



HAL
open science

Ener Pos : Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des Bâtiments à Énergie Positive en climat chaud : Dom/Tom

Frédéry Lavoye, Françoise Thellier, Sandra Spagnol

► To cite this version:

Frédéry Lavoye, Françoise Thellier, Sandra Spagnol. Ener Pos : Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des Bâtiments à Énergie Positive en climat chaud : Dom/Tom. [Rapport de recherche] Université toulouse 3 Paul Sabatier. 2009. hal-02177266

HAL Id: hal-02177266

<https://hal.science/hal-02177266>

Submitted on 8 Jul 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.

Ener Pos

Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des Bâtiments à Énergie Positive en climat chaud : Dom/Tom



Généralités sur le confort thermique et présentation des indicateurs adaptés à l'étude

**Frédéry Lavoye, Françoise Thellier et Sandra Spagnol
Laboratoire PHASE, Université de Toulouse**

Sommaire

1.	Introduction générale.....	3
2.	Evaluation de la qualité des ambiances.....	3
2.1.	Définition du confort thermique	3
2.2.	Les indices d'évaluation du confort thermique	3
2.3.	La thermorégulation.....	3
2.3.1.	La thermorégulation physiologique.....	4
2.3.2.	L'approche adaptative du confort thermique : la thermorégulation comportementale	6
3.	Le cas particulier de l'étude.....	11
3.1.	Les climats chauds et humides	11
3.2.	Les bâtiments naturellement ventilés.....	13
3.3.	Vers des indicateurs adaptés.....	14
4.	Etude de sensibilité des indicateurs	17
4.1.	Impact de la température, de l'humidité et de la vitesse d'air sur la mouillure cutanée	17
4.2.	Lien entre débit sudoral et mouillure cutanée.....	19
4.3.	Impact du temps d'exposition sur la mouillure et la température cutanée.....	20
4.4.	Impact de la température, de l'humidité et de la vitesse d'air sur le rendement évaporatoire	21
4.5.	Sensibilité des indicateurs de confort aux variables climatiques	22
4.5.1.	Indice d'inconfort DISC lié à la mouillure.....	22
4.5.2.	Indice d'inconfort lié au courant d'air PD	22
4.5.3.	Indice de confort PMV	23
4.5.4.	Effective Temperature Index ET*	24
4.5.5.	Vers d'autres indices.....	25
	Conclusion	27
	Liste des figures	28
	Liste des tableaux	28
	Bibliographie.....	29

1. Introduction générale

L'analyse des conditions de « confort thermique » dans le cadre de ce projet est tout à fait novatrice car elle permet d'étendre les études déjà réalisées non seulement au climat chaud (celui de La Réunion) mais aussi aux bâtiments naturellement ventilés.

L'objectif, en ce qui nous concerne, étant de réduire un maximum les consommations liées au rafraîchissement du bâtiment, il devient décisif d'évaluer dans quelle mesure la ventilation naturelle transversale et le brassage d'air suffit à atteindre des conditions intérieures satisfaisantes.

A la Réunion, les conditions climatiques sont difficiles (température et humidité élevées) et le seul moyen d'évacuer la chaleur pour l'Homme est la régulation physiologique par vasodilatation et surtout par sudation.

Cette dernière se traduit naturellement par un transfert de chaleur et surtout de masse d'eau, qui pour maintenir un certain équilibre thermique, doit être évaporée. Dans de telles conditions d'humidité, cette évaporation ne peut s'effectuer que par une augmentation notable de la vitesse d'air, c'est-à-dire par la création d'un courant d'air.

Cependant, dans des conditions de sédentarité, ces courants d'air peuvent être à l'origine d'un inconfort local qui dépend non seulement de la vitesse et de la direction de l'air mais aussi des turbulences engendrées. Ces données, ainsi que la température et l'humidité, sont indispensables à l'évaluation du confort (global et local) et doivent donc être déterminées soit expérimentalement soit par simulation numérique.

Une bonne connaissance du climat intérieur et plus particulièrement aux abords de l'occupant permettra de déterminer les indices adaptés à ces conditions permettant ainsi de qualifier l'ambiance intérieure.

La prise en compte du comportement de l'occupant est indispensable à la compréhension des interactions. Un modèle de thermo régulation physiologique sera inclus dans la démarche au même titre qu'une approche adaptative. Ces deux démarches permettent de placer physiquement l'individu au centre de son environnement et ainsi représenter leurs interactions : échanges thermiques, régulation physiologique (Homme = machine thermique), action sur les modes de régulation disponibles (ouverture des fenêtres, mise en route des ventilateurs ou de la climatisation, changement de position...). L'approche adaptative permet en outre l'adaptation de la température de consigne en fonction des conditions extérieures : ceci a pour effet de ne pas créer de chocs thermiques entre l'intérieur et l'extérieur et d'optimiser la régulation du système énergétique (inutile de climatiser à 25°C si 27°C suffit).

Le présent document vise à présenter les généralités en termes de confort thermique et plus particulièrement en climat chaud et à détailler les différentes étapes de la méthodologie qui sera appliquée.

2. Evaluation de la qualité des ambiances

2.1. Définition du confort thermique

Voir commentaires ppt

« Le confort thermique est un état d'esprit qui exprime une satisfaction de son environnement ; le sujet ne peut pas dire s'il veut avoir plus chaud ou plus froid. »

2.2. Les indices d'évaluation du confort thermique

Voir commentaires ppt et tableau récapitulatif §2.4.5

2.3. La thermorégulation

La thermorégulation regroupe les réactions mise en œuvre par l'Homme afin de maintenir un bilan thermique le plus proche de la neutralité. Cette neutralité permet de maintenir une température interne de 37°C. La thermorégulation est un mécanisme vital permettant d'éviter (ou retarder en conditions extrêmes) une hypo ou hyperthermie.

La thermorégulation peut être de type :

- Physiologique : elle est inconsciente et est effectuée naturellement par le corps humain en fonction de son bilan thermique, lui-même influencé par le climat environnant;

- Comportementale : elle est consciente et se traduit par une modification des facteurs influençant la sensation thermique (tenue vestimentaire, consignes des systèmes énergétiques...).

Pour illustrer cette théorie, on peut dire que si un individu est situé dans une ambiance chaude et humide, son corps va engendrer inconsciemment une thermorégulation physiologique. Celle-ci se traduit par le mécanisme de vasodilatation voire de sudation. Si ce mécanisme est inconfortable (mouillure cutanée trop importante) ou insuffisant (trop humide pour évacuer correctement l'excès de sueur et donc de chaleur), l'individu va réagir consciemment en modifiant sa tenue vestimentaire ou en ouvrant les fenêtres.

La régulation comportementale représente les fondements de la théorie de démarche adaptative.

2.3.1. La thermorégulation physiologique

Les réactions de thermorégulation physiologiques se traduisent par une modification du débit sanguin du centre vers la périphérie, la sudation ou encore le frisson.

La figure suivante illustre les mécanismes du système régulateur du corps humain :

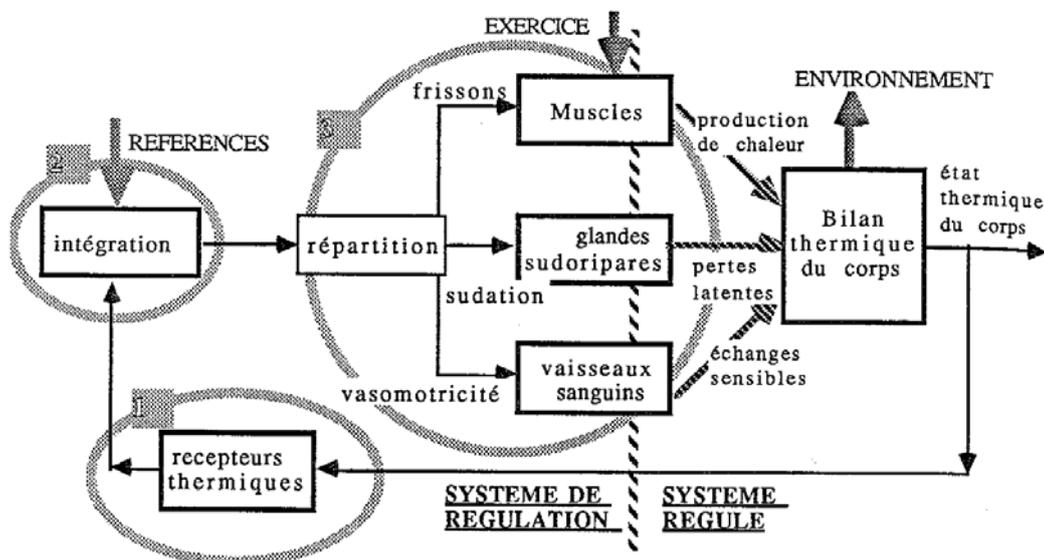


Figure 1 : Système de régulation du corps humain

Ainsi, lorsque l'individu est soumis à un climat chaud, les vaisseaux sanguins se dilatent, augmentant le débit sanguin et de fait l'évacuation de chaleur du centre vers la peau : c'est ce que l'on appelle la vasodilatation. Elle peut augmenter le débit jusqu'à 15 fois (de 1,7mL/(s.m²) à 25 mL/(s.m²)) ce qui engendre des transferts thermiques beaucoup plus conséquents.

Inversement, la vasoconstriction réduit ces échanges thermiques permettant de mieux conserver la chaleur interne et ainsi supporter des ambiances climatiques froides.

La sudation est un phénomène qui intervient après la vasodilatation. Elle consiste en l'évacuation de chaleur et de masse d'eau du corps humain vers l'environnement. En climat chaud, c'est le moyen le plus efficace d'évacuer de la chaleur et même parfois le seul. Cette sudation a un rendement qui est d'autant plus important que l'humidité relative extérieure est faible et les vitesses d'air importantes. En effet le système de thermorégulation physiologique détermine la quantité d'eau devant être évaporée pour maintenir l'homéothermie, cette quantité d'eau suée est alors excrétée au niveau de la peau : selon les conditions ambiantes elle sera ou non évaporée. Si l'ambiance est trop humide la totalité de l'eau suée ne pourra pas être évaporée et va alors rester sur la peau ce qui augmente la mouillure cutanée et peut être perçue comme inconfortable.

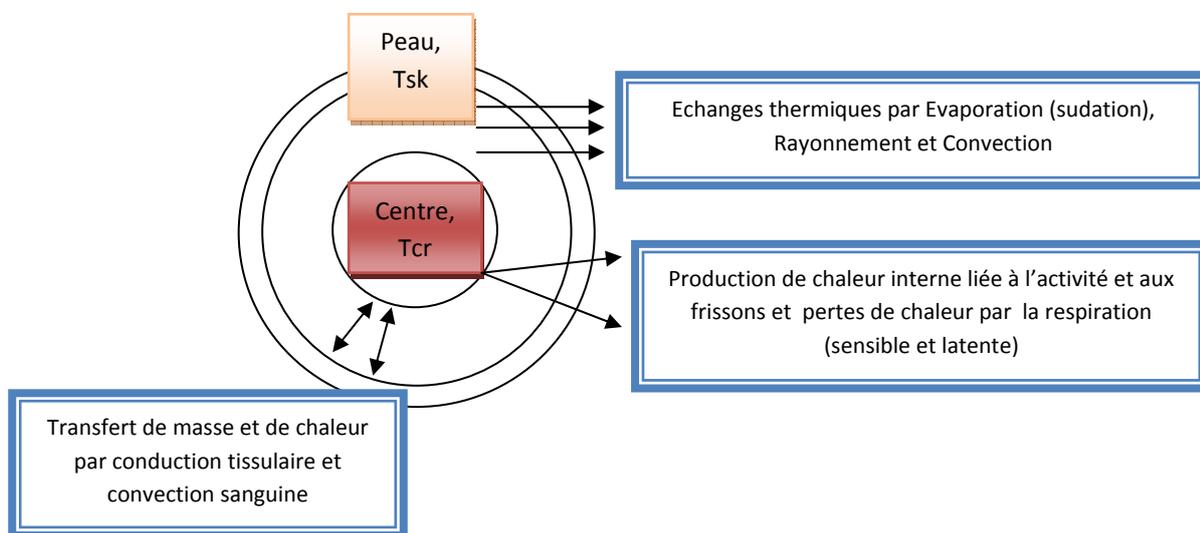
Le frisson quant à lui permet par contraction des muscles d'augmenter la production de chaleur. Le métabolisme peut alors atteindre 4,5met (soit 261W/m²) ce qui représente un métabolisme 4.5 fois plus important que celui observé en moyenne sur un individu au repos.

La prise en compte de ces mécanismes permet de déterminer des indicateurs physiologiques tels que la mouillure cutanée ou la température de peau. Ces derniers sont déterminants quant à l'interprétation et au calcul des indices d'évaluation du confort.

Des modèles de physiologie, basés sur des équations de transfert de masse et de chaleur au sein du corps humain, permettent de déterminer en régime transitoire les données thermo-physiologiques qui nous sont nécessaires.

Gagge et ses collaborateurs ont ainsi développé un modèle numérique représentant le comportement thermique du corps humain face à une (des) contrainte(s) climatique(s). Ce dernier est schématisé comme deux compartiments concentriques (on parle de modèles à deux nœuds) et représentant le centre du corps et sa périphérie. Ces compartiments sont isothermes et modélisent les transferts de chaleur de types conductifs (par les tissus) et convectifs (via la circulation du sang) entre le noyau et la périphérie. La prise en compte des mécanismes de thermorégulation permet la détermination des données nécessaires à l'évaluation du jugement thermo-sensoriel.

Un modèle basé sur celui de Gagge a été développé et affiné au sein du laboratoire PHASE. Il sera utilisé et adapté dans le cadre de cette étude pour modéliser le comportement physiologique de l'individu en régime transitoire. Il peut être schématisé par la figure suivante :



Ce modèle numérique, codé en Fortran est un module du logiciel de simulation dynamique TRNsys. Il est basé sur la méthodologie suivante :

1. Détermination des températures cutanées et centrales en fonction des données climatiques de l'environnement (T_{air} , T_{mrt} , V_{air} , HR) et de l'activité et de la tenue vestimentaire de l'individu.
2. Détermination des signaux d'erreur cutané, central et moyen en fonction de valeurs de consigne de température de peau ($t_{tsk}=33,7^{\circ}C$), centrale ($t_{tcr}=36,8^{\circ}C$) et moyenne ($t_{tbm}=36,5^{\circ}C$). Si les températures cutanées, centrales ou moyennes sont supérieures à ces valeurs, un signal d'erreur « chaud » est envoyé sinon c'est un signal d'erreur « froid ». Trois signaux sont ainsi évalués positivement comme la différence de température entre la valeur limite et la valeur effectivement calculée.
3. Si le signal calculé est suffisamment important, il permet de déterminer les facteurs de dilatation et de constriction des vaisseaux sanguins :
 - a. Facteur de dilatation = $0,055 \cdot \text{signal d'erreur chaud central}$
 - b. Facteur de constriction = $0,1 \cdot \text{signal d'erreur froid cutanée}$
 - c. Ceci afin de déterminer le débit de circulation sanguine : $skbf = \frac{skbfi + \text{facteurdilat}}{1 + \text{facteurconstrict}}$;
où $skbfi$ est le débit initial

- d. On remarque par ces formulations que le corps humain est plus sensible aux variations froides que chaudes.
4. La nouvelle valeur du débit sanguin induit de recalculer le facteur de pondération permettant d'évaluer la température moyenne corporelle (T_{bm}), α .
- $T_{bm} = \alpha * T_{sk} + (1 - \alpha) * T_{cr}$
 - $$\alpha = 0,0417737 + \frac{0,7451832}{skbf * 3600 + 0,585417}$$
 - Ce facteur α est fonction du débit sanguin et intervient dans les transferts de chaleur du centre du corps vers la peau. Si l'individu a froid, la vasoconstriction démarre et fait chuter le débit sanguin, augmentant ainsi le facteur α . Cette augmentation se traduit par une température corporelle moyenne plus proche de la température cutanée et donc plus froide (dans ces conditions).
5. Détermination de la sudation de régulation et des frissons :
- $regsw = 0,047 * signal_chaud_moyen * e^{\frac{signal_chaud_cutanée}{10,7}}$; la sudation de régulation est une fonction exponentielle du signal chaud cutanée et proportionnelle au signal chaud moyen. Cette donnée permet de déterminer les pertes par évaporation de la sueur par l'intermédiaire d'un coefficient de transfert h_a (W/m².K).
 - $frisson = 19,4 * signal_froid_cutanée * signal_froid_central$; cette donnée est directement sommée à l'activité du sujet.

Ces calculs s'effectuent sur un pas de temps de l'ordre de la minute et permettent par la suite de déterminer plus précisément les différents transferts de masse et de chaleur entre l'individu, ses vêtements et son environnement.

2.3.2 L'approche adaptative du confort thermique : la thermorégulation comportementale

« *If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways that tend to restore comfort* », d'après Nicol (2003)

L'approche adaptative permet de prendre en compte le comportement conscient de l'individu afin de maintenir des conditions les plus confortables possibles.

L'adaptation thermique peut se sous diviser en trois catégories principales :

- L'action comportementale est certainement celle qui offre le plus de possibilité à l'individu pour maintenir son équilibre alors que la régulation thermo physiologique est insuffisante. Elle se traduit par une action consciente sur les commandes de systèmes énergétique du bâtiment ou le bâtiment lui-même (modification du climat environnant) ou encore une action individuelle (modification de sa tenue vestimentaire ou de l'activité). Elle sera limitée par des contraintes liées à la fonctionnalité du bâtiment (possibilité de régulation individuelle des systèmes, ouverture/fermeture des fenêtres...) ou des contraintes sociales (protocole vestimentaire par exemple).
- L'action physiologique est tout à fait inconsciente et tient compte d'une adaptation génétique ou d'une acclimatation. Cette dernière peut influencer la sensation thermique d'individus adaptés à des conditions climatiques différentes. .
- L'action psychologique est des trois catégories la plus difficile à cerner car met en œuvre des effets cognitifs et culturels.

Sur le terrain, les causes des différents types d'actions sont le plus souvent totalement indissociables.

La prise en compte de la démarche adaptative dans un modèle numérique s'ajoute à la thermorégulation physiologique. Cette dernière permet de déterminer des données thermo-physiologiques tels que la température de peau ou du corps, la mouillure cutanée qui sont à l'origine de la perception thermique (c'est chaud, c'est froid). Ces derniers donnent les informations nécessaires à l'interprétation en terme de confort : on peut en effet, définir des valeurs limites de mouillure cutanée ou de température de peau en deçà (ou au-delà) desquelles le confort n'est plus possible. A partir de là, une approche adaptative comportementale est mise en place. Elle se traduit numériquement

par une augmentation/diminution de la résistance thermique des vêtements, une modification de la consigne de chauffage/climatisation, de la vitesse d'air (brasseur, ventilation naturelle...)

Bien entendu un ordre doit être établi comme l'illustre l'exemple ci-dessous :

- Evaluation du jugement thermo-sensoriel : mouillure cutanée trop importante, lié à un déséquilibre du bilan thermique ;
- Si possible diminution de la résistance thermique vestimentaire, jusqu'à ce que des conditions confortables ou une valeur minimum de résistance vestimentaire soient atteintes ;
- Si cela ne suffit pas, action sur la vitesse d'air par en priorité l'ouverture des fenêtres puis le déclenchement ou l'augmentation de régime des ventilateurs ;
- Si cela ne suffit toujours pas, la mise en route de la climatisation s'avère indispensable.

Cet exemple est représentatif d'un comportement énergétiquement sobre en période chaude: on aurait pu envisager l'allumage de la climatisation dès le début mais d'autres solutions « gratuites » doivent être mises en œuvre en priorité.

En 1997, le projet « Smarts Controls and Thermal Comfort » voit le jour afin d'appliquer l'approche adaptative à la régulation des systèmes énergétiques. L'originalité est d'adapter la température de consigne à la température de confort préférée qui dépend des variations de température extérieure. Les conclusions de cette étude sont formulées ci-après.

Suite aux recherches menées entre autres par Humphreys, le concept d'une température de « confort » variable voit le jour. Elle serait fonction des températures moyennes extérieures avec un poids sur ces dernières d'autant plus important que le temps écoulé respectif est court. L'introduction d'une température moyenne mobile permet de lisser la série des températures et traduit le changement qui est en train de se produire. Elle représente mieux qu'une moyenne classique la température à laquelle les sujets sont sensibles.

Nicol et Raja (1996) expriment cette moyenne mobile avec la formulation suivante :

$$T_{rm(n)} = (1-c) \cdot \{T_{od,moy(n-1)} + c \cdot T_{od,moy(n-2)} + c^2 \cdot T_{od,moy(n-3)} + \dots\},$$

où $T_{rm(n)}$ représente la température moyenne mobile (running mean temperature) et $T_{od,moy(n-1)}$ la température moyenne extérieure du jour précédent.

c est une constante comprise entre 0 et 1 permettant de mettre un poids plus ou moins important sur la moyenne des températures extérieures des jours précédents. Plusieurs études ont été menées pour déterminer la valeur de c et la meilleure corrélation serait pour une valeur de 0,8, ce qui donne une demi-vie de 3,5 jours. La notion de demi-vie représente le temps mis par des individus pour réagir face à un changement climatique. Elle se calcule par la formule suivante :

$$Demivie(jours) = \frac{0,69}{1-c} ;$$

Wilkins (1995) simplifie cette série infinie par l'expression suivante :

$$T_{rm(n)} = c \cdot T_{rm(n-1)} + (1-c) \cdot T_{od,moy(n-1)} ;$$

La température de confort est alors reliée à la variation de la température moyenne mobile T_{rm} :

$$T_c = dT_{rm(n)} + e \quad \text{si } T_{rm} > x^\circ\text{C}$$

$$T_c = g \quad \text{si } T_{rm} < x^\circ\text{C}$$

Pour simplifier le modèle, l'Algorithme de Commande Adaptative (ACA) a été développé lors du projet SCATs. L'étude réalisée dans 5 pays européens permet de déterminer la température de confort après interrogation de groupes de personnes. L'étude révèle les formulations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} T_c &= (0,302 \cdot T_{rm} + 19,39)^\circ\text{C} \quad \text{si } T_{rm} < 10^\circ\text{C} ; \\ T_c &= 22,88^\circ\text{C} \quad \text{sinon.} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{En moyenne sur les 5 pays évalués : France, Grèce,} \\ \text{Portugal, Suède, Angleterre.} \end{array}$$

En fait, il existe une formulation pour chacun de ces 5 pays comme le montre les courbes ci-dessous. Il est important de noter que deux types d'enquêtes ont été menés : la première (Level 1) a été réalisée par une méthode transverse, c'est-à-dire qu'un très grand nombre de personnes a été interrogé périodiquement (une fois par mois par exemple), la deuxième (Level 2) a été réalisée par une méthode longitudinale, c'est-à-dire qu'un petit groupe de personnes a été interrogé et suivi pendant quelques mois (par exemple 4 fois par jour pendant 3 à 12 mois)

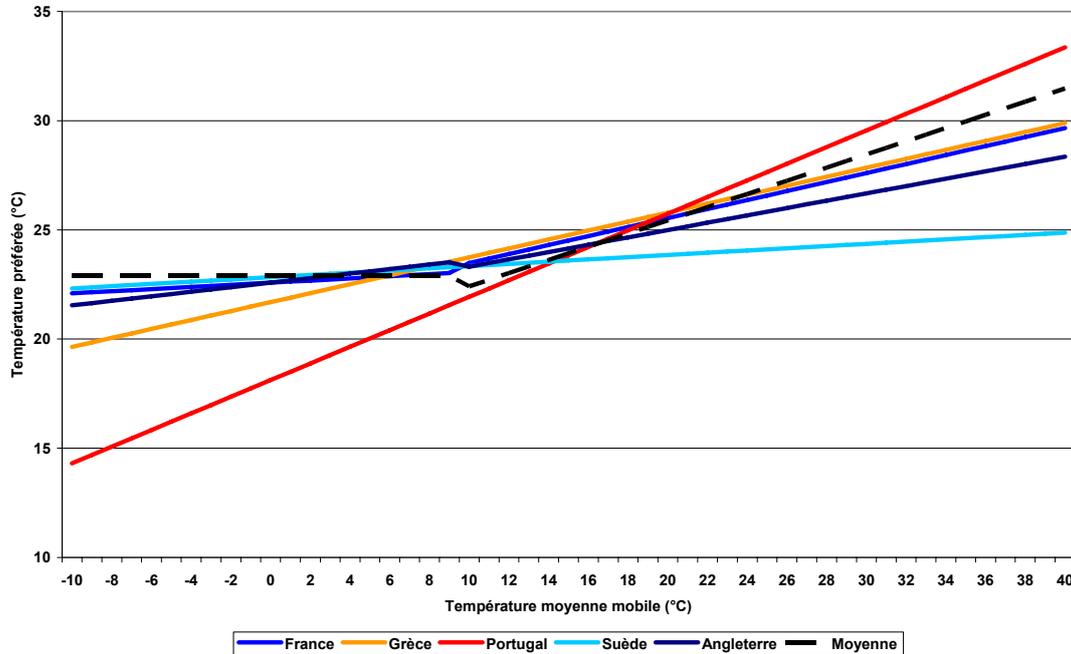


Figure 2: Température intérieure recommandée en fonction de la température extérieurs moyenne mobile. Résultats du SCATs, level 1

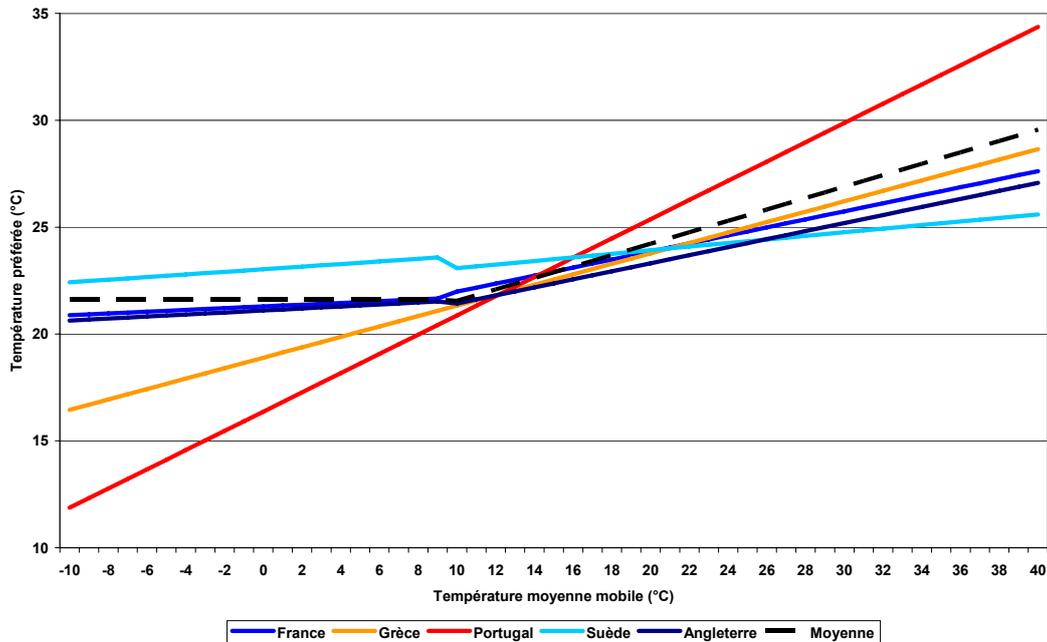


Figure 3: Température intérieure recommandée en fonction de la température extérieurs moyenne mobile. Résultats du SCATs, Level 2

Les courbes (fig.2 & 3) doivent être interprétées en tenant compte du fait que la température moyenne mobile n'est jamais égale à 40 °C en Suède par exemple (de la même façon, elle n'est jamais égale à -10°C au Portugal).

On remarque clairement que plus le climat est chaud (Portugal et Grèce) plus la pente de la courbe est élevée et l'ordonnée à l'origine faible. C'est-à-dire que plus la température moyenne mobile extérieure est élevée, plus les personnes acclimatées préfèrent des températures intérieures élevées. De la même façon, plus les températures extérieures sont faibles, moins l'écart avec la température intérieure est important.

Il faut noter également qu'une majorité des bâtiments au Portugal et en Grèce ne possèdent pas de système de chauffage et que par conséquent les occupants sont finalement plus « habitués » aux températures basses l'hiver.

Tableau 1 : Température intérieure recommandée en fonction de la température extérieure moyenne mobile

	Level 1		Level 2	
	Trm < 10	Trm > 10	Trm < 10	Trm > 10
FRANCE	0.049T+22.58	0.206T+21.42	0.041T+21.29	0.188T+20.10
GRECE	----	0.205T+21.69	----	0.244T+18.89
PORTUGAL	0.381T+18.12	----	0.45T+16.37	----
SUEDE	0.051T+22.83	----	0.061T+23.03	0.084T+22.24
ANGLETERRE	0.104T+22.58	0.168T+21.63	0.047T+21.10	0.188T+19.55
moyenne	22.88	0.302T+19.39	21.61	0.267T+18.88

Ces dernières courbes montrent l'effet de l'acclimatation sur la température intérieure préférée. De ce fait, il ne serait pas rigoureux d'appliquer ces formulations au climat de La Réunion, une adaptation doit être réalisée soit par la formulation d'hypothèses, soit par une enquête sur terrain.

De la même manière que la température de confort peut être adaptée à la variation des températures extérieures, il est tout à fait envisageable de proposer une relation permettant la prise en compte de la modification de la tenue vestimentaire en fonction des variations de températures journalières. Même si la tenue vestimentaire dépend de bien d'autres paramètres (sexe, type de travail, ...), le projet SCATs propose des corrélations en fonction de la température moyenne mobile :

$$I_{cl} = 0,950 - 0,0145.T_{rm}$$

Tableau 2 : Tenues vestimentaires préférées en fonction de la température extérieure moyenne mobile

	Level 1	Level 2
FRANCE	$I_{cl}=0.979-0.0197.T_{rm}$	$I_{cl}=0.816-0.0136.T_{rm}$
GRECE	$I_{cl}=1.072-0.0164.T_{rm}$	$I_{cl}=0.844-0.0130.T_{rm}$
PORTUGAL	$I_{cl}=1.376-0.0406.T_{rm}$	$I_{cl}=1.201-0.0346.T_{rm}$
SUEDE	$I_{cl}=0.927-0.0157.T_{rm}$	$I_{cl}=0.769-0.0100.T_{rm}$
ANGLETERRE	$I_{cl}=0.854-0.0125.T_{rm}$	$I_{cl}=0.730-0.00972.T_{rm}$
Moyenne	$I_{cl}=0.950-0.0145T_{rm}$	$I_{cl}=0.848-0.0136T_{rm}$

La courbe suivante représente les résultats obtenus pour les 5 pays, mais seulement pour le level 1. On remarque de la même façon, que plus l'individu vit dans un climat chaud, moins il supporte le froid (tenue vestimentaire plus isolante). Il a de plus tendance à mieux adapter sa tenue vestimentaire lorsque les températures extérieures sont élevées.

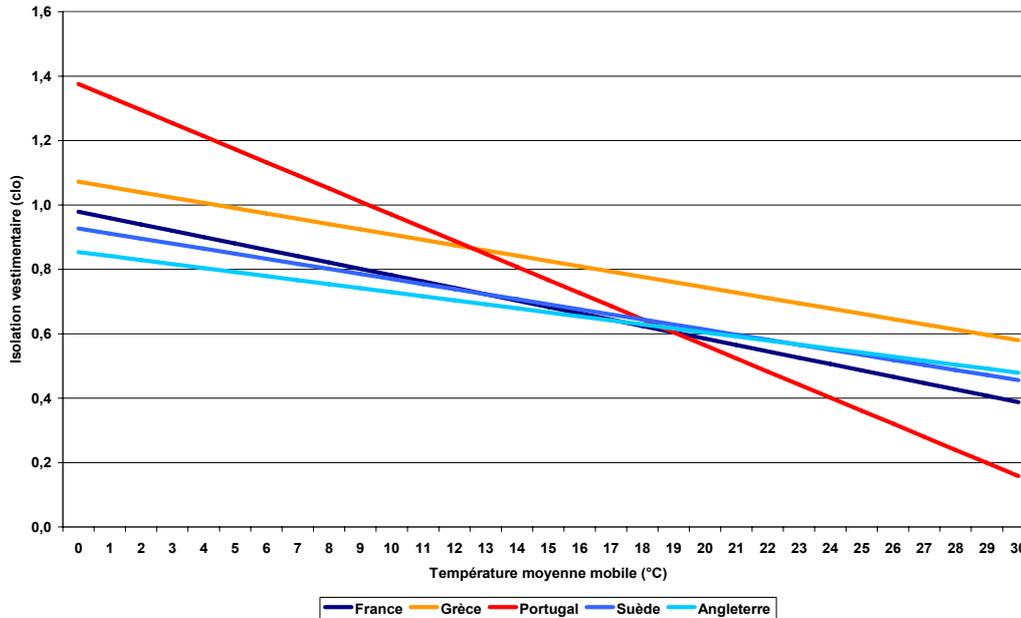


Figure 4: Tenue vestimentaire préférée en fonction de la température moyenne mobile. Résultats du SCATs, Level 1

La figure 5 est représentative des deux corrélations formulées ci-dessus, appliquées au climat de La Réunion. La courbe des températures de confort est tracée avec la formulation de la moyenne des résultats obtenus par le SCATs. Il est bien évident qu'une adaptation de cette formule pourra être réalisée : on remarque que si l'on applique la formulation du Portugal (Level 2), la température de confort maximale atteint largement 29°C.

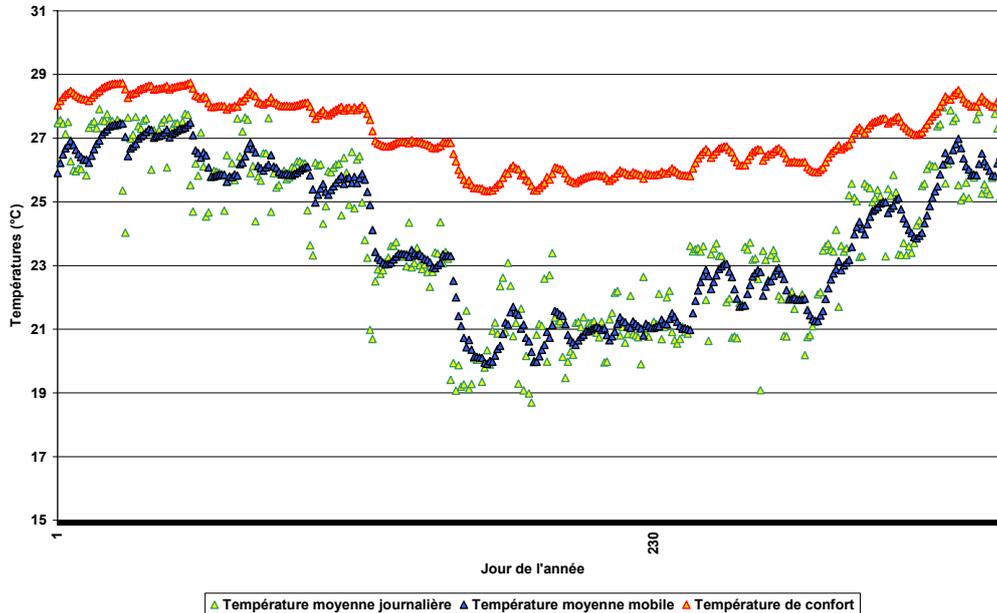


Figure 5 : Approche adaptative sur la température de confort

On note que la température moyenne mobile "lisse" énormément les variations de température. La température de confort varie entre 25 et 29°C. Cependant, en fonction de la vitesse d'air et de l'humidité cette fourchette peut s'élargir. De plus, on peut imaginer que seules les températures extérieures réellement vécues par les individus, à savoir durant la journée ou durant les heures de travail, sont à prendre en compte pour calculer la moyenne extérieure. Dans ce cas, la plage des températures de confort est alors surévaluée (25,5°C-27,5°C).

3. Le cas particulier de l'étude

3.1 Les climats chauds et humides

La Réunion est une île située au cœur de l'océan Indien et est donc soumise à un climat tropical humide, cependant son caractère montagneux implique des conditions tempérées en altitude. Comme tous les climats tropicaux, l'année se divise en deux saisons : une saison humide qui se caractérise par des précipitations abondantes et des températures élevées, et une saison « sèche » : cette dernière subit l'influence des vents d'alizée qui induit une baisse des températures (pouvant descendre en dessous de 20°C) ; à ce moment de l'année, l'humidité est plus faible et les écarts de températures journaliers plus importants. Même en saison sèche, l'humidité relative moyenne est supérieure à 55%.

Les données météorologiques données ci-dessous dont nous aurons besoin pour la suite sont issues de la station météorologique de Saint Pierre (Station météorologique Ligne Paradis), et correspondent aux mesures réalisées de 1997 à 2006.

La figure 6 est représentative de l'évolution annuelle des températures et humidité extérieure. On remarque que les températures extérieures ne descendent jamais en dessous de 15°C et l'humidité relative est toujours supérieure à 50%. On remarque deux saisons distinctes. La saison sèche voit des températures moyennes mobiles de l'ordre de 20°C, la saison humide de l'ordre de 25°C. La saison humide se distingue par de fréquents pics d'humidité relative de 100%, alors inexistantes en saison sèche.

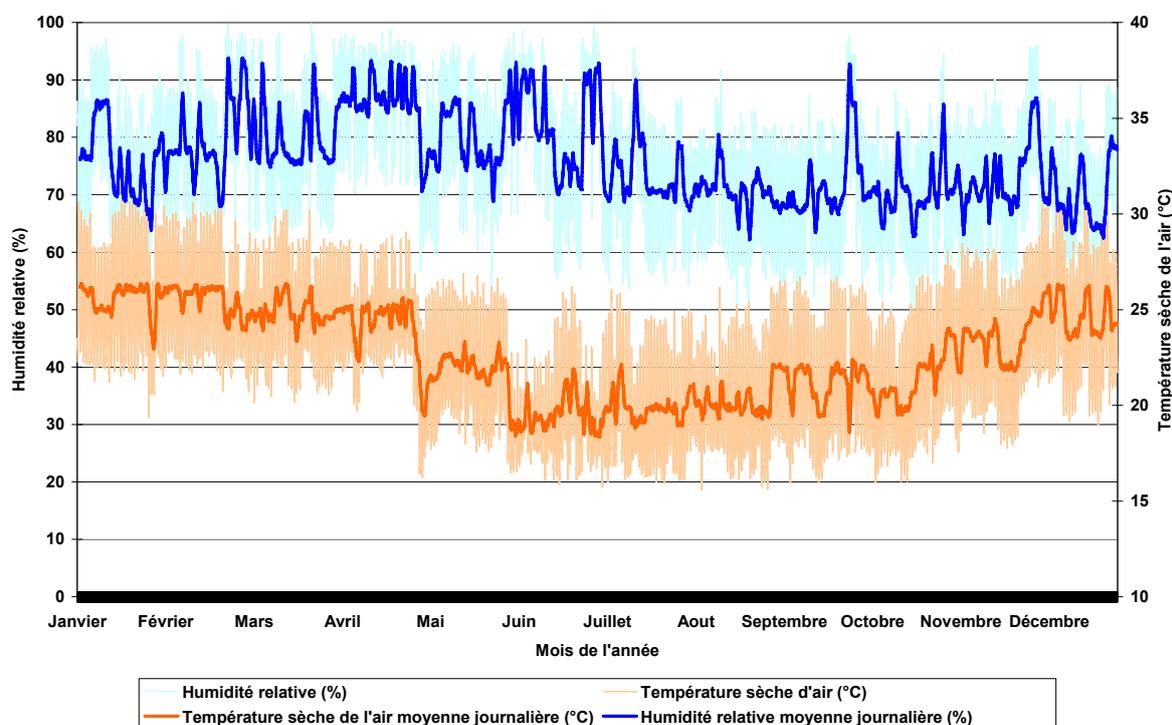


Figure 6: Variation de la température et de l'humidité à La Réunion station météorologique de Saint Pierre (Ligne Paradis)

La figure 7 permet de visualiser la différence entre la température moyenne journalière et la température moyenne mobile. On remarque clairement que cette dernière permet de lisser la série des températures et traduit ainsi le changement qui est en train de se produire. Elle amortie ainsi les variations brusques de température :

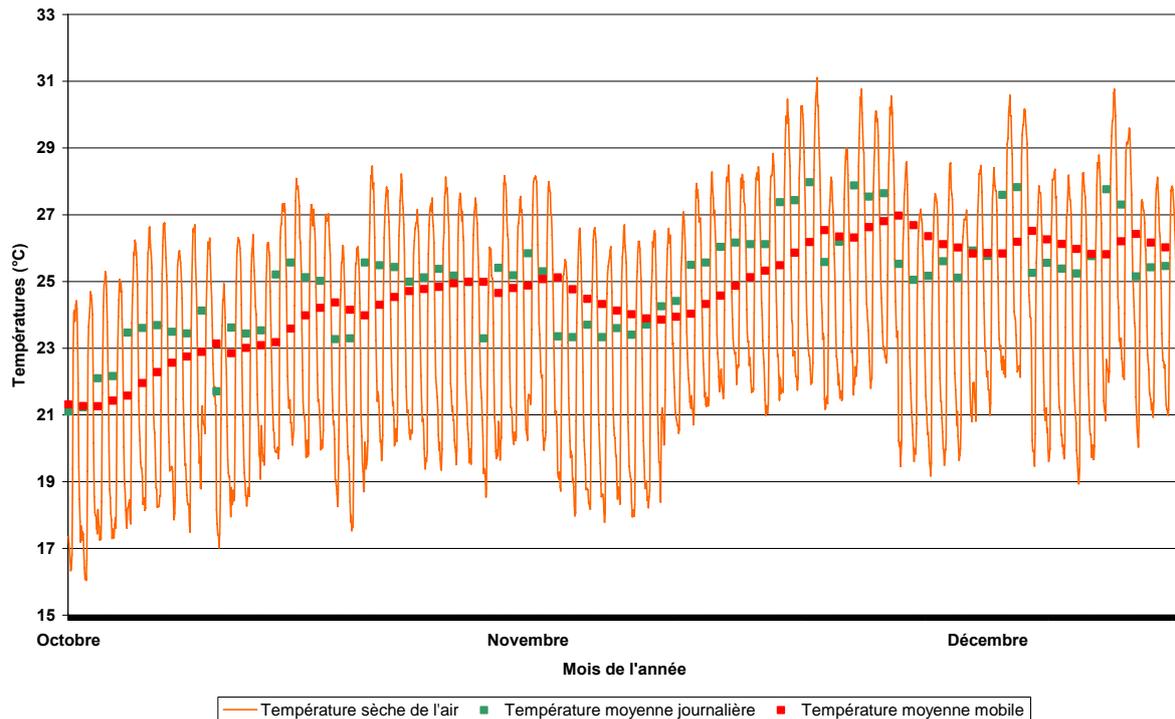


Figure 7 : Comparaison des moyennes journalière et mobile des températures extérieures pour une demi-vie d'une demi-semaine durant 3 mois de la saison humide

La figure 8 est représentative du rayonnement solaire incident sur une surface horizontale. On remarque qu'en saison sèche, le rayonnement diffus est plus faible que le reste de l'année en raison d'un ciel moins couvert : en saison des pluies la proportion du rayonnement diffus est plus importante.

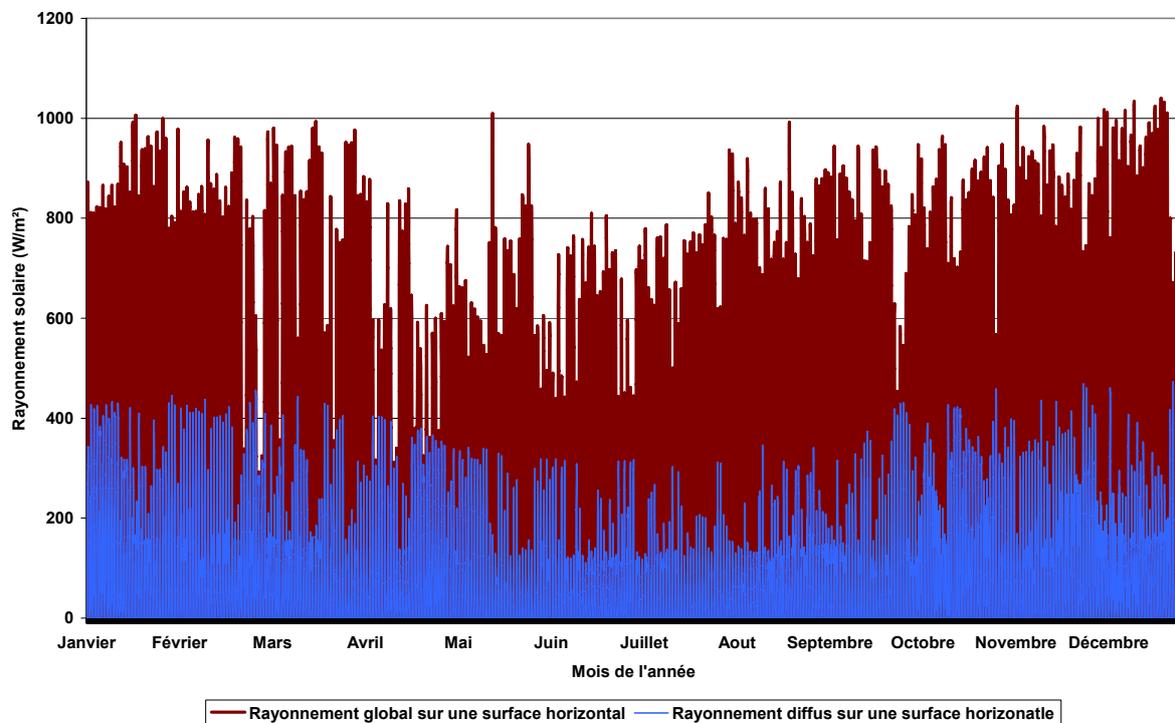


Figure 8: Densité de flux solaire incident sur une surface horizontale

Enfin la figure 9 illustre les vitesses de vent au cours de l'année. On remarque que même si cette dernière n'est pas très importante, le vent souffle régulièrement toute l'année ce qui favorise l'exploitation de la ventilation naturelle. Il

est important de noter que le vent ne souffle pas uniformément sur toute l'île. Ainsi la vitesse peut être plus importante le long des côtes qu'en pleine terre.

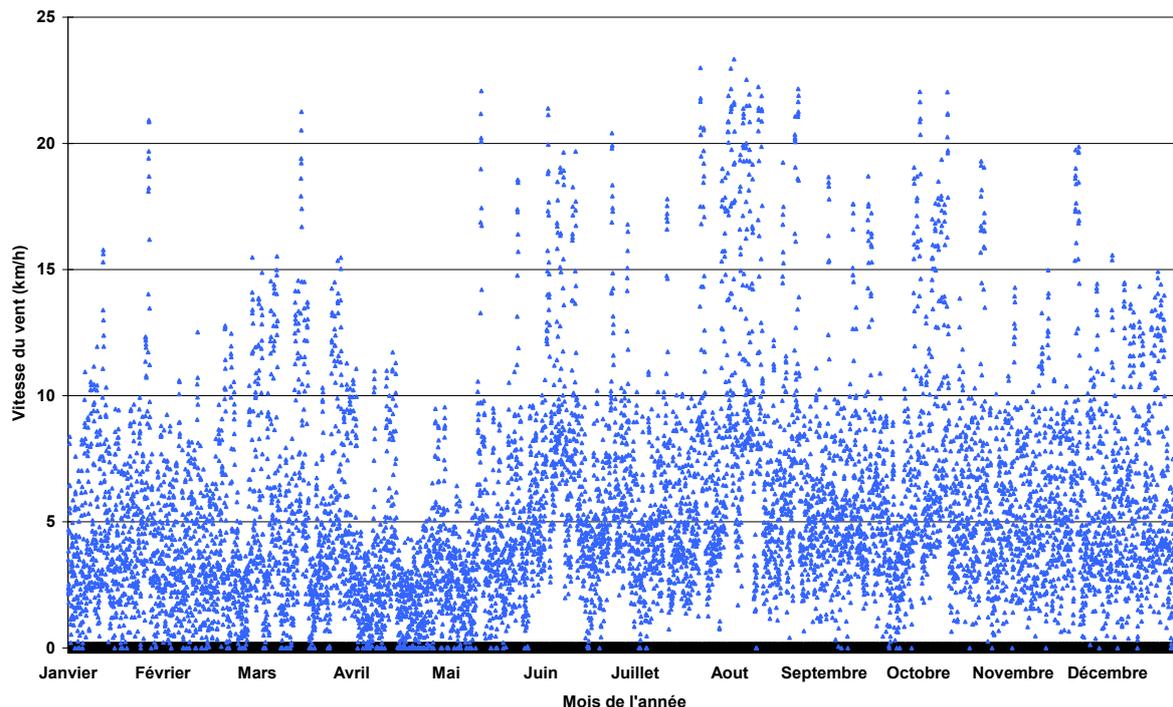


Figure 9: Variation annuelle de la vitesse du vent

3.2 Les bâtiments naturellement ventilés

La construction de bâtiments énergétiquement performants dans ce type de climat passe inévitablement par la réduction des besoins de climatisation. Outre les différences constructives (matériaux, inertie, protections solaires...) par rapport aux climats tempérés, des solutions énergétiques existent.

La ventilation naturelle nocturne ou diurne est une alternative efficace pour décharger le bâtiment des apports internes et solaires accumulés.

Dans la journée la création de courants d'air ou le brassage de l'air ambiant (ventilateurs) ne permettent pas de rafraîchir le bâtiment (si $T_{ext} > T_{int}$) mais améliore la sensation thermique des occupants en augmentant les transferts par convection et évaporation. En effet, pour évacuer la chaleur, le corps humain enclenche le processus de thermorégulation par sudation dont le rendement est d'autant plus efficace que la vitesse de l'air est élevée. La question est de savoir dans quelle mesure, la vitesse locale de l'air est suffisante à l'évacuation de la sueur cutanée tout en n'engendrant pas d'inconfort local lié au courant d'air. Car en dehors d'un effet purement thermique la perception est également liée à des effets plutôt mécaniques (sens de l'écoulement, turbulence, ...)

Si la ventilation naturelle permet un rafraîchissement du bâtiment, elle n'a pas la prétention d'exclure tout système traditionnel de climatisation. Cependant, une bonne régulation permet la réduction non seulement des pointes de puissance appelées mais également de la durée d'utilisation du système.

