d'un questionnaire à destination des utilisateurs ;
3. Analyse et exploitation de données ;
4. Validation des modèles.

A l'heure actuelle, la phase 1 est terminée. La phase 2 est en cours de réalisation. Les phases 3 et 4 seront menées courant 2007.

#### 4.1.2 Acquisition d'une centrale d'acquisition et de capteurs dédiés au confort

Nous avons fait l'acquisition en 2006 d'une centrale d'acquisition de type ALMEMO® dont la fiche technique figure en annexe et de divers capteurs permettant l'acquisition au pas de temps de la seconde de :

- la température sèche d'air intérieure ;
- la température de globe noir (permettant la mesure de la température résultante) ;
- l'humidité intérieure ;
- la vitesse d'air intérieure (anémomètre à fil chaud) ;
- le niveau d'éclairement sur le plan de travail (luxmètre).

Cette centrale possède les fonctions classiques d'acquisition (mémoire interne, pas de temps variable, liaison RS232, autonomie etc.).

La figure 8 donne une représentation de la centrale et des capteurs associés. La figure 9 montre le support dédié dans lequel sont stockés la centrale et les différents capteurs réalisé par le BET IMAGEEN. Ce support mobile a le grand avantage d'être facilement transportable.

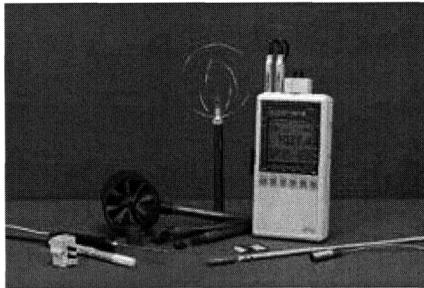


Figure 9 : Centrale d'acquisition ALMEMO et capteurs permettant d'évaluer le confort thermique et visuel dans une ambiance donnée.

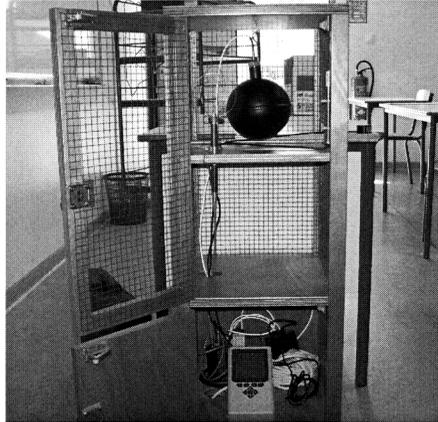


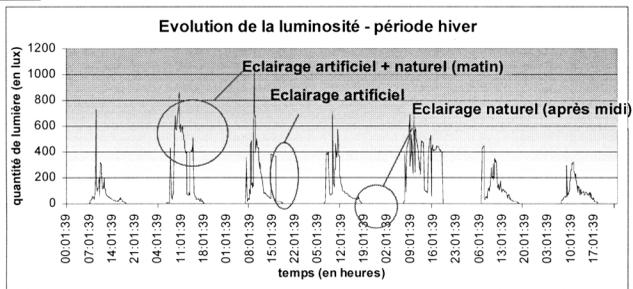
Figure 10 : Réalisation d'un support dédié permettant la protection des capteurs et de la centrale.

#### 4.1.3 Présentation de quelques résultats

##### Campagne de mesure pour un bureau de type tertiaire

Les résultats ci-dessous ont été réalisés par le BET IMAGEEN lors d'une campagne de mesure dans un bureau de type tertiaire. Les menuiseries sont de types jalousies.