La prise en compte de l'approche adaptative du confort thermique permet à l'occupant d'agir (si le bâtiment le lui permet) sur les vitesses d'air afin de trouver les conditions qu'il jugera les plus confortables. Des études réalisées sur le terrain ont montré que la prise en compte d'une telle démarche modifie la température de confort suivant que le bâtiment soit naturellement ventilé ou pas.

La théorie développée par Humphreys (1978) suggère que la température de confort est une fonction linéaire de la température extérieure. Cette dernière est généralement une moyenne (mensuelle, semi-mensuelle) des températures extérieures. On peut envisager d'utiliser la notion de température moyenne mobile. $T_c = a.T_{ext} + b$;

les constantes a et b sont déterminées expérimentalement. Humphreys a alors pu dresser la courbe suivante représentative de la variation de la température de confort dans des bâtiments climatisés ou non.

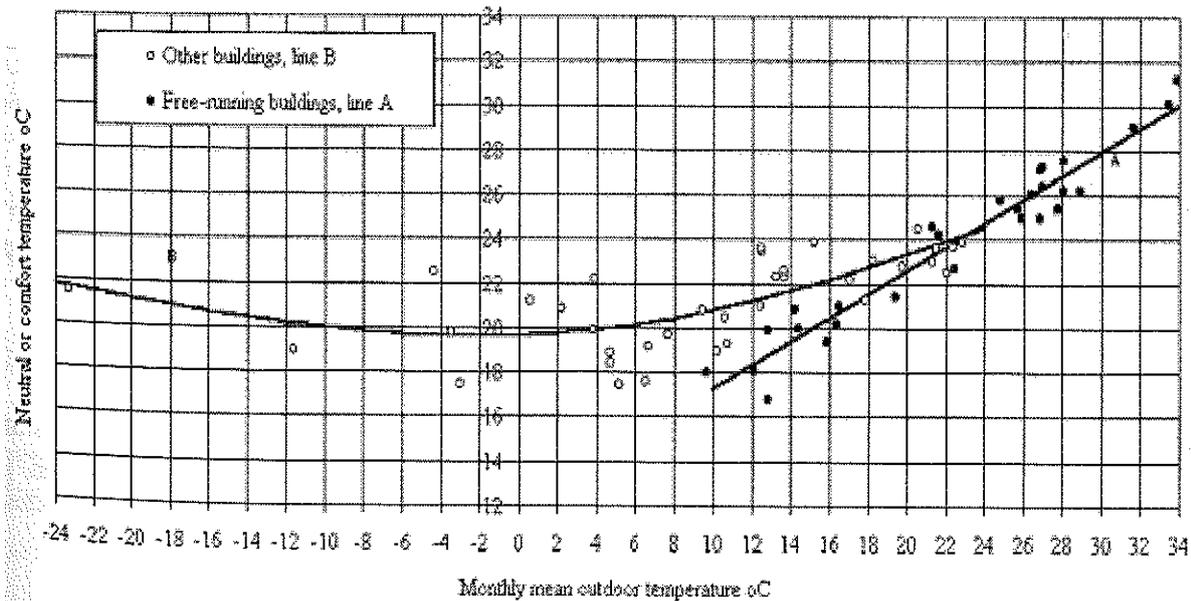


Figure 10 : Comparaison des températures de confort pour un bâtiment naturellement ventilé et un bâtiment climatisé

Il est notable que la température de confort est dans les bâtiments naturellement ventilés une fonction linéaire de la température extérieure. Les causes de ce lien ne sont pas clairement identifiées, mais sont probablement liés à un ensemble : adaptation vestimentaire, acceptation,

3.3 Vers des indicateurs adaptés

Afin d'évaluer la qualité de l'ambiance intérieure des bâtiments en climat chaud, il est indispensable de définir des indices appropriés. Les indices couramment utilisés et disponibles dans la littérature ne sont pas forcément adaptés à ce contexte précis. Il a été démontré que le PMV donne des valeurs souvent surestimées par rapport aux votes réellement enregistrés sur le terrain. De plus, dans de telles conditions, des vitesses d'air relativement élevées sont mieux perçues et on peut donc se demander si le PD ou DR (Percentage of Dissatisfied ou Draught Risk) est pertinent dans ce contexte.

Cet indice se calcule à partir de la relation suivante :

$$PD = (3,143 + 0,3698.v.T_u).(34 - T_a).(v - 0,05)^{0,6223} \quad (4.3.1)$$

Où v représente la vitesse de l'air, T_u sa turbulence et T_a sa température.

L'étude de sensibilité qui suit montre dans quelle mesure cet indice est lié au confort en climat chaud et humide. Il faut remarquer que dans la construction de cet indice, aucun paramètre représentant l'humidité dans l'air n'est présent. Ce qui suppose que l'effet du courant d'air sur l'évaporation n'est pas pris en compte. Cet indice a en effet été conçu pour des situations de chauffage.

En climat chaud la température de peau est quasiment uniforme et varie peu, la perception de l'état thermique est alors très liée à la mouillure cutanée, qui résulte de la sudation et de l'évaporation. La figure 10 illustre les mécanismes de sudation dont le corps humain est le siège.

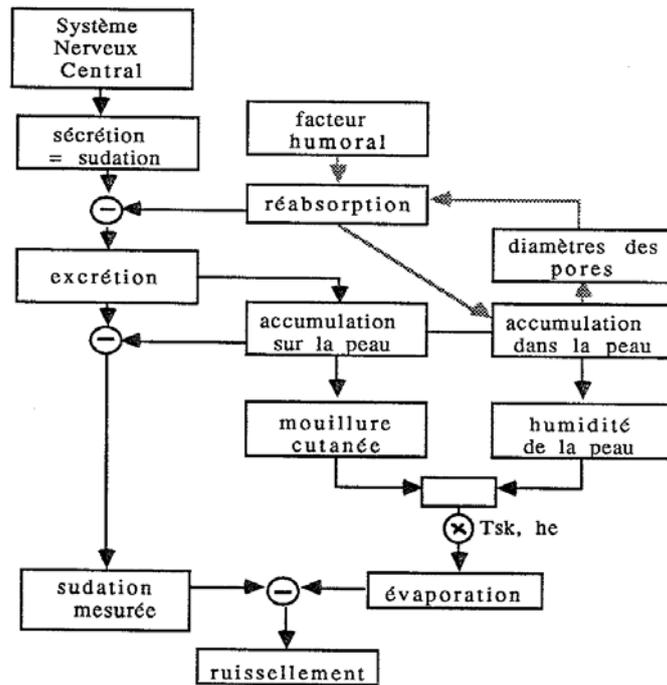


Figure 11 : Mécanisme de sudation

Les débits d'eau suée sont limités à 400g/h au repos et 700g/h en activité. Cependant, l'adaptation liée à l'acclimatement permet des débits allant de 700 à 1000 g/h suivant l'activité.

La thèse de doctorat présentée par Salif GAYE sur « la contribution à l'étude du confort thermique en climat tropical » [1] décrit les indicateurs liés à la mouillure cutanée. Les formulations suivantes en sont issues.

La mouillure cutanée représente le rapport entre la surface de la peau mouillée et la surface totale de la peau. Cette grandeur varie de 0.06 à 1. Un individu totalement mouillé voit sa mouillure cutanée égale 1. La raison pour laquelle cette grandeur n'est jamais égale à zéro est que même en l'absence de sudation, une diffusion minimale d'eau à travers les cellules corporelles se produit.

Elle se calcule par la relation suivante :

$$w = \frac{E_{sw}}{E_{max}} \quad (4.3.2)$$

où E_{sw} représente les pertes par évaporation de la sueur et E_{max} le pouvoir évaporatif maximum de l'air. Pour que le bilan thermique du corps humain soit équilibré il faut que :

$$E_{sw} = M - R - C - E_{diff} - E_{re} \quad (4.3.3)$$

M étant le métabolisme lié à l'activité de l'individu, R, les pertes par rayonnement, C, les pertes par convection, Edif, les pertes par diffusion de vapeur d'eau à travers la peau et E_{re} , les pertes par respiration (sensible et latent).

Le pouvoir évaporatoire maximal de l'ambiance est donné par la relation :

$$E_{max} = H_{ev} \cdot A_{du} \cdot (P_{sk} - P_{va}) \quad (4.3.4)$$

où H_{ev} représente le coefficient d'échange évaporatif, qui dépend du coefficient de convection :

$$H_{ev} = 16,7 \cdot 10^{-3} \cdot h_c \cdot F_{cpl} \quad (4.3.5) \quad \text{et} \quad F_{cpl} = \frac{1}{1 + 0,92 \cdot h_c \cdot R_{cl}} \quad (4.3.6)$$

Le pouvoir évaporatoire maximum est fonction de la différence entre la pression de vapeur saturante de la peau et la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant. C'est donc cette variable qui est directement responsable de ce phénomène. Le pouvoir évaporatoire est d'autant plus important que la pression partielle de vapeur d'eau est faible.

La figure 11 permet de visualiser pour le climat de La Réunion l'évolution annuelle de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant. Elle est à comparer avec la pression de vapeur saturante de la peau à 33 et 36°C.

La pression de vapeur saturante cutanée est une fonction croissante et linéaire de la température cutanée. Cette pression est calculée avec la formule suivante qui donne des valeurs de P_{sk} en fonction de la température cutanée :

$$P_{sk} = 255,9.T_{sk} - 3372,22 \quad (4.3.7)$$

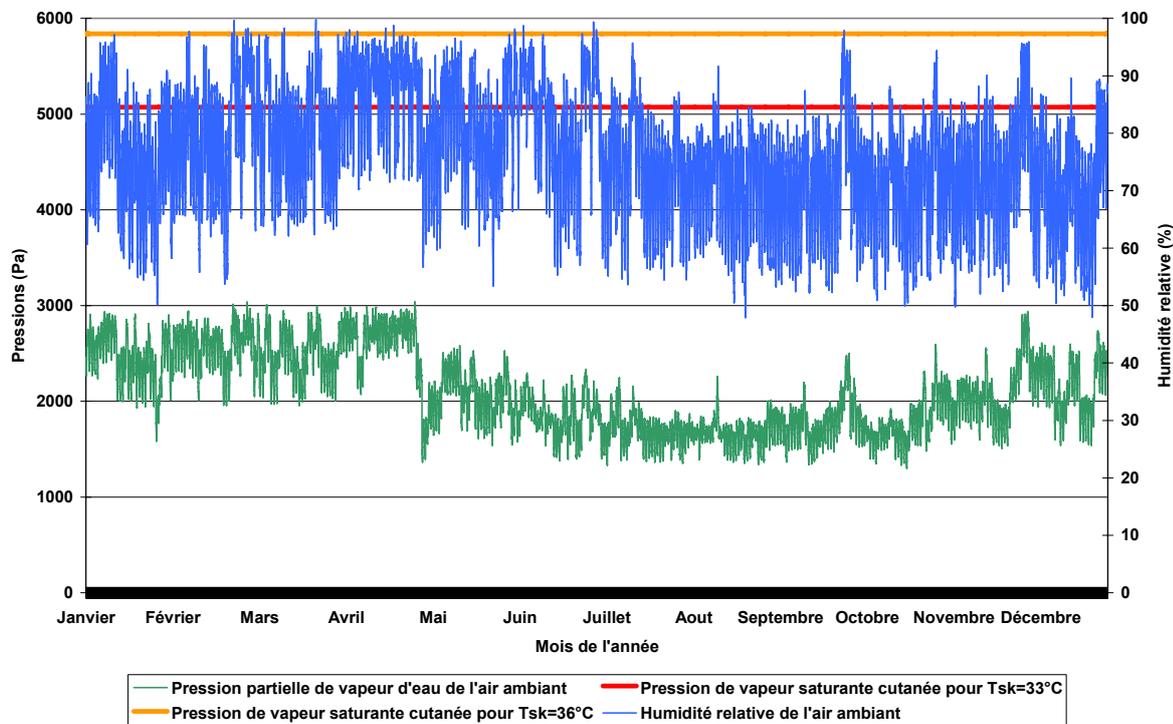


Figure 12 : Evolution annuelle de l'humidité relative et de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant

On note une différence des valeurs moyennes de pression partielle de vapeur d'eau entre la saison humide et la saison sèche : phénomène beaucoup moins visible si l'on se contente de l'évolution de l'humidité relative. Le pouvoir évaporatoire maximal est donc plus faible en saison humide. Plus la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau de l'air et la pression de vapeur saturante de la peau est faible, plus difficile sera l'évacuation de chaleur par évaporation de la sueur.

La connaissance des pertes par évaporation et de la mouillure cutanée permet de déterminer le débit sudoral (DS) ainsi que le rendement évaporatoire ϵ . Ces indices sont représentatifs de l'inconfort lié à la présence d'eau sur la peau :

$$DS = \frac{E_{sw}}{0,68.e} \quad (4.3.8)$$

$$e = 1 - 0.42 \cdot \exp(-6 \cdot (1 - w)) \quad (4.3.9)$$

Selon des études faites par des physiologistes, le confort n'est plus possible si ces grandeurs atteignent des valeurs limites. Ainsi un débit sudoral de 70 g/h et une mouillure cutanée de 0,3 sont des limites au-delà desquelles l'individu est en situation d'inconfort. Cependant, si l'individu est acclimaté, on peut envisager une augmentation de ces limites. A partir de là des zones de confort, de 1 à 4, sont déterminées en fonction des données du débit sudoral et de la mouillure cutanée. Cet indice DISC se calcule différemment suivant les auteurs et est plus ou moins sensible aux variations de la mouillure cutanée et/ou du débit sudoral.

L'analyse de SANGKERTADY permet de tenir compte de ces deux données pour calculer l'indice DISC :

$$DISC = 3,9338.w + 0,0158.DS - 0.3348 \quad (4.3.10)$$

Les valeurs de DISC sont discutées à partir de l'approche suivante :

- DISC=1, agréable ;
- DISC=2, légèrement désagréable ;
- DISC=3, désagréable ;
- DISC=4, très désagréable ;

Un pourcentage d'insatisfait peut être déterminé par la relation suivante :

$$IND = \sqrt{\frac{(w - 0,06)^2}{0,19} + \frac{(DS - 50)^2}{200}} \quad (4.3.11)$$

4. Etude de sensibilité des indicateurs

Une étude de sensibilité est réalisée à partir du logiciel « Ashrae Thermal Comfort Program » développé par l'ASHRAE. Cette étude est basée sur la sensibilité de la mouillure cutanée à la température, l'humidité et la vitesse de l'air.

Ce programme permet de calculer divers indices de confort, et également certaines données physiologiques, car il est basé sur un modèle de thermo physiologie à 2 nœuds.

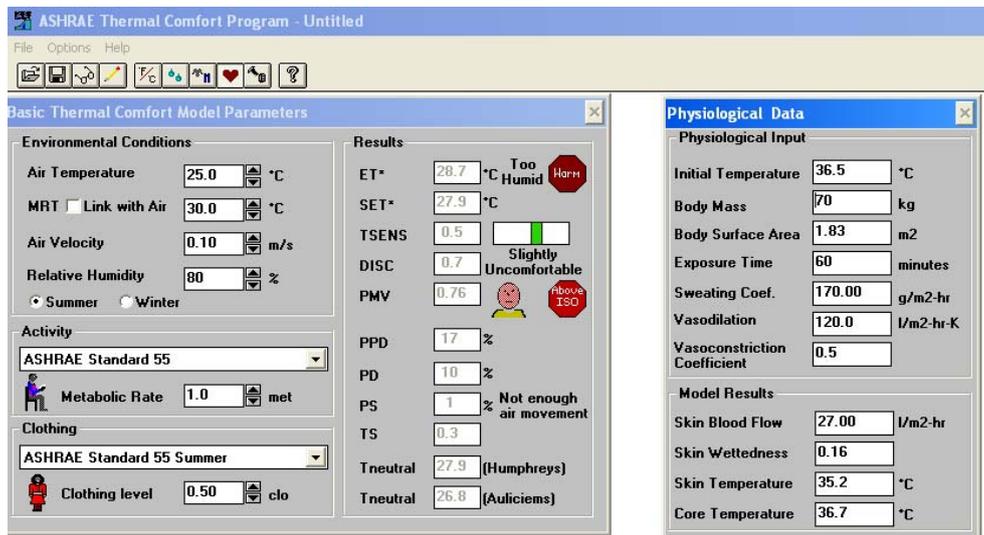


Figure 13 : Exemple d'interface graphique du logiciel de l'ASHRAE

Pour faire une étude de sensibilité dans un premier temps nous supposons une tenue vestimentaire estivale de 0,5 clo, une activité sédentaire de 1 met et égalité entre la température d'air et la température moyenne de rayonnement donc égale à la température opérative.

Un autre outil disponible en ligne permet de faire le même genre de calculs. Développé par le Dr Richard de Dear de l'université de Sydney, il permet d'obtenir les mêmes sorties, à la différence qu'il est possible de visualiser la variation de certaines données dans le temps, lorsque le sujet passe de conditions « thermo-neutres » à l'ambiance imposée.. Cependant, on note une légère différence si l'on effectue le calcul avec les deux outils. Ceci étant dû au modèle de physiologie sur lequel ils se basent.

Etant donné que le logiciel de l'ASHRAE est « normatif », c'est celui que l'on utilisera par la suite.

4.1. Impact de la température, de l'humidité et de la vitesse d'air sur la mouillure cutanée

En faisant varier la température opérative de 25°C à 32 °C par pas de 1°C, et la vitesse d'air de 0.1 à 0.6 m/s par pas de 0.1 m/s on obtient les courbes suivantes qui sont représentatives des résultats obtenus :

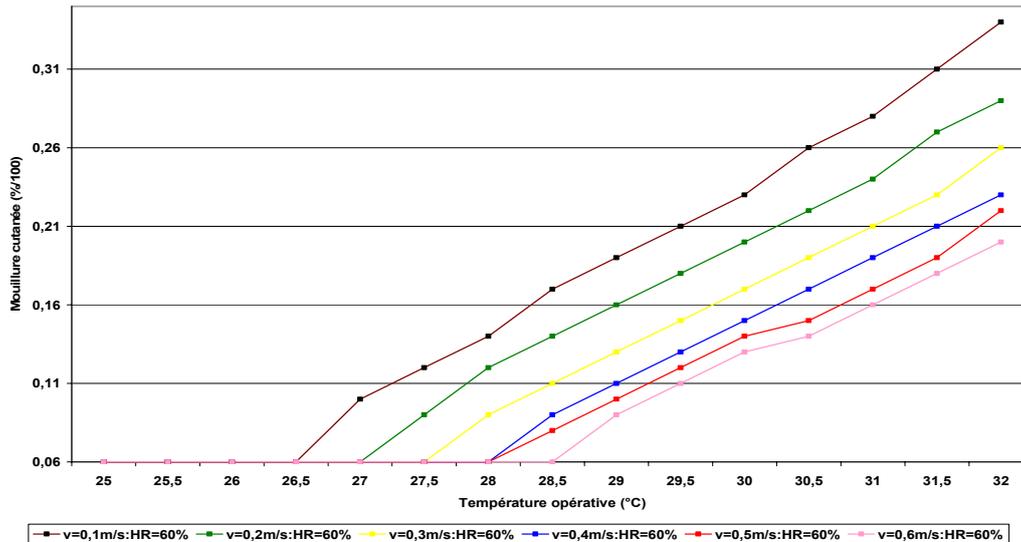


Figure 14: Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes vitesses d'air (HR=60%)

On remarque que la vitesse de l'air permet de réduire la mouillure cutanée et donc la sensation d'inconfort qui en résulte (cf. figure 14). Cependant, le pas de 0.1m/s pris dans le cadre de l'étude est de moins en moins efficace : c'est-à-dire qu'augmenter de trop la vitesse d'air ne permettra pas (dans certaines conditions) de diminuer la sensation de moiteur. L'inconfort lié au courant d'air devient alors prépondérant.

Malgré tout l'augmentation de la vitesse d'air permet d'éviter de passer la barre critique des 30% de mouillure et repousse la température à partir de laquelle le mécanisme de sudation démarre.

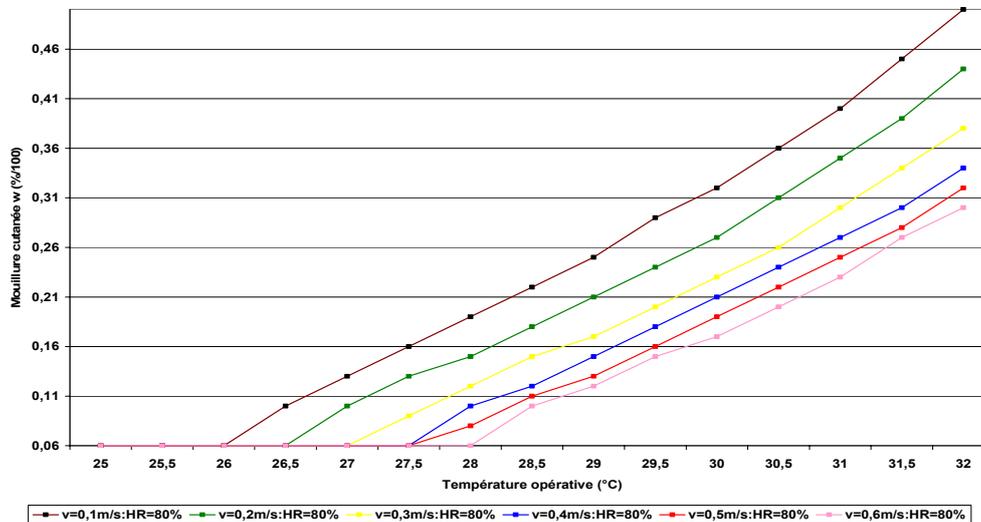


Figure 15 : Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes vitesses d'air (HR=80%)

La figure 15 représente les mêmes variations que la figure 14 mais pour une humidité relative plus importante, on constate alors que la sudation se déclenche pour des températures opératives plus faibles. Dans des conditions extrêmes de température (>32°C), il est alors difficile de limiter la mouillure cutanée à la valeur critique de 30% par seulement l'augmentation de la vitesse d'air.

La Figure 16: Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes humidités permet de mieux interpréter le rôle de l'humidité extérieure. La sudation est d'autant plus faible que l'humidité l'est.

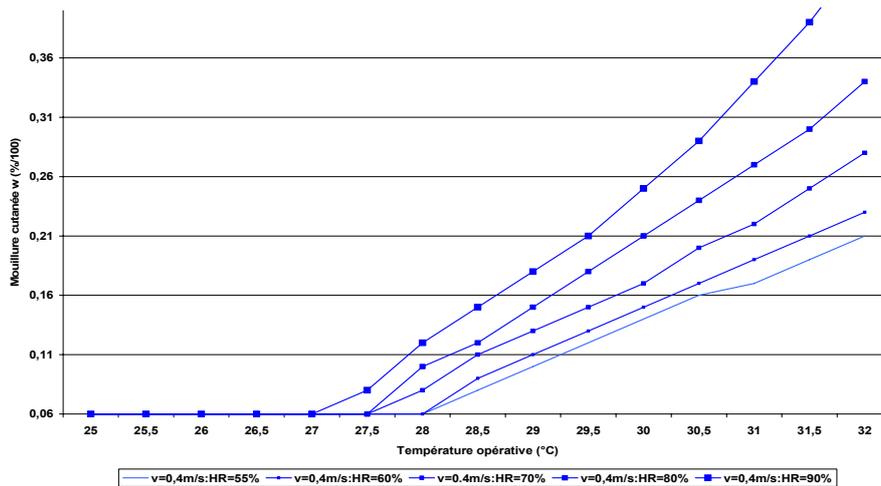


Figure 16: Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes humidités ($v=0.4m/s$)

On constate ici que l'humidité relative joue un rôle important, toutefois il faut être méfiant sur cette conclusion car la grandeur physique qui entre en compte dans l'évaporation est l'écart de pression de vapeur entre la peau et l'ambiance.

4.2. Lien entre débit sudoral et mouillure cutanée

La figure 17 est représentative de l'impact des données climatiques sur le débit sudoral.

Il est à noter que pour une personne acclimatée, les limites de débit sudoral sont 43% supérieures à celles d'une personne non acclimatée. En supposant qu'il en est de même pour la limite d'inconfort, le débit sudoral peut avoisiner 100 g/l. Le débit sudoral et la mouillure étant liés on obtient le même type de courbe.

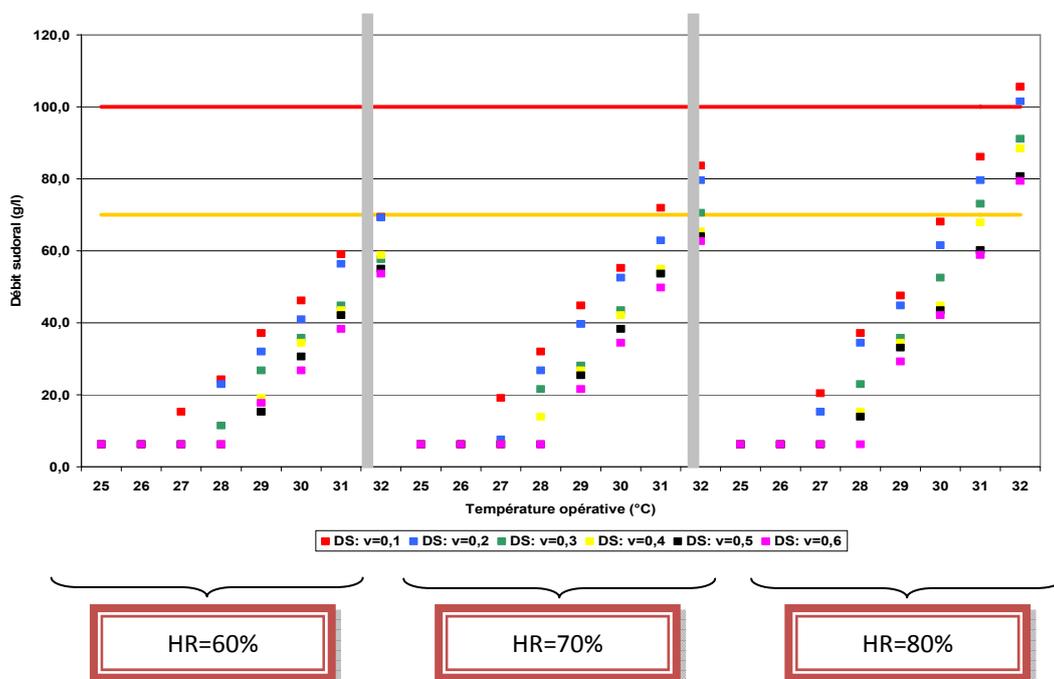


Figure 17: Evolution du débit sudoral sous différents climats

Là où des personnes non acclimatées se trouveraient dans une situation d'inconfort, notamment dû à un couple humidité/température élevé, des personnes acclimatées sont encore dans une situation de transition (cf. figure 17). On peut se demander si les personnes acclimatées acceptent un débit sudoral plus important ou bien si leur adaptation physiologique fait que dans les mêmes conditions, ce débit sudoral est moindre. Il faut noter que bien évidemment le modèle inclus dans le logiciel ASHRAE correspond à un sujet "standard" non acclimaté.

4.3. Impact du temps d'exposition sur la mouillure et la température cutanée

Les courbes suivantes (figure 18 et 19) permettent d'analyser l'évolution des températures et mouillures cutanées en fonction du temps d'exposition et de différentes conditions climatiques. Au temps initial le sujet est supposé être dans les mêmes conditions

Elles se lisent avec la méthodologie suivante :

- même couleur = même vitesse d'air : 0.1 (rouge) et 0.5 m/s (orangé) ;
- même épaisseur = même température : 28°C (trait fin) et 32°C (trait épais) ;
- même continuité = même humidité : 55% (discontinu) et 80% (continu).

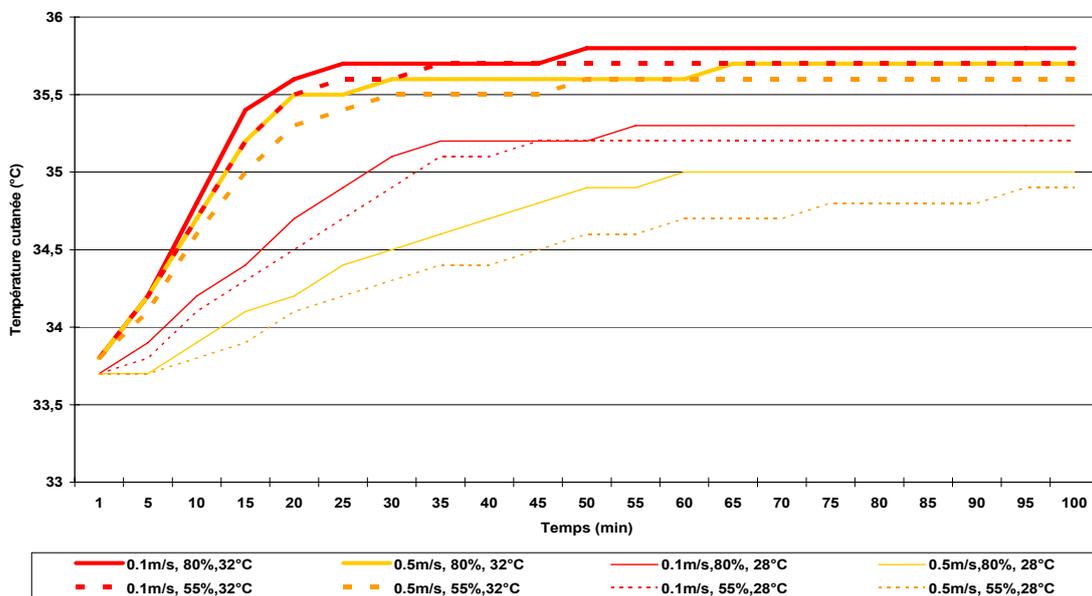


Figure 18: Evolution de la température cutanée en fonction du temps pour diverses conditions climatiques

La température cutanée croît d'autant plus vite que la température ambiante est élevée. L'humidité n'a qu'un très faible impact sur cette variation même si une humidité élevée entraîne des températures cutanées plus importantes. Une vitesse d'air permet d'abaisser légèrement la température cutanée.

Quelles que soient les conditions climatiques, la température cutanée se stabilise au bout d'une heure environ.

La figure 19 montre l'évolution de la mouillure dans les mêmes conditions que précédemment. On constate que le processus de sudation, contrairement à l'élévation de température cutanée, démarre au bout d'un temps d'exposition d'au moins 10 minutes dans les conditions étudiées. La sudation se stabilise au bout d'une heure environ suivant les conditions.

La mouillure est d'autant plus importante que la vitesse d'air est faible.

On constate ici très nettement que pour le climat chaud et humide la mouillure est très élevée dans ce cas l'inconfort chaud sera important. On peut aussi noter que pour des climats plus modérés on peut constater que la mouillure met plus de 30 minutes avant d'augmenter, Dans le bâtiment les zones de séjours et de passage peuvent donc être traitées différemment.

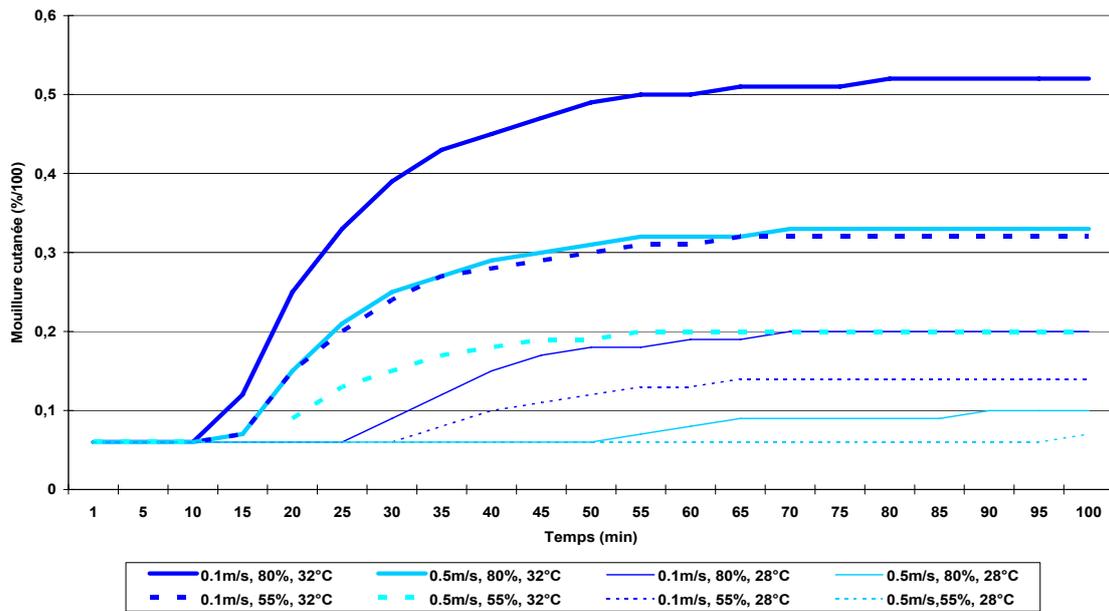


Figure 19: Evolution de la mouillure cutanée pour diverses conditions climatiques

4.4. Impact de la température, de l'humidité et de la vitesse d'air sur le rendement évaporatoire

L'impact des paramètres d'ambiance sur le rendement de sudation a été calculé à partir de l'équation 4.3.7. La figure 20 est représentative de la chute de ce rendement avec l'augmentation de l'humidité relative. L'impact de la vitesse d'air n'est pas représentée mais le rendement est d'autant plus important que la vitesse d'air est élevée (augmentation du coefficient d'échange évaporatoire)

Malgré le fait que ce rendement ait, dans ces conditions, des valeurs élevées (>0.9), la diminution de ce dernier est une fonction exponentielle de la température et est d'autant plus importante que l'humidité est élevée.

Ces résultats sont en parfait accord avec des études réalisées par GINOVI et KERSLAKE qui mettent en évidence le fait que le rendement de sudation diminue lorsque la mouillure augmente, c'est-à-dire lorsque l'humidité est importante et les vitesses d'air faibles.

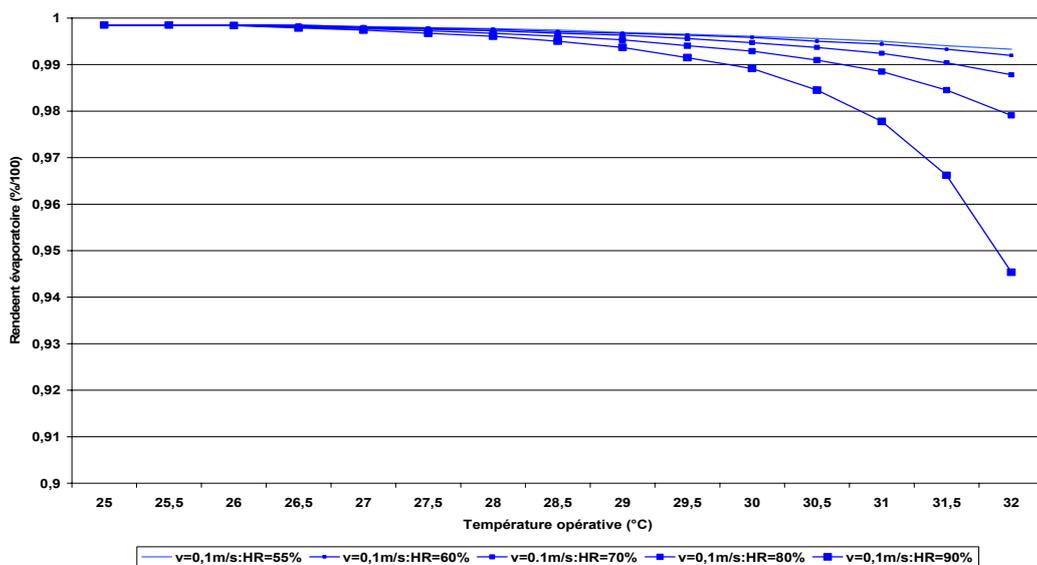


Figure 20: Rendement de sudation en fonction de la température d'ambiance pour différentes humidités relatives à v=0.1m/s

Il faut tout de même noter que ce rendement comme toutes les expressions de thermo-physiologie correspondent à des personnes non acclimatées et qu'il faudra faire des recherches plus poussées dans la bibliographie pour déterminer les modifications éventuelles pour des personnes acclimatées.

4.5. Sensibilité des indicateurs de confort aux variables climatiques

4.5.1 Indice d'inconfort DISC lié à la mouillure

Le tableau 3 montre les résultats mettant en évidence l'impact des différentes données climatiques sur l'indice DISC. Celui-ci est représentatif de l'inconfort lié non seulement à la mouillure cutanée mais aussi au débit sudoral. Une échelle de 0 à 4 permet d'apprécier la sensation.

On remarque qu'au dessus de 32°C, il est difficile d'atteindre une sensation « agréable » même en augmentant la vitesse d'air : cette augmentation étant de moins en moins efficace sur le jugement thermo-sensoriel, il faudrait l'élever au-delà des limites acceptables (en intérieur des vitesses trop élevées outre l'inconfort crée présente des désagréments : feuilles qui volent par exemple)

L'augmentation de l'inconfort lié à la mouillure de la peau est d'autant plus grande que la température et l'humidité augmentent : une faible élévation de température et d'humidité est alors de moins en moins bien ressentie.

Tableau 3: Evolution de l'indice DISC sous différentes hypothèses

	60% d'humidité					
	27°C	28°C	29°C	30°C	31°C	32°C
0,1 m/s	0,3	0,6	1	1,3	1,7	2,1
0,2 m/s	0	0,5	0,8	1,1	1,5	1,9
0,3 m/s	0	0,2	0,6	0,9	1,2	1,6
0,4 m/s		0	0,4	0,8	1,1	1,5
0,5 m/s		0	0,3	0,7	1	1,4
0,6 m/s		0	0,3	0,6	0,9	1,3
1 m/s						1,1
	70% d'humidité					
0,1 m/s	0,4	0,8	1,2	1,6	2,1	2,6
0,2 m/s	0,1	0,6	1	1,4	1,8	2,3
0,3 m/s	0	0,4	0,7	1,1	1,5	2
0,4 m/s		0,2	0,6	1	1,4	1,8
0,5 m/s		0	0,5	0,9	1,3	1,7
0,6 m/s			0,4	0,8	1,2	1,6
1 m/s					0,9	1,4
	80% d'humidité					
0,1 m/s	0,5	1	1,4	2	2,6	3,3
0,2 m/s	0,3	0,8	1,2	1,7	2,3	3
0,3 m/s	0	0,5	0,9	1,4	2	2,6
0,4 m/s		0,3	0,8	1,2	1,8	2,4
0,5 m/s		0,2	0,7	1,1	1,6	2,2
0,6 m/s		0	0,6	1	1,5	2,1
1 m/s					1,3	1,8

- DISC≤1 : agréable
- 1<DISC≤2 : légèrement désagréable
- 2<DISC≤3 : désagréable
- 3<DISC≤4 : très désagréable

4.5.2 Indice d'inconfort lié au courant d'air PD

La figure 21 représente le pourcentage d'insatisfait lié à la présence d'un courant d'air en fonction de la température et de la vitesse d'air, l'humidité n'ayant aucune influence sur ce paramètre. Il faut noter que dans le calcul de cet indice, le taux de turbulence intervient, celui-ci étant rarement connu, il a été fixé à 40%.

On remarque donc que les vitesses d'air sont d'autant mieux perçues (faible pourcentage d'insatisfait) que la température est élevée. Ceci se traduit par des pentes décroissantes d'autant plus importantes que la vitesse d'air est élevée.

Des vitesses d'air importantes peuvent être mises en œuvre à condition que la température intérieure soit relativement élevée.

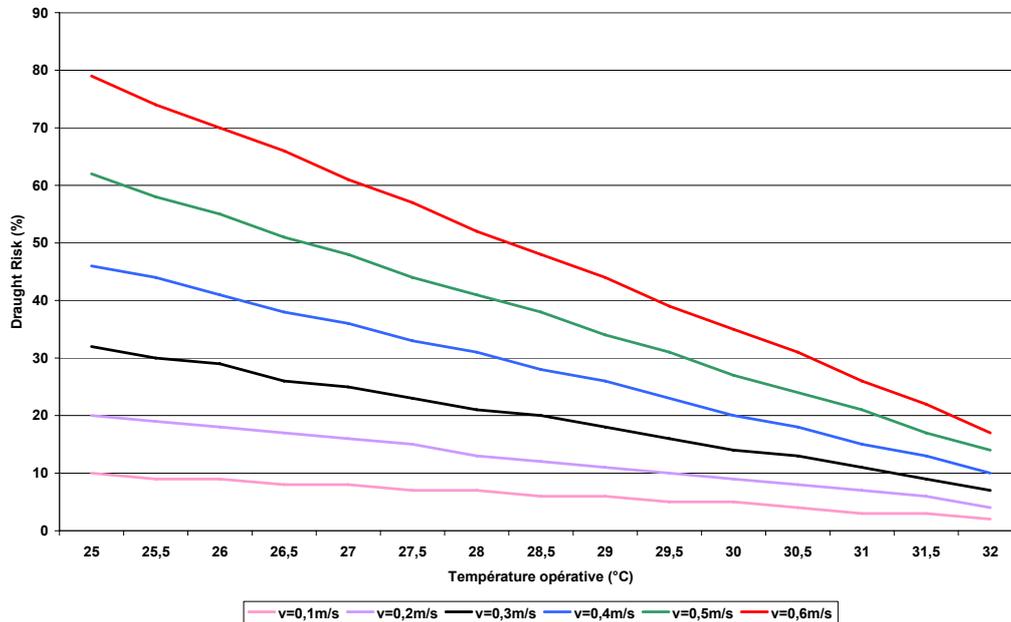


Figure 21: Evolution du PD en fonction de la température ambiante pour diverses vitesses d'air

4.5.3 Indice de confort PMV

Le Predicted Mean Vote (PMV) est l'indice le plus couramment utilisé pour interpréter le confort thermique. S'échelonnant de -3 (très froid) à +3 (très chaud), il permet d'évaluer si l'individu se trouve dans une ambiance froide ou chaude. Une valeur de PMV égale à 0 représente la thermo neutralité, et la norme fixe les valeurs acceptables entre -0.5 et +0.5.

Nous réalisons une étude de sensibilité du PMV en fonction de la température, de l'humidité et de la vitesse d'air.

On remarque que le PMV est une fonction croissante de la température et de l'humidité (cf. figure 22 et 23). C'est-à-dire qu'en climat chaud, l'inconfort est d'autant plus important que ces paramètres sont élevés. L'humidité a cependant un impact largement moindre que la température sur la variation de cet indice : pourtant l'humidité joue un rôle particulièrement important sur le processus de sudation.

La vitesse d'air quant à elle permet de se rapprocher de la thermo neutralité à partir du moment où le PMV est positif. Cependant il apparaît que cette amélioration du confort est d'autant plus faible que les températures sont élevées.

Il faut noter que cet indice représente plutôt un écart aux conditions idéales, qu'il ne prend pas en compte les phénomènes de thermorégulation et qu'il est une simple indication au-delà de 1.5 ou en deçà de -1.5. En effet les pertes par évaporation dans les équations ne sont fonction que de l'activité, car elles correspondent aux pertes que devrait avoir un sujet ayant une certaine activité pour être à la thermo neutralité. La construction de cet indice n'a pas abordé les conditions chaudes et humides il ne peut donc raisonnablement pas être utilisé dans ce domaine.

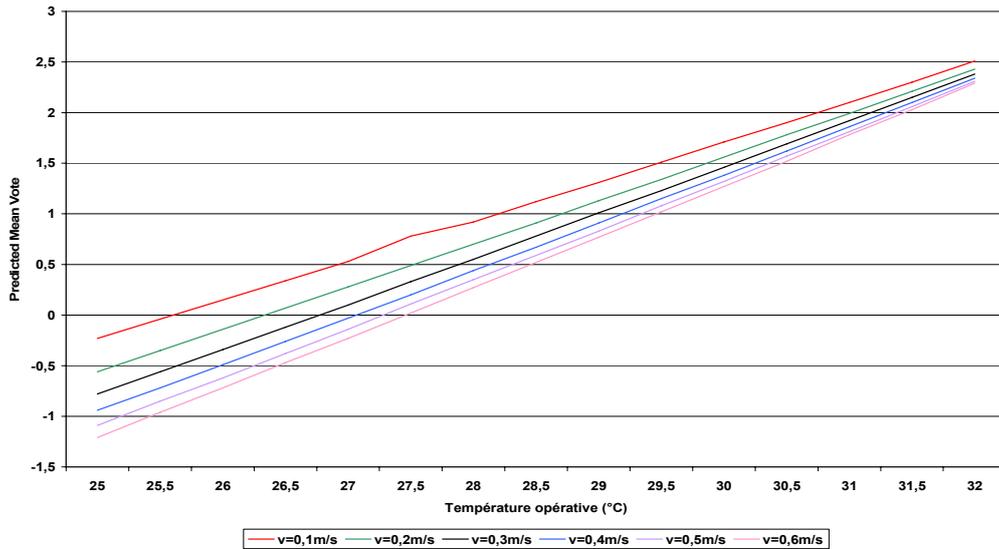


Figure 22: Evolution du PMV en fonction de la température et de la vitesse d'air (HR=70%)

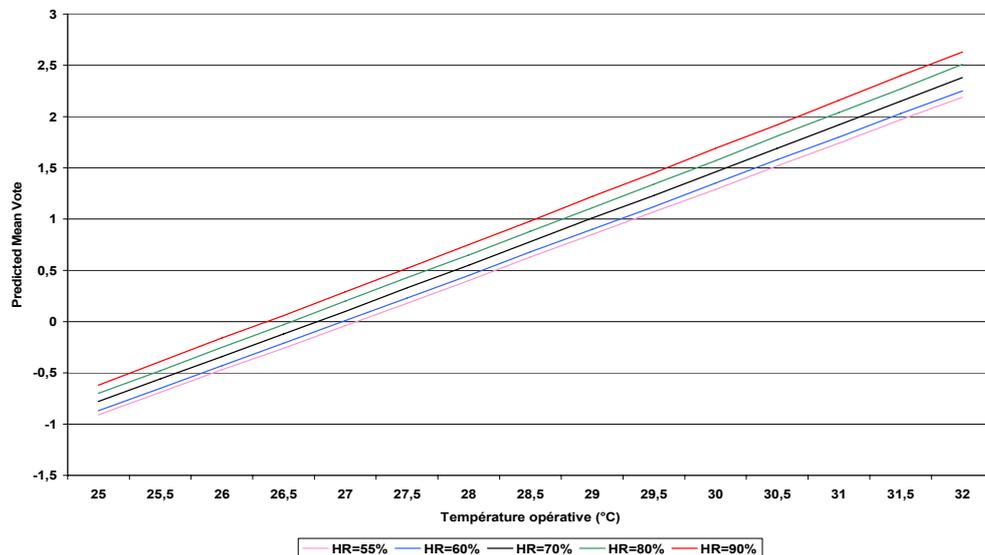


Figure 23 : Evolution du PMV en fonction de la température et de l'humidité (V=0.3 m/s)

4.5.4 Effective Temperature Index ET*

La température effective est la température d'un environnement standard (HR=50%, $v < 0.15$ m/s, $T_a = T_r$) qui induirait les mêmes effets (mouillure et température cutanée, pertes de chaleur cutanées) que dans l'environnement réel étudié, c'est en fait une température équivalente d'échange. Cet indice varie principalement avec l'humidité et la température. Il ne dépend que très peu de la vitesse de l'air. Il nous renseigne cependant sur le caractère chaud et humide (ou froid et sec) de l'environnement.

Le tableau 4 permet d'illustrer la variation de cet indice:

Tableau 4: ET* suivant différentes hypothèses de température et d'humidité relative, v = 0.5 m/s

	50%	60%	70%	80%	90%	100%
25 °C	25,0	25,2	25,3	25,5	25,6	25,8
26 °C	26,0	26,2	26,3	26,5	26,7	26,8
27 °C	27,0	27,2	27,4	27,5	27,7	27,9
28 °C	28,0	28,2	28,4	28,7	29,1	29,7
29 °C	29,0	29,3	29,7	30,2	30,8	31,8
30 °C	30,0	30,4	31,0	31,7	32,6	33,9
31 °C	31,0	31,5	32,2	33,2	34,4	36,2
32 °C	32,0	32,7	33,6	34,8	36,4	38,7

	In Iso
	too humid
	warm+too humid
	warm

Si la température d'ambiance est 30°C avec 80% d'humidité, la température effective est égale à 31.7°C. C'est à dire que la mouillure et température cutanée ainsi que les pertes thermiques au niveau de la peau sont les mêmes dans un environnement à (30°C ; 80%) qu'à (31.7°C ; 50%). On observe donc une augmentation de ET* de 1,7°C lorsque l'humidité augmente de 50 à 80%.

On constate que l'impact de l'humidité sur l'évolution de cette température effective est d'autant plus important que la température est élevée. L'effet est largement amplifié lorsque l'humidité relative dépasse 80%.

La vitesse de l'air n'influence que très peu la température effective : on remarque que chaque augmentation de 1 m/s permet de diminuer d'un dixième de degrés cet indice.

Etant donné que cet indice dépend peu de la vitesse d'air mais permet de prendre en compte l'influence de l'humidité sur la perception thermique, il peut être intéressant de le coupler au calcul du pourcentage d'insatisfait lié à un courant d'air : ce dernier serait calculé non plus avec la température de l'air mais avec la température effective. Ce nouvel indicateur permettrait de relier l'impact de ces différents paramètres sur le confort.

4.5.5 Vers d'autres indices

Le tableau 5 est une liste non exhaustive d'indices et indicateurs permettant de juger la qualité d'une ambiance thermique ou de la sensation ressentie. On peut classer ces indicateurs en quatre grandes catégories, tel que le code de couleur utilisé, et qui sont les suivantes :

- Les indices de confort, représentés en bleu permettent de classer sur une échelle bien définie la qualité d'une ambiance et prévoir ainsi un pourcentage d'insatisfait lié à l'inconfort estimé.
- Les indices de sensations, représentés en jaune, sont calculés à partir de données physiologiques ou climatiques. Ils permettent d'établir un jugement de sensation thermique.
- Les « températures équivalentes », représentés en orange, permettent d'évaluer l'impact d'une donnée sensible (humidité, vitesse d'air...) sur la température de l'air.
- Les données physiologiques exploitables, représentés en rose, sont déterminées à l'aide de modèle numérique de thermorégulation physiologique.