##### Confort visuel



L'analyse du graphique ci-dessus permet d'observer 3 niveaux d'éclairements :

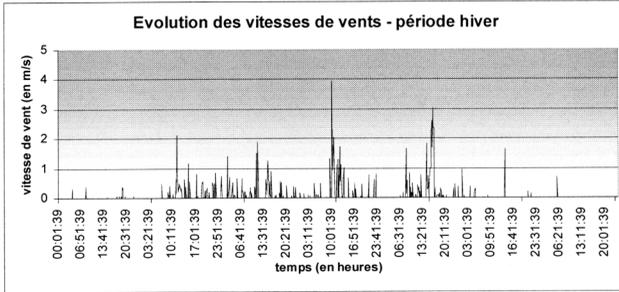
- un premier dépassant les 400 lux. Il correspond à l'usage de l'éclairage artificiel avec un apport d'éclairage naturel dû aux stores ouverts.
- Le second niveau se situe à 400 lux. On l'observe généralement dans l'après-midi lorsque le soleil est à l'ouest.

Il correspondant principalement à l'éclairage artificiel. La courbe journalière montre qu'à 12h00 – 13h00, l'éclairage tombe à 50 lux et remonte à 400 lux dans l'après-midi.

- Le troisième niveau se situe à environ 50 lux. On observe généralement dans l'après-midi lorsque le bureau est inoccupé.

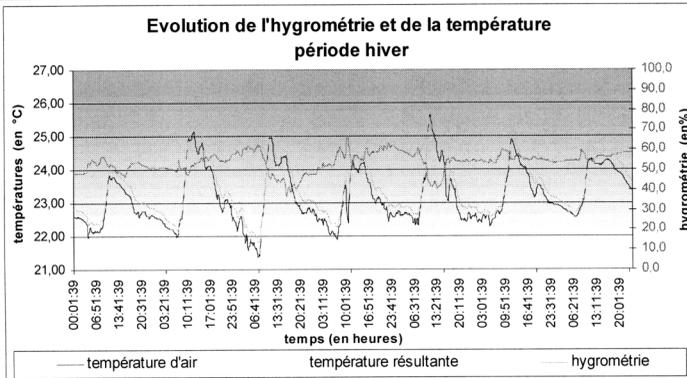
Le niveau d'éclairage respecte celle préconisée par l'AFE (425 lux).

Vitesse d'air



Le bureau est relativement peu ventilé en période hiver. L'ensemble des jalousies est clos. L'évolution des vitesses des vents, résulte de déplacement d'air générés par les occupants du bureau. En observant la courbe de la luminosité, on peut déterminer les jours ou l'occupation a été moindre. Pendant la première partie du graphique ainsi que pendant la dernière, les vitesses d'air sont quasi nulles. Lorsque le bureau est occupé, les vitesses d'air sont comprises entre  $0 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1 \text{ m.s}^{-1}$ .

Température et humidité

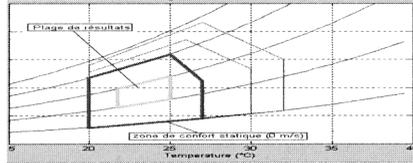


Les températures du bureau sont principalement comprises entre 22°C et 25°C. Les maxima sont généralement atteints à 12h00. A partir de cette heure, la façade n'est plus ensoleillée. On n'observe pas d'écart significatif entre la température résultante et la température d'air. Les parois en contact avec l'extérieur sont en effet peu sollicitées par le soleil. Il n'y a donc peu de chaleur radiante transmise dans la pièce. L'écart entre les deux courbes est d'environ 0,3°C. L'hygrométrie est comprise entre 40% et 60%.

Synthèse :

Le confort des usagers est atteint pour le local étudié.

Les couples températures /humidités sont favorables (22°C à 25°C et 40% à 65%). Le confort est obtenu le local fermé –ie sans besoin de générer une ventilation naturelle traversante.



Le confort visuel est lui aussi obtenu grâce au recours de l'éclairage artificiel, qui pallie au manque de lumière naturelle. L'éclairage moyen pour le travail de bureau est supérieur à 425 lux préconisés par l'AFE.