Tableau 5: indices et indicateurs d'ambiance et de confort

Nom	unité ou plage de valeurs	Dépend de									Formulation/définition/commentaires	Sources	
		Tair	Tmrt	HR	Pv	v	Tu	M	Icl	Données physiologiques			
Predicted Mean Vote, PMV	de -3 à +3	*	*	*	*	*	*	*	*	*		Formulation issue du bilan thermique du corps. Nécessite la connaissance de toutes les variables climatiques et individuelles. Un PMV égal à 0 revient à dire que le confort est possible et que le corps est dans la thermo neutralité.	Fanger
Thermal Sensation Vote, TSV	indice négatif ou positif	*	*	*	*	*	*	*	*	*		$1,33*PMV-1,61$, plusieurs corrélations sont mise en place sur base de votes et d'enquêtes. Elles permettent d'adapter le PMV aux conditions in situ. Permet de tenir compte que le PMV sur estime la sensation de chaud en climat tropical.	Feriadi Feriadi. et Nyuk Hien Wong
Pourcentage d'insatisfait lié au PMV, PPD	%	*	*	*	*	*	*	*	*	*		$100-95*exp(-0,03353*PMV^4+0,2179*PMV^2)$ Directement calculé à partir du PMV, il permet de déterminer le pourcentage d'insatisfait. Si le PMV est compris entre -0,5 et +0,5, alors le PPD est inférieur à 10%	Fanger
Indice Discomfort, DISC	de 0 à 4	*			*	*			*	*		$3,9338*w+0,0158*DS-0,3348$ Au dessus de 1, l'individu est supposé être en inconfort.	CNRS
Pourcentage d'insatisfait lié au DISC, IND	%	*			*	*			*	*		$racine(((w-0,06)^2/0,19)+((DS-50)^2/200))$. Directement lié aux même variables que DISC.	Fauconnier R. Guillemard P. et Grelat A.
Draft Risk, DR	%	*			*	*						$((34-Ta)(Va-0,05)^{0,62})^{0,37}*v^{*Tu+3,14}$. Valable pour des vitesses comprises entre 0,05 et 0,4 m/s et une turbulence (difficile à définir) entre 0 et 70%. Température entre 20 et 26 °C	Fanger
Percentage of Satisfied, PS	%	*	*		*							$1,13*racine(Top)-0,24*Top+2,7*racine(v)-0,99*v$. PS représente le pourcentage de gens satisfaits de la vitesse d'air. Les gens doivent avoir la possibilité de moduler cette variable	ASHRAE Comfort Tool
Indice de sensation thermique, S	de -3 à +3	*	*	*	*	*						$0,219*Top+0,012*RH-0,547*Va-5,83$. Valable pour une activité spécifique (école) dans des bâtiments naturellement ventilés. La tenue vestimentaire n'apparaît pas dans le calcul car supposée fonction de la température opérative. Ces formules sont établies en supposant que les variables en question (Top, HR et Va) sont les variables sensibles. Elles sont adaptées à un cas particulier.	Antonio Augusto de Paula Xavier
Percentage of dissatisfied, I	%	*	*	*	*	*						$18,94*S^2-0,24*S+25,41$. Valable pour une activité spécifique (école) dans des bâtiments naturellement ventilés. La tenue vestimentaire n'apparaît pas dans le calcul car supposée fonction de la température opérative. Ces formules sont établies en supposant que les variables en question (Top, HR et Va) sont les variables sensibles. Elles sont adaptées à un cas particulier.	Antonio Augusto de Paula Xavier
Sensation Thermique, TS	échelle de 0 à 7 pouvant dépasser 7	*	*	*	*	*						$0,151*Ta+0,010*RH-8,371 (Ta=Tmrt, en °F) ou 0,245*Ta+0,248*p-6,475$. Ces formules sont établis en supposant que les variables en question (Top, HR et Va) sont les variables sensibles. Elles sont adaptés à un cas particulier.	Rohles F. et Nevins R.
Sensation Thermique positive, TS+	indice positif (de plus en plus chaud)	*	*	*	*	*			*	*		$(5-6,56*(Pa-0,5))*\epsilon ws; \epsilon ws=(ws-0,06)/0,94$. Nécessite la connaissance de la mouillure cutanée.	Azer N.Z. et Hsu S.
Sensation Thermique négative, TS-	indice négatif (de plus en plus froid en valeur absolue)	*	*	*	*	*			*	*		$(-1,46\epsilon vc+3,75*\epsilon vc^2-6,19*\epsilon vc)$ $\epsilon vc=(kso-ks)/(kso-ks--)$. Les ks représentent les conductances globales de la peau (ks) à neutralité (kso) et en conditions très froides (ks--)	Azer N.Z. et Hsu S.
Sensation of Warmth, S	plus S est petit plus la sensation de chaud est grande	*	*	*	*	*						$11,16-0,0556*ta-0,0538*tmrt-0,0372*Pv+0,00144*racine(v)*(100-ta)$. Attention aux unités: ta et tmrt s'expriment en degrés fahrenheit, Pv en millimètre de mercure et v en pieds par minute	K.C.Parson
Equivalent temperature index, teq	°C	*	*	*	*	*						$0,522*ta+0,478*tmrt-0,21*racine(v)*(37,8-ta) ou 0,55*Ta+0,45*Tmrt+(36,5-Ta)*(0,24-0,75*racine(v))/(1+Icl)$. Ajuste la température de l'air en fonction de la vitesse de l'air et de la température de rayonnement.	K.C.Parson, Victor CANDAS
Temperature équivalente, teq	°C	*	*	*	*	*						C'est la température d'une enceinte isotherme ayant une vitesse d'air nulle, dans laquelle un individu échangerait la même quantité de chaleur sensible, par convection et par rayonnement, que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve (mais avec une vitesse non nulle). Elle peut se calculer soit par des formulations empiriques (voir equivalent temperature index) ou en effectuant les bilans thermiques dans les deux enceintes. Elle peut ensuite être utilisée pour le calcul du PMV ou d'autres indices ne prenant guère en compte la vitesse d'air.	K.C. Parson
Temperature effective, ET*	°C	*	*	*	*	*			*	*		C'est la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50% d'humidité relative, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve (et où l'humidité est différente). Elle peut ensuite être utilisée pour le calcul du PMV ou d'autres indices ne prenant guère en compte l'humidité.	Gagge
Température effective standard, SET	°C	*	*	*	*	*			*	*		Le SET est équivalent au ET* avec pour seule différence qu'il est standardisé, c'est-à-dire que sa tenue vestimentaire est adapté à son activité. Ce SET permet d'établir une échelle de sensation.	Gagge
Température de peau et centrale, Tsk et Tcr	°C										*	TRIM défini des seuils pour ces données en fonction de l'activité et de la tenue vestimentaire.	Galeou
Mouillure cutanée, w	de 0,06 à 1 (1 étant pour un individu plongé dans l'eau)	*			*	*			*	*		$Esw/E_{max}=ha*regsw/(Hev*Adu*(Psk-Pv))$; Des valeurs seuils doivent être établies	Fauconnier R. Guillemard P. et Grelat A.
Rendement évaporatoire, e	varie de 0 à 1	*			*	*			*	*		$1-0,42*exp(-6*(1-w))$	Fauconnier R. Guillemard P. et Grelat A.
Débit sudoral, DS	g/l	*			*	*			*	*		$Esw/(0,68*e)$; des valeurs seuils doivent être établis	Fauconnier R. Guillemard P. et Grelat A.

Conclusion

Cette étude préliminaire permet de faire le point sur quelques méthodes d'évaluation du confort thermique et plus particulièrement sur les outils courants. Il apparaît que des indices physiologiques tels que la mouillure cutanée ou le débit sudoral soient des données convaincantes, dans la mesure où des valeurs limites sont définies.

L'interprétation des indices tels que le pourcentage d'insatisfaits lié à un courant d'air ou l'indice DISC (lié non seulement au débit sudoral mais aussi à la mouillure cutanée) reste cependant indispensable même s'ils ne permettent pas la prise en compte des différents paramètres (le PD par exemple ne dépend pas de l'humidité).

L'adaptation non seulement des seuils de confort mais aussi du calcul de ces indices est indispensable. Une alternative acceptable introduite par Gan est de calculer plusieurs indices, chacun sensible à une variable bien précise (soit l'humidité, soit la température, soit la vitesse d'air), et de définir un indice égal au maximum de ceux calculés : cette méthode du facteur limitant permettrait de déterminer quelle variable semble la plus sensible.

Par la suite, le travail consistera à effectuer des simulations dynamiques du bâtiment étudié afin de déterminer les données climatiques intérieures et de pouvoir évaluer dans quelle mesure les techniques passives de rafraîchissement sont suffisantes.

Il est tout à fait envisageable d'adapter les formulations empiriques, notamment sur la température de confort issue de la démarche adaptative, ainsi que les valeurs limites, tels que la mouillure cutanée ou le débit sudoral maximum, le PMV etc, initialement conçues pour les climats tempérés au climat tropical.

Des hypothèses seront donc émises et devront être testées sur terrain.

Liste des figures

Figure 1 : Système de régulation du corps humain.....	4
Figure 2: Température intérieure recommandée en fonction de la température extérieurs moyenne mobile. Résultats du SCATs, level 1.....	8
Figure 3: Température intérieure recommandée en fonction de la température extérieurs moyenne mobile. Résultats du SCATs, Level 2.....	8
Figure 4: Tenue vestimentaire préférée en fonction de la température moyenne mobile. Résultats du SCATs, Level 1	10
Figure 5 : Approche adaptative sur la température de confort.....	10
Figure 6: Variation de la température et de l'humidité à La Réunion station météorologique de Saint Pierre (Ligne Paradis).....	11
Figure 7 : Comparaison des moyennes journalière et mobile des températures extérieures pour une demi-vie d'une demi-semaine durant 3 mois de la saison humide	12
Figure 8: Densité de flux solaire incident sur une surface horizontale	12
Figure 9: Variation annuelle de la vitesse du vent	13
Figure 10 : Comparaison des températures de confort pour un bâtiment naturellement ventilé et un bâtiment climatisé	14
Figure 11 : Mécanisme de sudation	15
Figure 12 : Evolution annuelle de l'humidité relative et de la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant	16
Figure 13 : Exemple d'interface graphique du logiciel de l'ASHRAE	17
Figure 14: Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes vitesses d'air (HR=60%)	18
Figure 15 : Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes vitesses d'air (HR=80%)	18
Figure 16: Evolution de la mouillure cutanée en fonction de la température opérative pour différentes humidités (v= 0.4m/s)	19
Figure 17: Evolution du débit sudoral sous différents climats.....	19
Figure 18: Evolution de la température cutanée en fonction du temps pour diverses conditions climatiques ..	20
Figure 19: Evolution de la mouillure cutanée pour diverses conditions climatiques	21
Figure 20: Rendement de sudation en fonction de la température d'ambiance pour différentes humidités relatives à v=0.1m/s.....	21
Figure 21: Evolution du PD en fonction de la température ambiante pour diverses vitesses d'air.....	23
Figure 22: Evolution du PMV en fonction de la température et de la vitesse d'air (HR=70%)	24
Figure 23 : Evolution du PMV en fonction de la température et de l'humidité (V=0.3 m/s)	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : Température intérieure recommandée en fonction de la température extérieure moyenne mobile	9
Tableau 2 : Tenues vestimentaires préférées en fonction de la température extérieure moyenne mobile.....	9
Tableau 3: Evolution de l'indice DISC sous différentes hypothèses.....	22
Tableau 4: ET* suivant différentes hypothèses de température et d'humidité relative, v = 0.5 m/s	25
Tableau 5: indices et indicateurs d'ambiance et de confort	26

Bibliographie

ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS (2005). SI Editions, supported by ASCHRAE research., (404), 8.1-8.29

ASHRAE Thermal Comfort Tool (1997)

Azer N.Z. et Hsu S. (1977) The prediction of thermal sensation from a simple model of human physiological response. ASHRAE Trans., 83, 88-102

Brager G.S. and de Dear R.J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. Energy and Buildings, 27, 83-96

Endravadan Mala (2006) Thèse de doctorat. Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation basée sur la sensation thermique humaine. Impact sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. Université de Toulouse, UPS.

Fanger P.O. (1970) Thermal comfort. McGraw Book Hill Co., USA

Fauconnier, Guillemard et Grelat (1987) Algorithmes des simulateurs du comportement thermique des bâtiments BILGA et BILBO. Annales de l'I.T.B.T.P.n°458

Feriadi et Nyuk Hien Wong (2004) Thermal Comfort for Naturally ventilated Houses in Indonesia. Energy and Buildings.

Galeou M. (1991). Thèse de doctorat. La sensation thermique de l'homme dans son habitat: des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations. Université de Toulouse, UPS.

Gan G. (1994). Numerical Method for a full assessment of indoor thermal comfort, Indoor Air 4.

Gaye Salif (1998) Thèse de doctorat. Contribution à l'étude du confort thermique en climat tropical humide : Influence de la mouillure cutanée. Université Cheikh Anta Diop, école supérieure polytechnique de Dakar.

Humphreys M.A. 1978a. Outdoor temperature and comfort indoors. Building research and practice, journal CIB, 6(2), 92-105

Humphreys M.A. 1978b. The influence of season and ambient temperature on human clothing behaviour. Proceedings of first International Indoor Climate, eds P.O.Fanger and Valbjörn, 699-713, Copenhagen

Liebard Alain & De Herde André (2005) Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Editions le Moniteur.

Moujalled Bassam (2007) Thèse de doctorat. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. INstitut des Sciences Appliquées de Lyon.

Nicol J.F. and McCartney K. (2000). Smarts control and thermal comfort project. Oxford Brookes University, UK.

Novakovic K. And Holmberg S. (2004). The influence of air speed and turbulence intensity on thermal comfort in vehicles. RoomVent 2004, 9th international conference in University of Coimbra.

Parsons K.C. (1993) Human Thermal Environments. The effects of hot, moderate and cold Environments on Human Health, comfort and performance. The principles and the Practice. Taylors and Francis.

Rohles F. (1973). The revised modal comfort envelope. ASHRAE trans., 79, 52-59

Rohles F. Et Nevins R. (1971) The nature of thermal comfort for sedentary man. ASHRAE Trans., 77(1), 240-246

Theillier Françoise (1989) Thèse de doctorat. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Université de Toulouse, UPS.

Climat de La Réunion :

<http://lpbs.univ-reunion.fr/grandsprojets/meteo/telecharg.php>

Human Heat Balance : Richard de Dear, University of Sydney

<http://atmos.es.mq.edu.au/~rdedear/pmv/>



Université
Paul Sabatier
TOULOUSE III

LABORATOIRE
PHASE

Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement

Contribution Laboratoire PHASE

Université de Toulouse

Octobre 2009

Frédéry LAVOYE, Françoise THELLIER, Sandra SPAGNOL

Campagne de mesures : 24 Novembre à 19 Décembre 2008



Ener Pos

**Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception
pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud : DOM/TOM**

PREBAT 2006

ADEME



Contribution Laboratoire PHASE - Université de Toulouse
Frédéry LAVOYE, Françoise THELLIER, Sandra SPAGNOL
Campagne de mesures : 24 Novembre à 19 Décembre 2008

Sommaire

Introduction.....	1
1. Protocole initial.....	1
1.1 Essai I : Études longitudinales.....	2
1.1.1 Objectifs.....	2
1.1.2 Matériels et moyens mis en œuvre.....	2
1.1.3 Description des phases de l'expérimentation.....	2
1.2 Essai II : cartographie des conditions climatiques intérieures du bâtiment.....	3
1.2.1 Objectifs.....	3
1.2.2 Matériel et moyens mis en œuvre.....	3
1.2.3 Description de l'expérimentation.....	3
1.3 Essai III : Etudes statistiques.....	4
1.3.1 Objectifs.....	4
1.3.2 Matériels et moyens mis en œuvre.....	4
1.3.3 Description de l'expérimentation.....	5
2. Problèmes et difficultés rencontrés, solutions envisagées.....	5
2.1 Livraison et occupation du bâtiment.....	5
2.2 Problèmes techniques et technologiques de l'essai II.....	6
2.3 Contraintes climatiques.....	6
2.4 Adaptation des questionnaires.....	6
2.5 Poursuite de la campagne de mesures par le LPBS.....	7
2.6 Remarques complémentaires.....	8
3. La campagne de mesures.....	9
3.1 Essai III : étude statistique en salles de cours.....	9
3.1.1 Déroulement et description de l'expérimentation.....	9
3.1.2 Présentation générale et synthétique des manipulations, premières conclusions.....	11
3.1.3 Mesures climatiques.....	13
3.1.4 Résultats des questionnaires.....	20
3.1.5 Etude statistique.....	27
3.2 Essai I : étude longitudinale dans les bureaux.....	36
3.2.1 Déroulement et description de l'expérimentation.....	36
3.2.2 Etude avec F. Lavoye.....	36
3.2.3 Etude avec les doctorants.....	40
Conclusion.....	42
Table des figures et tableaux.....	43
Annexes.....	44
<i>Annexe 1 : essai II, maillage des pièces pour établir les cartographies.....</i>	<i>44</i>
<i>Annexe 2 : essai II, exemple de grilles de mesures.....</i>	<i>45</i>
<i>Annexe 3 : Caractéristiques techniques de l'appareil multifonction VT300 – KIMO.....</i>	<i>46</i>
<i>Annexe 4 : Principales caractéristiques du kit BABUC A/M,.....</i>	<i>47</i>
<i>Annexe 5 : Questionnaire à l'attention des enseignants chercheurs, essai I.....</i>	<i>51</i>
<i>Annexe 6 : Questionnaire à destination des élèves, Essai III.....</i>	<i>55</i>
<i>Annexe 7 : Prise en compte d'une pause éventuelle dans le questionnaire de l'Essai III.....</i>	<i>59</i>
<i>Annexe 8 : Notes et Observations de l'expérimentateur.....</i>	<i>60</i>

Introduction

Le projet EnerPos s'inscrit entièrement dans une démarche de développement durable en s'appuyant sur la conception du premier bâtiment à énergie positive des DOM/TOM. Le défi majeur étant de réduire de façon drastique les besoins énergétiques du bâtiment. La principale difficulté réside alors dans la proposition d'un bâtiment procurant des conditions ambiantes confortables avec une demande largement réduite en énergie.

L'objectif de la campagne de mesures est de valider si la conception du bâtiment et le dimensionnement des équipements permet d'atteindre les conditions climatiques internes de confort thermique prévues par l'étude. L'expérimentation doit permettre de collecter les informations nécessaires à l'interprétation de l'ambiance thermique et sera couplée à une enquête auprès des utilisateurs. A l'issue de la campagne, les résultats seront confrontés aux simulations dynamiques réalisées avec le logiciel TRNsys et permettront de valider non seulement la plate forme et la méthodologie de simulation, mais également des indicateurs de confort thermique adaptés au climat tropical humide de La Réunion.

Cette campagne a pour finalité scientifique d'établir un lien entre les paramètres physiques, les jugements thermo-sensoriels et la régulation comportementale des usagers. Pour ce faire, du matériel de mesures permettra de suivre l'évolution dans le temps des données climatiques intérieures (température d'air, température moyenne de rayonnement, vitesse d'air, humidité relative) et la répartition spatiale de ces données dans différentes pièces. Enfin, des questionnaires à destination des occupants d'évaluer leur sensation thermique et de visualiser l'usage qu'ils font des équipements du bâtiment.

La campagne de mesures a été conçue en Septembre 2008 et prévue pour se dérouler le plus tard possible dans la période chaude en tenant compte d'autres impératifs sur le planning. Pour des raisons contractuelles, la campagne devait se faire avant fin 2008. De fait les 4 semaines de mesures prévues se sont déroulées du 24 Novembre au 19 Décembre 2008 (début des vacances universitaires).

Nous exposerons tout d'abord le protocole initialement prévu, méthodologie de mesure, planning, ... De fait à cause du retard dans l'aménagement du bâtiment, le planning prévu n'a pas pu être respecté. Donc dans ce qui suit nous présentons : les problèmes rencontrés sur le terrain et solutions de remplacement, puis enfin la description de la campagne réalisée. La dernière partie est consacrée à l'analyse des résultats.

1. Protocole initial

La campagne de mesures est prévue pour s'échelonner sur 4 semaines pour couvrir trois types d'objectifs :

- I : liens entre comportement, sensation et évolution dans le temps des paramètres climatiques : étude longitudinale.
- II : répartition spatiale des données climatiques dans différents types de pièces et sous différents scénarii d'utilisation des équipements ;
- III : liens entre sensation et évolution temporelle des paramètres climatiques avec si possible répartition spatiale de ces données : étude statistique.

En parallèle de ces 3 phases, la mesure des conditions climatiques extérieures devra être réalisée et également une mesure de l'éclairement intérieur. Ceci afin de pouvoir le cas échéant expliquer des irrégularités dans les mesures thermiques ou comprendre un certain comportement de l'occupant.

Pour chaque expérimentation, il est prévu (cf. annexe):

- des fiches de relevé d'observations ;
- un protocole du déroulement dans le temps;
- un questionnaire spécifique pour les occupants.

1.1 Essai I : Études longitudinales

1.1.1 Objectifs

Cette phase consiste à évaluer le comportement de l'occupant dans son espace de travail et l'impact sur les jugements thermiques. Cette évaluation sera mise en relation avec la mesure de l'évolution temporelle des conditions climatiques intérieures. Elle se déroulera dans différents bureaux d'enseignants chercheurs et ce durant plusieurs jours, idéalement une semaine. Les différents objectifs de cette première phase sont :

- évaluer l'ambiance thermique en terme de jugements subjectifs ;
- évaluer le comportement de l'occupant notamment sur l'utilisation des équipements mis à sa disposition (climatisation, jalousies, ventilateurs...) et son impact sur la sensation thermique ;
- évaluer l'impact des conditions climatiques extérieures sur les conditions climatiques intérieures ;
- mettre en relation conditions climatiques, sensations et comportement.

1.1.2 Matériels et moyens mis en œuvre

Pour atteindre les objectifs fixés, deux outils sont nécessaires :

- les mesures des variables physiques, permettant la mesure des données climatiques intérieures ;
- les questionnaires, permettant de recueillir des informations sur le comportement et les jugements des usagers.

• Mesures physiques

Le matériel de mesure permet de récolter simultanément et en continu sur une période prédéfinie l'évolution des variables thermiques indispensables. Ce matériel est mis en place en début de manipulation et reste fixe durant la période de mesure. Le pas de temps des mesures est fixé à 1 minute et la durée à 5 jours idéalement.

Le "kit confort Babuc ®" est utilisé. Il s'agit d'un trépied sur lequel sont disposés différents capteurs et le boîtier d'acquisition de données. Toutes les mesures peuvent ensuite être transférées sur ordinateur et traitées via un logiciel fourni avec le matériel. Les différents capteurs sont :

- un anémomètre à fil chaud permettant la détermination de la vitesse et du taux de turbulence de l'air ;
- un thermomètre à globe noir mesurant la température de globe qui permet le calcul de la température moyenne de rayonnement ;
- une sonde psychrométrique à ventilation forcée permettant la mesure instantanée de la température sèche (bulbe sec), de la température humide (bulbe humide) et donc de l'humidité relative de l'air.

• Questionnaires aux occupants

En ce qui concerne le comportement et les jugements des usagers, l'outil est développé au sein du laboratoire et se présente sous la forme d'un questionnaire (cf. annexe). Ce dernier répertorie non seulement des informations relatives à la physiologie (taille, poids, sexe ...), mais également à la tenue vestimentaire, les dernières activités menées et principalement à la perception thermique et son comportement vis-à-vis des équipements disponibles. Une partie des informations n'est saisie qu'une fois au début de l'expérimentation. La suite du questionnaire est partitionnée en période d'occupation. Si l'occupant quitte son bureau plus d'une heure, une nouvelle période d'occupation recommence à son retour. Durant chaque période d'occupation, l'utilisateur devra répondre à son entrée (sur son impression générale, l'état des équipements, sa tenue vestimentaire...), durant l'occupation (sur son comportement) et à sa sortie (sur son impression générale durant toute la période). Ce questionnaire est disponible en annexe. Il est imprimé sous la forme d'un livret de bord et remis à l'utilisateur après discussion sur la façon de saisir les informations.

1.1.3 Description des phases de l'expérimentation

- Choisir des bureaux susceptibles d'être les plus représentatifs ;
- Choisir des occupants de ces locaux volontaires à cette expérimentation ;
- Fixer un rendez-vous avec l'un d'eux et installer le matériel de mesures ;
- Présenter le livret de bord et expliquer la démarche à suivre ;
- Installer et paramétrer le matériel (durée et pas d'acquisition), vérifier le bon fonctionnement des capteurs ;
- Démarrer la mesure ;
- Repasser régulièrement (1 fois par jour) dans le bureau idéalement lorsque l'utilisateur est présent pour vérifier le bon déroulement de l'expérimentation (mesures+questionnaire), éventuellement décharger la mémoire interne de la chaîne d'acquisition ;

1.2 Essai II : cartographie des conditions climatiques intérieures du bâtiment

1.2.1 Objectifs

Cette phase consiste en la mesure des données climatiques intérieures pour établir une cartographie dans les pièces étudiées. L'objectif est double :

- Evaluer l'homogénéité des paramètres mesurés dans l'espace considéré sous différents modes de fonctionnement des équipements. Les espaces considérés comprendront au minimum une salle informatique, une salle de cours, un bureau et un espace de circulation ;
- Dans chaque local, évaluer les profils de vitesse d'air aux alentours des ventilateurs et des ouvertures (jalousies). Ceci dans le but d'établir des corrélations pouvant être appliquées dans la plate forme de simulations dynamiques.

Le confort thermique est également lié à l'homogénéité climatique, largement dépendante du bon dimensionnement des équipements. En effet, les études thermiques supposent la majeure partie du temps des paramètres climatiques moyens en admettant que leurs variations sont suffisamment faibles pour que l'on puisse considérer l'environnement comme homogène et stationnaire. Si ce n'est pas le cas, les conditions de confort varient d'un emplacement à un autre et dans le temps : les études sont alors incomplètes et il faut analyser la situation plus en détail.

1.2.2 Matériel et moyens mis en œuvre

La manipulation consiste en :

- La mesure de la vitesse, de l'humidité relative et de la température de l'air en différents endroits de chacune des pièces
- La visualisation des températures de surfaces intérieures et extérieures (caméra Infra Rouge)
- La détermination du champ d'action des ventilateurs et des jalousies (mesure de vitesse d'air)

Afin de mener au mieux cette campagne de mesures, du matériel mobile est indispensable. On préfère ainsi utiliser des sondes légères, ergonomiques, à affichage numérique et permettant la mesure simultanée de plusieurs paramètres. Les sondes KIMO[®] sont tout à fait adaptées (cf. fiches techniques en annexe). Elles permettent de connecter un thermo-hygromètre et des anémomètres à fil chaud ou à hélice. L'anémomètre à hélice est utilisé avant toute manipulation de fil chaud pour ne pas endommager celui-ci. La visualisation des températures de surface se fera avec une caméra infra-rouge.

Afin d'établir les différentes cartographies, Plusieurs exemplaires de plans des salles expérimentées sont nécessaires (cf. annexe).

Les emplois du temps des différents locaux permettent de pouvoir s'y rendre en dehors des horaires d'utilisation : les mesures se feront en limitant la perturbation humaine c'est-à-dire avant l'arrivée des premiers occupants et/ou après l'utilisation de la salle. Toutefois, en ce qui concerne la cartographie des bureaux, on supposera que la perturbation est faible.

Sans ces emplois du temps, cette phase devra se dérouler en parcourant le bâtiment et visualisant les pièces inoccupées. Si le temps disponible est trop faible (arrivée d'élèves) une cartographie dans l'état de la pièce sera effectuée en notant bien la configuration dans laquelle elle se trouve.

Une feuille de renseignement à remplir par l'expérimentateur sera nécessaire afin de noter les conditions dans lesquelles la manipulation s'effectue. Cette dernière est disponible en annexe.

1.2.3 Description de l'expérimentation

Les mesures des différents paramètres se font en dehors des heures d'occupation et en limitant au maximum l'influence de l'activité humaine. Dans le cas contraire, le profil d'occupation sera noté. On prend garde à effectuer ces mesures le plus rapidement possible afin d'être le moins dépendant de la durée de la manipulation, dans le cas où les variations temporelles peuvent être importantes, ce qui doit d'abord être vérifié : plus celles-ci sont importantes, plus le risque est grand que les mesures soient faussées.

- **Déroulement de l'expérimentation**
 - Récupération des emplois du temps des différentes salles du bâtiment ;
 - Répertoire les créneaux durant lesquels les salles ne sont pas occupées ;
 - Se rendre dans la salle au moment déterminé avec le matériel décrit précédemment ;
 - Pour chaque configuration suivante les mesures sont effectuées aux différents emplacements suivant un maillage horizontal (cf. annexe) et à 3 hauteurs successives (0,6 ; 1,2 et 1,8 m)). Chaque mesure est répertoriée dans un tableau (cf. annexe)

1. Fermeture des jalousies, extinction des brasseurs d'air et de la climatisation
2. Ouverture des jalousies,
3. Fermeture des jalousies, ventilateurs position 1
4. " " Ventilateurs position 2
5. " " Ventilateurs position 3
6. Ouverture des jalousies, ventilateurs position 1
7. " " Ventilateurs position 2
8. " " Ventilateurs position 3
9. Fermeture des jalousies, climatisation allumée (si présente), ventilateurs éteints
10. " " " " " Ventilateurs position 1
11. " " " " " Ventilateurs position 2
12. " " " " " Ventilateurs position 3

nb1 : il n'y a pas de système de climatisation dans les salles informatiques et les salles de cours. Pour ces typologies de salles, 8 configurations sont donc faites.

nb2 : La première cartographie des salles de cours et/ou informatiques peut se faire idéalement un weekend afin d'évaluer la durée de la manipulation.

nb3 : il est tout à fait envisageable de se rendre dans une pièce et d'établir la cartographie dans l'état où elle se trouve (mode de fonctionnement des systèmes) en prenant bien soin de noter cette configuration. Une telle démarche permet de ne pas s'astreindre du temps de réponse thermique des équipements et notamment celui de la climatisation. En outre, il semble plus réaliste d'effectuer ces mesures dans les conditions où le bâtiment est effectivement utilisé.

1.3 Essai III : Etudes statistiques

1.3.1 Objectifs

L'objectif principal est de relier les jugements thermiques des individus aux données physiques mesurées, c'est-à-dire déterminer les grandeurs physiques auxquelles les usagers sont les plus sensibles et dans quelles limites elles restent acceptables pour une majorité de la population sondée. Les résultats de cette enquête seront comparés aux indicateurs choisis en simulation dynamique.

Pour ce faire, nous collectons l'avis d'un maximum d'utilisateurs du bâtiment (les élèves en l'occurrence) pour obtenir une opinion moyenne de la sensation thermique. Cette méthode transverse se fera par saisie d'un questionnaire par élève en couvrant un maximum de créneau horaire. Couplée à des mesures, cette enquête devrait permettre d'établir des indicateurs de confort (fonction des paramètres climatiques) adaptés à ce type de bâtiment dans ce type de climat que l'on pourra confronter aux indicateurs utilisés dans les simulations : ils pourront alors être soumis à la plate forme de simulation d'ores et déjà construite.

L'enquête permettra de faire ressortir l'impact de la régulation comportementale et de quelle manière celle-ci s'effectue. Ces actions seront notées en direct pour évaluer dans quelles mesures elles sont mises en place.

Il peut être intéressant de réaliser des mesures plus précises avant et après l'enquête pour pouvoir estimer non seulement une éventuelle hétérogénéité (que l'on pourrait retrouver dans les questionnaires) mais également l'impact des apports internes sur la variation des paramètres climatiques. Ces mesures pourront être mises en parallèle avec les résultats des simulations dynamiques.

1.3.2 Matériels et moyens mis en œuvre

Pour atteindre les objectifs, le matériel suivant est nécessaire :

- Du matériel fixe capable de mesurer instantanément et en continu tous les variables climatiques;
- Du matériel mobile, pour déceler d'éventuelles hétérogénéités avant et après l'enquête ;
- Un outil permettant de recueillir des données relatives à la sensation et aux préférences des individus.

- **Mesures physiques**

- La sonde Babuc® convient à la mesure en continu durant toute la durée de la manipulation.
- Les sondes Kimo® permettent l'établissement d'une cartographie rapide avant et après la manipulation.

- **Perception thermique des occupants**

Un questionnaire est développé au sein du laboratoire PHASE et sera remis à chaque individu (cf. Annexe). Il permet de récolter les informations nécessaires à la détermination de la sensation perçue mais également des informations personnelles (physiologie, activité...) et préférences. Ce questionnaire sera couplé à une feuille de

renseignement remplie par l'expérimentateur, ceci afin de donner une brève description des conditions dans lesquelles la manipulation s'effectue.

1.3.3 Description de l'expérimentation

- Prendre contact avec l'enseignant qui se trouve dans la salle lors du créneau de mesure choisi. Le cas échéant, se rendre dans une salle que l'on sait occupée par un cours quelques minutes avant le début du cours pour éventuellement noter quelques points de mesures (hétérogénéité) ;
- Discuter avec l'enseignant des objectifs de l'expérimentation ainsi que de son déroulement ;
- Après avoir obtenu son accord, installer le trépied de mesures au centre de la pièce et après avoir l'avoir paramétrer, démarrer la mesure ;
- Présentation de l'expérimentation et des questionnaires aux élèves ;
- Distribution des questionnaires, le cours peut commencer. La première partie du questionnaire doit être remplie ;
- Durant le cours, remplir la feuille d'informations ; notes et observation de l'expérimentateur (cf. annexe) ;
- Si possible, prendre quelques mesures de températures, humidité, vitesse d'air en différents endroits de la pièce ;
- Quelques minutes avant la fin du cours, la dernière partie du questionnaire doit être remplie ;
- A la fin du cours, récupérer les questionnaires, éventuellement répondre aux interrogations des élèves et surtout, vérifier rapidement quelques éléments de réponse, notamment la position des personnes interrogées ;
- Enfin, établir une cartographie rapide, si le temps disponible le permet.

2. Problèmes et difficultés rencontrés, solutions envisagées

Le protocole précédent a été établi à Toulouse courant septembre 2008 pour préparer la mission de campagne de mesure, sans une connaissance exacte de l'état d'avancement de la livraison du bâtiment et sans avoir préalablement testé le réalisme technique des expérimentations. Il semble normal que certains ajustements et modifications plus ou moins lourds soient à faire. Les principales contraintes et difficultés rencontrées sont données ci-dessous, suivies des solutions de remplacement ou des conséquences.

Frédéry Lavoye ingénieur de recherche sur cette convention est partie en mission du 24 novembre au 19 décembre 2008, pour une campagne de mesure de 4 semaines dans le nouveau bâtiment à énergie positive de l'IUT de Saint Pierre. Une fois sur place un certain nombre de points sont apparus qui ne permettaient pas la mise en place du protocole prévu. Dans les paragraphes suivants, nous faisons un point sur les problèmes rencontrés puis les solutions alternatives qui ont été ou non mise en place.

2.1 Livraison et occupation du bâtiment

A la date de début de campagne, le bâtiment à énergie positive n'est pas officiellement livré par conséquent il n'est pas occupé ni même meublé. L'un des objectifs étant de réaliser une enquête de satisfaction auprès des usagers et utilisateurs du bâtiment, cette difficulté est majeure. Le mobilier des salles de cours et des bureaux des enseignants chercheurs a été livré dans le courant de la 3^{ème} semaine de la mission.

En ce qui concerne l'expérimentation n°1, enquête longitudinale (suivi de la même personne) dans les bureaux des enseignants chercheurs, les bureaux actuels étant climatisés, le lien avec le projet EnerPos est quasi inexistant ce qui pose un réel problème quant à pertinence de cette expérience. Après l'aménagement des locaux l'expérimentation n°1 a été réalisée même si celle-ci n'a pas pu se faire en suivant le protocole initial par manque de temps et d'enseignants chercheurs disponibles à emménager dans les nouveaux locaux. La situation est compliquée : le déménagement des enseignants devraient prendre plus de temps (difficultés d'organisation et d'ordre logistique), d'autant plus que l'accès à internet n'est pas opérationnel. A ce stade du projet, nous ne pouvons dire si cette expérimentation pourra être menée à son terme.

Les solutions face au problème de retard ont été de démarrer l'expérimentation n°3 dans des salles de TD de l'ancien bâtiment, dont la conception avoisine celle du bâtiment pilote : ventilation naturelle, brasseurs d'air, isolation toiture ... Après aménagement des locaux quelques séances de l'expé. n°3 ont été faites dans les nouveaux locaux. Puis le protocole a été transmis au LPBS par l'intermédiaire d'un étudiant de Master 2, Etienne Bernard, dans le cadre de son projet de fin d'études. L'inconvénient est la modification de la répartition des élèves dans leur salle d'enseignement. A l'issue de la mission du laboratoire PHASE, 3 créneaux de cours ont pu être réalisés dans le nouveau

bâtiment. Cependant dès la rentrée de Janvier 2009, Etienne Bernard a poursuivi l'expérimentation 3 dans les salles de cours du bâtiment pilote.

2.2 Problèmes techniques et technologiques de l'essai II

Il semble que le protocole prévu par PHASE dans le cadre de cette manipulation soit trop ambitieux. Il avait été prévu une cartographie climatique précise (maillage d'une vingtaine de points sur 3 hauteurs différentes) des températures, humidité et vitesses d'air ainsi que des températures de surface. Le temps de réponse des capteurs couplé au nombre de points de mesures ne permet pas de négliger la composante temporelle. Une telle cartographie nécessitait environ 1h et l'écart constaté entre chaque point pouvait être dû à l'évolution dynamique du climat intérieur. Cette expérimentation a été abandonnée dans sa complexité d'origine.

La solution consiste à effectuer des mesures de vitesses températures et humidité d'air et température de globe noir intérieures sous différents scénarii de fonctionnement des brasseurs d'air et des jalousies et de les mettre en parallèle avec les données climatiques extérieures. Cette expérimentation a été effectuée par E. Bernard durant les vacances de Décembre 2008 à Janvier 2009. L'idéal serait de disposer d'un nombre suffisant de capteurs pour les placer aux mailles initialement prévues et de visionner l'évolution des paramètres climatiques en fonction de leur position et sous diverses configurations. N'ayant pas suffisamment de matériel, un unique trépied de mesures est utilisé, celui du LPBS. Pour pouvoir recalibrer les résultats, une comparaison a été faite entre les mesures réalisées à l'aide du matériel de PHASE et celui du LPBS.

2.3 Contraintes climatiques

La mission devait idéalement se dérouler dans des conditions climatiques extérieures extrêmes, à savoir en période chaude, les pics de températures maximales ont lieu principalement en Janvier. Le mois de décembre est le début de cette période, mais a été choisi pour des raisons de délais contractuels. Les conditions climatiques extérieures durant la mission de PHASE ne traduisent pas le caractère extrême du climat tropical. L'évolution de la température extérieure mesurée par le LPBS durant les 4 semaines de la campagne de mesure (ci-dessous) montre que la température n'a jamais dépassé 30°C, que la nuit les températures sont passées en dessous de 20°C, l'écart moyen jours/nuit étant de 8 à 10°C, ce qui permet un rafraîchissement nocturne. Par contre l'Humidité relative reste assez élevée sur toute la période.

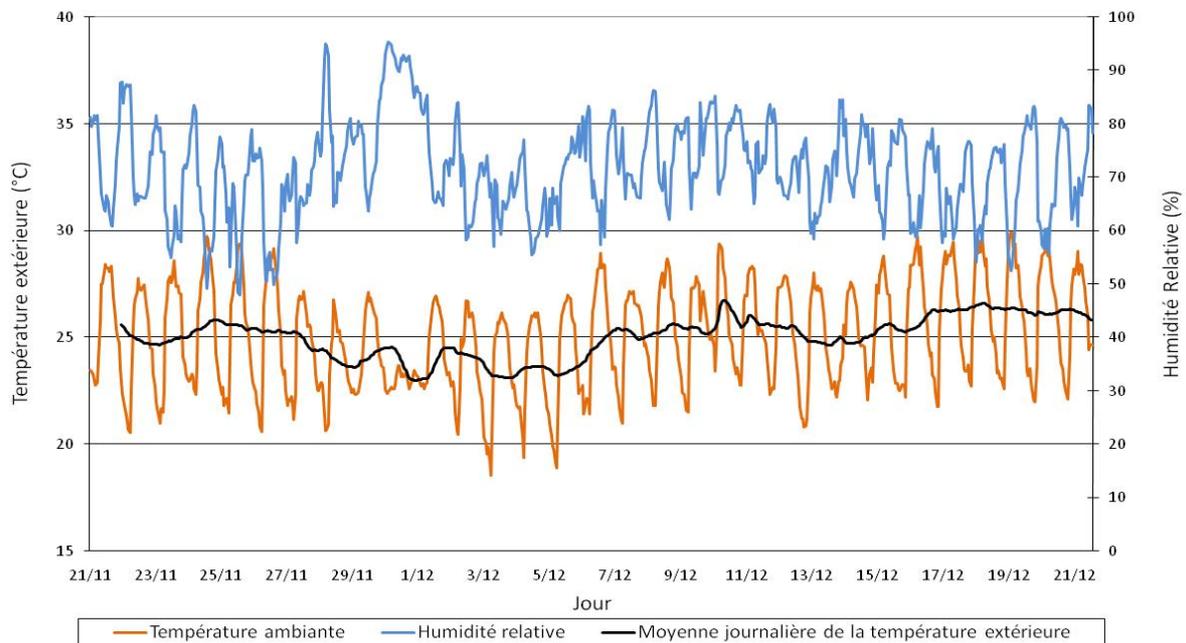


Figure 1 : Conditions climatiques extérieures durant les 4 semaines de la campagne expérimentale

Remarque : La transmission de notre méthodologie au LPBS via E. Bernard permettra certainement de poursuivre l'étude dans des conditions climatiques plus représentatives de conditions climatiques plus difficiles.

2.4 Adaptation des questionnaires

Les premières enquêtes de satisfaction ont permis d'améliorer les questionnaires afin de les rendre plus compréhensible et plus adaptés aux conditions réelles.

Voici quelques une des modifications apportées au questionnaire de l'expérimentation 3 suite aux remarques faites par les premiers utilisateurs :

- Certains enseignants font une pause durant le créneau de cours. Il semble judicieux de tenir compte de cette pause. Une page de questionnaire est insérée entre les pages 3 et 4 du questionnaire initial. Cette page est en annexe 7.
- En fin d'exposition, le questionnaire ne permet que la connaissance de la sensation thermique et des jugements sur l'humidité et la vitesse de l'air. Il semble indispensable de pouvoir connaître le jugement thermique : la question suivante est donc rajoutée :

En fonction de vos préférences personnelles uniquement, vous avez trouvé cet environnement thermique :				
Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

- L'exploitation des premiers questionnaires a soulevé des erreurs quant à la description de la tenue vestimentaire. Par exemple, les individus ne précisaient pas le nombre de tee-shirts qu'ils portaient (certains en portaient 2). Cette partie a été légèrement adaptée pour la rendre plus claire.
- En ce qui concerne la régulation comportementale, il apparaît que l'ouverture et la fermeture des portes joue un rôle non négligeable que l'on n'avait pas soupçonné. Cet « équipement » est désormais pris en compte dans la partie concernée. De plus, une incompréhension s'est parfois fait ressentir concernant le terme « brasseur d'air ». Ce dernier a été remplacé par le terme « ventilateur ».

2.5 Poursuite de la campagne de mesures par le LPBS

Aux vues des difficultés rencontrées et de la courte durée de la mission, il a été décidé de confier la suite et fin de la campagne à E. Bernard (stagiaire de Master 2 au LPBS). Les mesures faites avec les 2 types de matériels disponibles sont comparées capteurs du LPBS à celui du laboratoire PHASE. Il s'avère qu'un écart non négligeable apparaît entre les résultats de mesure donnés par les deux types de sonde, faisant apparaître des écarts de température parfois supérieur à 0,5°C, des écarts d'humidité de près de 5%, des écarts sur les valeurs d'éclairement pouvant atteindre 20% et une évolution dynamique décalée voire différente suivant les cas.

Ceci s'explique en partie par le fait que les capteurs sont différents :

- Anémomètre à fil chaud pour PHASE (F) et à boule chaude au LPBS (E)
- Capteur de température sèche et humide (bulbe humide et air ventilé) pour PHASE (F) et capteur d'hygrométrie capacitif et sonde Pt100 pour LPBS (E).

Par ailleurs nous ne sommes pas certains du mode d'acquisition des données pour les capteurs E: moyenne sur le pas de temps ?,... car les données sont plus "lisses" qu'avec le capteur F. Une source d'erreur est probablement liée à la position des deux trépieds lors de la mesure comparative, et certains paramètres peuvent subir des influences parasites (mouvement ou ombre de l'expérimentateur, mouvement d'air parasite, infiltrations...).

La solution face à ce problème est de ne pas mettre sur le même plan les mesures réalisées avec les deux trépieds. La campagne poursuivie avec le matériel du LPBS ne pourra pas être traitée comme une suite évidente de la mission de PHASE.

Cette comparaison a été faite en collaboration avec E. Bernard qui en a rédigé un rapport dans le cadre de son stage, et dont les principales conclusions sont les suivantes :

- Les variables mesurées suivent une tendance quasi identique durant la période d'acquisition.
- Les sondes de température sèche (Tair), et de température humide (Th), de vitesse d'air (Vair) et dans une moindre mesure de température de globe noir (Tg) utilisées par le laboratoire PHASE (sonde BaBuc®) semblent avoir une sensibilité plus importante et une plus faible inertie.
- Le plus important pourcentage d'erreur se lit sur les mesures d'éclairement et de vitesse d'air et dans une moindre mesure sur la température de bulbe humide.

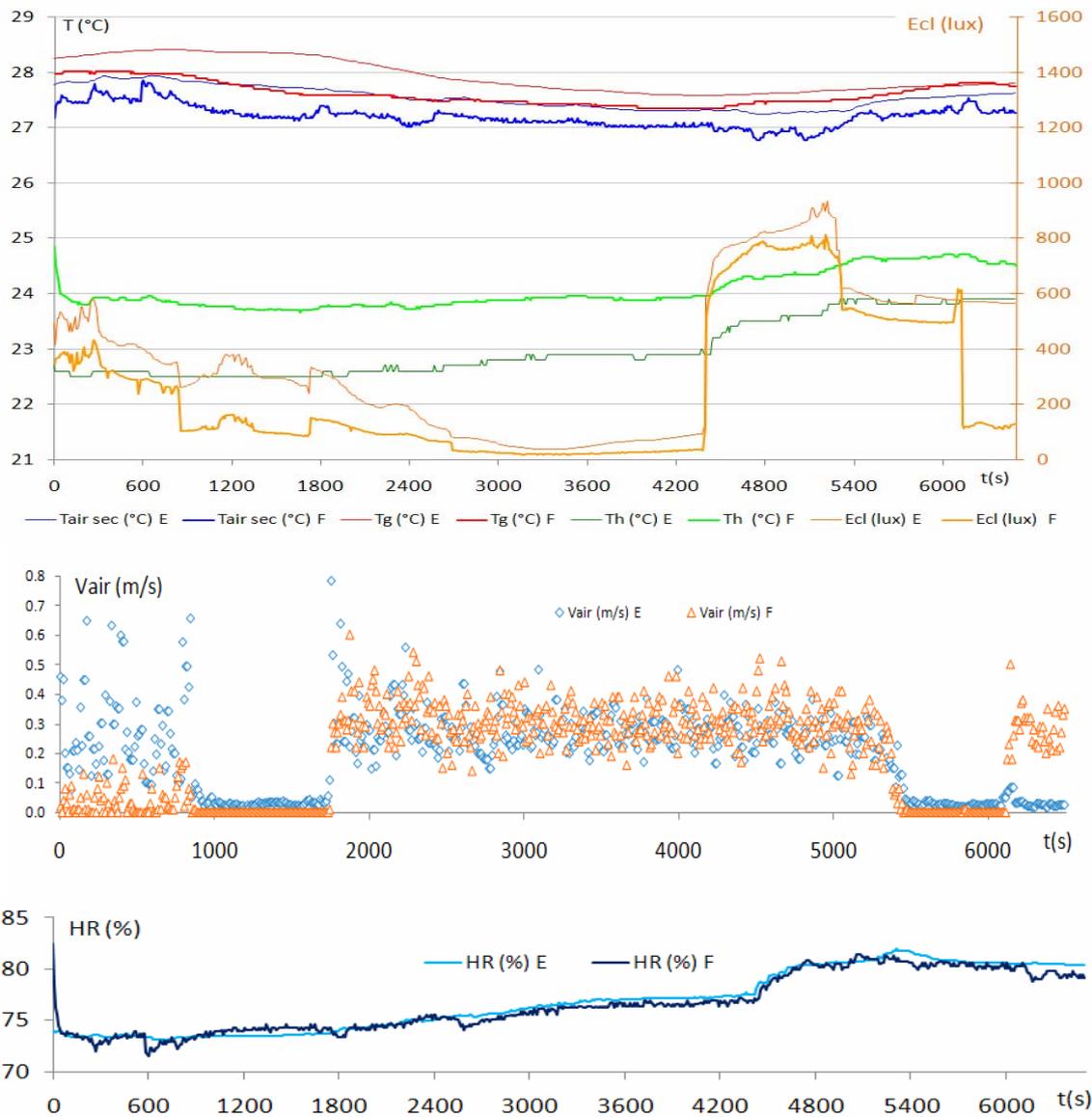


Figure 2 : Comparaison des mesures effectuées avec le matériel du LPBS (E) et celui de PHASE (F)

2.6 Remarques complémentaires

Aux vues de ces constatations, il apparaît que l'expérimentation n°3 présente le plus de données exploitables. C'est d'ailleurs cette phase qui a été menée le plus à son terme et ce sont principalement les résultats de cette expérimentation qui sont analysés dans le présent rapport.

Cependant, l'expérimentation n°1 a d'ores permet d'obtenir quelques conclusions : le suivi de cette phase par le LPBS permettra d'obtenir plus de résultats.

Enfin, le LPBS effectue une campagne de mesures (sans enquête de satisfaction) dans le bâtiment pilote et sous divers modes de fonctionnement sur toute la saison chaude.

3. La campagne de mesures

La campagne de mesures s'est déroulée durant la mission de Frédéry Lavoye, mission du vendredi 20 Novembre au vendredi 19 Décembre. Le déroulement de ces 4 semaines est donné en détail en annexe. Comme il a été dit précédemment, suite à divers problèmes, seule l'expérimentation n°3 a été réalisée en entier avec un protocole proche de celui prévu. Donc dans un premier temps, nous nous attarderons sur ces essais.