**Détermination du cône de ventilation d'un brasseur d'air et de l'efficacité des brasseurs d'air dans une salle de travaux dirigés**

Ce paragraphe présente les résultats concernant les vitesses d'air enregistrées dans une salle de Travaux Dirigés de 50 m<sup>2</sup> équipée de 6 brasseurs d'air.

Les objectifs de l'étude étaient :

- vérifier l'homogénéité des vitesses d'air et le niveau acoustique de la pièce avec les 6 brasseurs d'air en marche et à vitesse moyenne sur le plan de travail – ie 75 cm) ;
- déterminer la répartition de vitesses d'air pour un brasseur d'air à différentes hauteurs.

Ces deux résultats permettront de mieux dimensionner le nombre de brasseurs d'air dans une pièce.

Homogénéité des vitesses d'air dans une salle de TD

Les mesures ont été réalisées dans deux salles de TD adjacentes à l'IUT de Saint-Pierre, Université de La Réunion. Les résultats sont présentés et synthétisés dans la Figure 11 ci-dessous.

Nous pouvons voir que les zones sous les brasseurs d'air (représentés par les croix orange), ont une valeur de vitesse d'air très bonne, de l'ordre de 1 m.s<sup>-1</sup>. Ceci permet d'être en situation de confort pour des températures avoisinant les 30,5°C. On peut noter toutefois que le fond des salles sont moins bien ventilées avec des vitesses de l'ordre de 0,5 m.s<sup>-1</sup>.

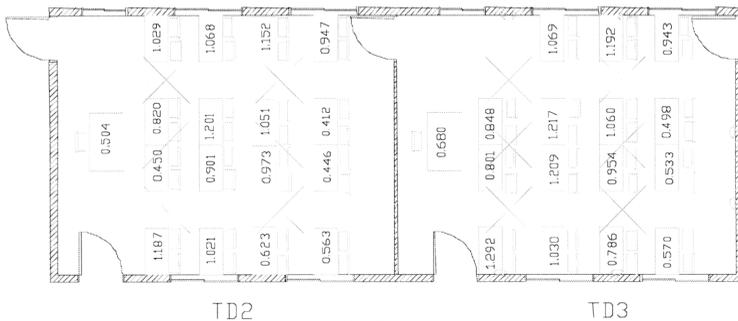


Figure 11 : Valeurs des vitesses d'air sur le plan de travail pour deux salles de Travaux Dirigés.

Répartition de vitesses d'air pour un brasseur d'air à différentes hauteurs en cm (85, 140, 170, 200)

Nous avons réalisé une prise de mesure d'un cube de 3 mètres de côté dont le plan au sol est centré sur le brasseur d'air avec un pas de mesure de 30 cm. Le diamètre du brasseur d'air étudié est de 140 cm.

Une prise de vitesse d'air à été réalisée à chaque pas de mesure (Figure 12). Ceci a permis la reconstitution du profil des vitesses à l'aide du logiciel « R ». Ce logiciel est un logiciel utilisé en Statistiques et téléchargeable sur le site [www.R-project.org](http://www.R-project.org).

L'analyse des vitesses d'air générées par le brasseur d'air à différentes hauteur (voir Figure 13) permet de constater que plus on se rapproche du plan de travail, plus le diamètre des vitesses de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  augmente mais se stabilise autour de 140 cm, ce qui nous permet d'affirmer que le « cône de ventilation » d'un brasseur d'air est en fait un cylindre de ventilation correspondant au diamètre du brasseur d'air. Une étude plus fine est à notre avis nécessaire pour optimiser le cône de ventilation d'un brasseur d'air.