3.1 Essai III : étude statistique en salles de cours

3.1.1 Déroulement et description de l'expérimentation

Comme précisé en partie 2.1, la plupart des mesures ont été réalisées dans l'ancien bâtiment. Au total 14 expérimentations ont été menées :

- Dans l'ancien bâtiment dont la conception est bioclimatique, trois salles de différentes de TD ont permis la réalisation de 11 expérimentations de 2 ou 4h..
- Dans le nouveau bâtiment, 2 expérimentations (de 3 à 4h environ) ont pu être réalisées dans une salle de cours à l'étage, sous le vent, une expérimentation de 4 h a pu être réalisée dans une salle de cours au rez-de-chaussée.

Les expérimentations se sont faites à divers moments de journée sans préférence particulière, mais en s'adaptant aux emplois du temps des salles et en évitant de questionner plusieurs fois le même groupe d'élèves. Cependant, aux vues de la situation, il s'avère que certains groupes d'élèves ont été questionnés plusieurs fois : les conditions climatiques et même parfois la salle de cours étant différentes, on pourra supposer que cette condition n'a que très peu d'impact sur les résultats et sera donc négligée.

Ces élèves suivent une formation à l'IUT de Saint Pierre en génie civil et génie biologique.

Méthodologie

Avant le début du cours, une présentation des enjeux du projet est faite. L'expérimentateur insiste sur le fait que les élèves doivent se comporter avec les équipements mis à leur disposition comme à leur habitude. Cependant, on remarque la plupart du temps qu'à leur entrée, les élèves ouvrent les jalousies et allument les ventilateurs (si ces derniers étaient fermés et éteints). De très rares ajustements ont lieu durant la suite du cours. La gestion de l'ouverture/fermeture de la porte se fait généralement par l'enseignant. Il a cependant été remarqué que les élèves (et parfois même l'enseignant) n'osaient pas allumer la lumière ou toucher aux autres équipements de crainte de fausser la manipulation.

Généralement, les questionnaires sont remplis sérieusement et objectivement par les élèves. Cependant, il n'est pas rare de constater des cases vierges au moment du traitement. Certains commentaires libres sont en outre riches en informations concernant la préférence d'un groupe d'élèves sur une salle de l'IUT, sur la ventilation naturelle par rapport à la climatisation voire même l'ergonomie et l'esthétique des salles. Ces commentaires sont analysés indépendamment.

On peut visualiser sur les figures suivantes des photographies d'une salle de TD de l'ancien bâtiment et une dans le nouveau bâtiment à énergie positive :

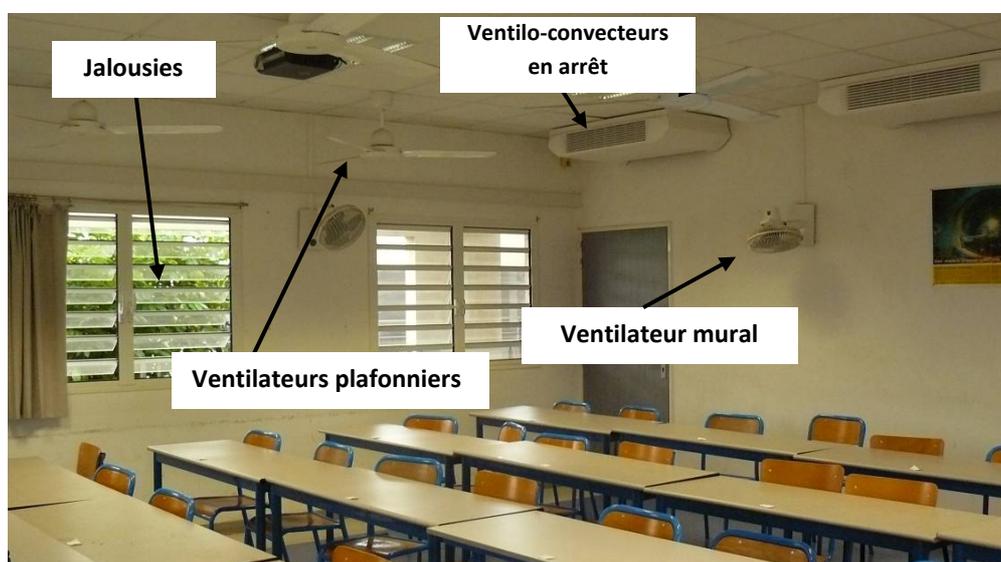


Figure 3 : Photo de la salle de cours de l'ancien bâtiment de l'IUT

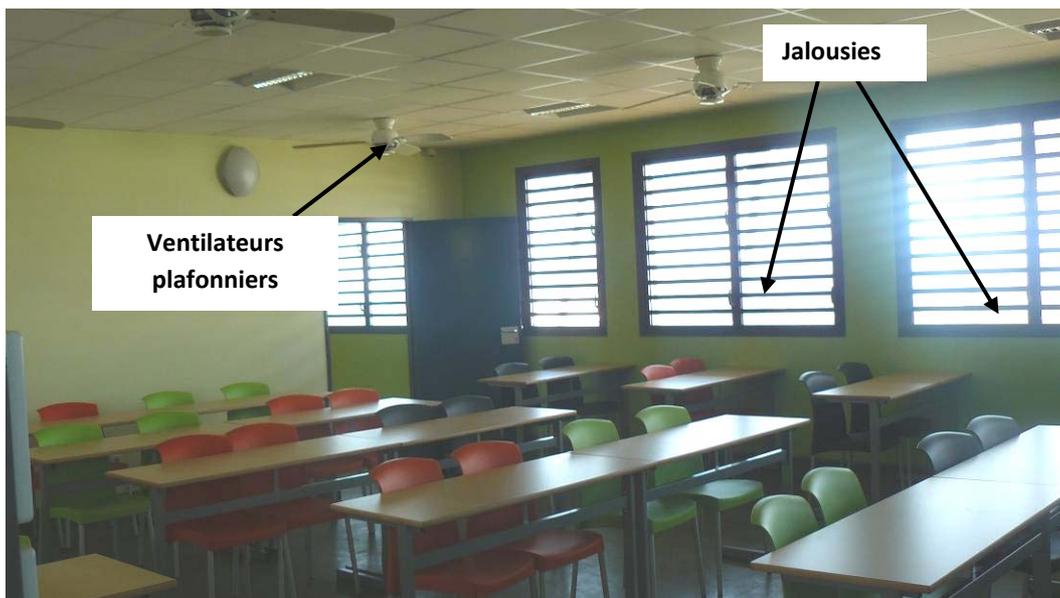


Figure 4 : Photo de la salle de cours du bâtiment pilote

Nous présentons ici les courbes représentatives des données météorologiques extérieures durant toute la durée de la mission à savoir du 21 Novembre au 21 Décembre 2008.

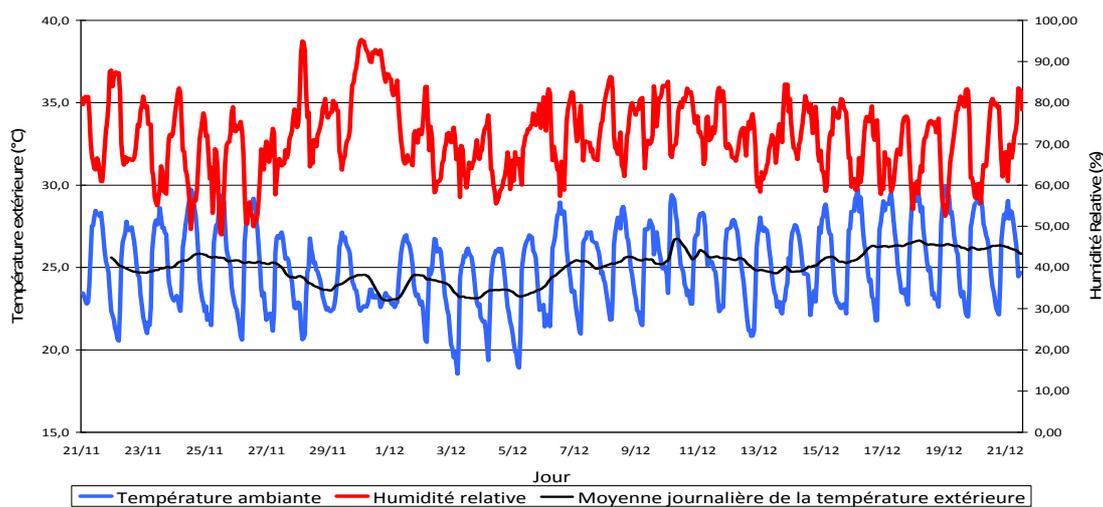


Figure 5: Température et humidité relative extérieure durant la période de mesure

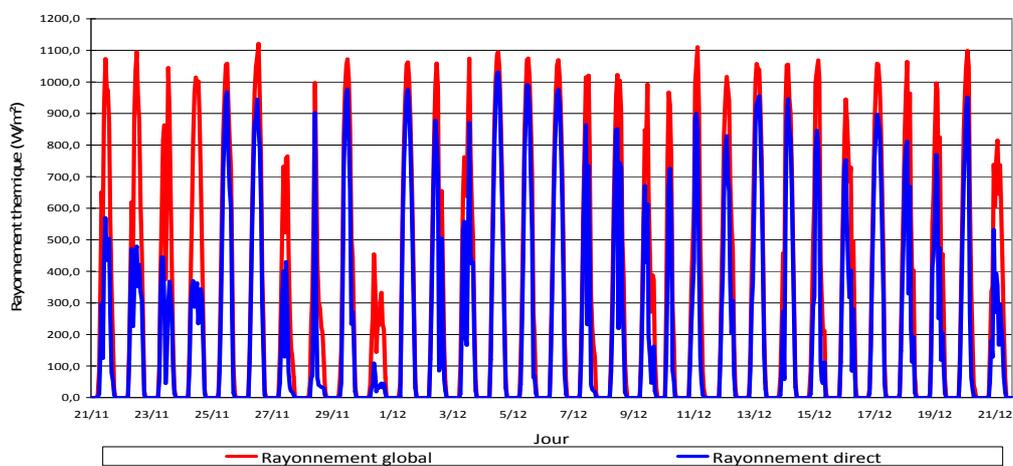


Figure 6: Rayonnement solaire sur une surface horizontale

3.1.2 Présentation générale et synthétique des manipulations, premières conclusions

Les tableaux suivants permettent d'obtenir une vision globale des différentes manipulations réalisées : moment de la journée, climat intérieur, évolution de température.... Les expériences sont données par ordre chronologique.

Sur 14 expériences, 10 se sont déroulées l'après midi et 4 le matin. Les températures n'ont jamais été très élevées minimum 25, 5°C maximum 29°C. Le nombre de personnes interrogées a varié de 8 à 28 par expérience, au totale 281 questionnaires ont été distribués. Dans la majeure partie des expériences les brasseurs d'air étaient utilisés.

Dans les tableaux, nous avons donné l'évolution du nombre de vote pour les sensations thermique et les jugements. Par exemple sur la ligne St= 1 (19 ↘ 9) signifie, qu'en début 19 personnes ont voté S=1 (légèrement chaud) et qu'en fin d'expériences plus que 9 personnes votaient 'légèrement chaud'.

Les sensations extrêmes du coté froid n'ont évidemment pas utilisées, de même que le jugement '4= extrêmement inconfortable '.

Tableau 1: Synthèse des différentes expériences de type essai III

Numéro de la manipulation	1	2	3	4	5	6	7
Lieu	GC TD5			GC TD3			
date	25 novembre			28 novembre		2 décembre	
Heure	9h-13h	13h30-17h30	13h-15h	8h-10h	15h-17h	13h-15h	15h-17h
Nombre de sondés	15	15	28	15	13	15	9
Brasseur d'air	----- Oui -----						
Remarques	Cours de langues et portes et rideaux fermés						
Mesures climatiques intérieures							
Température d'air moyenne	27,79	29,03	28,11	26,43	26,76	26,48	26,64
Evolution température d'air	26,5 ↗ 27,4 ↗ 29,7	29,2 ↗ 29,3 ↘ 28,4	27,4 ↗ 28,1 ↗ 28,3	25,4 ↗ 26,1 ↗ 26,9	25,8 ↗ 27,2 ↘ 26,5	25,9 ↗ 26,6 ↘ 26,5	26,5 ↗ 26,9 ↘ 26,5
Temp. de globe moyenne	28,33	29,62	28,74	26,75	27,19	27,02	27,11
Humidité relative moyenne	66,08	62,51	66,07	74,2	68,5	62,1	62,0
Vitesse d'air moyenne	0,455	0,378	0,089	0,30	0,35	0,02	0,07
Sensations thermiques (-2 froid : 0 neutre : 3 Très chaud)							
St=-2				0 ↗ 1			2 ↘ 0
St=-1	0 ↗ 2 ↘ 0		1 ↗ 3	1 ↗ 3	0 ↗ 2	2 ↘ 1	2 → 2
St=0	11 ↗ 12 ↗ 13	3 → 3 ↗ 13	4 ↗ 12	10 ↗ 11	11 ↘ 9	4 ↗ 10	4 → 4
St=1	4 ↘ 1 ↗ 2	9 → 9 ↘ 1	19 ↘ 9	4 ↘ 0	2 ↘ 1	7 ↘ 2	2 ↗ 3
St=2		2 ↗ 3 ↘ 0	3 → 3			1 ↗ 2	1 ↘ 0
St=3		1 ↘ 0 → 0	1 ↘ 0				
Jugements thermiques (0=confortable, 3 = très inconfortable)							
Jg=0	14 ↘ 13 → 13	9 ↗ 12	6 ↗ 13	10 ↗ 13	11 ↘ 8	6 ↗ 9	6 ↘ 5
Jg=1	1 ↗ 2 → 2	3 ↘ 2	19 ↘ 8	5 ↘ 2	2 ↗ 4	8 ↘ 4	2 ↗ 4
Jg=2		3 ↘ 0	2 ↘ 1			1 ↗ 2	1 ↘ 0
Jg=3			1 → 1				

Numéro de la manipulation	8	9	10	11	12	13	14
Lieu	GB TD1				Pilote cours	Pilote projet	
Date	3 Décembre		5 Décembre		16 Décembre	19 Décembre	
Heure	15h-17h	17h-19h	8h-11h40	13h-15h	13h-17h	8h-12h	13h-16h
Nombre de sondés	24	25	25	25	26	23	23
Brasseur d'air	----- Non -----				----- Oui -----		
Mesures climatiques intérieures							
Temp. d'air moyenne	26,32	25,75	26,81	27,15	28,94	28,11	28,24
Evolution Temp. d'air	26,1 ↗ 26,4 ↘ 26,1	26,2 ↘ 25,7 ↘ 25,4	25,3 ↗ 26,6 ↗ 27,2	27,1 ↗ 27,3 ↗ 27,4	28,4 ↗ 29,1 ↘ 28,9	27 ↗ 28,3 ↗ 28,5	28,8 ↘ 28,0
Temp. globe moyenne	26,8	26,3	27,16	27,65	29,1	28,43	28,62
HR moyenne	63,7	63,8	69,2	74,63	66,5	61,7	66,9
Vitesse d'air moyenne	0,45	0,31	0,31	0,42	0,35	0,68	0,63
Sensations thermiques (-2 froid : 0 neutre : 2 chaud)							
St=-2			0 ↗ 1 ↘ 0	1 ↘ 0	0 ↗ 1 ↘ 0		0 ↗ 1
St=-1	0 ↗ 7	4 ↗ 10	2 ↗ 5 ↘ 1	2 ↗ 4	0 ↗ 1 → 1	0 ↗ 3 ↘ 1	1 → 1
St=0	16 → 16	12 ↗ 14	10 ↗ 12 ↗ 16	15 ↗ 17	4 ↗ 11 ↗ 16	15 ↗ 17 ↗ 20	17 ↗ 20
St=1	7 ↘ 1	8 ↘ 0	10 ↘ 7 ↗ 8	6 ↘ 4	14 ↘ 11 ↘ 8	6 ↘ 3 ↘ 2	3 ↘ 1
St=2	1 ↘ 0	1 ↘ 0	2 ↘ 0 → 0	1 ↘ 0	6 ↘ 1 → 1	2 ↘ 0 → 0	2 ↘ 0
St=3			1 ↘ 0 → 0		2 ↘ 0 → 0		
Jugements thermiques (0=confortable, 3 = très inconfortable)							
Jg=0	12 ↗ 19	12 ↗ 17	14 ↗ 19 → 19	19 ↗ 21	10 ↗ 16 ↗ 21	16 ↗ 20 ↗ 22	19 ↗ 21
Jg=1	12 ↘ 5	12 ↘ 7	9 ↘ 5 ↗ 6	5 ↘ 3	11 ↘ 8 ↘ 5	4 ↘ 3 ↘ 1	2 → 2
Jg=2		1 ↘ 0	2 ↘ 0 → 0	1 → 1	4 ↘ 1 ↘ 0	3 ↘ 0 → 0	1 ↘ 0
Jg=3			0 ↗ 1 ↘ 0		1 ↘ 0 → 0		

A l'aide du tableau récapitulatif et des conditions météo nous pouvons dès lors tirer quelques observations :

- Les températures d'air intérieures commencent à diminuer à partir de 15h.
- La température moyenne minimale d'une exposition est de 25,7°C : Expé. n°9, début de soirée.
- La température moyenne maximale quant à elle est de 29,03°C : Expé. n°2 durant un après midi.
- L'humidité relative est comprise entre 60 et 75%.
- Les vitesses d'air moyennes sont généralement comprises entre 0,3 et 0,45 m/s. Cependant, nous pouvons constater que durant 3 expositions ces vitesses sont inférieures à 0,1 m/s, les après midi en salle de TD3 de l'IUT.
 - Concernant la journée du 27 Novembre. La vitesse du vent est faible. Elle ne dépasse pas les 9 km/h et est en moyenne égale à 5 km/h. Ce qui fait que les vitesses d'air intérieures ne semblent pas modifiées il n'y a donc pas de surventilation, d'autant plus que l'orientation de la salle ne joue pas en sa faveur.
 - En ce qui concerne les 2 autres cas (après midi du 2 Décembre), elles ont lieu durant la projection d'un film qui nécessite la fermeture des rideaux et des portes, ce qui a un effet non négligeable sur les vitesses d'air intérieures. Cependant, c'est aussi le cas pour 2 autres manipulations où la vitesse d'air moyenne a des valeurs plus élevées. C'est lorsque nous avons de telles incertitudes que la présence de l'expérimentateur durant la manipulation est indispensable : ces faibles valeurs s'expliquent par une utilisation limitée des ventilateurs, mis à disposition. En fait, concernant la manipulation n°6, le ventilateur est mis en route en cours d'exposition (au bout d'une heure) et en faible régime, au même titre que l'ouverture d'une jalousie supplémentaire.
- Concernant la manipulation n°7, la situation précédente est conservée seulement la vitesse est légèrement supérieure en raison d'une ouverture et fermeture intempestive de la porte (due à un problème technique lié à la projection du film).
- On remarque en outre que les dernières manipulations les vitesses d'air moyennes sont bien supérieures que dans les autres cas : de l'ordre de 0,65m/s. Ces manipulations ont lieu dans la salle de projet du bâtiment pilote, situé au premier étage et orientée sous le vent.
- Concernant les votes des élèves sur leur sensation et jugement thermique, même s'il est difficile de tirer des conclusions précises, on peut tout de même déduire une tendance. Tout d'abord, le nombre de votes de sensation thermique neutre (« ni chaud, ni froid ») augmente entre le début et la fin de l'exposition à l'exception d'une exposition où il diminue (expé. n°5) et 2 expositions où il est constant (n°7 et 8). Ceci est révélateur de l'adaptation à une ambiance thermique. Le même type de conclusions peut être tiré en analysant les votes de jugement thermique. Le nombre d'élèves votant « confortable » augmente généralement entre le début et la fin de l'exposition. Seule 3 manipulations dérogent à cette règle.

3.1.3 Mesures climatiques

Les mesures sont réalisées avec le trépied BaBuc® permettant la mesure simultanée de la température de l'air, de globe noir, la vitesse et l'humidité de l'air ainsi que l'éclairement. Généralement, l'expérimentateur démarre, si possible, les mesures avant le début du cours, ceci afin de non seulement permettre aux capteurs d'atteindre l'équilibre thermique, mais également de pouvoir évaluer l'impact de l'arrivée des étudiants dans la salle. Le trépied est généralement placé dans le courant d'air créé par les jalousies et si possible sous un ventilateur plafonnier (ou non loin) et fait l'acquisition des données durant le cours avec un pas de 10 secondes. Ce faible pas de temps a été décidé suite à l'observation d'une importante variation de la vitesse de l'air au cours du temps. Il est malgré tout regrettable d'observer une capacité de stockage des données relativement limitée lorsqu'on utilise un tel pas de temps. Il est en effet impossible d'effectuer une mesure en continu durant toute une journée avec un tel pas de temps et autant de variables à mesurer. Nous ne présenterons pas dans cette partie toutes les mesures qui ont été réalisées. Quelques exemples jugés représentatifs seront analysés.

Expé. n°5 : le vendredi 28 Novembre 2008 de 15h à 17h, salle de TD3, IUT génie civil

Cette exposition a lieu durant un après midi concerne un cours de langue consistant en la projection d'un film. Les élèves, peuvent être considérés en situation de repos. Pour une meilleure visibilité du film, la lumière est éteinte, les portes et rideaux fermés.

- La couverture nuageuse est relativement épaisse (faible rayonnement direct), la température extérieure est de l'ordre de 25°C pour une humidité relative de plus de 70%. La vitesse du vent varie entre 10 et 20 km/h. La figure suivante donne un récapitulatif complet des données météorologiques de l'après-midi.
- La mesure de l'éclairement intérieur est riche en informations et permet de retrouver les instants où certaines actions ont été engendrées et notamment l'ouverture/fermeture des portes et rideaux, l'allumage de la lumière... Sur la figure montrant l'éclairement intérieur, nous avons reporté les phénomènes marquants. A l'arrivée des

étudiants toutes les jalousies sont ouvertes et les ventilateurs plafonniers sont allumés. La porte est également ouverte puis sera refermée.

- La température intérieure égale à 26°C est supérieure de 1°C à la température extérieure. L'impact des charges internes liées à l'occupation (15 personnes) engendre une hausse de 1°C de la température en 1/2 -heure. De plus, au moment de l'ouverture de la porte qui dure près de 25 minutes, on constate une chute de près de 1°C de la température intérieure qui s'accompagne d'une élévation de la vitesse d'air malheureusement pas mesurée car l'anémomètre n'est pas situé dans l'axe. Cette remarque est issue des commentaires de l'expérimentateur et d'élèves assis dans le courant d'air. La température de globe noir lisse les variations de température d'air et les majorent de près de 0,5°C. L'effet de l'inertie se traduit par une atténuation et un décalage entre la température de l'air et la température de globe noir.
- L'humidité relative extérieure est assez élevée, les jalousies étant ouvertes, l'humidité relative intérieure varie très peu et reste proche de l'humidité relative extérieure. Les apports latents liés aux occupants n'ont pas d'impact notable sur l'évolution de l'humidité relative.
- Les vitesses d'air varient entre 0 et 0,65m/s la moyenne est de l'ordre de 0,35m/s. Il est impossible avec la courbe de visualiser l'impact de l'ouverture et de la fermeture de la porte. Seuls les commentaires permettent de soulever le fait que cette action est non négligeable mais cependant locale. Le vent à l'extérieur est assez stable durant les 2 h. ce qui ne nous permet pas d'analyser l'impact de ce dernier sur les vitesses d'air intérieures.

Nombre de sondés	13
Brasseur d'air	OUI
Remarques	Cours de langues portes et rideaux fermés
Conditions climatiques intérieures moyenne	
Tair moyenne	26,76
Evolution Tair	25,8 ↗ 27,2 ↘ 26,5
Tglobe	27,19
HR	68,5
Vair	0,35
Sensations thermiques	
St=-1	0 ↗ 2
St=0	11 ↘ 9
St=1	2 ↘ 1
Jugements thermiques	
Jg=0	11 ↘ 8
Jg=1	2 ↗ 4

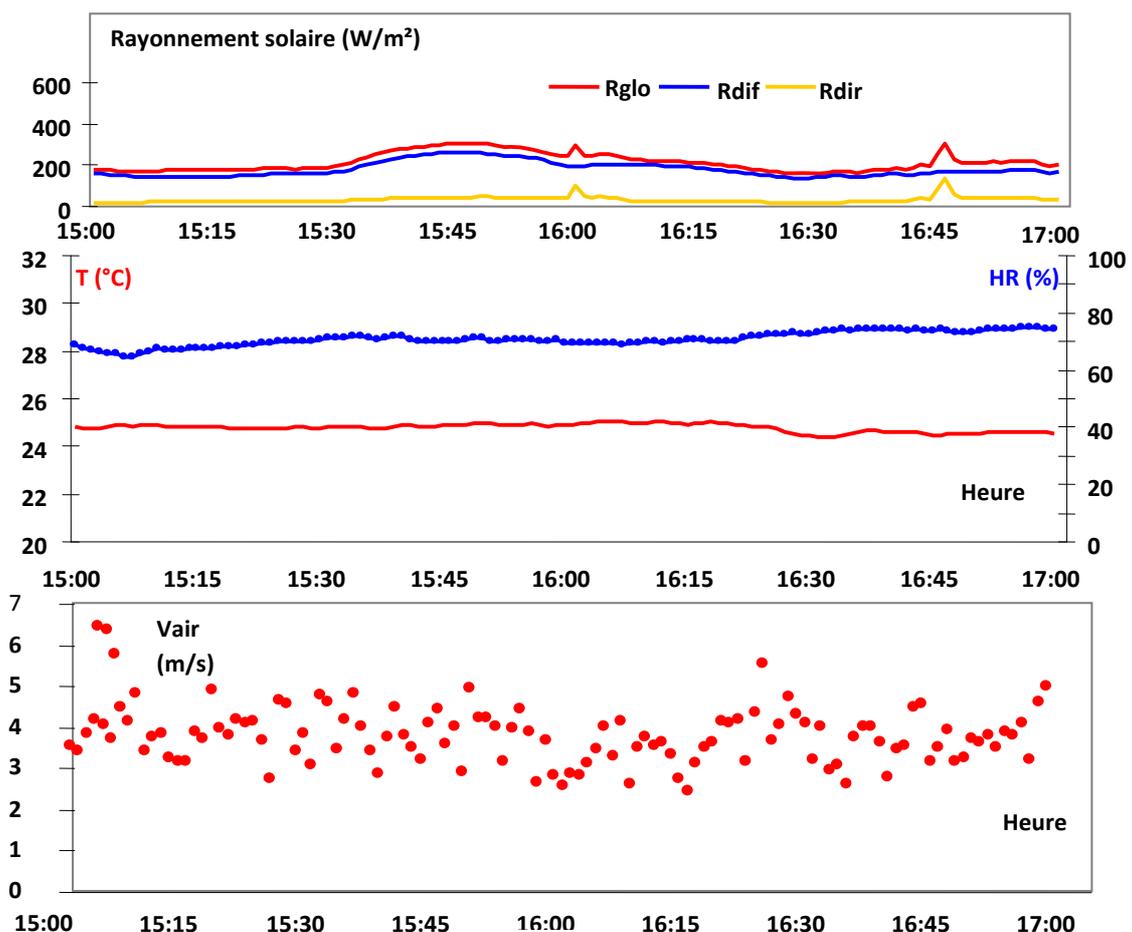


Figure 7: Météorologie locale durant la demi-journée de l'expé. n°5

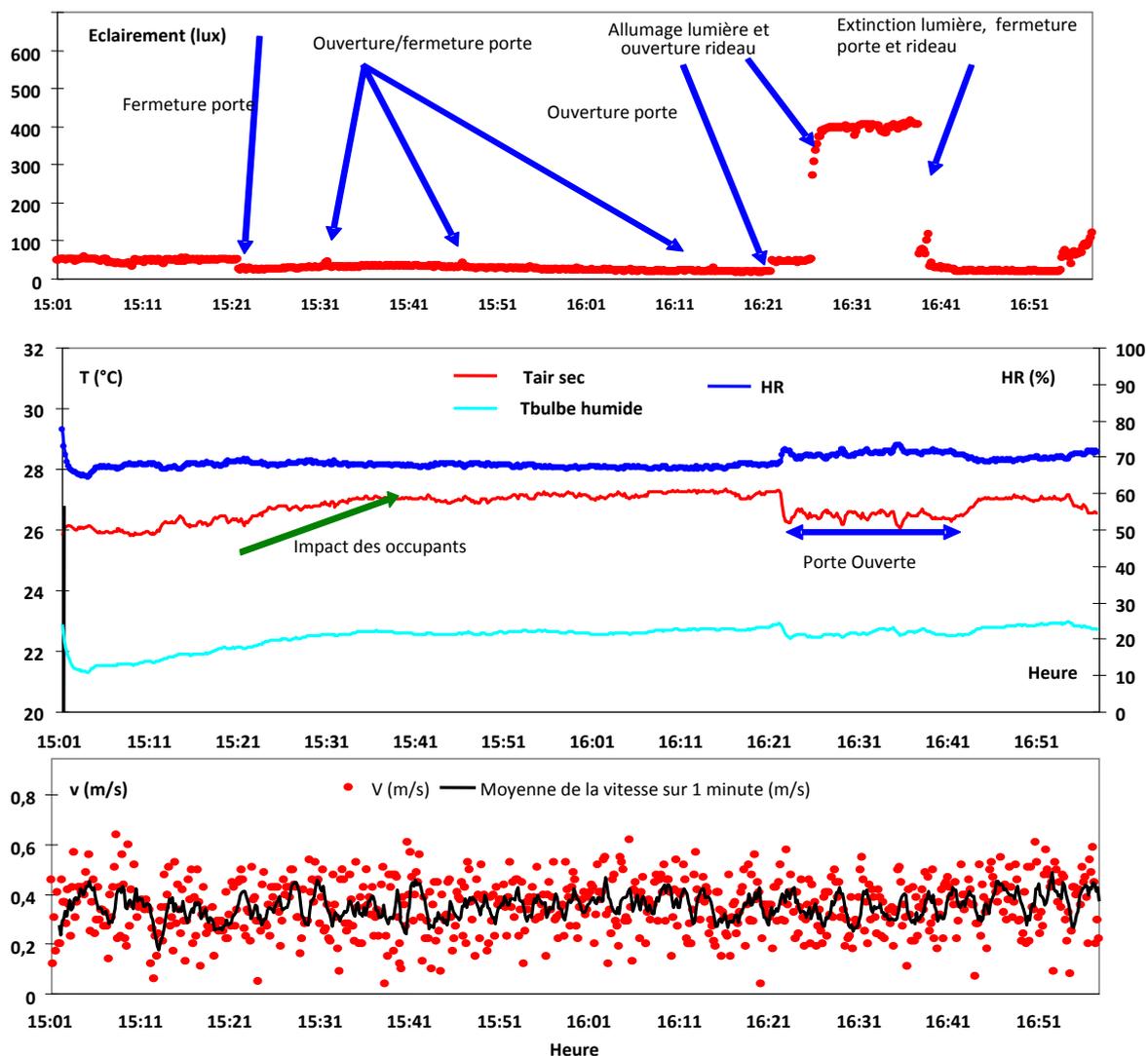


Figure 8 : Conditions intérieures, exp. n°5

Expé. n°8 et 9 : Mercredi 3 Décembre 2008 de 15 - 19h, salle de TD1, IUT génie biologique

Les courbes suivantes sont représentatives des mesures effectuées au cours de cet essai. Il est important de noter que la pièce n'est pas occupée avant ce créneau horaire et que les jalousies orientées vers le Sud, c'est-à-dire vers l'océan et donc sous le vent sont ouvertes, les brasseurs d'air mis à disposition des occupants sont très vétustes voire inutilisables en raison du bruit qu'ils génèrent : la rotation des pales est d'autant plus menaçante qu'elle fait vibrer dangereusement le support du brasseur d'air. Ces derniers ne sont pas utilisés.

- Les mesures d'éclairage intérieur montrent une nette diminution dès la première demi heure pour ensuite se stabiliser aux alentours des 200 lux ce qui est tout à fait acceptable. A partir du moment où l'éclairage devient inférieur à ce seuil et avoisine 100 lux, l'éclairage artificiel est utilisé permettant de remonter à une valeur de l'ordre de 300 lux. La diminution de l'éclairage en début d'exposition est en phase avec la diminution du rayonnement solaire diffus (il n'y a pas de rayonnement direct pénétrant dans la salle) et correspond bien à la décroissance de la course solaire. La couverture nuageuse est ce jour relativement faible et se traduit par un rayonnement direct très proche du rayonnement global, des pics à 800 W/m² ce qui sont dans la moyenne de ce que l'on a pu mesurer durant la mission.

Numéro	8	9
Heure	15h-17h	17h-19h
Nbr de sondés	24	25
Brasseur d'air	Non	
Mesures climatiques intérieures		
Tair	26,32	25,75
Evolution Tair	26,1 ↗ 26,4 ↘ 26,1	26,2 ↘ 25,7 ↘ 25,4
Temp. globe	26,8	26,3
HR	63,7	63,8
Vair	0,45	0,31
Sensations thermiques		
St=-1	0 ↗ 7	4 ↗ 10
St=0	16 → 16	12 ↗ 14
St=1	7 ↘ 1	8 ↘ 0
St=2	1 ↘ 0	1 ↘ 0
Jugements thermiques		
Jg=0	12 ↗ 19	12 ↗ 17
Jg=1	12 ↘ 5	12 ↘ 7
Jg=2		1 ↘ 0

- Les courbes permettent de montrer qu'avant l'arrivée des étudiants, les températures intérieure et extérieure sont égales. L'arrivée des étudiants se voit nettement sur l'évolution de la température intérieure qui augmente brusquement dépassant la température extérieure. L'expérimentation se déroulant en fin de journée, la température extérieure diminue d'environ 2°C en fin d'essai lorsque l'ensoleillement baisse. La température intérieure suit cette baisse, avec un léger décalage temporel, mais en restant toujours supérieure. Les températures diminuent ensuite jusqu'à la fin de l'exposition.
- La température de globe noir lisse les variations de température de l'air et elle est légèrement supérieure d'environ 0,5°C en moyenne (cet écart varie entre 0.04 et 1°C). Les températures de surface sont supérieures à la température de l'air ce qui se confirme par une brève visualisation avec la caméra infra rouge. L'inertie thermique des murs (même si elle n'est pas quantifiée, mais supposée semi-lourde) explique l'atténuation et le léger décalage des variations de température d'air. L'humidité relative intérieure est de l'ordre de 60% et légèrement inférieure à l'humidité relative extérieure (de l'ordre de 65 à 70%) ce qui paraît étonnant si l'on suppose une évacuation de chaleur latente des occupants. La surventilation par les jalousies ainsi que des températures légèrement supérieures expliquent cette différence.
- Pour la vitesse de l'air à l'intérieur, on remarque que lorsque seules les jalousies orientées vers l'océan sont ouvertes, la vitesse moyennée sur une minute est de l'ordre de 0.15 à 0.4m/s. La vitesse instantanée quant à elle varie entre 0 et 0.8m/s. Lorsque les jalousies opposées sont ouvertes, la vitesse moyennée sur une minute varie entre 0,3 et 0,7 m/s, la vitesse instantanée peut alors dépasser 1m/s. Il est bien évident que ces vitesses même si elles dépendent de l'écart de température entre les deux façades opposées sont étroitement liées à la vitesse du vent : cette dernière varie entre 3 et 6 m/s (soit entre 10 et 20km/h).

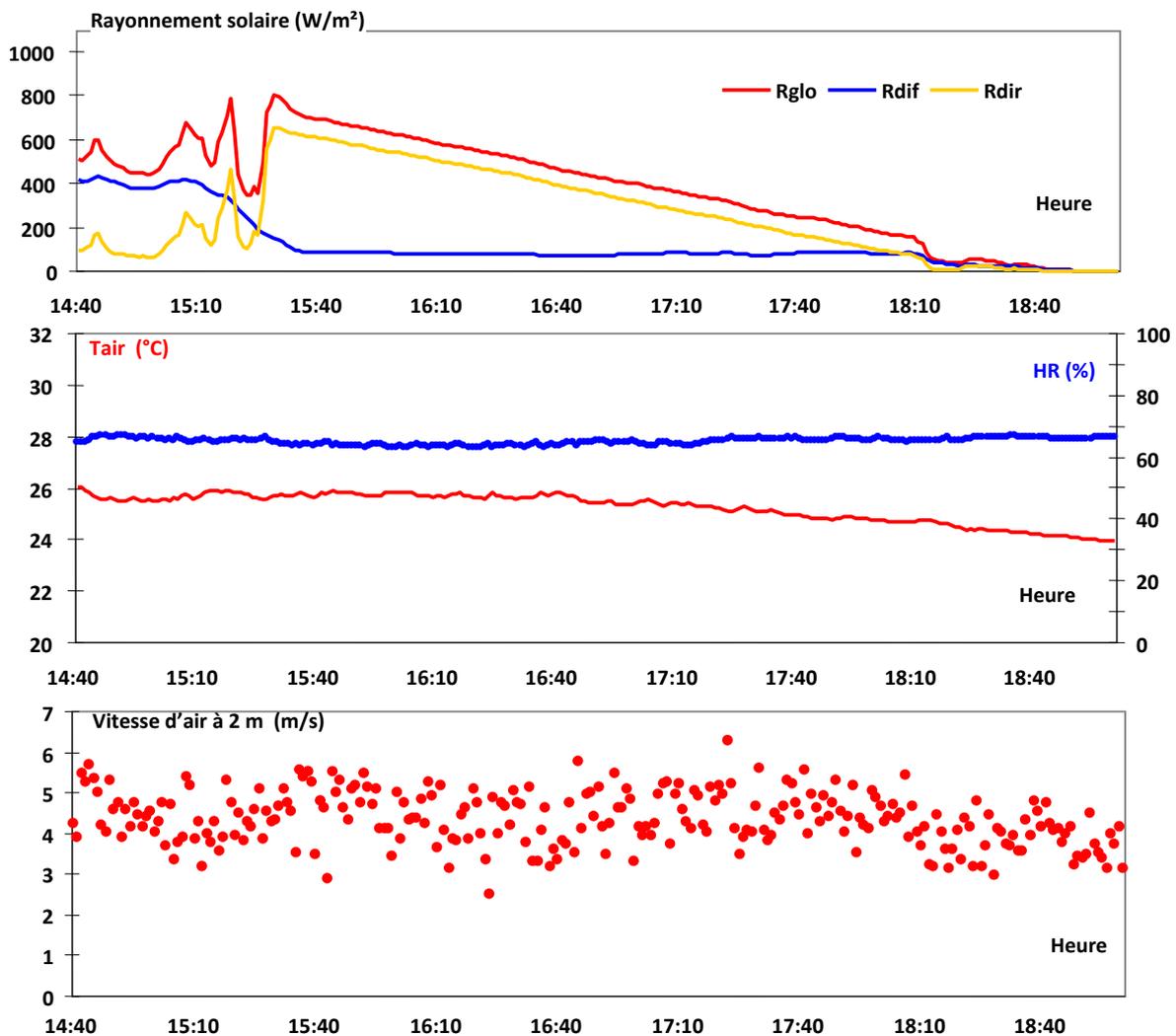


Figure 9: Météorologie locale durant l'exposition, (expé. n°8 et 9)

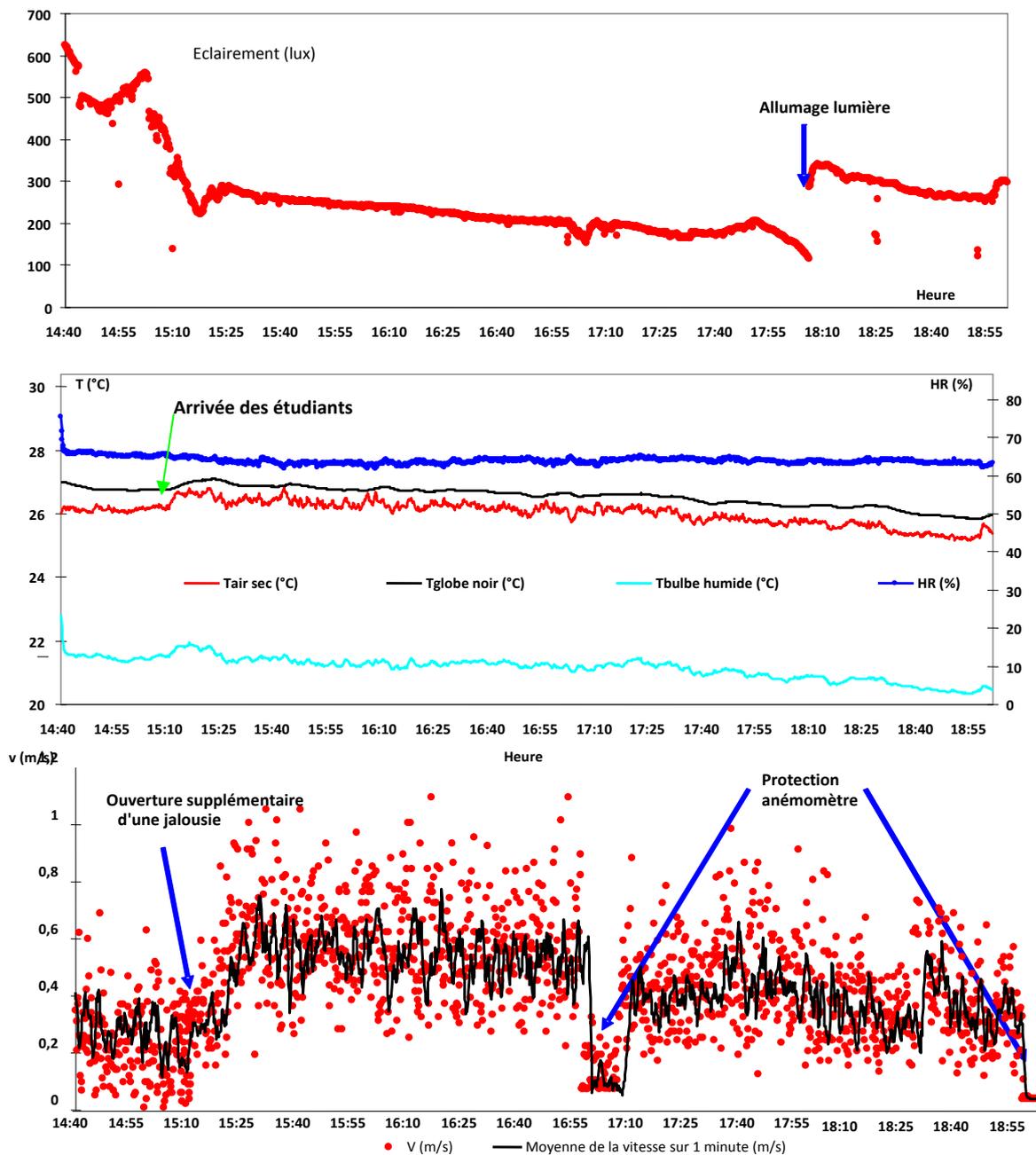


Figure 10 : Résultats des mesures de l'après midi du 3 Décembre (expé. n° 8 et 9)

Expé. n°12 : le 16 décembre 2008 de 13 - 17h, salle de cours n°1, bâtiment pilote

Cette exposition correspond à une des plus chaudes. Il suffit de visualiser l'évolution de la température extérieure ainsi que l'intensité du rayonnement solaire pour s'en rendre compte. Ce dernier atteint en global sur une surface horizontale 1200 W/m².

C'est aussi la première fois qu'un cours avait eu lieu dans le nouveau bâtiment. Un groupe d'étudiants de l'IUT génie biologique a été déplacée pour suivre son cours dans une des salles de cours récemment aménagée (au rez-de-chaussée, côté montagne). Toutes les jalousies sont ouvertes et les brasseurs d'air sont allumés avant l'arrivée des étudiants : cette décision a été prise en raison de l'« odeur de neuf » régnant dans la salle de cours, il semblait judicieux d'aérer efficacement la salle. Les mesures ont été réalisées avec le matériel du LPBS.

- L'éclairage sur le plan de travail ; nous constatons que en éclairage naturel seul l'éclairage varie entre 300 et 500 lux ce qui est tout à fait acceptable.

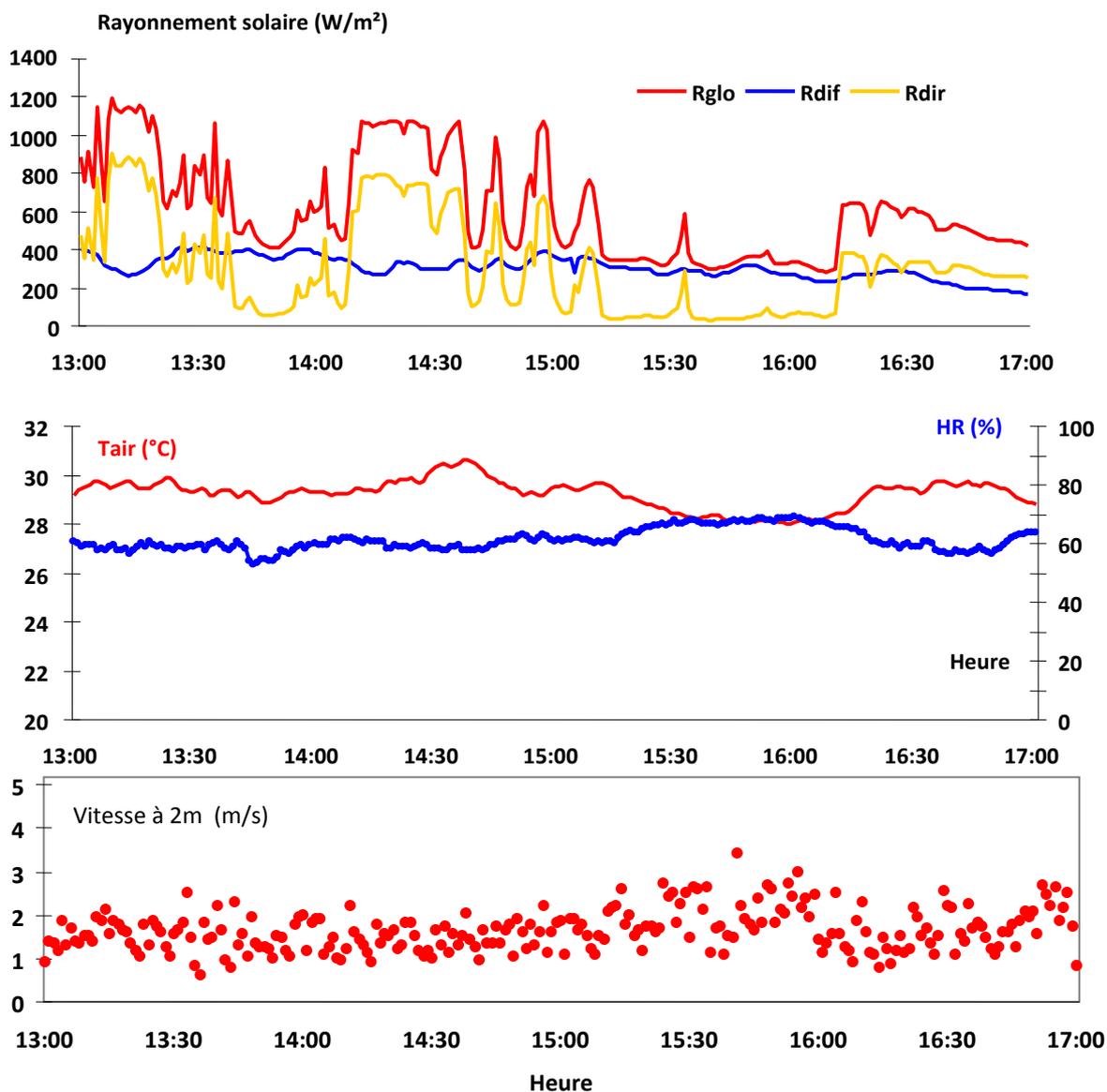


Figure 11 : Météorologie locale durant l'exposition du 16 décembre (expé. n°12)

- Les températures d'air intérieures varient entre 28,5 et 29,5°C ce qui reste du même ordre de grandeur que les températures d'air extérieures bien que ces dernières soient un peu plus élevées (parfois supérieures à 30°C). Il est intéressant de noter que l'évolution « légèrement sinusoïdale » de la température extérieure se répercute très nettement sur la température intérieure. Concernant la température de globe noir, nous pouvons tirer les mêmes conclusions que précédemment.
- Malgré une ouverture des jalousies maximales et le fonctionnement des ventilateurs, les vitesses d'air sont relativement faibles, inférieures à celles décrites précédemment, et également moins turbulente. Elles varient entre 0,2 et 0,5 m/s. Il suffit de visualiser la vitesse du vent pour expliquer en partie cette différence. Elle est relativement faible et ne dépasse pas les 12km/h (valeurs qu'elle n'atteint une seule fois). De plus, il s'est avéré que les brasseurs d'air étaient en mode « hiver » et donc que le mouvement d'air qu'ils génèrent n'est pas optimisé pour les conditions chaudes : les vitesses d'air ne sont pas aussi importantes qu'elles devraient l'être. Cette constatation est valable pour tous les brasseurs d'air présents dans le bâtiment. Suite à cela, le passage en mode « été » est effectué pour la fin de la mission.