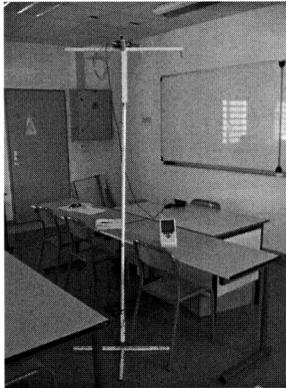


Figure 12 : Mesures des vitesse d'air dans la salle de TD

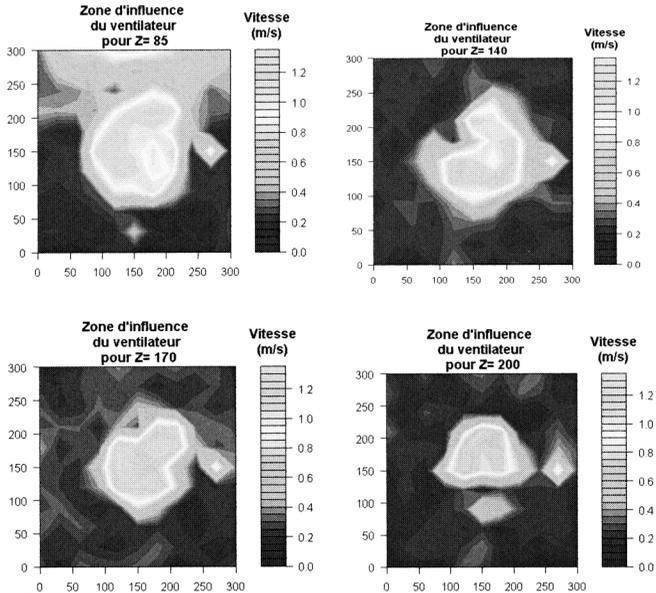


Figure 13 : Valeur des vitesses d'air générées par le brasseur d'air à moyenne vitesse à différentes hauteurs (vue en plan) – 85 cm, 140 cm, 170 cm, 200 cm

## 5 VALORISATION DE LA RECHERCHE

En terme de valorisation de la recherche, les améliorations apportées à CODYRUN ainsi que le développement de l'outil CODYCONF ont permis de disposer localement à La Réunion d'outils de modélisation du confort thermique dans un bâtiment. Ces deux logiciels sont utilisés actuellement par plusieurs bureaux d'études locaux et deux cabinets d'Architecte dans le cadre des projets de bâtiments qu'ils ont en étude. A ce titre, nous pouvons affirmer qu'il y a bien eu un transfert de connaissance de la recherche vers les pratiques professionnelles. Par ailleurs, nous disposons de deux centrales d'acquisition, l'une appartenant à l'Université, l'autre au BET IMAGEEN. Nous pourrions grâce à cela mener des campagnes communes afin de valoriser nos deux installations.

## 6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En guise de conclusion, nous pouvons dire que l'évaluation du confort dans une ambiance donnée n'est pas chose aisée. Grâce au financement de cette fiche recherche, une bibliographie conséquente a été réalisée et l'achat d'une centrale d'acquisition a été effectué.

Les premières campagnes de mesure ont permis d'apporter un certain nombre de réponse sur l'efficacité des brasseurs d'air dans des salles de travaux dirigés.

Les travaux futurs vont concerner des campagnes de mesure dans des locaux occupés en enregistrant l'ensemble des grandeurs intervenant dans le confort et en couplant ces mesures physiques avec la sensation thermique des occupants. Ces mesures seront réalisées avec le BET

IMAGEEN qui dispose d'un système d'acquisition similaire dans les opérations HQE livrées récemment à La Réunion et permettront de valider les modèles de sensation thermique.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

---

- [ASHRAE 55] ASHRAE Standard 55a. 1995. Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Transactions.
- [Bastide 04] Bastide A. 2004. Etude de la ventilation naturelle à l'aide de la Mécanique des Fluides Numérique dans les bâtiments à grande ouverture. Application au confort thermique et à l'amélioration des modèles aérauliques nodaux. Thèse Sci. Université de La Réunion.
- [Doherty 88] Doherty T., Arens E. 1988. Evaluation of physiology bases of thermal comfort models. ASHRAE Transaction 94 : 1371-1385, 1988.
- [Fanger 72] Fanger O. 1972. Thermal comfort. Mc Graw-Hill. New York.
- [Gagge 86] Gagge A., Fobelets P., Berglund L. 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transaction 92 : 709-731.
- [Givoni 78] Givoni. 1978. L'Homme, l'architecture et le climat. Edition moniteur, Paris.
- [ISO 7730] Norme ISO 7730. 1994. Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV-PPD et spécifications des conditions de confort thermique. Comité européen de normalisation.
- [ISO 7933] Norme ISO 7933. 1989. Ambiances thermiques chaudes. Détermination analytique et interpretation de la contrainte thermique fondés sur le calcul de la sudation requise. Organisation Internationale de Normalisation.
- [Kindangen 97] Kindangen J., Krauss G., Depecker P. 1997. Effect of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings. Building and Environnement 32 : 1-11.
- [Sangkertadi 94] Sangkertadi. 1994. Contribution à l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments en climat tropical humide. Prise en compte de la ventilation naturelle dans l'évaluation du confort. Thèse Sci. INSA Lyon.
- [Stolwijk 70] Stolwijk J.A.J. 1970. Mathematical model of thermo-regulation. Physical and behavioral regulation. 48 : 703-720.
- [Vienne 01] Vienne F. 2001. Détermination d'un indice de confort en milieux tropicaux humides. Mise en place d'une loi de vitesse. Intégration à un code de simulation. Mémoire de DEA, Université de La Réunion.
- [Thellier 99] Thellier F. 1999. L'Homme et son Environnement Thermique. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse.

# Annexes

Fiche technique de la centrale ALMEMO<sup>®</sup>  
utilisée pour la mesure du confort thermique

**ALMEMO<sup>®</sup> MEASURING INSTRUMENTS**
**new!**
**Data logger, hand-held, with  
 9 measuring inputs ALMEMO<sup>®</sup> 2590-9**

**Technical Data:**

<b>Measuring inputs:</b>	9 ALMEMO <sup>®</sup> input sockets, electrically isolated, for 9 ALMEMO <sup>®</sup> sensors
<b>Channels:</b>	per sensor, maximum 4 chann. (sensor-type-specific, meas. and function channels).
<b>AD converter</b>	delta-sigma >16bit resolution see page 01.05
<b>Measuring rate</b>	2.5, 10, 50 meas. op. per s.
<b>Sensor power supply:</b>	
mains power supply:	approx. 12 V, max. 100 mA
Battery:	7 to 9 V, max. 100 mA
<b>Outputs:</b>	2 ALMEMO <sup>®</sup> -sockets

**Equipment:**

<b>Display:</b>	graphical, 128 x 128 dots, 16 rows, 21 characters, 4mm
<b>Operation:</b>	6 keys (four soft-keys) and thumb-wheel
<b>Memory:</b>	512 kB (100000 measured values) buffered with lithium battery
<b>Date and time-of-day:</b>	real-time dock buffered with lithium battery

**Power supply:**

<b>mains power supply:</b>	ZB2590NA: 230 V AC 12 V DC, 0.8 A elect. isol.
<b>Adapter cable electr. isol.:</b>	ZB2590UK: 10 ... 30 V DC 12 V DC, 1 A
<b>Battery pack:</b>	NIMH- Battery: 7.2 to 9V, 1600mA Charging time: approx. 4h, quick and trickle charge
<b>Current consumption without lighting:</b>	active mode: approx. 31mA without display: approx. 57mA without display: approx. 25mA Sleep mode: approx. 0.2mA
<b>Input and output modules:</b>	
<b>Housing:</b>	204 x 109 x 44 mm, ABS high impact resistance (max. 70°C)
<b>Operating temperature:</b>	0 to 50°C (Storage temp.: -20 to +60°C)