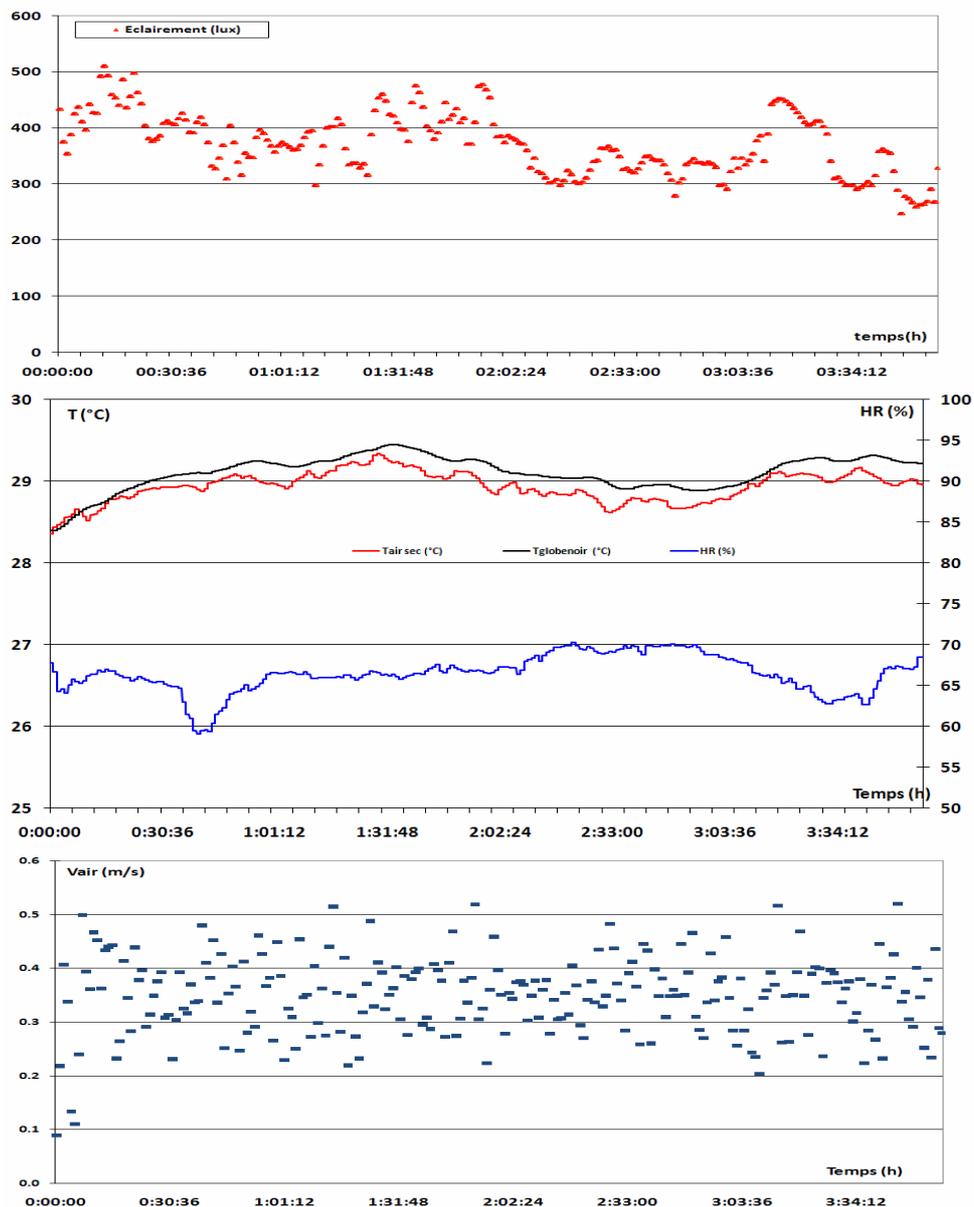


Figure 12 : Résultats de mesures de l'après midi du 16 Décembre, bâtiment pilote (expé. n°12)

Remarque générale sur les températures de surface

La température du globe noir permet d'approcher la température moyenne de rayonnement qui a une influence notable sur les échanges secs du corps humains. La température de globe dépend de la température et de la vitesse de l'air et de la température de surface des parois.

Il faut noter deux points :

- Le globe noir a une forte inertie thermique (plus de 15 minutes) par conséquent, cette mesure ne prend pas en compte les variations rapides du climat. Cependant sur des périodes où la température de l'air varie peu, la mesure de la température de globe permet de cerner un peu plus les températures de surface ;
- Les températures de globe mesurées sont presque toujours supérieures aux températures d'air, ce qui veut dire que les températures de surfaces sont en moyenne plus chaudes que l'air.

Les photos, ci-dessous, sont prises avec la caméra infra rouge à l'intérieur de la salle de TD5 de l'IUT génie civil, prise à 10 h du matin et correspondent à : une jalousie orientée côté océan (Sud-Sud Ouest), un brasseur d'air et des étudiants.

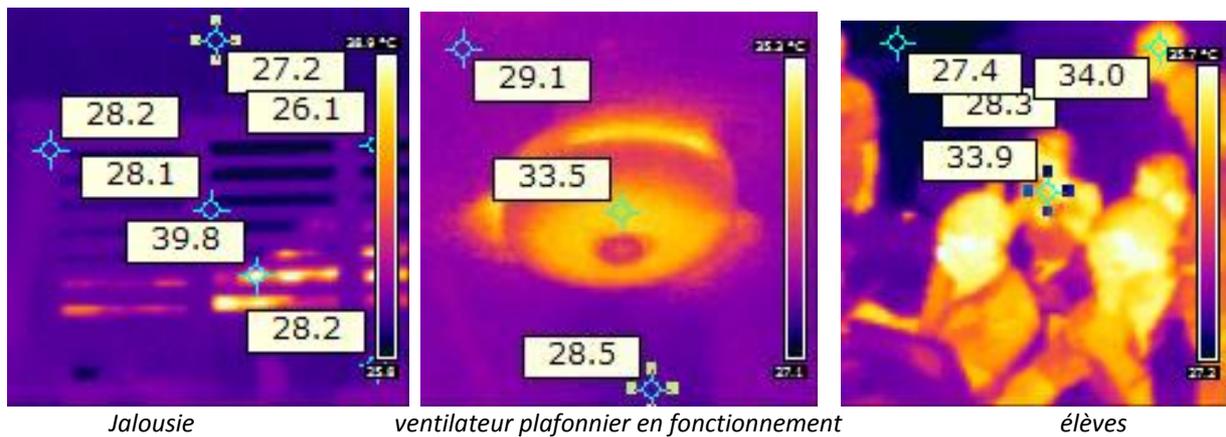


Figure 13: Photographies Infra Rouge à l'intérieur de la salle

Au moment du cliché, la température de l'air intérieur est d'environ 27°C et celle de globe noir 27,5°C. On remarque que la température du haut du mur (début du plafond) est de l'ordre de 27°C alors que celle du mur et de la structure de la jalousie est plutôt proche de 28°C. Les températures de surface extérieures sont plus variables puisqu'on note une température de l'ordre de 40°C et une de 26°C. Dans l'ensemble, les températures de surface sont supérieures à celles de l'air : à cela s'ajoute les températures de surface des élèves, des ventilateurs et du plafond qui sont supérieures (voire bien plus supérieures) à 30°C. Enfin, les températures de surface des murs mitoyens avec d'autres salles viennent compenser légèrement cette tendance élevée des températures de surface. Comme celle du plancher, elles sont plutôt de l'ordre de 27°C. C'est la raison pour laquelle la température de globe noir n'est que très faiblement supérieure à la température de l'air.

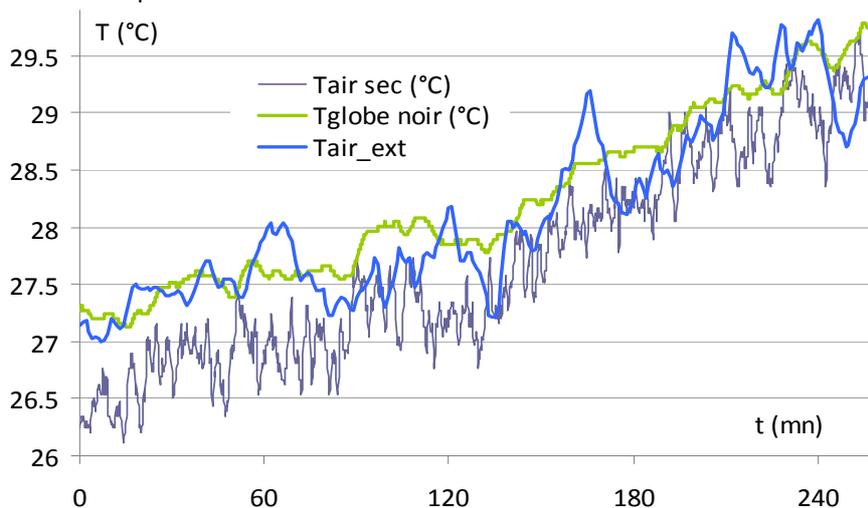


Figure 14 : Températures extérieure et intérieures (air et globe noir) (Expé n°12)

A partir de ces constatations nous pouvons tirer les conclusions générales suivantes :

- Les variations de température d'air extérieure et intérieure sont étroitement liées et mis à part l'impact des charges internes liées à l'occupation, ces températures sont quasiment identiques.
- Les températures de globe noir sont légèrement supérieures aux températures d'air intérieures. Leurs variations sont lissées et on peut noter un léger déphasage et amortissement dû à l'inertie des murs.
- Les variations de température d'air sur une durée d'exposition de 2 h ne dépassent jamais 1°C. Bien évidemment cet écart est plus important si l'exposition est de 4 h, on note alors un écart pouvant parfois atteindre 3°C. Ceci nous conforte dans l'idée d'utiliser des moyennes de ces variables quant à l'interprétation des questionnaires.
- La mesure des vitesses d'air montre une dispersion relativement importante. Cette donnée varie constamment même avec un pas de temps de 10 secondes. Seule une moyenne peut être utilisée pour comparer différents scénarii de fonctionnement (jalousies, portes...).

3.1.4 Résultats des questionnaires

Cette partie vise à étudier de plus près quelques unes des expositions en termes de sensations, jugements et préférences. Il est indispensable de se référer au tableau n°1 et éventuellement aux courbes disponibles en annexe ou dans le corps de ce rapport. Il semble préférable d'étudier les résultats des sondages en lien avec les mesures

précédemment décrites à savoir celles des manipulations n°5, 8, 9 et 12. Ces résultats permettent de faire ressortir l'évolution des votes depuis le début de l'exposition jusqu'à sa fin. De plus, il sera possible de juger la qualité de l'ambiance thermique (début d'approche statistique) en fonction des données mesurées. Les réponses sont traduites en termes chiffrés plus facilement exploitables :

Sensation thermique : Comment vous sentez-vous à ce moment précis ?

Froid	Un peu froid	Ni chaud, ni froid	Un peu chaud	Chaud	Très chaud	Extrêmement chaud
-2	-1	0	1	2	3	4

Préférence thermique : En ce moment, préféreriez-vous avoir ?

Beaucoup plus froid	Plus froid	Un peu plus froid	Aucun changement	Un peu plus chaud	Plus chaud	Beaucoup plus chaud
-3	-2	-1	0	1	2	3

Préférence courant d'air : Préféreriez-vous qu'il y ait ?

Moins de mouvements d'air	Un peu moins de mouvements d'air	Sans changement	Un peu plus de mouvements d'air	Plus de mouvements d'air
-2	-1	0	1	2

Préférence humidité : Préféreriez-vous une ambiance ?

Plus sèche	Un peu plus sèche	Sans changement	Un peu plus humide	Plus humide
-2	-1	0	1	2

Jugements : Vous trouvez cette ambiance ?

Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
0	1	2	3	4

Expérience n°5 : 28 Novembre 2008 de 15 -17h, salle de TD3, IUT génie civil :

Au cours de cette expérience 13 étudiants étaient présents, dont 1 femme, la moyenne d'âge est de 19.23 ans (de 18 à 25 ans). La tenue vestimentaire est relativement homogène 0.4 clo, ce qui correspond à une tenue d'été légère. Les différences physiologiques (poids et taille) interindividuelles sont assez importantes. Par contre au cours de l'heure précédente tous les étudiants ont exercés environ la même activité. Un des questionnaires n'a pas été rempli dans son intégralité. Les renseignements liés à la fin de l'exposition ne sont pas renseignés.

On remarque que la majorité des élèves vote pour une sensation thermique neutre et un jugement thermique confortable. Cependant, il est notable que ce vote se dégrade entre le début et la fin de l'exposition. Ceci peut s'expliquer par diverses raisons. Tout d'abord, une chute de température en fin d'exposition est constatée, ce qui a un effet sur le bilan thermique. Les températures varient entre 25 et 27°C. Il est important de rajouter que durant cette exposition, les étudiants visionnent un film et donc ont un métabolisme d'activité avoisinant celui de « Assis au repos », ce qui est inférieur à l'activité qu'ils ont eu durant l'heure précédant leur arrivée en salle (on constate surtout « debout relaxé », « marche » ou « suivi d'un cours »).

En début de cours, 10 élèves préféraient aucun changement thermique, alors que 2 préféraient avoir un peu plus froid et un autre beaucoup plus froid. Ceci n'est pas vraiment en accord avec les votes effectués : en moyenne on constate une diminution de la sensation thermique (conforme aux préférences en début d'exposition) ce qui ne se traduit pas par une amélioration du jugement. Si l'on regarde en détail les différents résultats, on remarque que ce sont des personnes votant « sans changement » en début d'exposition qui se retrouvent en situation d'inconfort (sensation plus froide ou jugement « légèrement inconfortable »).

En effet, les élèves ayant une préférence pour avoir plus froid en début d'exposition voient leur sensation thermique diminuer ou rester égale, mais pour autant leur jugement reste le même (« légèrement inconfortable »). Toujours est-il que le jugement thermique « légèrement inconfortable » de fin d'exposition est lié à une sensation négative ou neutre. En

Nombre de sondés	13
Brasseur d'air	OUI
Remarques	Cours de langues portes et rideaux fermés
Conditions climatiques intérieures moyenne	
Tair moyenne	26,76
Evolution Tair	25,8 ↗ 27,2 ↘ 26,5
Tglobe	27,19
HR	68,5
Vair	0,35
Sensations thermiques	
St=-1	0 ↗ 2
St=0	11 ↘ 9
St=1	2 ↘ 1
Jugements thermiques	
Jg=0	11 ↘ 8
Jg=1	2 ↗ 4

début d'exposition, cet inconfort était lié à une sensation positive (ou neutre). On note qu'en début d'exposition, 91% des votes de sensation neutre jugent l'ambiance confortable contre seulement 78% en fin d'exposition. Ceci traduit le fait qu'une sensation thermique neutre n'est pas synonyme de confort, que de plus une sensation supposée neutre peut s'avérer « légèrement inconfortable » et qu'enfin une même sensation peut être jugée différemment suivant le contexte (durée d'exposition, activité ...).

Tableau 2: synthèse des différences interindividuelles (Expé.n°5)

Position	Age (ans)	Poids (kg)	Taille (m)	Adu (m²)	Sexe	Tenue (clo)	Activité précédente (met)			
							- 1h	1/2h	-20 min	- 10 min
0	25	61	1.70	1.71	M	0.41	1.2	1.2	1.6	1.0
8	19	80	1.72	1.94	M	0.41	1.2	1.2	1.6	1.6
10	20	90	1.96	2.24	M	0.41	1.0	1.0	1.0	1.0
12	18	72	1.81	1.92	M	0.55	1.0	1.0	1.0	1.0
14	18	46	1.70	1.52	F	0.30	-	-	2.0	-
16	18	52	1.68	1.59	M	0.41	1.0	1.0	1.6	1.6
17	18	70	1.79	1.88	M	0.21	-	1.0	1.0	1.6
20	20	60	1.70	1.70	M	0.41	1.6	1.00	1.0	1.0
21	20	73	1.75	1.89	M	0.41	-	-	-	1.2
23	20	78	1.83	2.00	M	0.41	1.0	1.60	1.6	1.6
24	18	67	1.82	1.87	M	0.29	-	-	1.2	-
27	18	100	1.80	2.20	M	0.39	1.0	1.0	1.0	1.6
29	18	84	1.82	2.06	M	0.41	1.0	1.0	2.0	1.6
Moy	19.23	71.77	1.78	1.89	1 F, 12 M	0.39				

Tableau 3: Jugements thermo-sensoriels (Expé.n°5)

Individu	Tenue (clo)	Sensation thermique		Jugement thermique		Préférence thermique	Jugement Mouvement d'air		Préférence mouvement d'air	Jugement humidité		Préférence humidité
		15 h	17 h	15 h	17 h		15 h	17 h		15 h	17 h	
0	0.41	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-1
8	0.41	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0
10	0.41	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	-1
12	0.55	1	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
14(F)	0.30	1	0	1	1	-1	1	1	0	0	1	0
16	0.41	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
17	0.21	0	0	1	1	-2	0	0	1	0	0	1
20	0.41	0	0	0	0	-1	0	1	1	1	1	-1
21	0.41	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
23	0.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0.29	0	-	0	-	0	0	-	0	0	-	0
27	0.39	0	-1	0	1	0	1	1	-1	1	1	-1
29	0.41	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0

En ce qui concerne les jugements liés à la vitesse de l'air et à l'humidité, les votes sont plus serrés et on ne note aucun changement entre le début et la fin de l'exposition (étant donné qu'il manque une réponse de fin d'exposition, on supposera cet éventuel changement négligeable). Ces jugements sont partagés pour ces deux variables entre « confortable » et « légèrement inconfortable ». Cependant, on note qu'en début d'exposition, même si la majorité des élèves ne préféreraient aucun changement, une préférence pour plus de courant d'air est ressentie. Concernant l'humidité ambiante, les préférences sont partagées.

En ce qui concerne les jugements liés à la vitesse de l'air et à l'humidité, les votes sont plus serrés et on ne note aucun changement entre le début et la fin de l'exposition (étant donné qu'il manque une réponse de fin d'exposition, on supposera cet éventuel changement négligeable). Ces jugements sont partagés pour ces deux variables entre « confortable » et « légèrement inconfortable ». Cependant, on note qu'en début d'exposition, même si la majorité des élèves ne préféreraient aucun changement, une préférence pour plus de courant d'air est ressentie. Concernant l'humidité ambiante, les préférences sont partagées.

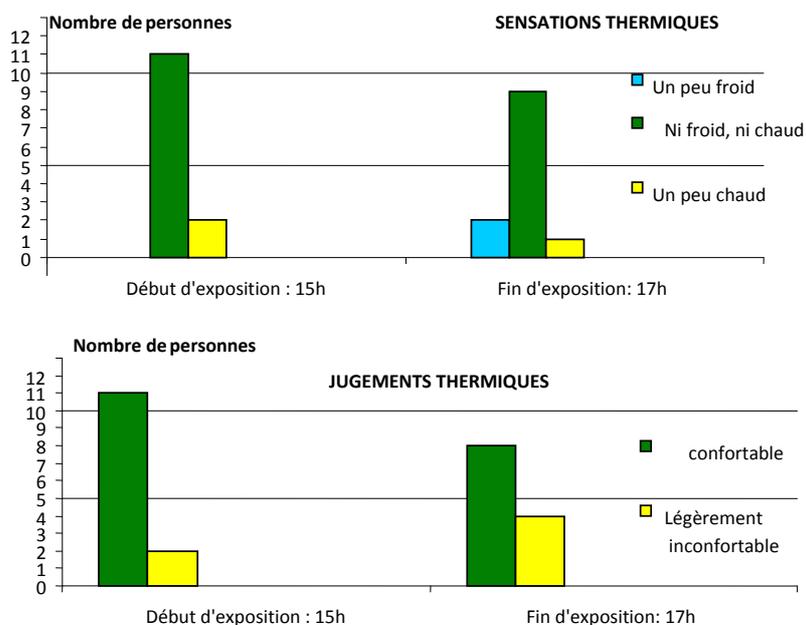


Figure 15 : Sensations et jugements thermiques de l'expérience n°5

Expé. n°8 et 9 : Le 3 Décembre 2008 de 15 - 19h, salle de TD1, IUT génie biologique

Cette exposition de 4h est séparée en 2 étant donné que 2 groupes d'élèves se succèdent (2 créneaux de 2h). Du point de vue des mesures, nous ne notons que très peu de différences, bien que l'ambiance semble très légèrement plus froide durant le deuxième créneau.

Expé. n°8 : 15h-17h

On note un décalage entre le début et la fin de l'exposition d'une sensation plutôt positive vers une sensation plutôt négative, alors qu'on ne constate aucune diminution de la température intérieure. Ceci met en évidence le fait que la composante temporelle est indispensable à l'appréciation du confort thermique. Une ambiance vécue comme plutôt chaude à l'arrivée des étudiants est ressentie plutôt froide au bout de 2h d'exposition avec une activité « assis, suivi d'un cours » et une vêture de 0,37 clo en moyenne, adaptée aux conditions extérieures. Malgré tout, on constate que cette situation est jugée meilleure puisque 7 élèves votant « légèrement inconfortable » en début de cours votent désormais « confortable » à la fin. Ceci est tout à fait en accord avec le vote de préférence thermique : en effet, tous les élèves ne votant pas « sans changement » préféreraient avoir plus frais (les votes vont de « un peu plus froid » à « beaucoup plus froid »), ce qui est le cas en fin d'exposition et est donc jugée comme confortable. Malgré tout, 38% des interrogés ayant une sensation initiale neutre préféreraient avoir un peu plus froid : pour la plupart d'entre eux, cette sensation est jugée légèrement inconfortable.

On note qu'en début d'exposition 56% des élèves ayant une sensation neutre jugent l'ambiance comme confortable, les 43% restant la jugent comme « légèrement inconfortable ». Cette tendance est inversée pour une sensation de 1. En fin d'exposition, 94% des élèves ayant une sensation neutre sont confortables. Par contre, 57% des élèves ayant une sensation de -1 trouvent cela confortable.

Ces constatations laissent apparaître les difficultés quant à une interprétation individuelle du « confort thermique ». Il n'est en effet pas anodin de constater que certains élèves ont « ni chaud ni froid », trouvent cela « confortable » mais préféreraient avoir « un peu plus froid » ou bien qu'un élève ait « légèrement chaud », trouve cela « confortable » et n'aimerait « aucun changement »...

Numéro	8	9
Heure	15h-17h	17h-19h
Nbr de sondés	24	25
Brasseur d'air	Non	
Mesures climatiques intérieures		
Tair	26,32	25,75
Evolution Tair	26,1 ↗ 26,4 ↘ 26,1	26,2 ↘ 25,7 ↘ 25,4
Temp. globe	26,8	26,3
HR	63,7	63,8
Vair	0,45	0,31
Sensations thermiques		
St=-1	0 ↗ 7	4 ↗ 10
St=0	16 → 16	12 ↗ 14
St=1	7 ↘ 1	8 ↘ 0
St=2	1 ↘ 0	1 ↘ 0
Jugements thermiques		
Jg=0	12 ↗ 19	12 ↗ 17
Jg=1	12 ↘ 5	12 ↘ 7
Jg=2		1 ↘ 0

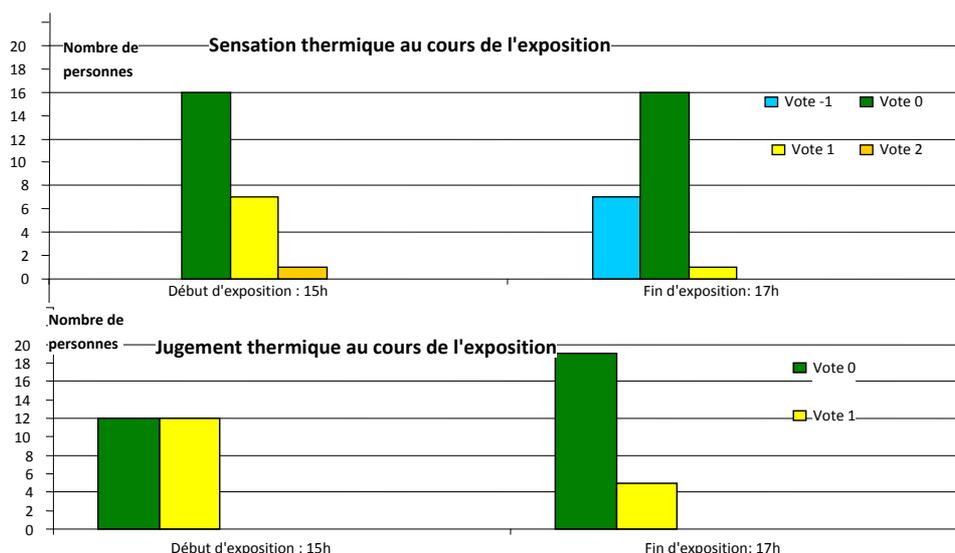


Figure 16 : Sensations et jugements thermique, expérience n°8

En ce qui concerne les mouvements d'air, on note qu'ils sont mieux perçus en début qu'en fin d'exposition. Cette différence de jugement n'est pas directement liée à une variation de la vitesse de l'air, qui est du même ordre de grandeur durant l'occupation de la salle. Etant donné que la sensation thermique moyenne diminue, cet inconfort en fin d'exposition semblerait être lié à des vitesses trop importantes (le questionnaire ne demande pas les préférences en fin d'exposition). Hors, en début de cours, les élèves préféreraient qu'il y ait plus de mouvement d'air... Il semblerait que les avis soient partagés. Tout d'abord, tous les élèves (à l'exception d'un individu) ayant jugé le mouvement d'air initial comme inconfortable confirment leur vote en fin de cours : tous auraient préféré plus de mouvement d'air. A la fin de l'exposition, ces mêmes élèves votent pour une sensation thermique nulle ou positive (ni chaud ni froid ou légèrement chaud) : pour ces élèves là, les vitesses d'air semblent trop faibles. Tous les autres élèves ayant jugé comme inconfortable le mouvement de l'air en fin d'exposition ont voté pour une sensation thermique plutôt négative : pour ceux là, les vitesses d'air semblent trop importantes. Après visualisation de l'emplacement de ces deux groupes d'élèves, il est difficile de trouver un lien entre la position des élèves et leur jugement sur la vitesse de l'air (certains élèves sont côte à côte...)

Les vitesses d'air ne sont donc pas ressenties de la même façon par chacun des individus. Cependant, il est net qu'une augmentation de la vitesse de l'air entraîne un refroidissement du corps et qu'une sensation de chaud est ressentie si cette vitesse semble trop faible au regard de l'individu.

Pour le jugement de l'humidité ambiante, il semble qu'il soit moins bien vécu en fin d'exposition qu'en début d'exposition hors cette variable est constante durant toute l'occupation. Cependant, les réponses au sondage font apparaître une préférence pour une ambiance plus sèche (en début d'exposition). Le jugement reste le même pour les personnes non satisfaites initialement. Sur les 3 autres personnes restantes, 2 votaient pour une sensation thermique négative, 1 pour une sensation thermique positive. Si les individus ont légèrement froid et si de surcroît le mouvement de l'air leur semble trop important, alors une humidité importante peut être ressentie comme désagréable (surtout au niveau cutané). Un individu ayant plutôt chaud et jugeant le mouvement de l'air insuffisant trouvera cette humidité inconfortable car difficile à évacuer à sa surface cutanée.

Expé. n°9 : 17h-19h

Les mesures montrent une diminution de la température de l'air de 0,8°C entre le début et la fin de l'exposition. Ceci se répercute sur les votes de sensation thermique qui se décalent vers une sensation « légèrement froide ». 9 élèves se trouvaient dans une situation « légèrement chaude » voire « chaude » en début d'exposition : tous se trouvent en sensation neutre ou légèrement froide en fin. Ceci entraîne une amélioration du jugement thermique. Leur préférence thermique en début de cours étant d'avoir un peu plus froid, les résultats de ces votes sont tout à fait justifiés. Les élèves ayant « légèrement froid » initialement conservent cette sensation.

On déduit que 83% des élèves étant ayant une sensation neutre trouvent cela confortable en début d'exposition contre 86% en fin d'occupation. Concernant ceux trouvant l'ambiance « légèrement froide », 50% jugent cela « confortable » et « légèrement inconfortable ». Enfin, les 8 personnes ayant « légèrement chaud » en début de cours trouvent tous cela « légèrement inconfortable ». Doit-on en déduire qu'une sensation « légèrement chaude » est moins bien vécu en terme de confort qu'une sensation « légèrement froide » ? Toujours est-il que le lien entre sensation et confort n'est pas toujours évident : une sensation neutre n'est pas synonyme de confort, conclusion que l'on a déjà tirée précédemment. De plus, il paraît étonnant (ou du moins c'était plutôt imprévisible) qu'un nombre

aussi important de vote « légèrement froid » ait lieu, surtout pour des températures supérieures à 25°C. Ceci met en avant le fait que le confort thermique ne peut pas simplement être basé sur une température : c'est bel et bien une combinaison de divers paramètres climatiques ainsi que d'un contexte bien particulier (activité, vêture ...) qui fait toute la complexité de l'interprétation du confort thermique.

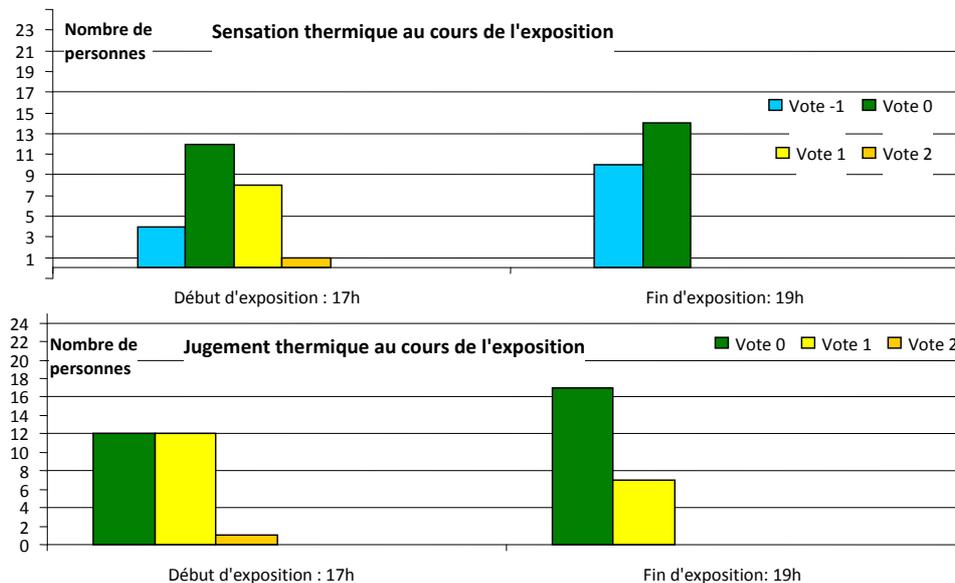


Figure 17 : Sensations et jugements thermiques : expérience n°9

Une large majorité des personnes interrogées jugent le mouvement de l'air 'confortable' même si l'on note une diminution de ce vote entre le début et la fin du cours (72 → 66%). Il est difficile de déterminer si les élèves jugent le mouvement de l'air inconfortable en raison de sa vitesse ou d'un autre phénomène.

Les votes de préférences sont en effet très partagés à tel point que si l'on effectue une moyenne de ces votes, cette dernière est égale à 0,08. Mais comme précédemment, les préférences pour une vitesse d'air plus importantes sont celles d'individus en sensation neutre ou « légèrement chaude » voire « chaude » et inversement (hormis un cas qui se trouve en situation « légèrement chaude » préférerait avoir « un peu plus froid » mais avec « un peu moins de courant d'air »...). Enfin toutes les personnes jugeant cette vitesse d'air inconfortable en fin d'exposition ont légèrement froid et préféreraient moins de courant d'air en début de cours. Il semble que ces préférences soient conservées.

Humidité ambiante : en début d'exposition 50% des individus la trouvent « légèrement inconfortable » voire « inconfortable » car jugée trop forte (2 individus préféreraient cependant qu'elle soit plus élevée). Cette tendance est moins partagée en fin d'exposition où plus de 30% des individus la trouvent toujours inconfortable. Ceux là avaient émis le même vote en début d'exposition.

Expé. n°12 : Mardi 16 décembre 2008, 13 - 17h, salle de cours n°1, bâtiment pilote

Durant cette manipulation, le même groupe d'élèves occupe la salle durant 4h, nous l'étudierons comme une seule et même expérimentation (contrairement à la précédente).

La figure suivante met clairement en évidence l'amélioration de la sensation et du jugement thermique au cours de l'après midi. Les élèves passent d'une sensation plutôt chaude (voire « très chaude ») à une sensation plutôt neutre et les votes « confortable » doublent entre le début et la fin de l'exposition.

En début d'exposition, 85% des étudiants sont en situation au moins « légèrement chaude ». Il faut dire que la plupart des élèves étaient auparavant dehors où la météo y est extrême : température de l'ordre de 29°C, humidité relative supérieure à 60%, faible vent et rayonnement solaire intense (plusieurs pics supérieurs à 1000 W/m²).

On constate qu'en début d'exposition 88% des élèves préféreraient être dans une ambiance au moins « un peu plus froide » : 61% préféreraient avoir un peu plus froid, 23% préféreraient avoir « plus froid », 11% ne souhaite pas de changement. Il apparaît que certains élèves préféreraient avoir plus froid tout en jugeant l'ambiance « confortable ».

Dès la pause, on peut visualiser une adaptation thermique à l'ambiance intérieure de la salle de cours. En effet, le nombre d'élèves votant « confortable » au jugement thermique passe de 10 à 16 : ceci se traduit par une diminution des votes de sensations positifs, laissant apparaître des votes de sensations négatifs et une augmentation des sensations neutres. Tous les votes d'inconfort sont reliés à une sensation positive : une sensation négative est toujours perçue comme confortable. On constate cependant des sensations chaudes confortables. 20% (2/10) des

personnes étant en situation d'inconfort à la pause ne l'étaient pas initialement. Ces deux personnes étaient dans la même sensation thermique (« légèrement chaude ») et auraient préféré avoir « un peu plus froid ».

A la fin de l'exposition, c'est seulement 5 personnes sur 25 qui sont en situation d'inconfort. Tous les 5 votent pour une sensation positive (de 1 à 2). 3 de ces personnes sont restées inconfortable durant tout le cours. Tous les autres se sont adaptés.

Statistiquement, on observe une diminution de 70% de la sensation thermique, passant de 1,23 à 0,35. On remarque que cette diminution est déjà bien engagée à la pause (67%). Ceci indique bien que l'état thermique de la plupart des sondés en début d'exposition est corrélé au contexte précédant le cours (activité, météorologie extérieure...): la salle de cours semble être un contexte adapté.

Du point de vue jugement thermique, on mesure une diminution de 78% de la note d'inconfort. Cependant, cette diminution se fait progressivement entre le début et la fin du cours. Seule l'adaptation à l'ambiance intérieure semble être la raison pour laquelle les votes de confort augmentent (et ceux de sensations passent de plutôt chaud à plutôt neutre-froid). En effet, les variables climatiques intérieures sont relativement constantes durant toute l'exposition.

Heure	13h-17h
Nbre sondés	26
Brasseur d'air	Oui
conditions intérieures	
Tair	28,94
Evolution Tair	28,4 ↗ 29,1 ↘ 28,9
Tglobe	29,1
HR	66,5
Vair	0,35
Sensations thermiques	
St=-2	0 ↗ 1 ↘ 0
St=-1	0 ↗ 1 → 1
St=0	4 ↗ 11 ↗ 16
St=1	14 ↘ 11 ↘ 8
St=2	6 ↘ 1 → 1
St=3	2 ↘ 0 → 0
Jugements thermiques	
Jg=0	10 ↗ 16 ↗ 21
Jg=1	11 ↘ 8 ↘ 5
Jg=2	4 ↘ 1 ↘ 0
Jg=3	1 ↘ 0 → 0

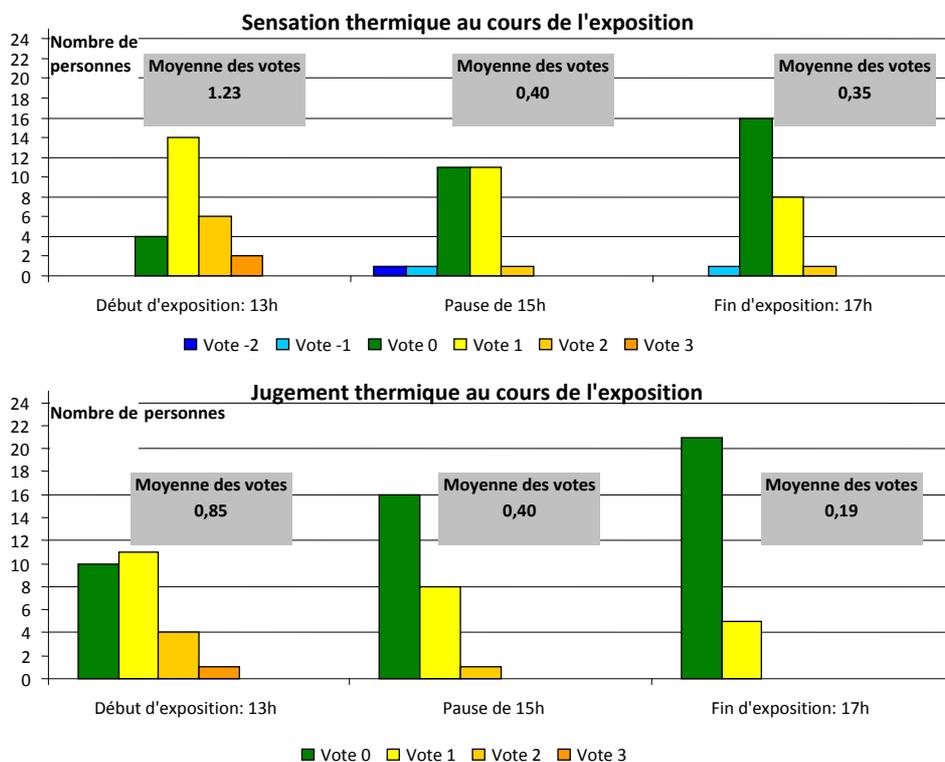


Figure 18 : Sensations et jugements thermiques Expérience n°12

Pour les jugements sur l'humidité et la vitesse d'air, une large majorité des personnes sont satisfaites. En ce qui concerne l'humidité, 7 personnes la jugent au moins « légèrement inconfortable » en début et fin d'exposition (ce ne sont cependant pas les mêmes personnes) en notant une légère amélioration à la pause. Il est difficile de dire si cet inconfort est lié à une humidité excessive ou non tant les votes de préférences sont partagés. On peut seulement dire que chaque personne non satisfaite de l'humidité de l'air sont en situation chaude.

Concernant les mouvements de l'air, leur acceptabilité est croissante. Le nombre de personnes les jugeant confortables passent de 19 à 22 entre le début et la fin du cours (soit de l'ordre de 3/4 des élèves voire plus). En début d'exposition, les insatisfaits préféreraient avoir plus de mouvements d'air et votent pour des sensations thermiques plutôt élevées. Ceci indique bien que les élèves sont tout à fait conscients de l'importance des mouvements de l'air sur l'évacuation de la chaleur.

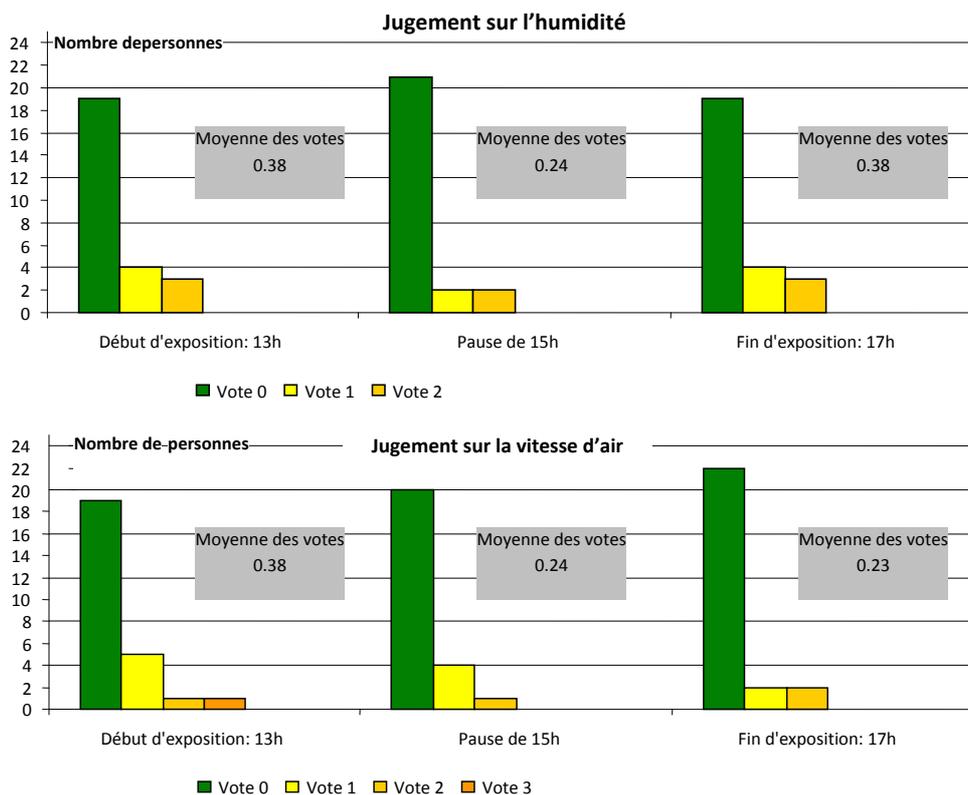


Figure 19: Jugements sur l'humidité et la vitesse d'air au cours de l'exposition (expé. n°12)

De ce qui précède nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Une sensation neutre n'est pas forcément synonyme de confort. En outre, il semble que les personnes percevant une ambiance plutôt froide trouvent cela plus confortable que ceux percevant une ambiance plutôt chaude ;
- Les variations de votes de sensation ne sont pas toujours liées à des variations climatiques : la variable temporelle semble être décisive et révélatrice d'une adaptation thermique ;
- Le contexte précédant l'exposition joue un rôle majeur sur la perception thermique de début d'exposition.
- Pour une interprétation des résultats ciblée sur l'ambiance thermique intérieure, les votes de fin d'exposition semblent plus adaptés : les variables climatiques qui y sont liées (dernière heure par exemple) seront utilisées ; En règle générale, en fin d'exposition, une bonne majorité des élèves est en situation de confort (de 46 à 91%, avec une occurrence plus marquée pour des valeurs supérieures à 70%). Les résultats dans le nouveau bâtiment reflètent bien les efforts mis en œuvre pour la qualité de l'ambiance thermique ;
- Les jugements et de préférences sur l'air sont généralement bien reliés à la sensation thermique. Les mouvements d'air sont bien perçus comme élément moteur du refroidissement du corps humain ;
- Concernant l'humidité, il semble qu'elle soit difficilement interprétée par les élèves. Les votes sont souvent partagés ;
- L'exploitation individuelle des questionnaires est délicate car laisse apparaître des résultats parfois difficile à interpréter. Une étude statistique reprenant les moyennes des votes (de fin d'exposition) ainsi que les moyennes des variables mesurées (sur la dernière heure) doit être menée pour identifier une tendance générale.

3.1.5 Etude statistique

Ce paragraphe a pour but d'analyser la totalité des questionnaires et des mesures effectués dans les salles de classes. Chaque phase sera « résumée » par des moyennes des résultats obtenus : moyenne des votes, moyenne de températures ... L'objectif est d'établir un lien entre les sensations et les jugements et les variables climatiques. Par la suite, nous déterminerons les indicateurs de confort thermique théoriques et les confronter et relier aux divers votes de sensations. A partir de là, il sera possible soit de déterminer un indicateur de confort représentatif des conditions thermiques et fonction d'une ou plusieurs variables climatiques mesurées soit de valider un indicateur de confort d'ores et déjà disponible dans la littérature.

Les conclusions précédentes incitent à utiliser les réponses aux questions de fin d'exposition (et éventuellement celles de milieu d'exposition (pause)) des questionnaires pour une analyse ciblée sur la perception thermique de l'ambiance intérieure. De ce fait, nous déterminerons les moyennes des variables climatiques

mesurées : en tenant compte d'une constante de temps du corps humain de 1h, la moyenne sur la dernière heure du cours sera calculée.

Généralités

En ce qui concerne la répartition de la population des personnes interrogées, elle est représentative d'une population jeune, à mixité sexuelle équilibrée, de poids et de taille normal (plutôt petits gabarits) et habillée d'une tenue légère. L'activité des sondés durant l'exposition sera évaluée à 1,2 met (activité de bureau).

- Ages : La moyenne d'âge de toutes les personnes interrogées est inférieure à 20 ans (19,6 ans) : la plus jeune a 17 ans et la plus âgée a 48 ans (cas unique).
- Physionomie : Les questions liées au poids et à la taille nous permettent le calcul de la surface corporelle dite Aire de Dubois : pour un poids moyen de 62,5 kg et une taille moyenne de 1,7 m, la surface corporelle moyenne est de 1,72 m².
- Sexe : Il apparaît que sur 281 personnes interrogées, 146 sont de sexe masculin et 135 de sexe féminin, ce qui reflète un bon équilibre des personnes sondées.
- Vêtement : La résistance thermique moyenne des tenues vestimentaires s'élève à 0,39 clo.

Jugements et sensations thermiques

Le paragraphe précédent laissait entendre qu'une sensation (légèrement) froide était généralement mieux perçue qu'une sensation (légèrement) chaude. La courbe suivante permet de confirmer cette hypothèse. Elle est représentative de la moyenne des jugements thermique en fonction de celle des sensations thermiques de chaque exposition.

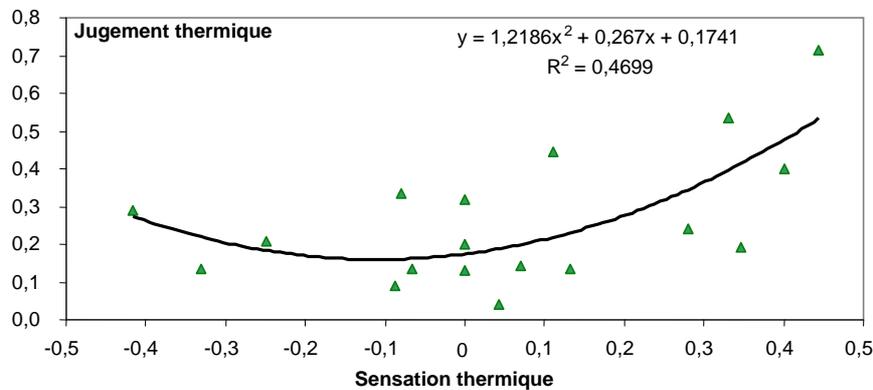


Figure 20 : Jugement thermique en fonction de la sensation thermique

On remarque dans un premier temps que les moyennes des sensations thermiques sont comprises entre -0,42 et 0,44 avec une occurrence bien plus marquée pour des valeurs comprises entre -0,10 et 0,10. Ceci est révélateur du caractère modéré de l'ambiance thermique.

Les moyennes des jugements thermiques quant à elles sont comprises entre 0,04 et 0,71. La courbe de tendance polynomiale d'ordre 2 a un coefficient de détermination, R², relativement faible, et il est donc peu judicieux de se fier à cette dernière pour tirer des conclusions très précises. Cependant on remarque que l'extremum de cette courbe est pour une valeur de sensation égale à -0,11 : le confort serait donc optimum pour des sensations légèrement froides. Cependant, la manipulation n°13 laisse apparaître un jugement thermique de 0,04 pour une sensation de même valeur (0,04). Il est bien évident qu'une ambiance thermique sera considérée comme confortable si les individus sont situation de neutralité.

Sensation thermique et variables climatiques

Dans un premier temps, nous faisons le choix de relier les moyennes des sensations thermiques aux températures mesurées (température de l'air, température opérative). Puis, nous calculerons diverses températures équivalentes (dont on rappellera la définition) afin de les confronter aux résultats des sondages. Nous analyserons les courbes de tendance de type linéaire.

Température d'air : La figure ci-dessous représente la moyenne des sensations thermiques de fin d'exposition en fonction des moyennes sur la dernière heure de l'exposition des températures de l'air. Nous déterminons une courbe de tendance linéaire au coefficient de détermination R² égal à 0,3862, ce qui est bien faible. Le lien entre sensation thermique et température de l'air est bien présent mais les larges écarts par rapport à la courbe de tendance nous incitent à penser que cette sensation thermique doit être reliée à des variables supplémentaires.

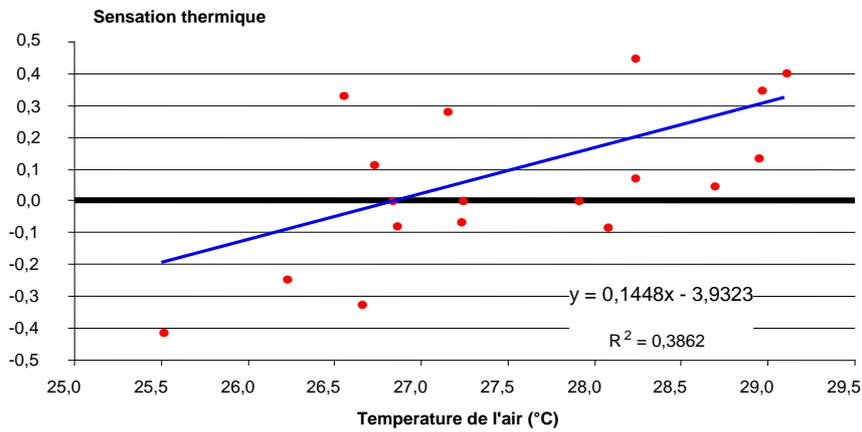


Figure 21 : Sensation thermique en fonction de la température de l'air

Température Opérative : La figure suivante donne la sensation thermique en fonction de la température opérative (T_{op}).

$$T_{op} = \frac{h_c \cdot T_a + h_r \cdot T_{mrt}}{h_c + h_r} ; \quad T_{mrt} = T_g + \frac{h_c}{h_r} \cdot (T_g - T_a)$$

T_g température de globe noir mesurée, T_a température d'air.

Le coefficient de détermination lié à la courbe de tendance est plus élevé (augmentation de 16% par rapport à la température de l'air). Le rayonnement thermique est donc un paramètre à ne pas négliger dans l'évaluation de la sensation thermique, même si son rôle ne semble pas majeur. Un certain nombre de points restent cependant bien éloignés de la courbe de tendance, ce qui indique que la sensation thermique n'est pas uniquement dépendante de cette variable.

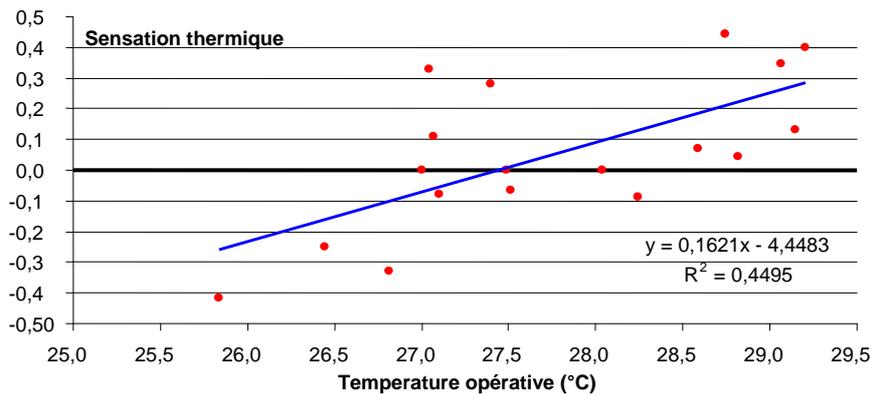


Figure 22 : Sensation thermique en fonction de la température opérative

Température Equivalente : Nous décidons de relier la sensation thermique à la « Equivalent Temperature » (cf. Rapport intermédiaire) qui permet de tenir compte de l'effet de la vitesse d'air :

$$T_{eq} = 0.522 \times T_a + 0.478 \times T_{mrt} - 0.21 \sqrt{v} (37.8 - T_a)$$

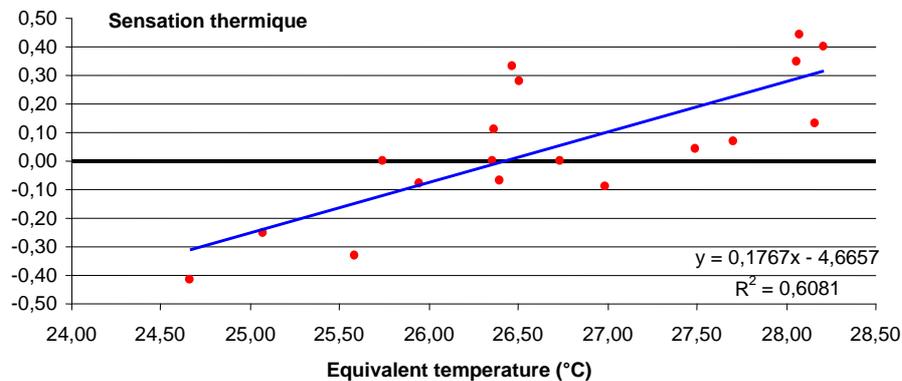


Figure 23 : Sensation thermique en fonction de Température équivalente ET

On constate que le coefficient de détermination de la courbe de tendance a une valeur acceptable et bien supérieure aux 2 figures précédentes. Cette large dispersion met en évidence l'impact fort de la vitesse d'air sur la perception thermique. Ceci nous conforte dans l'idée que la sensation thermique ne peut être une fonction linéaire de la température mais bien une fonction complexe de diverses variables climatiques.

Température effective Standard : Pour aller plus loin dans la démarche, nous déterminons la Standard Effective Temperature ou SET* (cf. Rapport intermédiaire).

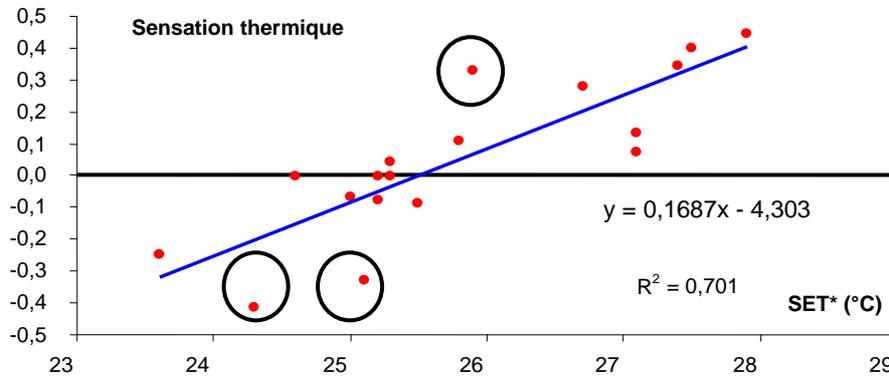


Figure 24 : Sensation thermique en fonction de la SET*

On constate que le coefficient de détermination de la courbe de tendance est égal à 0.701 ce qui est tout à fait acceptable et indicateur de la cohérence entre l'audit réalisé et la SET*. Trois expositions restent cependant bien à l'écart de cette courbe de tendance (points encerclés). On note qu'une sensation neutre correspondrait à une SET* de 25,5°C. Il est cependant difficile d'imaginer à quel environnement thermique cela correspond étant donné que cette température est une fonction de toutes les variables climatiques, de l'activité et de la vêtue de l'individu et également des mécanismes de thermorégulation physiologique. Cependant, un certain nombre d'outils permettent de la déterminer, à condition de connaître toutes les variables dont il dépend. On citera par exemple 'l'ASHRAE Comfort Tool', l'outil en ligne de DeDear et le modèle de thermorégulation physiologique à deux nœuds développé par le laboratoire PHASE. Il est faut de noter que la SET* peut être transcrite en un indicateur de confort comme l'indique le tableau ci-dessous :

Tableau 4: Relation entre SET et sensation

SET*	Sensation thermique	Etat physiologique pour une personne sédentaire
>37,5	Extrêmement chaud	Echec de la thermorégulation
34.5 – 37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30.0 – 34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25.6 – 30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère vasodilatation
22.2 – 25.6	Confortable et acceptable	Neutralité physiologique
17.5 – 22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
....

Ainsi la thermo-neutralité serait atteinte pour des valeurs de SET comprises entre 22,2 et 25,6 °C. La SET* optimale obtenue précédemment est de 25,5°C (sensation neutre), ce qui est une valeur incluse dans l'intervalle [22,2 ; 25,6]. Cependant, on pourrait dire que c'est le maximum de cet intervalle (à 0,1°C près). Il semble donc judicieux de décaler cet intervalle en fonction des résultats issus de la Figure 24 en le centrant sur 25,5°C : on obtient l'intervalle [23,8 ; 27,2] ce qui correspond à des sensations thermiques comprises dans l'intervalle [-0,28 ; 0,28].

Remarque : Nous avons préalablement tracé d'autres courbes représentatives des moyennes de sensation thermique en fonction de ET*, 'Effective Temperature' non standardisée. Il s'avère que la courbe de tendance qui en découle a un coefficient de détermination $R^2 = 0.3594$, ce qui est inférieur au coefficient de détermination de la courbe de tendance des moyennes de sensation en fonction de la température de l'air. Il semble que cet indicateur ne soit pas bien représentatif de la sensation thermique. La seule différence entre l'ET* et la SET est que la SET est calculée après avoir « standardisée » la tenue vestimentaire par rapport à l'activité des sujets : pour une activité de 1,2 met, la résistance thermique de la tenue standardisée est égale à 0.6 clo ce qui est près de 50% supérieur à la tenue réellement portée par les personnes interrogées. La SET a l'avantage par rapport à l'ET* de mieux tenir compte de l'activité et de la tenue du sujet.

Jugement thermique, variables climatiques et indicateurs de confort :

Nous essayons d'établir la même démarche que précédemment. Cependant, comme nous avons d'ores et déjà montré qu'il ne peut y avoir un lien étroit entre les sensation thermiques et les variables climatiques uniquement si les température équivalentes utilisées prennent en compte un maximum de données (température, humidité ...), nous ne tracerons que les courbes de jugement en fonction de telles variables (SET, ET*, DISC ...). Les courbes de tendance qui sont analysées sont de type polynomial d'ordre 2.

Les courbes de jugement thermique en fonction des diverses variables citées précédemment (Température d'air, température opérative, 'Equivalent Temperature' etc.) ne sont pas du tout représentatives et les coefficients de détermination varient de 0.014 (température de l'air) à 0.1849 (SET) ...

Il faut noter que étant donné que le lien entre sensation et jugement n'est pas facile à établir, car c'est le passage d'une perception objective du climat, à une interprétation subjective où interviennent les aspects psychosociologiques individuels qui conduise vers la préférence thermique.

Nous décidons de tracer sur le même graphique ci-dessous qui représente les jugements thermiques en fonction de la SET :

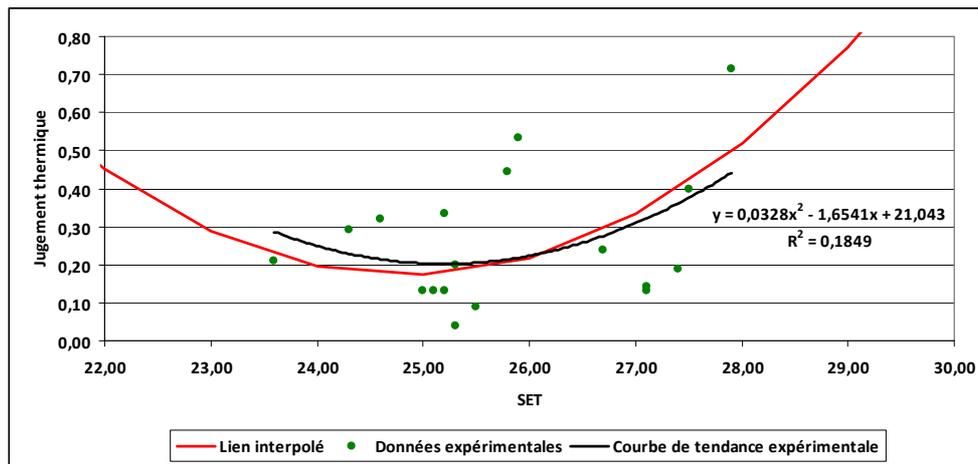


Figure 25 : jugement thermique en fonction de la SET

Il est à noter que sur la, toutes les manipulations sont représentées y compris celles où la sensation thermique est négative. L'ambiance semble confortable pour une SET de l'ordre de 25°C ce qui correspond, d'après la à une sensation thermique de l'ordre de -0,1, il semblerait donc que les occupants 'aiment' avoir très légèrement frais. Cependant, le coefficient de corrélation de cette courbe de tendance est relativement faible et que le vote moyen de jugement thermique maximum est de 0.71. Pour rappel, une valeur de 1 correspond à une ambiance « légèrement inconfortable ». Ce point a déjà été noté lors de la campagne de mesure les conditions thermiques dans les bâtiments n'ont pas énormément varié.

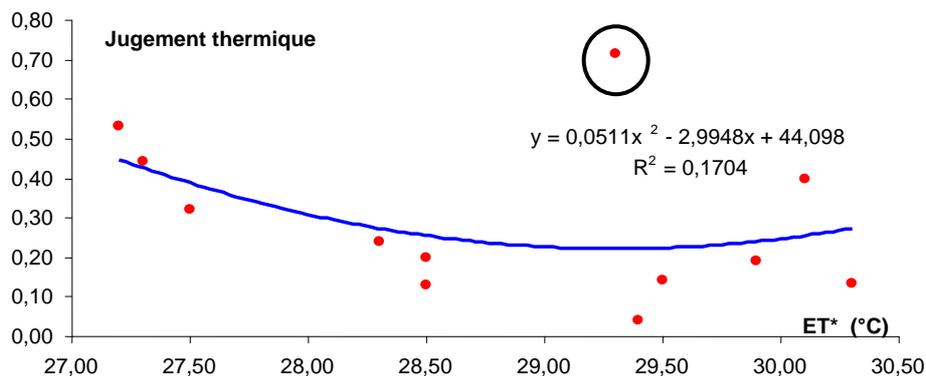


Figure 26 : Jugements thermiques en fonction de ET* (pour les sensations >0)

Nous avons vu précédemment que les sensations froides et chaudes n'étaient pas perçues de la même manière nous décidons donc de faire un tri et de n'étudier que les jugements correspondant à des sensations thermiques positives. On note une nette amélioration et une augmentation significative des coefficients de détermination et ce pour les différentes courbes hormis celle fonction de la SET. Cependant, ces coefficients de détermination restent pour toutes les courbes inférieures à 0,2 ce qui reflète bien la difficulté de relier les votes de jugement thermique à des variables climatiques. On remarque que parmi les jugements dont la sensation thermique

correspondante est positive, un point en particulier se dégage de chaque courbe de tendance : il correspond à la manipulation n°3. Il n'y a cependant rien à signaler de particulier concernant le déroulement de la manipulation. Seulement, beaucoup de paramètres (parfois sans rapport avec les variables climatiques) peuvent influencer le vote des élèves. Il s'avère que les votes des élèves sont relativement extrêmes : 1 « très inconfortable », 3 « inconfortable », 11 « légèrement inconfortable ».

Nous décidons d'exclure ce point afin d'évaluer son impact sur la courbe de tendance et son coefficient de détermination. Nous obtenons la courbe suivante :

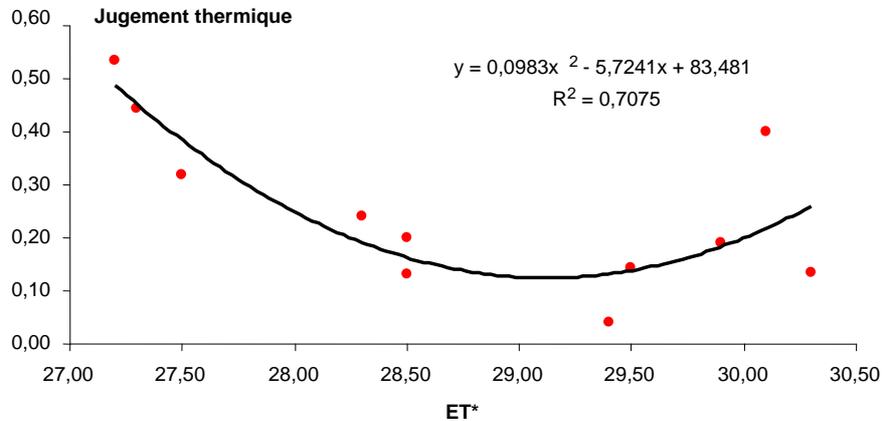


Figure 27: Jugement thermique en fonction de ET* (pour des sensations thermiques positives et hors expé. n°3)

Dès lors le coefficient de détermination de cette courbe de tendance est largement amélioré. Cependant, même si une telle amélioration est notable la corrélation entre jugement et variable physiques reste faible

En ce qui concerne les sensations thermiques, les coefficients de détermination se classaient dans l'ordre croissant comme suit : ET*, Température de l'air, température opérative, Equivalent Temperature, et SET*. Il s'avère que pour les jugements, cet ordre est inversé et est le suivant : SET, Equivalent Temperature, température opérative, ET*, Température de l'air.

Les jugements thermiques seraient donc influencés par peu de variables : températures et humidité principalement. Les élèves n'ayant que très peu de marge de manœuvre sur leur activité et leur vêture, ces variables ne semblent pas être prises en compte dans le jugement thermique de l'ambiance. Il semble en outre difficile d'établir un lien direct entre jugement thermique et variables physique : le jugement thermique est une notion très subjective et influencée par une multitude de préférences psycho-socio-affectives.

Le meilleur coefficient de détermination est obtenu pour la courbe des moyennes de jugements thermiques en fonction de la température de l'air. Ce phénomène est cité dans la littérature les sensations thermiques sont liées aux températures cutanées donc au bilan thermique du corps humain qui pour une même activité et tenue vestimentaire dépend essentiellement des variables climatiques ? Mais ensuite le jugement peut être influencé par la température de l'air qui est directement perçu par les muqueuses au niveau des voies respiratoires supérieures.

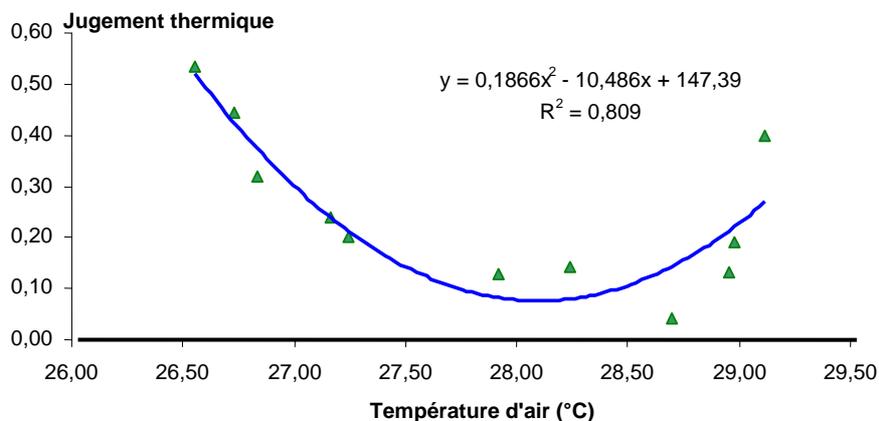


Figure 28 : Jugement thermique en fonction de la température de l'air

Nous obtenons sensiblement la même courbe avec en utilisant la température opérative malgré un coefficient de détermination plus faible ($R^2 = 0,6847$). Ce ci paraît logique puisque la Top dépend fortement de Tair Dans ces conditions expérimentales, la température de confort serait de l'ordre de 28°C.

Il est difficile d'établir un lien entre le jugement thermique et les autres températures équivalentes. La courbe du jugement thermique en fonction de l'Equivalent Temperature reste cependant acceptable. Le coefficient de détermination est égal à 0.2067, ce qui est faible. Cependant, il faut souligner que nous ne disposons que de 12 points de mesures où la sensation thermique est positive, dont 1 est éliminé. L'Equivalent Temperature Index optimum serait de l'ordre de 27,5°C.

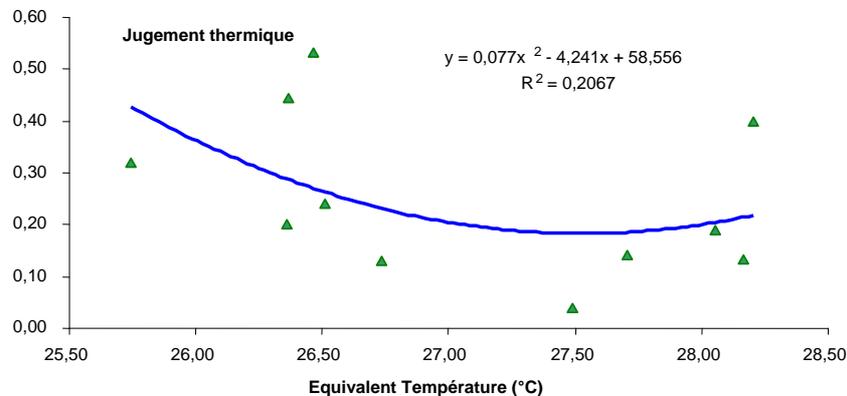


Figure 29 : jugement thermique en fonction de l'Equivalent Temperature

En supposant que $T_{air} = T_{mrt}$ donc $T_{op} = T_{air} = T_{mrt}$, nous traçons l'évolution de l'Equivalent Temperature fonction de la température opérative pour quelques valeurs de vitesse de l'air.

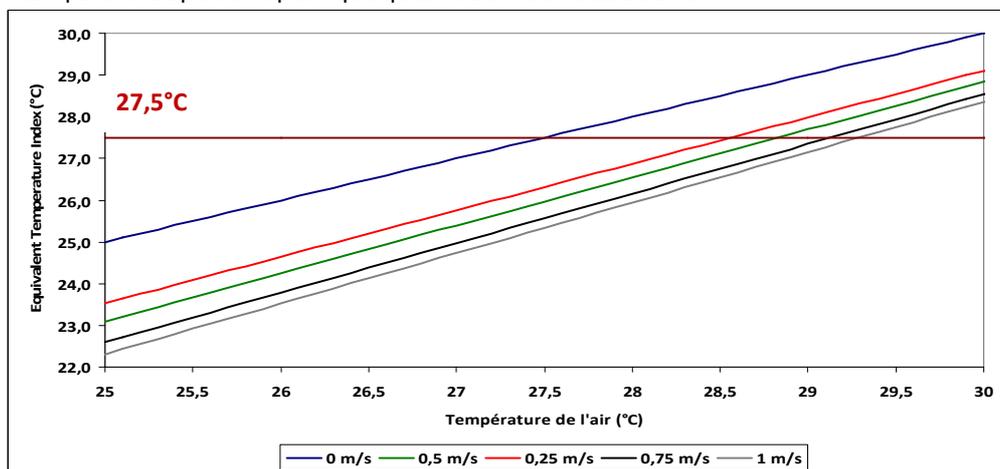


Figure 30 : "Equivalent Temperature" en fonction de la température opérative pour diverses vitesses d'air

On remarque qu'une Equivalent Temperature de 27,5°C correspond en fonction de la vitesse de l'air à des températures de l'air comprises entre 27,5 ($v = 0$ m/s) et 29,5 ($v = 1$ m/s). Ceci est bien en accord les conclusions précédentes.

Lien entre jugement convectif et variables climatiques

La Figure 31 donne la courbe représentative des jugements convectifs en fonction de l'indice Draft Risk supposé être le plus représentatif de l'inconfort lié à un mouvement d'air. Il est à noter que les mesures ont été réalisées avec le matériel du LPBS la sonde n'est pas assez rapide pour nous renseigner sur les valeurs de turbulence de l'air, pourtant indispensable au calcul du DR.

On constate qu'il n'y a aucune corrélation. Cependant il faut faire quelques remarques ; nous avons vu précédemment que le mouvement d'air pouvait être inconfortable car jugée trop faible, hors le Draft Risk correspond un pourcentage d'individus insatisfait d'un mouvement d'air trop important. Il est donc indispensable de repérer les expériences correspondantes et faire la différence entre un inconfort lié à des vitesses trop basses et trop élevées.

Nous décidons de supprimer les points où la vitesse d'air moyenne est inférieure à 0.1 m/s. Une tendance se dessine mais la dispersion reste forte.

Il faut noter que cet indice est plutôt destiné aux conditions de chauffage où l'augmentation de vitesse d'air n'a pas les mêmes effets sur le corps humain et la définition est « un courant d'air est refroidissement local du corps humain lié au mouvement d'air ». Il a été établi pour les conditions suivantes :

- Températures d'air comprises entre 20 et 26°C
- Vitesses d'air comprises entre 0,05 et 0,4 m/s

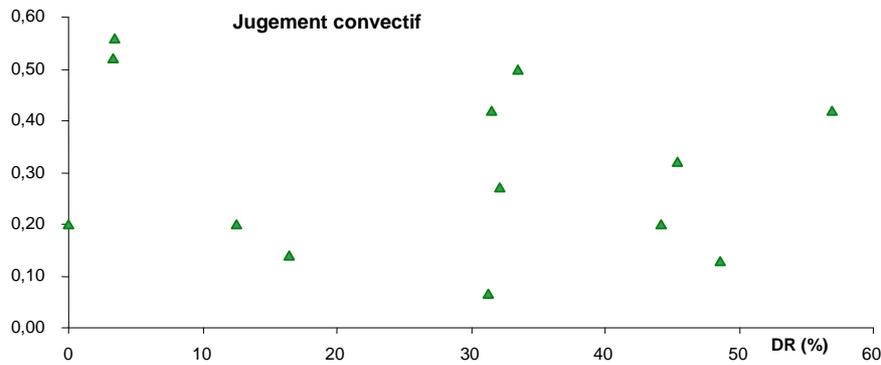


Figure 31 : Jugement convectif en fonction du « Draught Risk »

Dans le cadre de nos expériences, les températures d'air sont comprises entre 26 et 29°C et les vitesses d'air sont parfois supérieures à 0,4 m/s. Le Draft Risk ne semble pas du tout adapté pour déterminer l'inconfort dû aux mouvements d'air en climat chaud. Nous décidons de tracer la courbe représentative du jugement convectif en fonction des vitesses d'air :

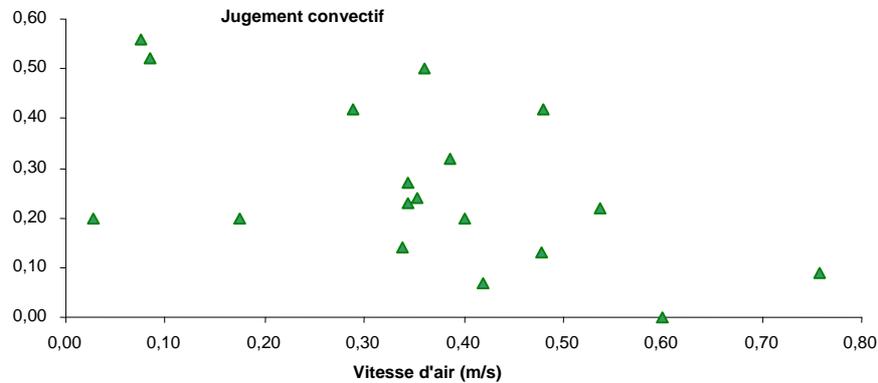


Figure 32 : jugement convectif en fonction de la vitesse d'air

Nous pouvons noter que généralement, le jugement convectif diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Si l'on ne garde que les manipulations où la sensation thermique est positive, cette tendance se précise. Malgré tout, un lien précis ne peut pas être établi uniquement entre le jugement convectif et la vitesse de l'air : d'autres variables doivent être prises en compte.

Nous faisons le choix de tracer les jugements convectifs en fonction de l'Equivalent Temperature qui permet une prise en compte simultanée de la température d'air, de la température moyenne de rayonnement et la vitesse d'air.

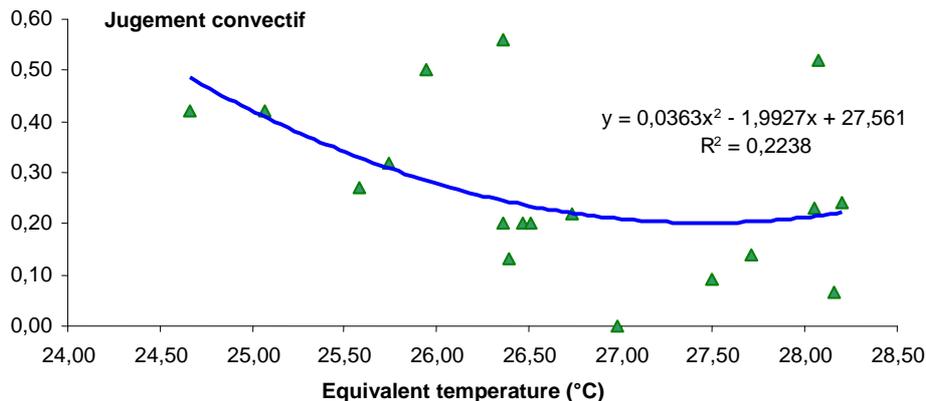


Figure 33 : Jugement convectif en fonction de l'Equivalent Temperature

Malgré quelques points espacés, une légère tendance apparaît. Le jugement optimal correspond à une Equivalent Temperature de l'ordre de 27,5°C. Nous obtenons la même valeur avec le jugement thermique. En deçà la vitesse de l'air est trop importante aux vues d'une température d'air trop faibles. Au-delà d'une telle valeur, soit la vitesse d'air est trop faible, soit la température de l'air trop importante.

La Figure 34 est représentative de l'évolution du jugement convectif en fonction de ET* et de la SET.

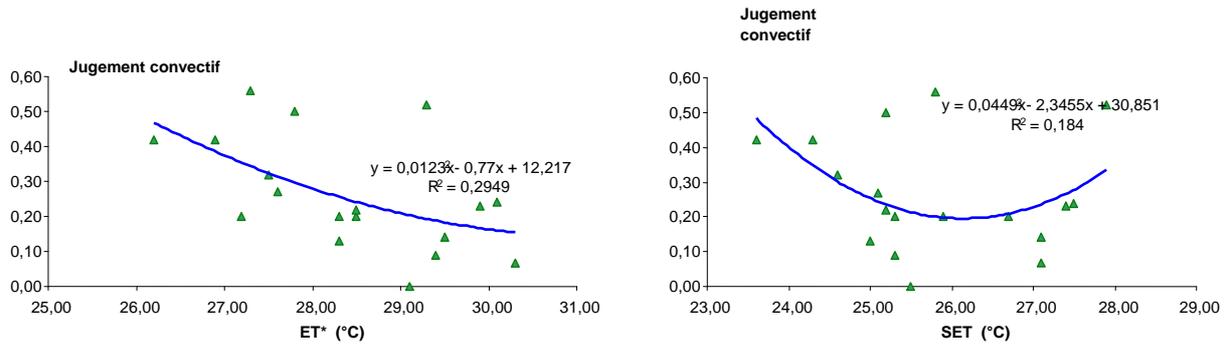


Figure 34 : jugement convectif en fonction de ET* et de SET

Les deux courbes de tendance semblent bien différentes. En ce qui concerne celle fonction de ET*, le jugement convectif décroît lorsque l'ET* augmente et ce jusqu'à une valeur de ET* supérieure à 30°C (les manipulations réalisées ne permettent pas de déduire un optimum). Plus l'ambiance est chaude et humide, plus le courant d'air est ressenti comme confortable. Par contre, la courbe de tendance du jugement convectif en fonction de la SET permet de déduire un optimum de l'ordre de SET=26°C, légèrement supérieur à l'optimum pour le jugement thermique.

Lien entre jugement hygrométrique et variables climatiques

Nous noté que le jugement lié à l'humidité était difficilement interprété par les étudiants. Cette constatation se répercute sur la présente étude statistique. La courbe représentant les jugements hygrométriques en fonction de l'indice DISC, n'est pas représentée car difficilement exploitable. Cet indice DISC est supposé être un indice représentatif des contraintes liées à l'humidité

Si nous analysons les liens avec les variables climatiques et/ ou les températures équivalentes. Les observations sont les suivantes, l'humidité relative à elle seule ne permet pas d'établir un lien avec le jugement hygrométrique. Les variables les plus sensibles à l'humidité relative sont l'ET* et la SET : les courbes qui y sont liés sont celles de la Figure 35.

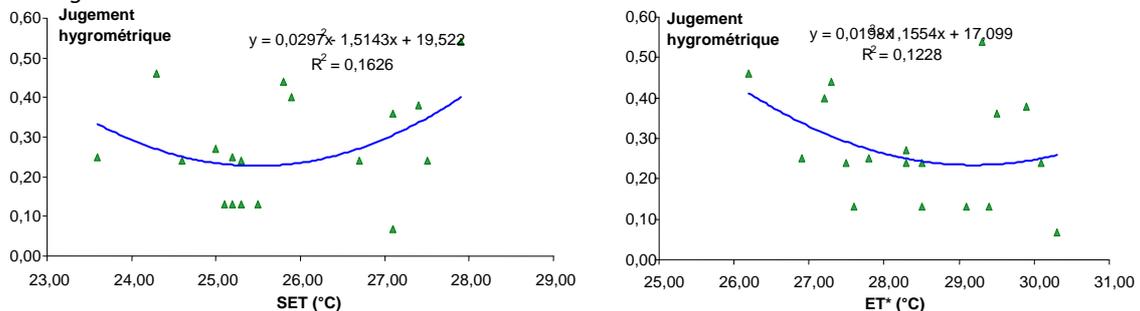


Figure 35 : jugement hygrométrique en fonction de ET* et de SET

On constate que les coefficients de corrélation sont faibles et donc que les conclusions qui sont tirées de ces deux courbes doivent être utilisées avec précaution. Les optimums correspondent à SET = 25,5°C et ET* = 29°C environ. Ces résultats correspondent plutôt bien avec ceux établis pour les jugements thermiques et convectifs ainsi que pour les sensations thermiques. Enfin, nous traçons la courbe représentative du jugement hygrométrique en fonction de l'Equivalent Temperature:

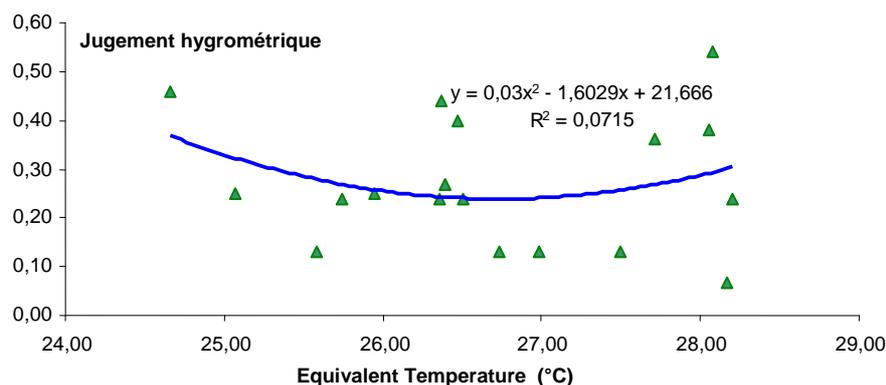


Figure 36 : jugement hygrométrique en fonction de l'Equivalent Temperature

Le coefficient de corrélation est très faible. Cependant, il est intéressant de constater que l'extremum de cette courbe est atteint pour une température équivalente de l'ordre de 27°C, ce qui est du même ordre de grandeur que les résultats précédents.

De ce paragraphe nous tirons les conclusions suivantes :

- Dans le cadre de cette étude statistique, certaines manipulations sont écartées car supposées « hors norme » et nous empêchent de déduire un lien entre les différents résultats. Il est en outre indispensable d'étudier séparément un inconfort lié à une sensation froide et celui lié à une sensation chaude. Seul l'inconfort lié à une sensation chaude est étudiée ;
- Un lien entre sensation et jugement thermique peut être établi mais on constate qu'un jugement thermique est optimum pour une sensation thermique légèrement décalée dans le froid ;
- La sensation thermique pour être correctement exploitée doit être reliée à un maximum de variables climatiques ou à un indicateur les regroupant : la Standard Effective Temperature (SET*) semble être une variable la plus appropriée aux vues de la corrélation qui peut être établie avec la sensation thermique. Une SET* égale à 25,5°C correspond à une sensation neutre. L'Equivalent Temperature est aussi une variable qui peut être reliée à la sensation thermique : la neutralité est alors atteinte pour une valeur de 26,5°C environ ;
- Il est plus difficile de déduire des liens précis entre jugements thermiques et variables climatiques que pour les sensations thermiques. Ceci en raison de préférences individuelles difficilement cernables. Malgré tout, les liens qui sont établis pour les jugements sont en bonne corrélation avec ceux établis pour les sensations. Ainsi, on obtient un optimum pour une SET* = 25°C et une Equivalent Temperature de l'ordre de 27,5°C ;
- Une bonne corrélation entre jugement thermique (dont la sensation thermique est positive) et température de l'air est établi : le coefficient de détermination est égal à 0,809. La température d'air optimale est égale à environ 28°C. La manipulation la plus proche de cet optimum est le premier créneau horaire de la n°13. Voici à titre indicatif les moyennes des données mesurées : Tair = 27,92°C ; Tmrt = 28,63 °C ; v = 0,54 m/s ; HR = 60,85 % ;
- En ce qui concerne les jugements convectifs et hygrométriques, il est difficile de les relier aux indicateurs pourtant représentatifs de l'inconfort lié à la vitesse de l'air ou à l'humidité. Cependant, les courbes de ces jugements en fonction de l'Equivalent Temperature, de la SET ou dans une moindre mesure de l'ET* nous confortent dans l'idée que ces variables sont à exploiter pour l'évaluation du confort dans ces conditions thermiques.

3.2 Essai I : étude longitudinale dans les bureaux

3.2.1 Déroulement et description de l'expérimentation

Comme nous l'avons signalé cette expérimentation ne s'est pas déroulée comme prévu. Tout d'abord en raison de l'inoccupation du nouveau bâtiment et du retard pris dans la livraison du mobilier mais également à cause de l'impossibilité de l'adapter aux bureaux des anciens locaux. Cependant, les derniers jours de la mission, F. Lavoye et dans une moindre mesure deux doctorants, du LPBS (O.Marc et F.Simana), se sont installés dans les nouveaux bureaux afin de se soumettre à l'expérimentation. F.Lavoye s'est installé dans le même bureau durant 9 créneaux horaires (de 1h30 à 3h30 environ) réparties sur 6 journées à partir du 12 Décembre. Les deux doctorants occupaient le même bureau durant 4 créneaux horaires, réparties sur 3 journées.

Méthode : Etant donné que l'expérimentateur lui-même répondait aux questionnaires (qu'il a lui-même rédigé en collaboration avec F.Thellier), son objectivité a été mise à l'épreuve. Cependant, il a été décidé de tester un maximum de configurations de fonctionnement des équipements mis à disposition afin d'évaluer leur impact. Concernant l'expérimentation avec les deux doctorants, une description des enjeux, des questionnaires et du matériel est effectué avant de démarrer la manipulation. Il est bien mis en évidence que c'est aux occupants de gérer l'ouverture/fermeture des jalousies/portes, l'allumage/extinction des ventilateurs... On constate de nombreux ajustements durant une exposition et ce dès l'entrée des individus dans leur bureau. Nous analyserons séparément les données de chaque individu. Concernant les doctorants, il est à noter que les contraintes thermiques sont les mêmes.

3.2.2 Etude avec F. Lavoye

Pour connaître les conditions climatiques extérieures de cette manipulation (cf. Figure 5 et Figure 6). Les différents créneaux horaires d'occupation du bureau et les principaux résultats de mesure sont donnés dans le Tableau 5. Il n'est pas envisageable de présenter ici toutes les mesures effectuées durant les manipulations d'autant plus que les conditions thermiques des différents créneaux sont très proches et sont disponibles en annexe.

La tenue vestimentaire de F.Lavoye est soit de 0,37 clo, soit de 0,41 clo, suivant s'il porte une chemise à manches longues ou à manches courtes. Son activité métabolique est estimée à 1,2 met durant l'occupation. C'est un homme âgé de 25 ans, pesant 61 kg et mesurant 1,7 m, soit une surface corporelle de 1,7 m². C'est un individu non

acclimaté (vit à La Réunion depuis moins d'un mois) et avec des contraintes vestimentaires se limitant au port du pantalon et de la chemise.

Tableau 5: Synthèse générale des différentes expositions

Numéro de la manipulation	1	2	3	4
date	10 décembre		11 décembre	
Heure	9h15-11h25	12h30-15h50	9h10-11h40	12h30-16h
Durée	2h10	3h20	2h30	3h30
Tair moyenne (°C)	27,49	28,04	27,04	27,60
Evolution Tair (°C)	26,93 ↗ 28,16	27,74 ↓ 28,12	26,74 ↗ 27,54	27,43 ↓ 27,01
T° globe moyenne (°C)	28,23	28,8	27,67	28,28
HR moyenne (%)	72,79	73,89	78,25	71,05
Vair moyenne (m/s)	0,11	0,26	0,24	0,37
Sensation thermique	2 ↘ 0	3 ↘ 1	1 ↘ -1	1 ↘ 0
Jugement thermique	2 ↘ 0	3 ↘ 0	0 → 0	1 → 1

Numéro de la manipulation	5	6	7	8	9
date	12 décembre		15 décembre	16 décembre	18 décembre
Heure	9h-11h25	13h-16h	13h10- 16h30	8h55-10h30	9h-11h10
Durée	2h25	3h	3h20	1h35	(2h10)
Tair moyenne (°C)	26,84	27,18	27,27	27,08	27,60
Evolution Tair (°C)	=	=	27,35 ↘ 26,85	26,12 ↗ 27,31	=
T° globe moyenne (°C)	27,48	27,90	28,02	27,78	28,42
HR moyenne (%)	72,81	69,37	67,2	65,25	63,67
Vair moyenne (m/s)	0,15	0,11	0,19	0,10	0,18
Sensation thermique	1 ↘ 0	0 → 0	1 ↘ 0	1 ↘ 0	2 ↘ 0
Jugement thermique	0 → 0	0 → 0	1 ↘ 0	1 ↘ 0	2 ↘ 0

On remarque que les températures d'air moyennes sont de l'ordre de 27°C (une fois 28,04°C) avec des variations plus ou moins importantes suivant les créneaux. Les humidités relatives moyennes varient entre 65 et 80% environ. Les vitesses d'air moyennes sont comprises entre 0,10 et 0,37 m/s : il n'est cependant pas rare de visualiser des pics de vitesses supérieurs à 1 m/s.

En ce qui concerne les sensations et de jugements thermiques, quelque soit l'exposition, la situation tend à s'améliorer. En effet, le sondé arrive généralement dans le bureau en situation d'inconfort chaud et en repart plus proche de la neutralité et avec un inconfort réduit voir nul. En début d'exposition, il n'est pas rare de constater des votes extrêmes : « Très inconfortable », « très chaud ». Ceci est principalement dû à l'activité précédent l'entrée dans le bureau : généralement le sujet était dehors avec une activité de « marche » et souvent chargé du matériel de mesures. En fin d'exposition, seulement 1 manipulation sur 9 est jugée comme « légèrement inconfortable », les autres étant jugées « confortable ». En terme de sensations, 1 manipulation sur 9 est jugée comme légèrement chaude en fin d'exposition, 1 autre comme légèrement froide : les autres manipulations sont jugées thermiquement neutre (« ni chaud, ni froid »).

En dehors des réponses aux questionnaires et des mesures, certains commentaires sont émis et donnent les informations suivantes :

- La livraison récente du bâtiment engendre des odeurs perçues comme désagréable,
- L'ouverture vers l'extérieur et vers les zones de circulation intérieures du bâtiment limite l'intimité. Au cours de travaux à l'extérieur, l'ouverture des jalousies devient acoustiquement désagréable, hors sans leur utilisation, le bâtiment devient inconfortable.
- L'ouverture de la porte a un impact considérable sur l'augmentation des vitesses d'air. Cependant, il est impossible de la laisser ouverte sans qu'elle se referme par courant d'air.
- Le brasseur d'air plafonnier semble mal disposé : son champ d'action n'est pas centré sur la zone d'occupation ;
- Difficulté d'optimiser la vitesse de l'air avec les systèmes mis à disposition : on se retrouve souvent dans des situations extrêmes du type « il y a trop d'air » ou « il n'y a pas assez d'air ».

Journée du 11 Décembre

Nous étudions plus en détail les mesures des variables climatiques de la journée du 11 Décembre : ce jour là, de nombreux ajustements ont été réalisés, d'une part pour pouvoir analyser leur impact sur les données climatiques mais également (dans une moindre mesure) pour un ajustement personnel. Ces ajustements ont un impact prépondérant sur les variations de la vitesse de l'air comme l'indique la *Figure 37*.

Pour rappel, voici le code utilisé pour la description des ajustements :

- J10, J11, J12 : Jalousies intérieures fermées, entrouvertes, ouvertes,
- JE0, JE1, JE2 : Jalousies extérieures fermées, entrouvertes, ouvertes,
- P0, P1 : Porte fermée, porte ouverte,
- V0, V1, V2, V3 : brasseur d'air éteint, en position maximum, en position moyenne, en position minimale

Il est à noter qu'en début d'exposition la porte est fermée, les jalousies intérieures aussi, le ventilateur est éteint mais les jalousies extérieures sont restées ouvertes. Dans ces conditions, la vitesse de l'air intérieure est faible. Lorsque les jalousies intérieures sont ouvertes par l'occupant pour augmenter la vitesse de l'air, cette dernière augmente considérablement avec des pics à plus de 1 m/s. Les valeurs moyennées sur une minute varient entre 0,1 et 0,8 m/s. Vers 11h10, la vitesse d'air élevée est ressentie par l'occupant : ce dernier note une sensation de froid et décide donc de mettre en position entrouvertes les jalousies intérieures et extérieures, réduisant nettement les vitesses de l'air dont les valeurs moyennes sont alors inférieures à 0,2 m/s. Le sujet quitte le bureau à 11h30 pour y revenir au bout d'une heure : préférant avoir « un peu plus froid », il décide d'ouvrir complètement les jalousies extérieures : l'impact est net et les vitesses d'air augmentent jusqu'à 1 m/s. Au moment où la porte s'ouvre (un visiteur arrive), les vitesses moyennées sur 1 min dépasse les 1 m/s : ceci est ressentie comme inconfortable par l'individu qui referme la porte et décide de mettre en position entrouverte les jalousies extérieures. Cependant, la vitesse d'air devient alors trop faible et l'individu a chaud : « il fait lourd ». L'action se fait pas à pas : ouverture des jalousies extérieures, ventilateur mis en position maximum, jalousies intérieures ouvertes afin d'augmenter la vitesse de l'air. Avant de quitter le bureau, le ventilateur est éteint et les jalousies mises en position entrouvertes. On constate que même si les moyens mis en œuvre permettent de moduler la vitesse de l'air intérieur, il s'avère qu'il semble difficile de l'ajuster précisément : les vitesses d'air sont perçues soit trop élevées, soit trop faibles.

La *Figure 38* représente l'évolution des températures et de l'humidité intérieures. On constate une évolution légèrement croissante de la température de l'air avec des fluctuations relativement importantes. On remarque cependant que l'ouverture des jalousies permet une diminution de la température de l'air et de globe noir. Cette dernière lisse les variations de la température d'air et on peut également noter un léger décalage et amortissement des fluctuations, ceci est en grande partie liée à l'inertie thermique du capteur. Sur la *Figure 38*, on constate de nettes diminutions de l'humidité relative, qui se produisent lorsque les jalousies intérieures et extérieures sont simultanément ouvertes, ce qui permet une meilleure circulation de l'air. Ceci a pour effet de rapprocher les conditions intérieures des conditions extérieures : en effet cette diminution est visible sur la figure suivante, représentant les conditions hygrothermiques extérieures au moment de l'exposition. On remarque que les températures intérieures sont inférieures aux températures extérieures, ce qui s'explique par la bonne conception du bâtiment (protection solaire, ventilation...) et les faibles charges internes (peu voire pas d'occupants, pas d'équipements électriques...)

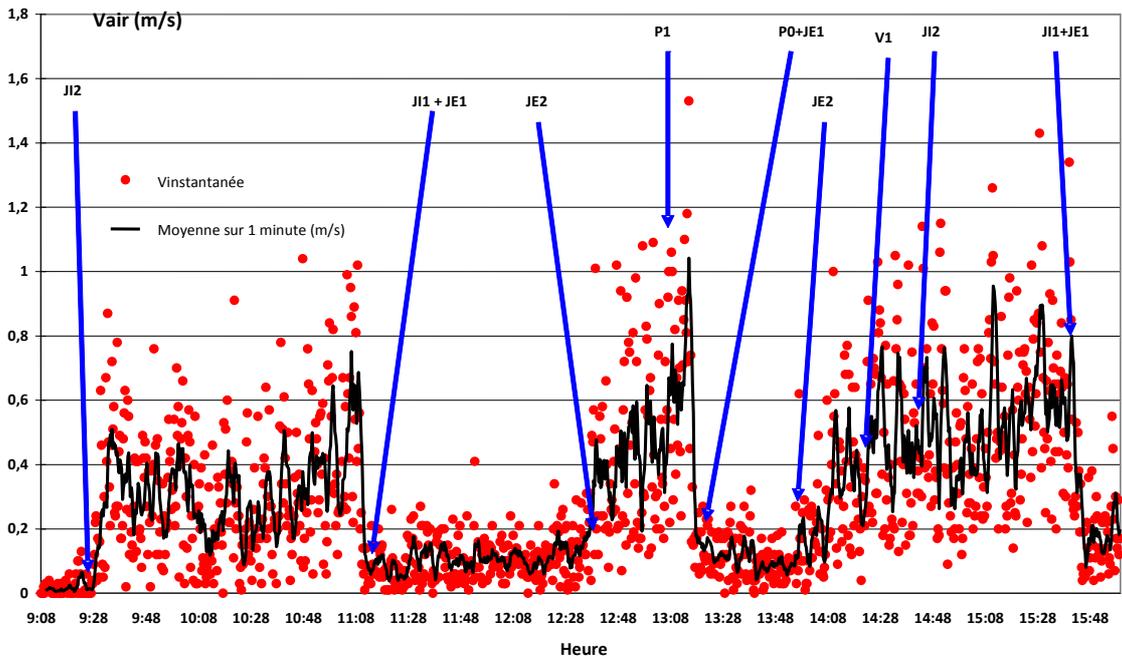


Figure 37 : Vitesses d'air et visualisation des ajustements comportementaux

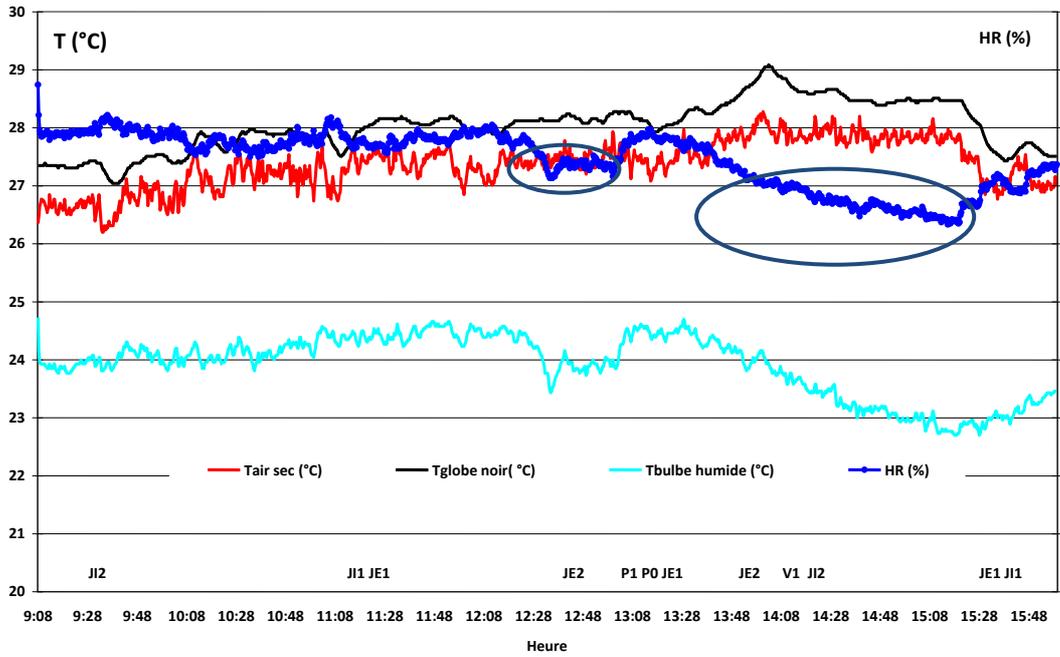


Figure 38 : Conditions climatiques intérieures du 11 décembre

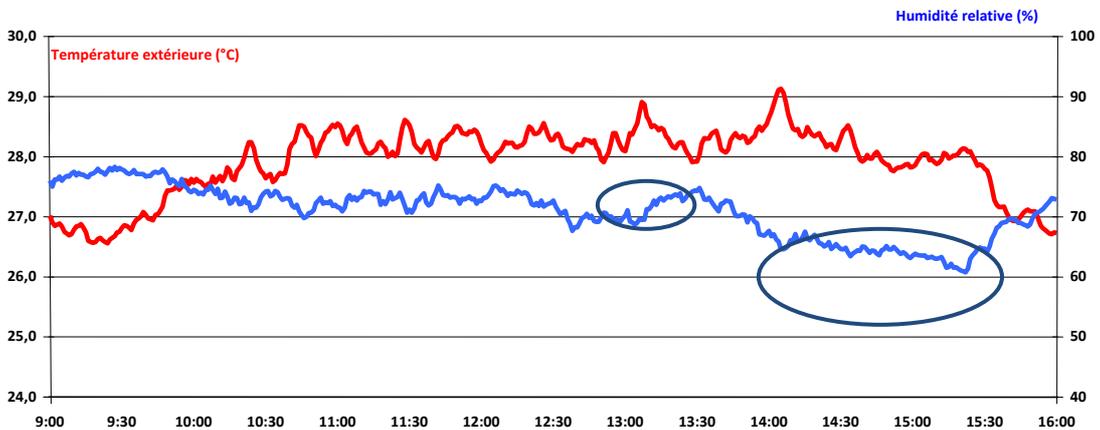


Figure 39 : Température et de l'humidité relative extérieure le 11 décembre

3.2.3 Etude avec les doctorants

Les créneaux d'occupation du bureau des doctorants et les moyennes des valeurs de mesures sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Synthèse générale des différentes expositions

Numéro de la manipulation	1	2	3	4
date	12 décembre	18 décembre	19 décembre	
Heure	13h20-16h15	13h25-14h45	8h50-11h	13h-15h
durée	2h55	1h20	2h10	2h
Température d'air moyenne (°C)	27,72	28,45	27,70	28,14
Evolution température d'air (°C)	27,55 → 27,74	28,08 → 28,35	27,08 ↗ 28,55	28,35 ↘ 27,89
T° de globe noir moyenne (°C)	28,06	29,19	28,18	28,91
Humidité relative moyenne (°C)	68,94	64,65	60,77	64,27
Vitesse d'air moyenne (m/s)	0,38	0,22	0,09	0,19
Evolution des Sensations thermiques				
O.Marc	2 ↘ 0	2 ↘ 0	2 ↘ 0	1 → 1
F.Simana	1 ↘ 0	2 ↘ 0	2 ↘ 0	2 ↘ 1
Evolution des Jugements thermiques				
O.Marc	2 ↘ 1	3 ↘ 0	2 ↘ 0	1 → 1
F.Simana	1 ↘ 0	3 ↘ 0	2 ↘ 0	2 ↘ 1

Les résistances vestimentaires des deux individus est de l'ordre de 0,4 clo (entre 0,39 et 0,41 clo). O.Marc est un homme de 27 ans mesurant 1,83 m pour 75 kg, soit une surface corporelle de 1,97m². F.Simana quant à lui est un homme de 23 ans mesurant 1,7 m pour 80 kg, soit une surface corporelle de 1,92 m².