**Technical features :**

- ▶ Large illuminated graphics display, 128 X 128 dots, 16 rows
- ▶ Graphical measured value display, as line chart or bar chart
- ▶ Numerical measured value representation, as single display, multi-channel display, or measured values list
- ▶ Easy and convenient operation by means of soft-keys and thumb-wheels
- ▶ All measuring functional, and programming values, visible in various menus
- ▶ All sensor and device parameters configurable without using a PC
- ▶ Three measuring menus configurable by the user using the functions needed for his / her applications
- ▶ Access to menus and operating keys lockable step-by-step and via password
- ▶ Switch between the following languages : English / German / French
- ▶ Maximum and minimum values stored with date and time-of-day
- ▶ 9 ALMEMO<sup>®</sup> input sockets, electrically isolated, for 9 ALMEMO<sup>®</sup> sensors
- ▶ Two output sockets for digital interface, analog output, trigger input, and alarm contacts
- ▶ Sleep mode for long-term measuring operations
- ▶ All measuring functions for all sensors
- ▶ Memory with capacity for 100,000 measured values, configurable as linear or cyclic memory
- ▶ Optional: Built-in smart media card drive for memory cards of 32 MB up (2.7 million measured values)
- ▶ With high-speed, high-resolution delta-sigma A/D converter (up to 50 meas. operations per sec.) now standard version

**Extent of the delivery**

Universal data logger ALMEMO<sup>®</sup> 2590-9 with up to 50 measuring operations per second including battery pack and charging unit, operating instructions, ALMEMO<sup>®</sup>-Manual, with software AMR-Control, in case  
**Order No. MA25909Q**

Universal data logger ALMEMO<sup>®</sup> 2590-9 with slot for smart media card and 1 media card  
**Order No. MA25909QC**

**Accessories:**

Smart media card, 32MB (approx. 7.2 mio. measured values)	Order No. ZB19045C32
Reader for smart media card, maximum 115.2 kbaud, plug-in mains supply, 12 V, 200 mA (ordinary commercially available readers cannot be used)	Order No. ZA14095LG
Spare battery pack	Order No. ZB2590AP
DC voltage adapter cable 10 to 30 V DC, 12 V / 1A, electr. isol.	Order No. ZB2590UK
ALMEMO <sup>®</sup> data cable, V24 interface electr. isolated	Order No. ZA1909DK5

## ALMEMO<sup>®</sup> MEASURING INSTRUMENTS

### The features of the new ALMEMO<sup>®</sup> 2590-9 - at a glance

#### Easy and convenient operation:

- ▶ Straightforward navigation through the menus
- ▶ Your own configurable user menus
- ▶ Easy operation by means of soft-keys and thumb-wheels
- ▶ Switch between the following languages: English / German / French

#### Clear and easy-to-understand representation of measured values :

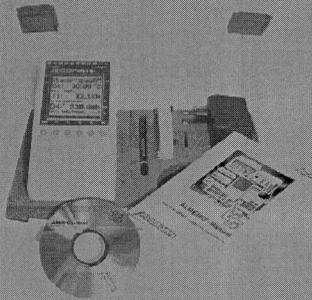
- ▶ numeric:
  - Large numeric display, single value,
  - multi-channel,
  - measured value list, (up to 20 channels)
- ▶ graphical:
  - bar chart,
  - line chart

#### Combines all the advantages

##### of the ALMEMO<sup>®</sup> V5 family of measuring instruments

- ▶ 9 measuring inputs with four measuring channels each, sensors for a wide variety of measured values, connectable via ALMEMO<sup>®</sup> connectors
- ▶ 2 outputs for printing, programming, networking, accessing alarm relays, reading out measured values, etc.

#### Measuring with ALMEMO<sup>®</sup> is now even easier !



Delivery includes ALMEMO<sup>®</sup> 2590-9

Different views shown  
by the graphical display  
on the ALMEMO<sup>®</sup> 2540-9



Menu selection



Multi-channel display



Measured values list



Bar chart



Line chart

Photo: We reserve the right to make technical changes.

**ALMEMO**  
www.aliborn.com

01.15