Les températures sont du même ordre de grandeur que précédemment bien que légèrement supérieures : le bureau des doctorants est situé sur l'aile ouest du bâtiment et on constate la présence de taches solaires à l'intérieur du bureau : à cet endroit les protections solaires semblent moins efficaces. Les températures d'air sont de l'ordre de 28°C et relativement constantes durant l'exposition, même si l'on note des fluctuations de l'ordre de 1°C.

L'exposition du 19 décembre laisse apparaître des variations plus marquées ; hausse des températures la matinée, puis baisse dans l'après midi. Les humidités relatives moyennes sont comprises entre 60 et 70%, et les vitesses d'air sont comprises entre 0,1 et 0,38 m/s, ce qui est du même ordre de grandeur que précédemment.

Pour les jugements thermosensoriels comme précédemment, la situation générale s'améliore au cours de l'occupation puisque les individus passent généralement d'une situation d'inconfort chaud à une situation ; sensation neutre, jugement confortable. On note des votes extrêmes (« très inconfortable », « chaud ») des sujet à leur entrée dans le bureau ce qui est dû à leur activité précédente mais également au fait qu'il n'y a que peu de différences entre le climat intérieur et le climat extérieur. Le fait que le bâtiment soit protégé du soleil et suffisamment ventilé permet d'atteindre des conditions favorables en fin d'exposition.

Journée du 19 Décembre

Nous étudions de plus près les mesures du 19 Décembre. A leur arrivée à 8h50, les jalousies extérieures et intérieures sont fermées, la porte est ouverte et les ventilateurs éteints. La première action consiste à ouvrir complètement les jalousies intérieures et extérieures, ce qui a un impact visible sur l'évolution des vitesses d'air. La raison de cette action est la sensation thermique chaude. Puis, le brasseur d'air est mis en marche à 10h15 augmentant encore plus les vitesses d'air jusqu'à son extinction à 11 h (au même titre que la fermeture de la porte). A leur retour vers 13 h, la porte est laissée ouverte et les ventilateurs sont rallumés, cependant, ces dispositions ne semblent pas suffisantes aux vues des votes en fin d'exposition.

L'impact du brasseur d'air est bien visible par rapport aux autres configurations. Il permet en effet de dépasser la barre des 0,2m/s, maximum atteint lorsque seulement les jalousies sont utilisées. Par contre il n'y a pas de modification de l'évolution des températures et humidités. En ce qui concerne la température moyenne de globe noir, comme précédemment elle lisse les variations de températures d'air et les amortit et décale légèrement.

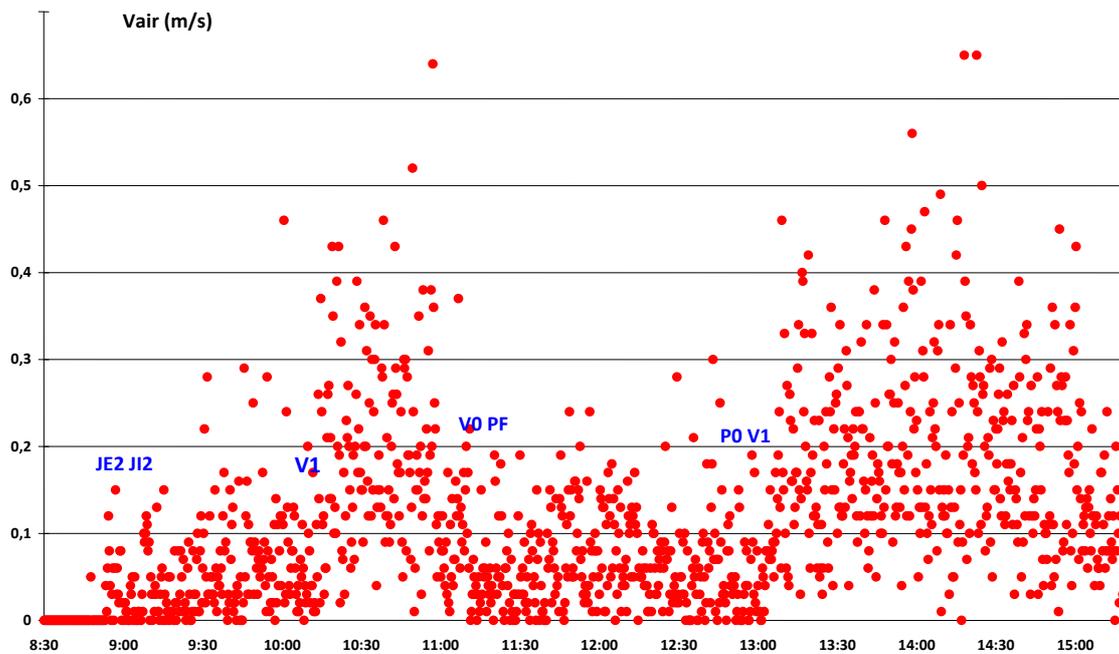


Figure 40 : Evolution de la vitesse de l'air et visualisation de l'impact des ajustements

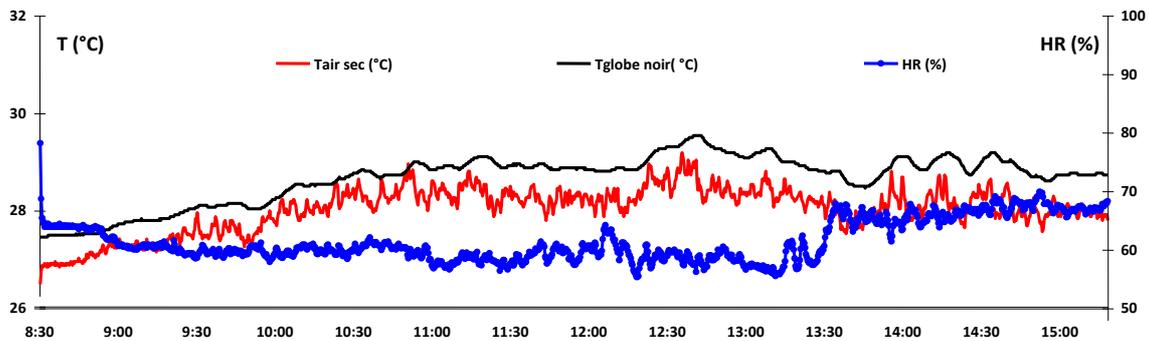


Figure 41 : Evolution de la température d'air, de globe noir et de l'humidité relative (expé. n°3 et 4)

Les commentaires généraux des 2 occupants sur l'ensemble de l'exposition soulignent le fait qu'un système pour bloquer la porte serait bienvenu. De plus, il semble qu'ils soient éblouis par le soleil rasant en fin de journée : les protections solaires ne sont pas alors entièrement efficaces.

De ce paragraphe nous tirons les conclusions suivantes :

- Les conditions intérieures et extérieures sont très proches lorsque les jalousies extérieures sont ouvertes, et d'autant plus si simultanément avec les jalousies intérieures.
- Les actions sur les systèmes mis à disposition des occupants ont un impact principalement sur les vitesses d'air, mais ne permettent pas un ajustement fin. Malgré cela, ils permettent une nette amélioration des sensations thermiques ;
- les protections solaires et surventilation permettent d'améliorer les conditions intérieures par rapport aux conditions extérieures, par une limitation des apports solaires et une augmentation des vitesses d'air. Ainsi au bout d'un certain temps d'exposition, les votes de jugement et de sensations tendent respectivement vers un jugement « confortable » et une « sensation neutre », alors qu'ils étaient en début d'exposition plutôt inconfortable et chaud.
- Les conditions intérieures semblent tout à fait acceptables aux vues des réponses aux questionnaires. Les équipements mis à disposition des utilisateurs sont utilisés à bon escient et leur efficacité est validé;

Conclusion

Cette campagne de mesures a permis de tirer une multitude de conclusions quant à la validation en termes de 'confort thermique' de principes constructifs et des systèmes énergétiques adaptés à des bâtiments naturellement ventilés en climat chaud.

Malgré les difficultés rencontrées liées principalement au retard pris dans la livraison du bâtiment, une expérimentation a pu être menée à bien et est riche en informations. Une autre expérimentation a été initiée, cependant la durée de la mission n'a pas pu permettre de la mener à bout : quelques conclusions ont pu cependant être émises.

Il s'avère que les dispositions mises en œuvre pour limiter ou annuler les besoins en climatisation sont tout à fait efficaces et satisfont d'une manière générale les utilisateurs du bâtiment. Cependant, en salles de cours, les élèves sont peu disposés à ajuster les moyens mis à leur disposition pour maintenir des conditions intérieures confortables : on ne remarque en effet que très peu d'interventions des étudiants durant le cours, ces dernières se faisant généralement à leur entrée dans la salle (allumage des ventilateurs, ouverture des jalousies) ou bien par l'enseignant.

Les mesures de données climatiques intérieures mettent en évidence le caractère bioclimatique de la conception du bâtiment : conditions intérieures proches des conditions extérieures, faibles variations... Les dispositifs ont une influence principalement sur les vitesses d'air qui peuvent atteindre régulièrement 1m/s, sans générer d'inconfort. Cependant, ces dispositifs ont un impact sur les variations de température et d'humidité (principalement l'ouverture des jalousies), puisqu'ils permettent l'évacuation de la chaleur et de l'humidité internes tout en faisant circuler de l'air aux conditions climatiques extérieures.

En règle générale, on constate une diminution de la sensation thermique entre le début et la fin d'une exposition (d'une sensation chaude à une sensation froide ou neutre) ce qui est ressenti comme confortable : en effet, même si un lien entre sensation et jugement thermique est difficile à extraire, il s'avère qu'un jugement « confortable » peut être mis en parallèle avec une sensation neutre voire « légèrement froide » mais très rarement « légèrement chaude ». De plus, le jugement lié à l'acceptabilité des mouvements d'air met clairement en évidence le fait qu'une vitesse d'air importante est d'autant mieux ressentie que l'individu a chaud et vice versa.

En ce qui concerne le jugement hygrothermique, il s'avère que l'inconfort lié à l'humidité est difficilement interprété par les individus à tel point qu'il est difficile d'en déduire une tendance significative.

L'étude statistique qui a été menée fait ressortir des températures de confort, des liens entre sensation ou jugement et variables climatiques ce qui est valide notre choix de certaines variables dans l'interprétation d'une ambiance thermique en termes de confort : la Standard Effective Temperature (SET), l'Equivalent temperature et dans une moindre mesure l'ET* sont des données directement exploitables et tout à fait appropriées à l'évaluation des conditions de confort hygrothermique.

Table des figures et tableaux

Figure 1 : Conditions climatiques extérieures durant les 4 semaines de la campagne expérimentale	6
Figure 2 : Comparaison des mesures effectuées avec le matériel du LPBS (E) et celui de PHASE (F)	8
Figure 3 : Photo de la salle de cours de l'ancien bâtiment de l'IUT.....	9
Figure 4 : Photo de la salle de cours du bâtiment pilote.....	10
Figure 5: Température et humidité relative extérieure durant la période de mesure	10
Figure 6: Rayonnement solaire sur une surface horizontale.....	10
Figure 7: Météorologie locale durant la demi-journée de l'expé. n°5.....	14
Figure 8 : Conditions intérieures, expé. n°5	15
Figure 9: Météorologie locale durant l'exposition, (expé. n°8 et 9).....	16
Figure 10 : Résultats des mesures de l'après midi du 3 Décembre (expé. n° 8 et 9)	17
Figure 11 : Météorologie locale durant l'exposition du 16 décembre (expé. n°12)	18
Figure 12 : Résultats de mesures de l'après midi du 16 Décembre, bâtiment pilote (expé. n°12)	19
Figure 13: Photographies Infra Rouge à l'intérieur de la salle.....	20
Figure 14 : Températures extérieure et intérieures (air et globe noir) (Expé n°12)	20
Figure 15 : Sensations et jugements thermiques de l'expérience n°5.....	23
Figure 16 : Sensations et jugements thermique, expérience n°8	24
Figure 17 : Sensations et jugements thermiques : expérience n°9.....	25
Figure 18 : Sensations et jugements thermiques Expérience n°12	26
Figure 19: Jugements sur l'humidité et la vitesse d'air au cours de l'exposition (expé. n°12)	27
Figure 20 : Jugement thermique en fonction de la sensation thermique	28
Figure 21 : Sensation thermique en fonction de la température de l'air	29
Figure 22 : Sensation thermique en fonction de la température opérative	29
Figure 23 : Sensation thermique en fonction de Température équivalente ET	29
Figure 24 : Sensation thermique en fonction de la SET*	30
Figure 25 : jugement thermique en fonction de la SET	31
Figure 26 : Jugements thermiques en fonction de ET* (pour les sensations >0).....	31
Figure 27: Jugement thermique en fonction de ET* (pour des sensations thermiques positives et hors expé. n°3).....	32
Figure 28 : Jugement thermique en fonction de la température de l'air	32
Figure 29 : jugement thermique en fonction de l'Equivalent Temperature.....	33
Figure 30 : 'Equivalent Temperature' en fonction de la température opérative pour diverses vitesses d'air	33
Figure 31 : Jugement convectif en fonction du « Draught Risk »	34
Figure 32 : jugement convectif en fonction de la vitesse d'air.....	34
Figure 33 : Jugement convectif en fonction de l'Equivalent Temperature.....	34
Figure 34 : jugement convectif en fonction de ET* et de SET	35
Figure 35 : jugement hygrométrique en fonction de ET* et de SET	35
Figure 36 : jugement hygrométrique en fonction de l'Equivalent Temperature.....	35
Figure 37 : Vitesses d'air et visualisation des ajustements comportementaux	39
Figure 38 : Conditions climatiques intérieures du 11 décembre.....	39
Figure 39 : Température et de l'humidité relative extérieure le 11 décembre.....	39
Figure 40 : Evolution de la vitesse de l'air et visualisation de l'impact des ajustements	41
Figure 41 : Evolution de la température d'air, de globe noir et de l'humidité relative (expé. n°3 et 4).....	41
Figure A.42: Plans et maillages d'une salle informatique et d'une salle de cours.....	44
Figure A.43: Plans et maillages des bureaux de 2 personnes et de 3 personnes	44
Tableau 1: Synthèse des différentes expériences de type essai III	11
Tableau 2: synthèse des différences inter-individuelles (Expé.n°5).....	22
Tableau 3: Jugements thermo-sensoriels (Expé.n°5)	22
Tableau 4: Relation entre SET et sensation.....	30
Tableau 5: Synthèse générale des différentes expositions	37
Tableau 6 : Synthèse générale des différentes expositions.....	40
Tableau A.7: Grille de mesures des conditions climatiques	45
Tableau A.8 : Grille de mesures des températures de surface (caméra infra-rouge FLIR).....	45

Annexes

Annexe 1 : essai II, maillage des pièces pour établir les cartographies

Les plans et maillages ci-dessous sont donnés à titre indicatif. En effet, il est probable qu'une fois sur le terrain, on ne puisse effectuer les mesures dans ces pièces ou bien que la disposition du mobilier (etc.) soit différente. Cependant, ces figures permettent de visualiser le niveau de précision qui est visé et quoiqu'il en soit les mesures s'effectueront dans des conditions très voisines de celles présentées dans cette partie. On numérotera les points de gauche à droite puis de haut en bas du plan. Les points noirs correspondent aux points de mesure.

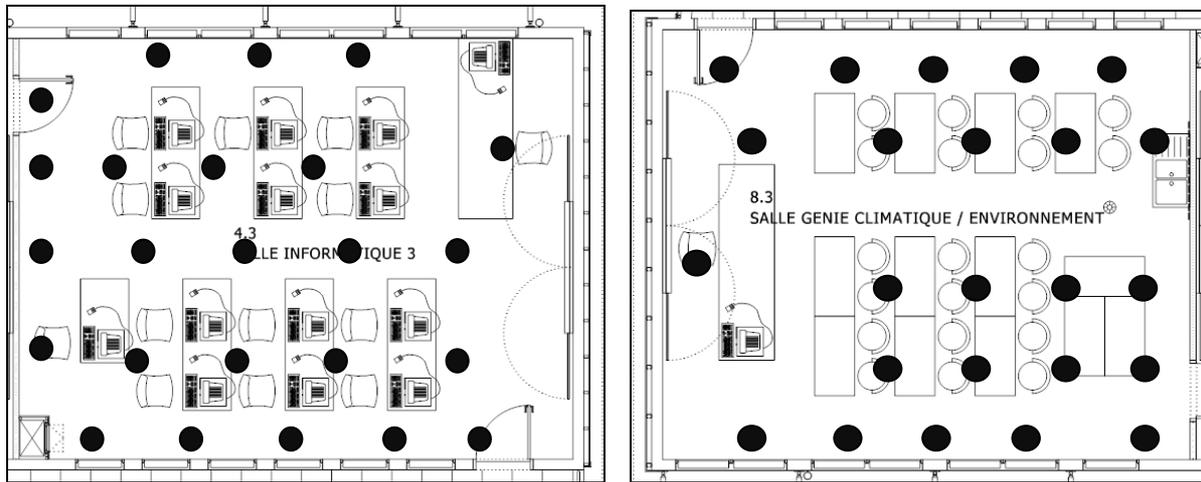


Figure A.42: Plans et maillages d'une salle informatique et d'une salle de cours

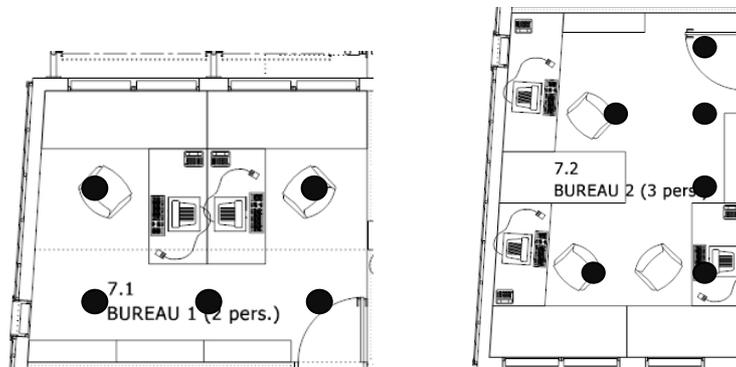


Figure A.43: Plans et maillages des bureaux de 2 personnes et de 3 personnes

Annexe 2 : essai II, exemple de grilles de mesures

Tableau A.7: Grille de mesures des conditions climatiques

Date, heure, zone, configuration :

	Hauteur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Tair (°C)	60 cm																		
	1 m 20																		
	1 m 80																		
HR (%)	60 cm																		
	1 m 20																		
	1 m 80																		
V (m/s)	60 cm																		
	1 m 20																		
	1 m 80																		

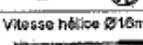
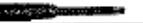
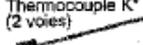
Nb : les numéros correspondent aux emplacements préalablement déterminés. Les mesures se feront toujours dans le même ordre.

Tableau A.8 : Grille de mesures des températures de surface (caméra infra-rouge FLIR)

	Mur Nord			Mur Ouest			Mur Sud			Mur Est		
Description du mur (intérieur ou extérieur, vitrée ...)												
Point de mesure	NE	N	NO	NO	O	SO	SO	S	SE	SE	E	NE
Température de Surface (°C)												

Annexe 3 : Caractéristiques techniques de l'appareil multifonction VT300 – KIMO

Le VT 300 est un appareil multifonctions capable de recevoir toutes les sondes munies du système SMART PRO, ainsi qu'un large choix de sondes de température thermocouple K. Les sondes SMART PRO sont livrées avec certificat d'étalonnage ou d'ajustage (date affichée par les appareils lors de la connexion). Elles sont automatiquement reconnues par les instruments et sont ainsi complètement interchangeables.

		Unités de mesure	Plages de mesure	Exactitudes**	Résolutions
THERMO ANEMO A HELICE	Vitesse hélice Ø100mm 	m/s, fpm	0,20 à 3m/s 3,1 à 35m/s	±2% de la lecture ±0,06m/s ±2% de la lecture ±0,2m/s	0,01m/s 0,1m/s
	Vitesse hélice Ø70mm 	m/s, fpm	0,3 à 35m/s	±2% de la lecture ±0,1m/s	0,1m/s
	Vitesse hélice Ø16mm 	m/s, fpm	0,6 à 40m/s	±2% de la lecture ±0,1m/s	0,1m/s
	Température ambiante (sauf hélice ø 16mm)	°C, °F, K	-20 à +80°C	±2% de la lecture ±0,1°C	0,1°C
	Débit	m³/h, cfm, l/s, m³/s	0 à 65000m³/h	±3% de la lecture ±10m³/h	1m³/h
THERMO ANEMO A FIL CHAUD	Vitesse fil chaud	m/s, fpm	0 à 3m/s 3,1 à 30m/s	±3% de la lecture ±0,03m/s ±3% de la lecture ±0,1m/s	0,01m/s 0,1m/s
	Vitesse fil chaud télescopique	m/s, fpm	0 à 3m/s 3,1 à 30m/s	±3% de la lecture ±0,03m/s ±3% de la lecture ±0,1m/s	0,01m/s 0,1m/s
	Température ambiante	°C, °F, K	-20 à +80°C	±2% de la lecture ±0,1°C	0,1°C
	Débit	m³/h, cfm, l/s, m³/s	0 à 65000m³/h	±3% de la lecture ±10m³/h	1m³/h
THERMO HYDRO	Humidité 	%HR, g/kg	3 à 98%HR	±1% de la lecture ±1,5%HR	0,1%HR
	Point de rosée	°C, °F, K	-20 à +60°C	±2% de la lecture ±0,1°C	0,1°C
	Température ambiante	°C, °F, K	-20 à +80°C	±2% de la lecture ±0,1°C	0,1°C
THERMOMETRE	Température PT 100 (2 voies) 	°C, °F, K	-100 à +400°C	±2% de la lecture ±0,1°C	0,1°C
	Thermocouple K* (2 voies) 	°C, °F, K	-200 à -40°C -39 à +999°C +1000 à +1300°C	±1% de la lecture ±1,2°C ±0,5% de la lecture ±0,8°C ±1% de la lecture ±1,2°C	0,1°C 0,1°C 1°C
TACHY	Optique 	tr/min, rpm, m/min,	60 à 50000tr/min	±0,5% de la lecture ±1tr/min	1tr/min
	Contact 	tr/min, in/min	4 à 2500m/min 30 à 20000tr/min	±2% de la lecture ±1m/min	0,1m/min 1 tr/min

* Les sondes thermocouple K ne disposent pas du système SMART PRO.

** Etablies dans des conditions de laboratoire, les exactitudes présentées dans ce document seront maintenues sous réserve d'appliquer les compensations d'étalonnage ou de se ramener à des conditions identiques.

SONDE D'HYGROMETRIE :

Ecart maximum garanti* :

$$* \text{EMG} = \text{Et} + \text{Ehl} + k \cdot (\text{uet}^2 + \text{ur}^2 + \text{ud}^2 + \text{us}^2)^{1/2}$$

EMG (GAL) = ±2,70 %HR entre 18 et 28°C (domaine standard)

Seion la charte 2000/2001 Hygromètres avec :

Etendue de mesure : 3 à 98%HR
Dérive à court terme : meilleure que 1%HR / an
Temps de réponse : 10 secondes

uet : incertitude d'étalonnage = ± 0,55%HR
ur : incertitude de résolution = ± 0,003%HR
ud : incertitude de fabrication = ± 0,17%HR
us : répétabilité de comparaison = 0,11%HR
Et : écart dû à la dérive thermique = ± 0,28%HR
Ehl : écart dû à l'hystérésis et à la linéarité = ± 1,25%HR
k : facteur d'élargissement = 2%HR

Annexe 4 : Principales caractéristiques du kit BABUC A/M,

Fonctions :

- Reconnaissance automatique des capteurs
- Affichage des mesures
- Paramètres programmables
- Enregistrement / Transfert PC
- Logiciel d'exploitation
- Impression directe sur imprimante des enregistrements

Babuc est une ligne d'instruments, de capteurs, d'accessoires et de logiciels pour l'acquisition, l'affichage, l'enregistrement et l'analyse d'une large variété de mesures techniques, physiques qui intègrent l'environnement.

L'instrument Babuc possède des entrées universelles qui peuvent recevoir n'importe quelle combinaison de capteurs, il est capable de reconnaître automatiquement les capteurs.

Différentes utilisations :

- Affichage immédiat des valeurs
- Enregistrement, création d'archives
- Transfert vers un PC
- Contrôle à distance via Modem, contrôle possible jusqu'à 32 Babuc de liaison

Le Babuc est adapté à la mesure "portable", mais répond aussi aux besoins du "fixe" ou "semi-fixe".

Le BABUC peut recevoir différents capteurs en simultanément comme:

- 1 - température
 - 2 - Humidité relative
 - 3 - Densité de flux
 - 4 - Radiation
 - 5 - Illumination
 - 6 - Pression atmosphérique et différentielle
 - 7 - Vitesse d'air
 - 8 - Concentration de gaz
 - 9 - Bruit
 - 10 - PH
 - 11 - Tachymétrie
 - 12 - Niveau
- * Et beaucoup d'autres

PROGRAMMATION : Le BABUC est programmé de façon à répondre à la plupart des besoins, les paramètres sont intégrés d'usine. L'opérateur peut modifier lui-même ses paramètres. Il y a quatre catégories de programmation SURVEY, SYSTEME, COMMUNICATION et UTILITES.

Survey :

- a) Choix entre l'affichage avec ou sans enregistrement
- b) Programmation du nombre d'enregistrements
- c) Programmation de la date/heure, début/fin d'enregistrement
- d) Programmation de la durée d'enregistrement
- e) Programmation de la vitesse d'acquisition pour tous les capteurs

Système:

Permet de programmer le traitement des capteurs.

- a) Programmation de la vitesse d'acquisition capteur par capteur (1s à 24h)
- b) Programmation de la période d'alimentation
- c) Programmation du paramètre d'entrée/sortie du capteur
- d) Programmation du paramètre de calibration du capteur
- e) Programmation de la quantité standard (gravité, température, altitude, pression atmosphérique émissivité)

Communication :

Programmation de la communication entre Babuc et PC:

- a) Programmer vitesse de transfert RS 232
- b) Programmer l'identification du BABUC
- c) Information sur l'activité de la sortie série

Utility:

Opérations générales de l'instrument:

- a) Programmation de la date/heure du système
- b) Programmation du blocage clavier par mot de passe
- c) Programmation de l'activation du Bip clavier
- d) Programmation du temps de désactivation de l'afficheur

DISPLAY AFFICHEUR :

Il est possible d'afficher les valeurs sous 2 formats :

- synthétique
- statistique

INPUTS : ENTREE :

Le Babuc est capable de recevoir et de reconnaître n'importe quel signal analogique ou impulsionnel. Il possède une entrée spécifique fils chaud et une autre 0 - 4 Volts (suivant le modèle).

Reconnaissance automatique des capteurs du type LSI, il est possible de programmer n'importe quel autre capteur non LSI.

	BABUC/M	BABUC/A
Reconnaissance automatique : thermocouple, thermistance, mV, mA, etc	4	8
Entrée signal pour capteur impulsionnel	1	1
Entrée du fils chaud LSI	1	1
Entrée du signal 0 - 4 V	-	1
Nombre total des entrées	6	11

MEMOIRE:

Référence	BABUC/A			
	BABUC/M	BSA010-BSA011	BSA012-BSA013	BSA014-BSA015
Total des mémoires (en Kb)	32	64	128	256
Nombre maximal d'enregistrements en mémoire	5,000	20,000	50,000	110,000

VITESSE ACQUISITION : Programmable de 1 seconde à 24 heures, individuellement par capteur.

CONNEXION DES SONDAS NON-LSI : Il est possible de connecter des sondes non-LSI. Dans cette opération, l'opérateur peut utiliser le connecteur à attacher à la sonde ou les paramètres de procédure. BABUC reconnaît automatiquement la sonde dans tous les cas.

Description	BABUC/M	BABUC/A
No. entrées	6	11
sorties	RS232-DCE	RS232-DCE/RS422
mémoire EPROM	32 K	64 K (128, 256 K opt.)
A/D convertisseur	12 bit	
Horloge	temps réel avec batterie rechargeable un an	temps réel avec batterie rechargeable
Afficheur	LCD 20 char. X 4 lines	
Vitesse Acquisition	Suivant le type de sonde de 1s à 24h	
Clavier	1s	
Alimentation	2 piles 9V alkaline (accumulateur rechargeable en opt.)	6 piles 1.2V rechargeable (batteries alcalines en opt.)
Average power consumption (without actuators)	17mA	5mA (with active serial line: 12mA)
Autonomie sans alimentation capteurs	48 heures en continue. (12 heures avec batteries rechargeables)	4 jours en continu avec sonde (2 semaines avec piles alcalines)
Conditions d'opération	0-50°C (-20+50°C opt.)	
Matériaux	Boîtier en aluminium anodisé	
Dimensions	112x200x33 mm	222x129x41
Poids	850 g	1.4 Kg

Type d'entrée	Capteurs	Plage	Sous plage	Résolu t.	Toléran ce.
Entrée analogique	Pt100	-50 ... +600	-50 ...+150	0,03	± 0,15
			+150 ... +600	0,06	± 0,3
	TS/B	-50 ... +140	-50 ...0	0,02	±0,2
			0 ... +140	0,03	±0,15
	TC/J (IPTS)	-50 ... +600	-50 ...+500	0,2	± 0,5
	TC/J (DIN)		+500 ... +600	1	±2
	TC/K (IPTS)	-50+1300	-50 ...+700	0,2	± 0,5
			+700 ...+1300	1	± 2
	TC/T (IPTS)	-200... +200	-200 ... +200	0,2	± 0,5
TC/S (IPTS)	0 ... +1600	0 ... +1600	1	± 2	
Direct signal (mV)	-10 ... +300	-10 ... +30 mV	8µ V	±17 µV	
		+30 ... +300 mV	50µV	± 100 µV	
Entrée Voltmetrique	Direct signal (V)	0 ... 4	1 mV	1 mV	± 4 mV
Entrée Impulsionnelle	Impulse signal		0 .. 65.535 imp.	1 imp.	-

Capteur de température de globe noir

1. General description (see drawing 1)

This probe is manufactured in accordance with ISO 7726 standards. It is composed of a hollow, black metal globe with a temperature sensor mounted at its centre. Temperature readings (T_g) for a known dry temperature and air speed, allow Babuc to calculate the mean radiant temperature (T_r). The globe, also known as a Vernon globe, has a very high emission level (≥ 0.98) and very low reflection (2% ASTM 97-55), effectively making it a black body with respect to infrared radiation. With this probe, it is possible to evaluate and check radiant thermal loads, which are extremely important for analysing both temperate and hot environments. In particular, this probe is indispensable for determining the operating temperature, the PMV and PPD indices and the WBGT index, to cite just the more important standards.

2. Technical characteristics

Temp. Radiante / Radiant temperature	Measured parameter
analog.	Type of input on BABUC
Pt100 DIN4376A (4 fili / 4 wires)	Measuring element
½ DIN ($\pm 0,15^\circ\text{C}$ a 0°C)	Accuracy
-10 .. +100°C	Measurement range
n.10	Operating Code
10 sec.	Standard acquisition rate
NON attuata / Not actuated	Enabling rate
20 min	Response time
Ø 150 mm	Dimensions
< 2% ASTM 97-55	Reflection

Anémomètre à fil chaud, calcul de la turbulence

The BSV105 sensor measures the turbulence intensity in compliance with ISO7726. Due to its very fast acquisition rate (1 value every 100 ms), the sensor measures air speed, calculates the average (va) and the standard deviation over a period of 2 sec. measurements, and divides these two quantities, directly obtaining the turbulence intensity (TU) expressed as a percentage. Babuc displays and eventually stores the average velocity and the turbulence intensity. The turbulence intensity is an important quantity in order to evaluate air draughts that could cause discomfort to the people; the TU value is used in the following:

- as a factor inside the DR index formula (Draught rating – ISO7730). The DR index shows the risk of draughts, that is the percentage of dissatisfied due to air draughts. This parameter is directly calculated by Babuc (Vers. 0> 5.02) as derived calculation
- As value for studying the dynamics of air flow in environments, inside ducts and in ventilation outlets, that could result in a build-up of air or gas turbulence which could effect the efficiency and effectiveness of the HVAC system.

0+20 m/sec	Average air speed range
0+100%	Turbulence intensity range
0+0,5 m/s: ±5 cm/s 0,5+1,5 m/s: ±10 cm/s >1,5 m/s: ±4 %	Accuracy (Temp. +10+30°C)
0,01 m/s, 1%	Resolution
filo di tungsteno Ø 9,45 µm / tungsten wire Ø 9,45 µm	Sensitive element
0,01 m/sec.	Threshold
5 sec	Measuring period for the average air calculation
0.1 sec.	Acquisition rate
Max 40 mA (typ 20mA)	Power consumption
-30°C +200°C elemento sensibile / sensitive element -30°C +120°C Asta / shank -30°C +70°C Manico / handle	Environmental working ranges
Velocità media dell'aria / average air speed	Measured parameter
Indice di turbolenza (TU) / Turbulence index (TU)	Calculated parameter (by the sensor itself)
Draught rating (ISO7730)	Calculated parameter (by the Babuc itself)

Capteur de température sèche et humide

1. General description (see drawing 1)

This probe is manufactured in accordance with ISO 7726 standards. It measured the naturally ventilated wet-bulb temperature (T_{wb}); it corresponds to the temperature of a sensor covered with a wet sheath, subjected to natural ventilation and shielded from radiation. This temperature (T_{wb}) is thus different from that for forced ventilation (psychrometer) and is indispensable for determining the WBGT index defined in the ISO 9505 and UNI 7243 standards for evaluating hot environments.

2. Technical characteristics

Temp. Bulbo umida / Wet bulb temperature	Measured parameter
WBGT (interno ed esterno) [con sonda globotermometrica BST131 e sonda termometrica collegate]	Calculated parameters
WBGT (indoor and outdoor) [with globothermometer probe BST131 and thermometer probe connected]	
analog.	Type of input on BABUC
NO attuazione / Not actuated	Enabling rate
n.17	Operating code
10 sec.	Acquisition rate (default)
0 .. +60°C	Measurement range
Pt100 1/2DIN (±0,15°C) a 0°C	Precision
6 min.	Response time (t90)
0 .. 60°C (con acqua / with water) -15 .. +80°C (senza acqua / without water)	Operating limits
50 cc	Distilled water reservoir capacity
circa 10 giorni (50%UR%) / about 10 days (50% RH%)	Water duration
375 g	Weight
Ottone cromato / Nickel-plated brass	Material

Annexe 5 : Questionnaire à l'attention des enseignants chercheurs, essai I



Projet EnerPos

Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud

QUESTIONNAIRE : EXPERIMENTATION 1

Le bâtiment dans lequel vous travaillez actuellement a été conçu dans une volonté d'économie d'énergie et s'inscrit pleinement dans le contexte énergétique actuel. L'objectif, lors de l'étude, était de proposer le premier bâtiment à énergie positive des DOM/TOM. Pour ce faire, le travail a porté essentiellement sur la réduction des besoins énergétiques et notamment ceux liés à l'usage de la climatisation sans enfreindre bien évidemment le confort des occupants, priorité absolue de la conception de bâtiment.

Afin de valider l'étude, une campagne expérimentale est actuellement menée afin d'évaluer le confort des occupants. Une campagne de mesures est couplée à une enquête de satisfaction auprès des utilisateurs permettant de tenir compte de leur avis mais également de leur rôle dans la gestion du bâtiment.

Nous vous demandons de prendre quelques minutes lors de votre présence dans le bureau pour répondre spontanément aux questions. La partie « Informations personnelles » est à remplir le premier jour. Durant toute une période d'occupation du bureau, vous aurez à remplir les parties 1, 2 et 3. Si vous quittez le bureau durant une période de plus d'une heure, vous devrez recommencer à partir de la partie 1 suivante. La partie 2 n'est à renseigner uniquement si vous effectuez une action sur les systèmes de régulation du confort, à savoir : ventilateur, jalousies, climatisation et tenue vestimentaire. Si le tableau de la partie 2 est trop petit, vous n'avez qu'à barrer les parties 3 et 1 qui suivent et continuer votre saisie sur le prochain tableau.

Tout commentaire est le bienvenu.

L'enquête dure idéalement une semaine et nécessite mon intervention pour vérifier le bon fonctionnement et la récupération des mesures.

Merci de votre participation dans cette campagne de mesure et bon questionnaire.

Pour toutes informations supplémentaires, je reste joignable à l'adresse suivante :

fredery.lavoye@gmail.com et au numéro : 0623093139

Ne pas remplir ce cadre, merci :

Date début :

Bâtiment :

Bureau :

•••••

INFORMATIONS PERSONNELLES

1. **Nom prénom (facultatif) :**

2. **Age**ans **Poids**kg **Taille**cm

Homme ? Une Femme ?

3. **Etes vous** Un

4. **Depuis combien de temps vivez-vous à La Réunion ?**ans

5. **Depuis combien de temps êtes vous installé dans ce bureau ?**.....mois

6. **Description succincte de votre poste et de votre activité :**

.....
.....
.....
.....

7. **Quels sont habituellement vos horaires d'occupation de ce bureau ?**

.....
.....
.....

8. **Quel est votre moyen de transport domicile-travail (rayer la mention inutile)?**

Voiture Vélo Marche à pied Transport public Moto

9. **Avez-vous des contraintes d'habillement importantes dans votre travail (costume, cravate...)?**

Oui

Non

Si oui, précisez :

.....
.....



Projet EnerPos

Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud

QUESTIONNAIRE : EXPERIMENTATION 3

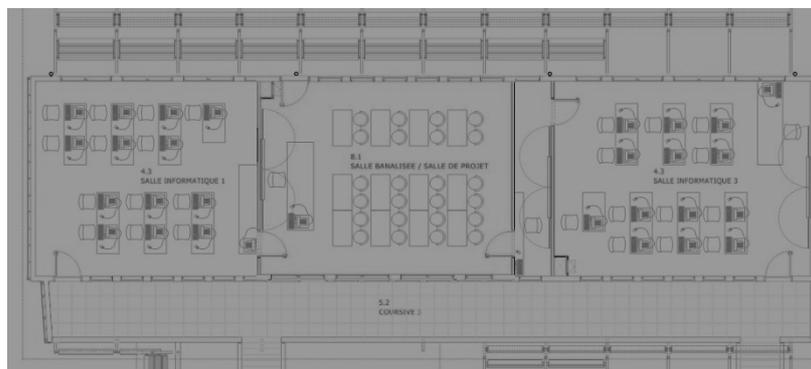
Le bâtiment dans lequel vous étudiez actuellement a été conçu dans une volonté d'économie d'énergie et s'inscrit pleinement dans le contexte énergétique actuel. L'objectif, lors de l'étude, était de proposer le premier bâtiment à énergie positive des DOM/TOM. Pour ce faire, le travail a porté essentiellement sur la réduction des besoins énergétiques et notamment ceux liés à l'usage de la climatisation sans enfreindre bien évidemment le confort des occupants, priorité absolue de la conception de bâtiment.

Afin de valider l'étude, une campagne expérimentale est actuellement menée afin d'évaluer le confort des occupants. Une campagne de mesures est couplée à une enquête de satisfaction auprès des utilisateurs permettant de tenir compte de leur avis mais également de leur rôle dans la gestion du bâtiment.

Nous vous demandons de prendre quelques minutes lors de votre présence dans cette salle pour répondre spontanément aux questions.

Merci de votre participation et bon questionnaire.

Merci d'entourer la place à laquelle vous êtes assis(es)



Ne pas remplir ce cadre, merci.

Date et heure :

Bâtiment :

Salle :

N° :

INFORMATIONS PERSONNELLES

1. **Age**ans **Poids**kg **Taille**cm

2. **Etes-vous** Un homme ? Une femme ?

Haut ...Manches courtes
(chemise, t-shirt)

Bas Jupe courte/short
Collants

Chaussures Fermées

Autres (foulard, chapeau...)

3. **Quelle est votre tenue vestimentaire ?**

...Manches longues ...Débardeur
(chemise, sweat)

Jupe longue Pantalon
Chaussettes

Ouvertes

4. **Depuis combien de temps vivez-vous à La Réunion ?**années

5. **Depuis combien de temps suivez vous les cours dans ce bâtiment ?**.....mois

6. **Quel est votre moyen de transport domicile-travail (rayer la mention inutile)?**

Voiture Vélo Marche à pied Transports public Moto

7. **Quelle était votre activité avant votre arrivée dans cette salle (cocher la case correspondante) ?**

	Sommeil	Assis repos	Suivi d'un cours	Debout relaxé	Marche	Restauration	Conduite véhicule	Sport
Il y a 1 h								
Il y a 30 min								
Il y a 20 min								
Il y a 10 min								

8. **Avez-vous l'habitude d'être dans cette salle ?** Oui Non

9. **Si oui, préférez-vous une place particulière ?**

Oui

Non

10. **Si oui laquelle ? Placez une croix sur le plan page 1 et précisez pourquoi ?**

.....

PERCEPTION THERMIQUE EN DEBUT D'EXPOSITION

11. Comment vous sentez-vous à ce moment précis ?

Froid	Légèrement froid	Ni chaud, ni froid	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud	Extrêmement chaud
<input type="checkbox"/>						

12. Trouvez-vous cette ambiance ?

Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

13. En ce moment préféreriez-vous avoir ?

Beaucoup plus froid	Plus froid	Un peu plus froid	Sans changement	Un peu plus chaud	Plus chaud	Beaucoup plus chaud
<input type="checkbox"/>						

14. Au sujet des mouvements d'air, les trouvez-vous ?

Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

15. Préféreriez vous qu'il y ait ?

Moins de mouvements d'air	Un peu moins de mouvements d'air	Sans changement	Un peu plus de mouvements d'air	Plus de mouvements d'air
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

16. Au sujet de l'humidité, la trouvez-vous ?

Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

17. Auriez-vous préféré une ambiance ?

Plus sèche	Un peu plus sèche	Sans changement	Un peu plus humide	Plus humide
<input type="checkbox"/>				

18. Avez-vous mis ou ôté un vêtement durant le cours ? Le(s)quel(s) ? (précisé si mis ou ôté)

.....

19. Etes-vous intervenu durant le cours sur les équipements suivants ?

	Non	Oui, une fois	Oui, plusieurs fois
Brasseurs d'air			
Jalousies			
Climatisation			

20. D'autres personnes sont t'elles intervenus? Non Oui

21. Si oui, quelles actions ont-elles été menées et quel s effets ont été engendrés?

.....

22. Comment vous sentez-vous à ce moment précis ?

Froid	Légèrement froid	Ni chaud, ni froid	Légèrement chaud	Chaud	Très chaud	Extrêmement chaud
<input type="checkbox"/>						

23. Au sujet des mouvements d'air, les trouvez-vous ?

Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

24. Au sujet de l'humidité, la trouvez-vous ?

Confortable	Légèrement inconfortable	Inconfortable	Très inconfortable	Extrêmement inconfortable
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

REMARQUES

25. Dans cette salle et plus généralement dans le bâtiment, y a-t-il des éléments que vous trouvez particulièrement agréables ou désagréables (acoustique, éclairage, thermique, architecture ...)? Lesquels et pourquoi ? Suggérez-vous des solutions d'amélioration ?

.....

26. Commentaires libres

.....

Annexe 7 : Prise en compte d'une pause éventuelle dans le questionnaire de l'Essai III

PERCEPTION THERMIQUE AVANT LA PAUSE

- 18. Comment vous sentez-vous à ce moment précis ?**
- | | | | | | | |
|-------|------------------|-----------------------|------------------|-------|---------------|----------------------|
| Froid | Légèrement froid | Ni chaud, ni
froid | Légèrement chaud | Chaud | Très
chaud | Extrêmement
chaud |
|-------|------------------|-----------------------|------------------|-------|---------------|----------------------|
- 19. Au sujet des mouvements d'air, les avez-vous trouvés ?**
- | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|
| Confortable | Légèrement
inconfortable | Inconfortable | Très inconfortable | Extrêmement
inconfortable |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|
- 20. Au sujet de l'humidité, l'avez-vous trouvée ?**
- | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|
| Confortable | Légèrement
inconfortable | Inconfortable | Très inconfortable | Extrêmement
inconfortable |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|
- 21. En fonction de vos préférences personnelles uniquement, vous avez trouvé cet environnement thermique :**
- | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|
| Confortable | Légèrement
inconfortable | Inconfortable | Très inconfortable | Extrêmement
inconfortable |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------------|------------------------------|

PERCEPTION THERMIQUE APRES LA PAUSE

- 22. Qu'avez-vous fait durant votre pause ?**
- | | | | | |
|---------------------|-------------------------|--------------|---------------|---------------|
| Assis à l'intérieur | Debout à
l'intérieur | Assis dehors | Debout dehors | Marche dehors |
|---------------------|-------------------------|--------------|---------------|---------------|
- 23. Si vous êtes sorti durant cette pause, à la reprise, vous avez trouvé l'ambiance :**
- | | | | | |
|-------------|-----------------------|-----------|--------------------|-------------|
| Plus froide | Un peu plus
froide | Semblable | Un peu plus chaude | Plus chaude |
|-------------|-----------------------|-----------|--------------------|-------------|



Projet EnerPos

**Développement de nouvelles méthodes de modélisation
et de conception pour des bâtiments à énergie positive
en climat chaud**

**NOTES ET OBSERVATIONS DE L'EXPERIMENTATEUR
AMBIANCE GLOBALE
Expérimentation n°.....**

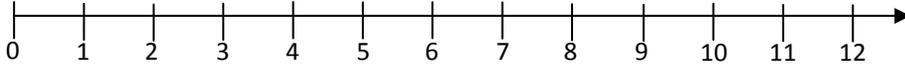
Date début :
Bâtiment :
Salle :
Nombre d'occupants:

METEO EXTERIEURE

1. Couverture nuageuse

Ciel bleu Ciel peu nuageux Ciel assez nuageux Ciel très nuageux Ciel couvert

2. Vent (échelle de Beaufort)



3. Pluie

Non Pluie légère Averses intermittentes Grosses averses Orages et pluies

└─┬─> La dernière pluie remonte à :

EQUIPEMENTS

1. Etat au début de la manipulation

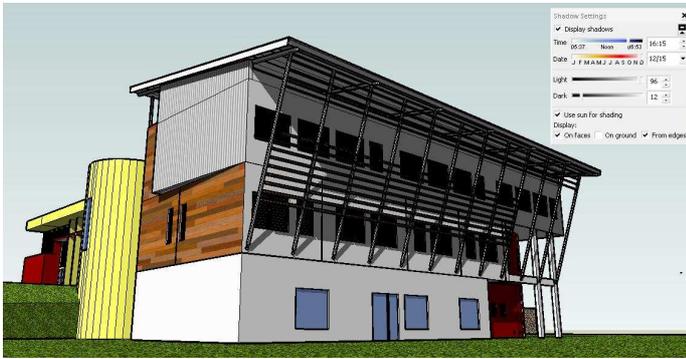
	Ventilateurs	Climatisation	Jalousies intérieures	Jalousies extérieures	Eclairage	Bureautique
Nombre total		-				
Nombre en état de marche						

2. Comportement

	Heure	Action	Qui ?
1 ^{ère} action			
2 ^{ème} action			
3 ^{ème} action			
4 ^{ème} action			
5 ^{ème} action			

DESCRIPTION ACOUSTIQUE

1. Bruits au sein de la salle :
2. Bruits dans le bâtiment :
3. Bruits extérieurs :



PREBAT 2006



**Développement de nouvelles méthodes
de modélisation et de conception
pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud**

Rapport final du projet

Rapport Factuel

D.1. Résumé français et anglais

D.2. Synthèse

décembre 2009

<http://lpbs.univ-reunion.fr/enerpos>



A. Identification

Programme – édition	PREBAT – Edition 2006
Projet (acronyme)	ENERPOS
Titre complet du projet	Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud.
Site Internet du projet	Http://lpbs.univ-reunion.fr/enerpos
Projet labellisé par le pôle de compétitivité	non
Période du projet (date début – date fin)	13/04/2007 au 13/10/2009
Coordinateur du projet (Société/Organisme)	François Garde, Laboratoire de Physique du Bâtiment et des Systèmes EA 4076, Université de La Réunion
Rédacteur du rapport : <ul style="list-style-type: none"> • Civilité, Nom, Prénom • Société/Organisme • Téléphone • Adresse électronique 	François GARDE/Mathieu David Laboratoire de Physique du Bâtiment et des Systèmes EA 4076 Université de La Réunion portable : 0692 67 20 51 email : garde@univ-reunion.fr / mathieu.david@univ-reunion.fr
Date de rédaction	Décembre 2009
Rapport confidentiel (oui/non)	non
Date de fin de confidentialité	-

Tableau 1: Liste des intervenants et partenaires dans le projet ENERPOS

Prénom	Nom	Tél	E-mail	Tâches
LPBS – Université de La Réunion (Coordonnateur)				
François	GARDE	0692 67 20 51	garde@univ-reunion.fr	A, B, C, D, E, F, G, H
Mathieu	DAVID	0262 96 28 53	mathieu.david@univ-reunion.fr	
Alain	BASTIDE	0262 57 94 44	abastide@univ-reunion.fr	
LOCIE – Université de Savoie (Partenaire universitaire 1)				
Etienne	WURTZ	04 79 44 45 54	etienne.wurtz@univ-savoie.fr	B, C, G
Gilbert	ACHARD		gilbert.achard@univ-savoie.fr	
Fabio	SICURELLA		f.sicurella@diim.unict.it	
PHASE – Université de Toulouse (Partenaire universitaire 2)				
Françoise	THELLIER	05 61 55 64 79	thellier@cict.fr	D
Frédéry	LAVOYE		fredery.lavoie@gmail.com	
Sandra	SPAGNOL		spagnol@cict.fr	
IMAGEEN – La Réunion (Partenaire privé 1)				
Eric	OTTENWELTER	0262 21 35 14	eric.ottenwelter@inset.fr	O, A, B, C, E, F, G, H
Néjia	FERJANI	0262 21 35 12	imageen974@wanadoo.fr	
Eric	POTHIN	0262 21 54 43	eric.pothin@inset.fr	
TRIBU – Paris (Partenaire privé 2)				
Alain	BORNAREL	01 43 49 55 75	tribu.conseil@wanadoo.fr	O, B, E
Edith	ACKICKI	01 43 49 55 75		

B. Liste des tâches et livrables

B.1. Rappel des taches du projet ENERPOS

Tâche 0 (TRIBU, IMAGEEN): Process Ingénierie et Gestion de Projet

Tâche A (LPBS, IMAGEEN): Optimisation des protections solaires par simulation 3D

Tâche B (LPBS, IMAGEEN): Réduction de la période de climatisation.

Tâche C (LPBS, LOCIE, IMAGEEN): Optimisation de l'éclairage naturel.

Tâche D (PHASE, LPBS): Évaluation d'un indice de confort thermique.

Tâche E (TRIBU, IMAGEEN, LPBS): Réflexion sur l'architecture intérieure

Tâche F (LPBS, IMAGEEN): Réduction des besoins du parc informatique

Tâche G (LPBS, IMAGEEN): Modélisation de la courbe de charge

Tâche H (LPBS, IMAGEEN): Modélisation de la production ENR photovoltaïque

à noter 2 tâches supplémentaires non prévues dans le projet initial mais qui ont été rajoutées dans le document final.

Tâche I (LPBS, IMAGEEN): GTC de recherche

Tâche J (LPBS, IMAGEEN) : retour d'expérience, Post Occupancy Evaluation

Tâches et livrables	2007		2008		2009		Commentaires/Livrables	Partenaire(s) Concerné(s)
	S1	S2	S1	S2	S1	S2		
Accord de consortium		☒						tous
Tâche 0				☒			2 rapports, 2 publications (Annexes 1 à 4)	TRIBU, IMAGEEN
Tâche A				☒			1 rapport : Annexe 5	LPBS, IMAGEEN
Tâche B						☒	3 rapports, 1 revue, 1 communication Annexes 6 à 10	LPBS, IMAGEEN
Tâche C					☒		2 rapports, 2 communications Annexes 11 à 14	LPBS, LOCIE, IMAGEEN
Tâche D						☒	3 rapports, 1 communication Annexes 15 à 18	PHASE, LPBS
Tâche E				☒			1 rapport. Annexe 19	TRIBU, IMAGEEN, LPBS
Tâche F						☒	1 rapport Annexe 15	LPBS, IMAGEEN
Tâche G						☒	1 rapport, 1 communication Annexes 20 et 21	LPBS, IMAGEEN
Tâche H						☒	1 rapport : annexe 22 Les simulations ont uniquement portées sur l'utilisation du logiciel PVSYST	LPBS, IMAGEEN
Tâche I (non prévue dans ENERPOS)						☒	1 rapport de description de la GTC recherche Annexe 23	LPBS, IMAGEEN
Tâche J (non prévue dans ENERPOS)						☒	2 Rapport et 1 communication : Evaluation des performances réelles du bâtiment Annexes 21, 24 et 25	LPBS, IMAGEEN

Δ= Prévu	▲=Prévu à nouveau	x= Abandonné	☒= Réalisé
----------	-------------------	--------------	------------

B.2. Activité de coordination

Les interactions entre les différents partenaires se sont déroulées selon les tâches à réaliser. En terme de méthode de travail et de coordination, nous avons défini un coordonnateur par tâches qui gère lui même son calendrier et ses échéances.

Avril 2008 : Un point à mi-parcours a été fait entre La Réunion et lors des journées PREBAT organisée à Chambéry.

Présents : LOCIE, IMAGEEN, LPBS, PHASE

Juin 2008 : Mission à La Réunion de TRIBU pour faire le point sur les tâches O, B et E.

Présents : LPBS, IMAGEEN, TRIBU

Nov/Déc. 09 : Mission de 4 semaines Frédéric Lavoye (PHASE) à la réunion pour campagne de mesure « analyse des conditions de confort in-situ »

Janvier 2009: Réunion PREBAT à Nice Sophia Antipolis

Mai 2009 : Réunion à Paris, locaux de Tribu. Point sur le rendu final. Présents : IMAGEEN (par visio), PHASE, LPBS et TRIBU.

Une fois par mois, point entre le LPBS et IMAGEEN sur les tâches en commun et avancement du projet.

C. Rapport factuel

C.1 Le tableau de résultats

Comptabiliser séparément les actions impliquant un seul partenaire et celles résultant d'un travail en commun « multipartenaires ».

Nombres de publications

	International		France		Actions de diffusion		
	Articles acceptés dans des RI CL*	Communicat. Internationales	Articles France	Comm. France	Articles vulgaris.	Conf. vulgaris.	Autres
Monopartenaire	1	3		3		12	
Multipartenaires	0	2	1**	1		2	

* : Revues Internationales à Comité de Lecture

9 publications dans des revues internationales sont en cours de rédaction ou prévues d'être soumises dans les 6 mois (voir liste des publications, auteurs et revue ciblée)

** en cours de soumission

Autres retombées (voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique) :

Ce tableau dénombre les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet (savoir faire, retombées diverses...) en précisant les partenariats éventuels.

Nature	Commentaires
Brevets nationaux	
Brevets internationaux	
Autres (préciser en C.4)	

C.2 Le tableau de personnels

	Nombre de personnes employées en CDD sur le projet et financées par l'ANR	
	Nombre	Homme-Mois cumulés sur tous les partenaires depuis le début du projet
Doctorants		
Post-docs	1	12
Ingénieur en CDD	2	19
Stagiaires	5	24
Autres (étudiants DUT Génie Civil)	3	3

Tableau de personnels par partenaire

	LPBS	LOCIE	PHASE	IMAGEEN
Doctorants				
Post-docs		F. Sicurella (12hm)		
Ingénieur en CDD	M. David (12hm)		F. Lavoye (7h.m)	
Stagiaires	E. Bernard (6hm)			M. Martin (6hm) C. Lombardot (6hm) A. Lenoir (6hm)
Autres (à préciser)	Etudiants de DUT (3hm)			

Nom, prénom, qualification	Devenir des personnes employées en CDD sur le projet		
	Emploi suite au projet		En recherche d'emploi
	Chez les partenaires	Ailleurs	
	CDD ou CDI	CDD ou CDI	
David, Mathieu, Docteur ingénieur (LPBS)		CDI (AIEE)	
Lenoir, Aurélie, Ingénieur (IMAGEEN)	CDD (CIFRE)		
Lombardot, Christophe, Ingénieur INSA Strasbourg (IMAGEEN)	CDI (INSET)		
Martin, Murielle, Ingénieur Polytech'Savoie (IMAGEEN)		CDI (Sté COREX)	
Bernard, Etienne, master 2 Génie Civil (LPBS)			x
Lavoye, Frédéric, master Polytech Savoie (PHASE)		CDI (3E)	
Sicurella, Fabio, ingénieur (LOCIE)		CDI (CNRS)	

Commentaires :

Sur l'ensemble des 7 stagiaires et Ingénieur en CDD qui ont participé au projet ENERPOS, 6 ont trouvé un emploi et sont en activité, un (Etienne Bernard) est en cours de recrutement.

Mathieu David est gérant d'un bureau d'études en acoustique et instrumentation à La Réunion.

Aurélie Lenoir est en convention CIFRE au sein d'IMAGEEN. Ses travaux de recherche se situent dans la continuité d'ENERPOS. Elle est impliquée également dans la Tâche 40 de l'Agence Internationale de l'Energie sur les bâtiments à énergie positive.

Christophe Lombardot a été embauché il y a un an par le bureau d'étude INSET, suite à son stage effectué au sein de la société IMAGEEN. Le projet ENERPOS a permis à Christophe de maîtriser un certain nombre d'outils de modélisation (Design Builder, Daysim). Cette maîtrise des outils de simulation a été l'une des raisons de son embauche au sein d'INSET.

Murielle Martin a été embauchée par la société réunionnaise COREX pour travailler sur de la gestion de projets photovoltaïques et sur la gestion énergétique de patrimoine immobilier.

Frédéry Lavoie travaille à Toulouse au bureau d'études 3^E. Il s'occupe de simulations dynamiques au sein de ce bureau d'études.

Fabio Sicurella a été recruté au CNRS suite à son passage au LOCIE pour travailler sur le projet ENERPOS.

C.3 Liste des publications et communications

Revue internationale à comité de lecture -RICL

[RICL 1]	Bastide A., Allard F. and Boyer H., <i>Natural ventilation: a new method based on the Walton model applied to crossventilated buildings having two large external openings</i> , International Journal of Ventilation, December, 2007, p.1-11	Tâche B	Mono
[RICL 2]	David. M, Donn M., Lenoir A., Garde F. <i>Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shadings in Reunion Island</i> . Energy and Buildings, en cours de soumission.	Tâche C	Mono
[RICL 3]	F. Garde, M. David, E. Ottenwelter. <i>Towards net zero energy buildings in hot climates. Part 1 News tools and methods</i> . To be submitted to the 2011 ASHRAE winter meeting	Tâche O	Multi
[RICL 4]	A. Lenoir, F. Garde, F. Thellier. <i>Towards net zero energy buildings in hot climates. Part 2 Experimental feedback</i> . To be submitted to the 2011 ASHRAE winter meeting	Tâche J	Multi
[RICL 5]	A. Bastide, B. Brangeon, F. Garde, <i>CFD modelling for the design of a Net Zero Energy Building in the Tropics</i> . To be submitted in International Journal of Ventilation.	Tâche B	Mono
[RICL 6]	Sicurella F. , Wurtz E. <i>Comparing the capabilities of lighting simulation programs that assess Daylighting and Energy saving in Buildings</i> Energy and Buildings (en cours de rédaction)	Tâche C	Mono
[RICL 7]	Sicurella F. <i>The state of the art of parameters to evaluate daylighting and a proposal of new indicators to enhance daylighting potential in building design</i> . Energy and Buildings (en cours de rédaction)	Tâche C	Mono
[RICL 8]	Sicurella F., Wurtz E., David M., Garde F. <i>New indicators to manage thermal and luminous comfort in free-running buildings during warm seasons (Part 1)</i> . Energy and Buildings (en cours de rédaction)	Tâche C	Multi
[RICL 9]	Sicurella F. Wurtz E. David M. Garde F. <i>New indicators to manage thermal and luminous comfort in free-running buildings during warm seasons: an application in a case study (Part 2)</i> . Energy and Buildings (en cours de rédaction)	Tâche C	Multi
[RICL 10]	F. Thellier, A. Lenoir, F. Lavoye, F. Garde. <i>Thermal comfort assessment in a net zero energy building in the Tropics</i> . Solar Energy (en cours de rédaction)	Tâche D	Multi

Revue nationale à comité de lecture -RNCL

[RNCL 1]	Lavoye F., Thellier F. <i>Le confort thermique dans les bâtiments..</i> Fiche PRISME, édité par IEPF l'institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie. Nov. 2008	Tâche D	mono
[RNCL 2]	Ottenwelter E., Bornarel A. Garde F. <i>Conception des bâtiments à énergie positive et à faible consommation énergétique : vers une réforme de l'ingénierie en France ?</i> Chauffage Ventilation Conditionnement (en cours de rédaction).	Tâche O	Multi

Communications internationales

[CI 1]	Garde F., Bastide A., Wurtz E. , Achard G., Dobre O., Thellier F., Ottenwelter E., Ferjani N., Bornarel A. , <i>ENERPOS : A National French Research Program for developing new methods for the Design of Zero Energy Buildings., CESB 07, Central Europe towards Sustainable Buildings</i> , September, 2007, Prague, Czech Republic.	Tâche O	Multi
[CI 2]	Martin M., Garde F., David M., Adélar L., Donn M., <i>Combination of daylighting and solar shading performances for buildings in tropical climates. EUROSUN 2008</i> , octobre 2008, Lisboa, Portugal.	Tâche C	Mono
[CI 3]	Garde F., Bastide A., Bentaleb D., Ottenwelter E., <i>Presentation of a new approach of building design for the realisation of a zero energy building in Reunion island.</i> , ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 5-10 novembre, 2006,	Tâche O	Mono

Chicago, US,

- [CI4] A. Lenoir, F. Garde, L. Adelard, M. David, F. Lavoye, F. Thellier. *Presentation of the experimental feedback of a zero energy building under tropical climat.* ISES Solar World Congress 2009, 11-14 october, Johannesburg, South Africa Tâche J Multi
- [CI5] Bastide A., Boyer H., Garde F. and Lucas F., A method based on the Walton model applied to cross-ventilated building to evaluate mass flow rate, RoomVent, 2007, p.1-10 Tâche B Mono

Communications nationales

- [CN 1] Thellier F., Monchoux F., Endravadan. M. Prise en compte du comportement adaptatif de l'être humain dans la simulation thermique de l'habitat. Proc. congrès S.F.T, "Thermique et Société", mai 2007. Tâche D Mono
- [CN 1] Thellier F., Bedrune J.P., Astoul X. *Audit performance énergétique et /ou confort ; du campus aux Maternelle.* Proc. Colloque Education au Développement Durable. Albi, Juin 2008. Tâche D Mono
- [CN 3] Martin M., Garde F., David M., Adelard L., Achard G., *Prise en compte simultanée des exigences en éclairage naturel et des protections solaire dans les bâtiments en climat tropical, IBPSA-France*, novembre 2008, Lyon, France. Tâche C Multi
- [CN 4] Lavoye F., Thellier F. , Spagnol S., Lartigue B. *Perception de la qualité des ambiances intérieures soumises à des transferts thermo-aérauliques. IBPSA -France*, novembre 2008, Lyon, France. Tâche D Mono

Conférences nationales et locales

- [CN 1] F. Garde, M. David, A. Bastide, E. Wurtz, F. Sicurella, G. Achard, F. Thellir,, E. Ottenwelter, E. Pothin., A. Bornarel. *Enerpos. Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud.* Les rencontres du PREBAT, colloque national, 3-5 juin 2008, Perpignan. Présentation d'un poster. Toutes tâches Multi
- [CN 2] E. Wurtz. *Enerpos. Développement de nouvelles méthodes de modélisation et de conception pour des bâtiments à énergie positive en climat chaud.* Revue de projets PREBAT Technologies Edition 2006. Nice, Sophia Antipolis, 14, 15 Janvier 2009. Toutes tâches Multi
- [CN 3] F. Garde. Maîtrise de l'Energie à l'Université de La Réunion. *Bâtiment à énergie positive IUT Site pilote en MDE et ENR.* 10 ans département Génie Civil. Conférence données dans le cadre des 10 ans du Département Génie Civil, IUT de Saint-Pierre en octobre 2008. Toutes tâches Mono
- [CN 4] F. Garde. *Présentation du premier bâtiment à énergie positive à La Réunion.* Conférence donnée à l'université de La Réunion en septembre 2008. Toutes tâches Mono
- [CN 4] F. Garde. *L'Université de La Réunion et le développement durable. Bâtiment à énergie positive. Campus durable.* Conférence donnée en novembre 2009 dans le cadre des 15 ans du campus du Tampon. Toutes tâches Mono
- [CN 6] F. Thellier. *Qualité de l'Habitat, énergie, confort et santé.* 21ème colloque du COPRAE ; Santé, Sécurité Environnement : Connaitre et agir, Toulouse, novembre 2007. Tâche D Mono
- [CN 7] F. Thellier. *L'Habitant dans un Habitat durable.* Présentation rapide du Projet, lors d'une conférence invité, Journée EasyFairs 'Building innovation dans le sud ouest', (présentation disponible sur le web), Toulouse, janvier 2008 Tâche D Mono

Conférences internationales

[CN 1]	F. Garde. <i>Towards net zero energy buildings. The hot climate approach.</i> IEA SHC Task 40 ECBCS Annex 52. 1 st experts meeting, Montreal, 6-8 May 2009.	Tâche 0 Tâche A Tâche B Tâche C	Mono
[CN 2]	F. Garde, A. Lenoir. <i>Towards net zero solar energy buildings. New tools and Methods. The French/tropical experience.</i> IEA SHC Task 40 ECBCS Annex 52. 2 nd experts meeting, Wuppertal, 8 October 2009.	Tâche 0 Tâche A Tâche B Tâche C	Mono

Conférences invitées

Le Pr. F. Garde a été invité par l'ambassade de France de Nouvelle Zélande en octobre 2009 pour participer au NZ Green Building Summit organisée par le NZ Green Building Council. Les travaux d'ENERPOS, les méthodes et les outils développés au cours d'ENERPOS ont été présentés lors de cette conférence.

[CINV 1]	F. Garde. <i>Near/zero low energy buildings : Solutions sets for different climates.</i> NZ Green Building Summit 2009, 28 October, SkyCity Convention Centre Auckland, New Zealand.	Toutes tâches	Mono
[CINV 2]	F. Garde. <i>Innovative practices and research projects. The French tropical experience.</i> Workshop session. NZ Green Building Summit 2009, 29 October, SkyCity Convention Centre Auckland, New Zealand.	Toutes tâches	Mono
[CINV 3]	F. Garde. <i>Net Zero Energy in the Tropics. New tools and methods.</i> 30 October 2009, School of Architecture and Design. Victoria University of Wellington.	Toutes tâches	Mono
[CINV 4]	F. Garde. <i>Comment économiser l'énergie aujourd'hui et demain ? Les risques Climatiques... Il est temps de réagir!</i> Conférence débat à l'initiative de la MAIF, Le Tampon, Réunion, 2 décembre 2009	Toutes tâches	Mono
[CINV 5]	F. Garde. Présentation du projet ANR PREBAT ENERPOS. Journée ANR PREBAT/TEMERGIE à l'initiative de la Technopole Réunion, 3 novembre 2009, Ile de La Réunion.	Toutes tâches	Multi

Autres : Contenu pédagogique de formation

Les résultats, outils et méthodes développés au cours du projet ENERPOS sont enseignées depuis 2 ans dans des filières en formation initiale et continue. Grâce à ENERPOS, l'enseignement de Google Sketchup, Daysim, Energy + et Design Builder est inscrit dans de nombreuses filières.

Les filières concernées sont listées ci-dessous :

En formation initiale :

A L'Université de La Réunion

- DUT Génie Civil, IUT de Saint-Pierre
- Licence professionnelle Maitrise de l'Energie et Energies Renouvelables, IUT de Saint-Pierre
- Licence Sciences de la Construction, Urbanisme et Environnement, UFR Sciences de l'Homme et de l'Environnement.
- Master Espace Construction Environnement
- Futur département Construction Durable et Environnement, école d'ingénieur ESIROI.

A l'université Paul Sabatier, Toulouse :

- Licence professionnelle STER (Sciences et Technologies des Energies renouvelables) IUT Tarbes
- Master Professionnel « Génie de l'Habitat, performance énergétique et confort », Toulouse

En formation continue/formation professionnelle

- Master en Architecture tropicale, UFR Sciences de l'Homme et de l'Environnement, Le Tampon.
- Journées professionnelles organisées par le CAUE Réunion;
- Maîtrise de l'Energie dans les collectivités, organisé par le CNFPT Réunion.

C.4. La liste des éléments de valorisation

Logiciels et tout autre prototype, développements de procédés, de méthodes d'essais ...

Un logiciel spécifique permettant de reproduire les couples température résultante/humidité dans les zones de confort de Givoni a été développé durant le projet ENERPOS. Cet outil très apprécié des architectes permet de déterminer le nombre de points pour les trois zones de confort ($V=0$ m/s, $v=0,5$ m/s, $v=1$ m/s) et ainsi de quantifier le % de temps où les conditions de confort sont atteintes.

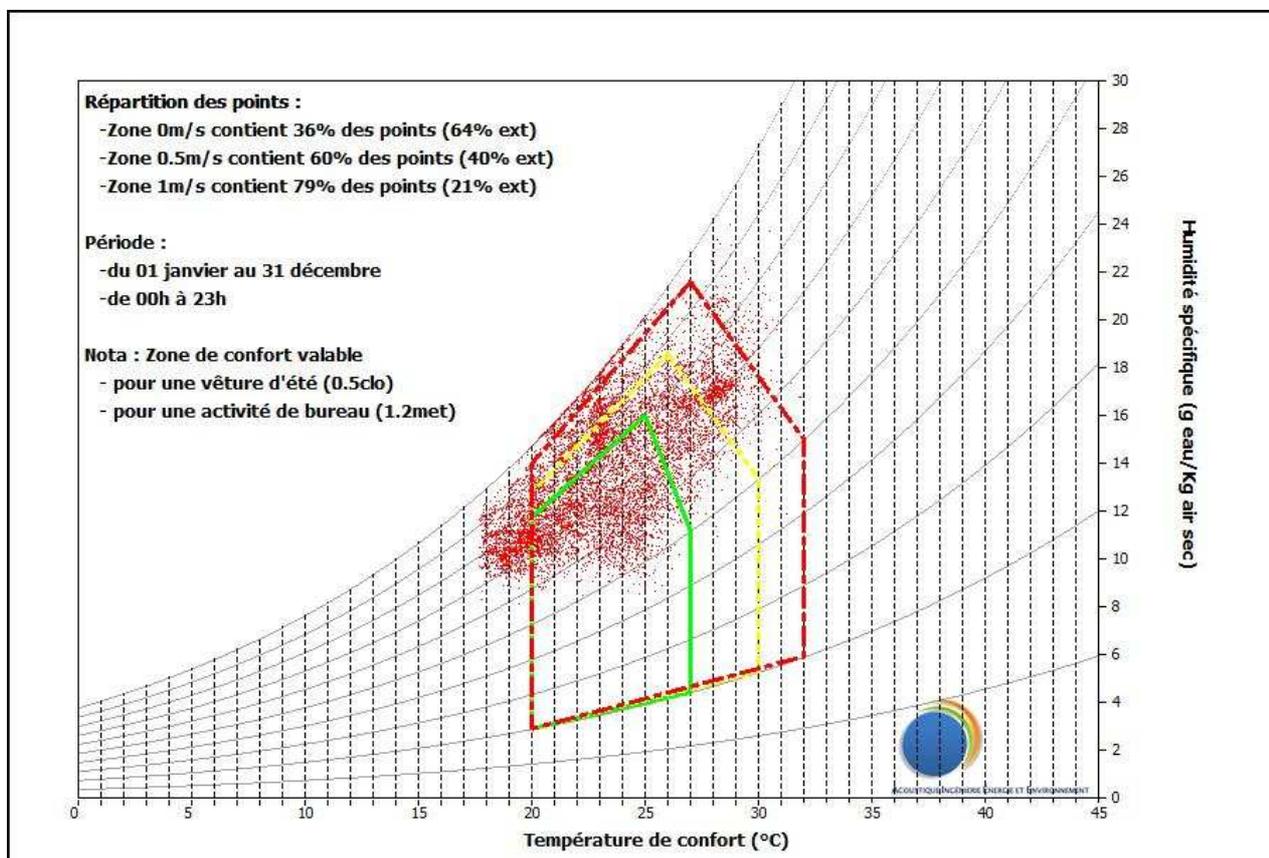


Figure 1 : Aperçu du rendu visuel du logiciel « confort ».

Les conséquences du projet (lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...)

Les conséquences du projet sont diverses et listées ci-dessous :

- le projet ENERPOS a permis d'avoir une expérience notable dans le domaine de la conception des bâtiments à énergie positive à l'échelle internationale. Il a permis à La France d'avoir une place prépondérante dans la mise en place de la Tâche 40 de l'Agence Internationale de l'Énergie sur les bâtiments à énergie positive.
- il a permis d'initier une thèse en convention CIFRE entre deux partenaires (LPBS et IMAGEEN)
- dans le domaine du transfert de connaissance, il a permis de mettre en place une méthodologie et de nouveaux outils de simulation auprès des partenaires bureaux d'études. D'autres bureaux d'études à La Réunion sont en cours d'appropriation des outils de simulations type Sketchup, Daysim et Energy Plus.

Le développement d'un nouveau partenariat,

Dans la continuité d'ENERPOS, un nouveau partenariat a été initié entre le LPBS et la société IMAGEEN avec l'embauche d'Aurélien Lenoir, stagiaire ingénieur qui a participé au projet ENERPOS, d'une convention CIFRE. La convention CIFRE a débuté en novembre 2009 et s'inscrit dans la continuité d'ENERPOS. Le sujet d'intitulé : « Développement et validation d'outils et de solutions techniques pour la conception de bâtiments à énergie positive. Prise en compte couplée de l'éclairage naturel et des protections solaires »

La création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté

La méthodologie d'utilisation d'outils de simulation autour de Sketchup mise en place dans le cadre d'ENERPOS présente le gros avantage d'être disponible gratuitement sur le net. Il existe en effet une version gratuite du logiciel. Energy + est également téléchargeable gratuitement et un plugin installable dans Sketchup est disponible. Le logiciel d'éclairage naturel Daysim est également disponible gratuitement sur le net. La communauté scientifique, notamment celle des pays en voie de développement, peut donc s'approprier ces outils de simulation à moindre coût, ce qui constitue un réel avantage de la méthode.

Ouverture internationale : Participation à la Tache 40/Annexe 52 de l'Agence Internationale de l'Energie « Towards net zero energy solar buildings »

ENERPOS a permis d'acquérir une expérience dans le domaine de la conception des bâtiments à énergie positive en climat chaud. Un comité d'experts du domaine a été constitué en 2007 et les réflexions ont abouti au lancement de la Task 40/Annex52 de l'Agence Internationale de l'Energie, porté à la fois par le Solar Heating and Cooling programme et le ECBCS programme (Energy Conservation in Buildings and Community Systems) . Les objectifs de la Task 40, qui a débuté en octobre 2008 et se terminera en 2013, sont d'uniformiser les connaissances autour des bâtiments à énergie positive, tant en terme de définitions, de développement d'outils de conception que de solutions techniques et d'intégration architecturale pour tout type de climat. Le Pr. François GARDE gère la sous-tâche -Subtask C relative à l'établissement d'un benchmarking pour les bâtiments tertiaires en termes de solutions techniques portant sur les systèmes énergétiques, l'intégration architecturale et sur la conception thermique de l'enveloppe. François GARDE, coordonateur du projet ENERPOS est le représentant de la France dans ce programme international de recherche.

Pour information, la prochaine réunion d'experts se tiendra à l'Ile de La Réunion du 3 au 6 mai 2010.

Pour en savoir plus : <http://www.iea-shc.org/task40/>

D. Rapport scientifique

D.1 Résumés en français et en anglais

Résumé en français :

Le projet ANR-PREBAT « ENERPOS » concerne le développement de nouvelles méthodes et d'outils pour la conception de bâtiments à énergie positive en climats chauds. Il a impliqué trois laboratoires de recherche universitaires (LPBS/La Réunion, LOCIE/Chambéry et PHASE/Toulouse) et deux partenaires industriels (bureaux d'études IMAGEEN/La Réunion et TRIBU/Paris)

Les objectifs d'ENERPOS étaient les suivants :

- Développer de nouvelles méthodes et d'outils pour la conception de bâtiments à énergie positive en climats chauds/tropicaux;
- Montrer que le facteur 3 est facile à atteindre. le ratio énergétique annuel doit être inférieur à 55 kWh/m²SU/an, soit une réduction d'un facteur 3 de la consommation par rapport aux bâtiments actuels dans les DOM/TOM.
- Réunir le monde de la recherche et de la maîtrise d'oeuvre en vue d'améliorer l'utilisation d'outils de simulation.
- Faire un transfert de connaissance de la recherche vers les pratiques professionnelles une fois la méthode et les outils validés.

Les méthodes et outils développés ont été appliqués pour la conception du premier bâtiment à énergie positive des DOM. La conception et la réalisation du bâtiment ont été entièrement en phase avec le déroulement du projet ANR. Le bâtiment a été livré en octobre 2008, soit un an avant le terme du projet ANR-ENERPOS.

Ce bâtiment baptisé également « ENERPOS » est un bâtiment à très faible consommation énergétique dont les caractéristiques principales sont listées ci-après : Toutes les pièces sont traversantes et sont équipées de brasseur d'air performants. Les salles de TD ne sont pas climatisées. Les protections solaires ont été optimisées par simulation informatique. Le bâtiment respecte les normes PERENE (label réunionnais, acronyme de PERFORMANCE Energétique des Bâtiments à La Réunion). La production d'énergie est assurée par 350 m²(soit 50 kWc) de panneaux photovoltaïques intégrés architecturalement grâce à un principe de sur-toiture.

Au niveau de la méthodologie, les travaux ont porté sur 9 tâches balayant toutes les phases de l'acte de construire, de la programmation, via les études et à la remise du DCE.

- Tâche 0 : Réflexion sur le processus de l'acte de construire des bâtiments à faible énergie de la phase programme à la livraison du bâtiment. Propositions d'améliorations;
- Tâche A : Optimisation des protections solaires par simulation 3D;
- Tâche B : Réduction de la période de climatisation en favorisant la ventilation naturelle des locaux. Utilisation de Sketchup, d'Energy +, de Daysim et de StarCD);
- Tâche C : Optimisation de l'éclairage naturel par la définition du % d'autonomie des pièces. Utilisation de Sketchup couplé à DAYSIM;
- Tâche D : Évaluation d'un indice de confort thermique adapté au climat tropical;
- Tâche E : Réflexion sur l'architecture intérieure et l'ergonomie des locaux;
- Tâche F : Réduction des besoins du parc informatique;
- Tâche G : Modélisation des courbes de charge du bâtiment par type d'utilisation;
- Tâche H : Modélisation de la production ENR photovoltaïque.

Les résultats significatifs sont listés ci-dessous :

- En terme d'utilisation d'outils, la méthode proposée est innovante et fait l'unanimité : il s'agit d'utiliser Google Sketchup comme interface entre l'architecte et l'ingénieur et comme clé de voute du process. Ensuite les simulations thermiques, énergétiques et en éclairage naturel sont lancées depuis Sketchup avec Energy Plus et Daysim. Ces méthodes sont actuellement utilisées par IMAGEEN dans le cadre d'autres projets. La méthode proposée est donc fiable et reproductible.
- Le bâtiment consomme in fine après correction 23 kWh/m²SU.an (55 kWh/m²SHON.an), soit 7 fois moins qu'un bâtiment standard. La climatisation a pu même être évitée durant la première saison chaude. Il produit 122 kWh/m²SU, soit 5 fois sa consommation.
- Dans les verrous restant à lever, il reste au niveau du process français d'avoir un objectif en terme de coût global et non en terme de coût d'investissement uniquement.
- Enfin, dans la continuité des travaux d'ENERPOS, le bâtiment est entièrement instrumenté avec une GTC à usage de recherche. La continuité des travaux va se réaliser dans le cadre de la Tache 40/Annexe 52 de l'Agence Internationale de l'Energie où ENERPOS est l'un des bâtiments référence en climat tropical.

Abstract :

The ANR-PREBAT « ENERPOS » research project focus on the development of new methods and tools for the design of Net Zero Energy Buildings in hot climates. Three French university research laboratories (LPBS/La Réunion, LOCIE/Chambéry and PHASE/Toulouse) and two HVAC practices (IMAGEEN/La Réunion and TRIBU/Paris) have been involved in the project.

The initial objectives of the ENERPOS project are listed below:

- to develop new methods and tools for the design of net zero energy buildings in hot/tropical climates;
- to point out that the factor 3 is easy to meet. The energy index must be below 55 kWh/m².year (net floor area);
- to gather the world of research and the professional sector for improving the use of new simulation tools;
- To do a transfer of knowledge from research to the professional fields once the proposed method validated.

The methods and tools have been applied to the design of the first zero energy building of the French overseas departments located in La Reunion. The design and the construction of the building has perfectly matched with the realization of the ENERPOS project. The completion was in October 2008, just one year before the end of the ENERPOS project.

The ENERPOS building, named similarly as the project itself, is a very low energy buildings. The main features are listed below : All rooms and spaces are cross naturally ventilated and equipped with high efficient ceiling fans.. The tutorial classrooms have no air-conditioning at all. Solar shadings have been designed and optimized thanks to 3D simulations. The building meets the PERENE requirements (PERENE, acronym of Energy Performance of Buildings) is a local standard for labeling energy efficient buildings. 350 m² of BIPV roofs (50 kWp) produce the renewable energy of the building.

In terms of methodology, the project has been structured around 9 tasks covering all the stages of the building process, from its design to the construction work.

- Task 0 : Re-thinking of the French process of the design of zero energy buildings. Proposals of improvements;
- Task A : Optimization of solar shading thanks to CAD tools;
- Task B : Reducing the period of air-conditioning by improving cross natural ventilation. Use of Sktechup, E+ plugin and Daysim.
- Task C : Optimization of daylighting and the Useful Daylight Index. Use of Daysim coupled with Sketchup;
- Task D : Assessment of a new index for thermal comfort in tropical/hot climates;
- Task E : Re-thinking of the indoor design;
- Task F : Reduction of the energy consumption of the computer network;
- Task G : Modeling of the electric loads of the building by end-uses;
- Task H : Modeling of the PV energy production

The most significant results are listed below :

- In terms of tools to use, the proposed method is innovative and has been widely approved : the use of Google Sktechup as a common tool used either by the architect or the engineer is the key stone of the process. Then, once the building is modeled or imported from CAD tools, Sketchup can launch the Energy Plus plugin to run thermal or energy simulations. It can also call Daysim for daylight simulations. The method has been tested and validated by professional partner IMAGEEN involved in the ENERPOS project. IMAGEEN now uses it for all its new buildings projects. This guarantees the reproducibility and efficiency of the method.
- The final energy index of the building after correction is less than 23 kWh/m²(net floor area)/.year (55 kWh/m² of gross floor area/year). This represents a reduction of a factor 7 compare to a standard building. Even air-conditioning could have been avoided during the entire first hot season. In terms of renewable energy, the energy produced is around 122 kWh/m² of net floor area, five times more than the consumption of the building.
- As for the French process to design low/zero energy buildings, a key step is to change the final objectives and move from the investment cost objective to the overall cost objective by taking into account the energy consumed throughout the entire life of the building.
- Last, the work done is continuing within the frame of the IEA SHC Task 40/ECBCS Annex 52 « Towards Net Zero Energy Solar Buildings ».The ENERPOS building is listed as one of the top NZEB buildings in all other the world and the experience gained thanks to ENERPOS allow France to take a lead part of this international work.

D.2 Synthèse

Enjeux et problématique, état de l'art

Le projet ENERPOS concerne la conception de bâtiments à énergie positive dans les pays à climats chauds (y/c DOM) et le transfert de connaissance des outils de conception utilisés par les chercheurs vers les professionnels. La réalisation de bâtiments à faible consommation d'énergie est d'une importance capitale dans les DOM, compte tenu des spécificités locales caractérisées :

- une réglementation thermique minimale qui va porter sur les logements uniquement et sera applicable à compter du 1er mai 2010 ;
- une croissance importante de la demande en énergie (7% par an en moyenne, 4% depuis 2006) ;
- un kWh électrique extrêmement polluant à cause des moyens de production de l'électricité : 1 kWh_e = 820 g de CO₂ (source : ADEME Réunion). Le coefficient de conversion énergie primaire/énergie finale est estimé par ailleurs à 3,3 (source : LPBS, université de La Réunion);
- une volonté politique forte à l'échelle nationale d'autonomie énergétique en 2030, programme GERRI Réunion Ile verte 2030.

Les principaux objectifs scientifiques du projet EnerPos visent à favoriser le processus de conception et de construction de bâtiment à énergie positive, à savoir :

- Développer de nouvelles méthodes et d'outils pour la conception de bâtiments à énergie positive en climats chauds;
- Montrer que le facteur 3 est facile à atteindre – cible : 55 kWh_e/m².an (en surface utile) ;
- Réunir le monde de la recherche et de la maîtrise d'œuvre en vue d'améliorer l'utilisation d'outils de simulation.
- Effectuer un transfert de connaissance de la recherche vers les pratiques professionnelles.

Matériels et méthodes

Le projet EnerPos bénéficie d'un cas d'étude à échelle réelle. Le bâtiment étudié est le premier bâtiment à énergie positive des DOM. Le bâtiment est localisé sur le site universitaire de Saint-Pierre, dans le sud de l'Ile de La Réunion. Les principales caractéristiques de cette construction sont les suivantes :

- Bâtiment universitaire de 627 m² de surface utile pour environ 1000 m² de SHON;
- Architecte : Thierry Faessel-Bohe;
- Bureau d'étude fluides : IMAGEEN;
- AMO HQE : TRIBU, Paris;
- Coût m² SHON : 2 200 €/m²;
- Formations accueillies : Master Espace, Construction et Environnement, formation professionnelles de l'IUT de Saint-Pierre;
- Production EnR assurée par 370m² (50,4 kWc) de toitures photovoltaïques intégrées;
- Programme très exigeant en terme de performances énergétiques sur l'enveloppe thermique (optimisation des protections solaires, ventilation naturelle) et les systèmes énergétiques utilisés (climatisation, éclairage, postes informatiques).
- Livraison : octobre 2008.

La conception du bâtiment EnerPos a intégrée tous les concepts de la construction bioclimatique et de la maîtrise de l'énergie déjà développé à La Réunion. Le bâtiment suit notamment les prescriptions énoncés dans le document PERENE (référentiel PERFORMANCE ENERgétique pour les DOM) établi par des acteurs privés de la construction et l'université de La Réunion.

Les grands principes bioclimatiques sont listés ci-dessous et sont illustrés par la Figure 3:

- Protections solaires des baies et parois opaques optimisées par simulation 3D;
- Toutes les pièces disposent d'une ventilation naturelle traversante;
- Pas de climatisation dans les salles de cours banalisés (enseignement théoriques et dirigés);
- Brasseurs d'air à haute efficacité énergétique équipant toutes les salles;
- Jalousies extérieures et intérieures;

- Climatisation à haut coefficient de performance;
- Eclairage naturel optimisé;
- Contrôle et suivi des consommations grâce à une GTC de recherche performante (enregistrement des conditions de confort, des consommations par type d'utilisation au pas de temps de la minute, suivi en temps réel des performances du bâtiment).
- Ergonomie des bureaux.

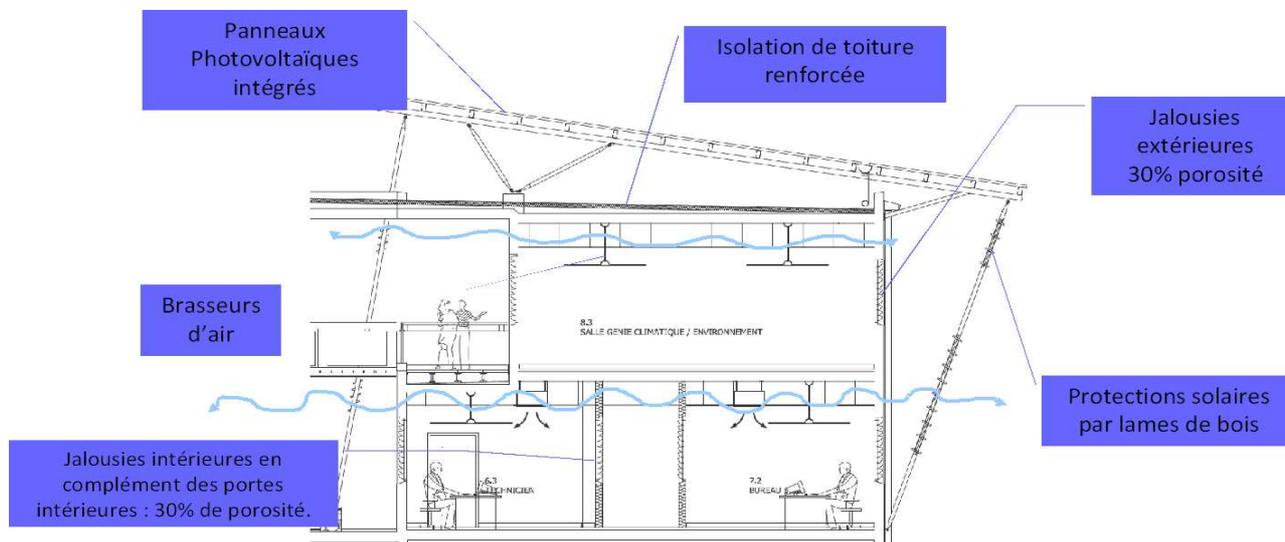


Figure 2 : Les grands principes de solutions passives retenues

La démarche retenue pour mener à bien les objectifs scientifiques du projet EnerPos s'articule principalement sur l'utilisation d'outils de modélisation et de simulation numériques. Pour que études menées soit transmissible dans l'ingénierie de la construction, ces outils logiciels doivent être accessibles au plus grand nombre tout en assurant une fiabilité des résultats obtenus. Le code de simulation EnergyPlus s'est imposé comme étant actuellement l'outil le plus adapté. Deux méthodes « diffusables » vers les professionnels et utilisant sur le code EnergyPlus ont été testées :

- Une première s'appuie sur une interface commerciale utilisant le code de calcul EnergyPlus (DesignBuilder) pour la partie thermique et une démarche parallèle utilisant DaySim pour l'éclairage naturelle (figure 1). Cette première méthode permet d'utiliser des outils simples et intégrés, mais souffre d'une lourdeur pour sa mise en œuvre.
- La deuxième méthode s'appuie sur les modules additionnels développés très récemment autour du logiciel de dessin Google SketchUp. De nombreux code de calcul dans la physique du bâtiment proposent ces « plugins » pour exporter de manière intelligible la modélisation 3D vers le moteur de calcul dédié à la simulation (voir Figure 3). Cette méthode s'avère très souple d'utilisation mais demande de maîtriser de nombreux outils complémentaires (dessin 3D, tableur, codes de calcul, etc.).

L'utilisation de SketchUp, qui dispose de plus en plus de modules additionnels (Plugins), nous paraît adaptée à la conception de bâtiment à énergie positive. A l'origine, ce logiciel de dessin a été créé pour permettre à l'utilisateur lambda de construire un bâtiment en 3D très rapidement. Il dispose en outre d'une connexion à internet permettant aux internautes de mettre en ligne leur projet via Google Earth. Ce logiciel est non seulement devenu incontournable mais également peut être utilisé comme une interface graphique puissante pour générer les fichiers d'entrée des codes de simulation.

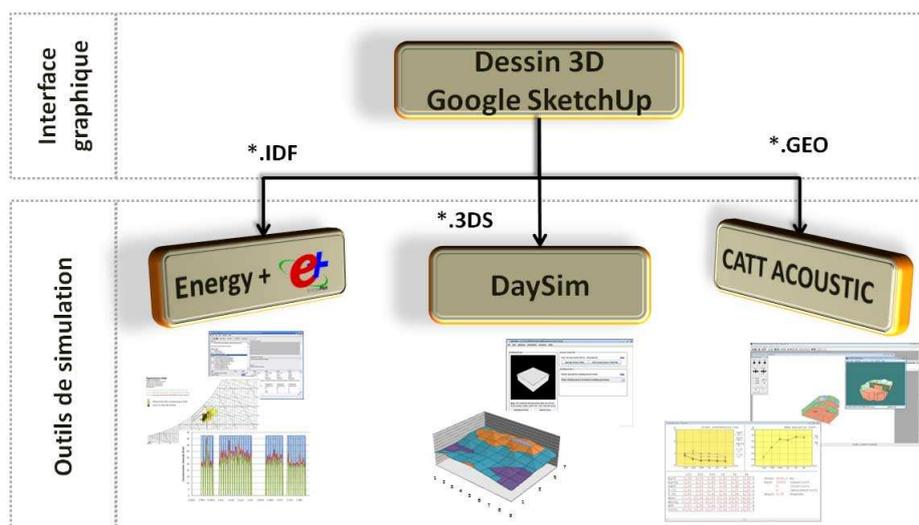


Figure 3 : Méthodologie de simulation basée sur l'utilisation de Google SketchUp comme clé de voute du process.

Résultats

Les travaux ont porté initialement sur 9 tâches concernant toutes les phases de l'acte de construire, de la programmation, via les études à la remise du DCE et l'exploitation du bâtiment. Deux tâches complémentaires ont été réalisées pour tenir en compte de l'évaluation des performances du bâtiment EnerPos en phase d'exploitation.

Tâche 0

Une réflexion sur le processus de l'acte de construire des bâtiments à faible énergie de la phase programme à la livraison du bâtiment a été menée. Cette réflexion a mis en avant les verrous existants actuellement niveau des équipes de conceptions et de construction. Une définition du concept de bâtiment à « énergie zéro » s'est imposé, il s'agit d'un bâtiment dont le « **bilan en énergie annuelle primaire est nulle** ».

Tâche A

L'optimisation des protections solaires est un des concepts fondamentaux de la conception bioclimatique dans les pays chauds et humides. Une optimisation des systèmes d'occultation de l'énergie solaire directe a été réalisée par des simulations 3D des ombres portées. Cette optimisation a permis de concevoir des protections efficaces en diminuant le nombre de lames brises soleil initialement prévues.

Tâche B

Une diminution significative de la consommation d'énergie des bâtiments dans les climats chauds et humides est obtenue en réduisant voir en supprimant de la période de climatisation. Cet objectif est atteignable en favorisant la ventilation naturelle traversante des locaux. Cette tâche a été réalisée en imaginant le couplage entre un code de calcul utilisant une méthode de description nodale tel qu'EnergyPlus avec un modèle analytique (volumes finis) de mécanique des fluides tel que StarCD.

Tâche C

L'éclairage artificiel n'étant pas le poste de consommation principale des bâtiments traditionnels, la conception thermique est prépondérante sur l'optimisation de l'éclairage naturel. Dans un bâtiment dont la consommation énergétique des systèmes de traitement d'air est réduite, la problématique est différente. Une étude de fond été réalisée pour l'optimisation de l'éclairage naturel. Elle intègre notamment la dualité entre protection solaire et éclairage naturel. Cette tâche a permis de proposer de nouveaux outils (Radiance, Daysim, EnergyPlus) ainsi que de nouveaux indicateurs de confort visuel et de consommation énergétique de l'éclairage.

Tâche D

Pour déterminer le besoin ou non de climatisation il paraît intéressant de se baser sur la perception thermique humaine plutôt que uniquement sur des variables physiques. Il faut envisager un outil d'évaluation de l'ambiance qui prenne en compte les spécificités du climat chaud et qui puisse être intégré facilement dans l'ensemble de la simulation. Le diagramme de confort est un outil dont les bases ont été

posées dans les années 70 mais il est encore actuellement le seul outil fiable qui puisse être transmis dans le domaine de l'ingénierie de la conception des bâtiments.

Le diagramme de confort est une première approche mais elle nécessite d'être progressivement remplacé par des indices de confort adaptés au climat des bas de La Réunion. Il apparaît que des indices physiologiques tels que la mouillure cutanée ou le débit sudoral soient des données convaincantes, dans la mesure où des valeurs limites sont définies. L'adaptation non seulement des seuils de confort mais aussi du calcul de ces indices est proposée.

Tâche E

L'obtention du confort à de moindre coût énergétique dépend de manière significative sur l'architecture intérieure et l'ergonomie des locaux. Une réflexion a été menée sur l'agencement des plans de travail, des ouvertures (ventilation et éclairage naturel), des brasseurs d'air, sur les assises, sur le type et le positionnement des luminaires. Par exemple, le positionnement des plans de travail est crucial vis-à-vis de l'optimisation de l'éclairage naturel. D'une part, il faut se placer suffisamment proche des fenêtres pour bénéficier d'un niveau d'éclairement moyen convenable. D'autre part, l'agencement de l'opérateur vis-à-vis de son poste de travail doit se faire parallèlement au plan des ouvertures principales pour éviter les éblouissements (contraste et tâches solaires).

Tâche F

Une étude spécifique sur la possible réduction des besoins du parc informatique a été menée. Elle a notamment porté sur la diminution des besoins en climatisation des salles informatiques par la déportation des unités centrales dans un local technique. La technologie est suffisamment mûre pour mettre en œuvre ce genre de solution qui permet de réduire les charges internes des salles informatiques aux seuls écrans. Les conclusions montrent que dans le cas du bâtiment EnerPos, la déportation des UC nécessite de climatiser en permanence un local technique. Il en résulte une consommation globale du bâtiment accrue par rapport à une solution classique.

Tâche G

La modélisation des courbes de charge du bâtiment par type d'utilisation a été menée pour évaluer le caractère « Energie Positive » du bâtiment EnerPos. En fonction des simulations thermiques et des simulations en éclairage naturel, la courbe de charge a été modélisée pour l'ensemble des postes énergétiques par rapport aux nouvelles données. Un comparatif a été effectué entre, la méthode classique demandée à un BET pour le bilan de puissance et la méthode proposée dans le cadre du projet EnerPos. L'estimation de la consommation énergétique du bâtiment est de **23 kWh/m²** de surface utile.

Tâche H

La modélisation de la production EnR par une ferme photovoltaïque de 50,4 kWc intégrée en ombrière de toiture a été réalisée avec le logiciel PVSyst. Il en ressort une production d'électricité annuelle de **123 kWh/m²SU**.

Tâche I (non prévue dans le programme ENERPOS mais incluse à titre d'information)

La mise en place d'une GTC et d'une supervision permet de créer une base de données sur le comportement du bâtiment. Ce système expérimental mesure les variables physiques du confort et les consommations énergétiques des différents postes.

Tâche J (non prévue dans le programme ENERPOS mais incluse à titre d'information)

Une étude « post occupancy evaluation » est en cours. L'évaluation des performances du bâtiment est obtenue par :

- La réalisation de questionnaires sur le confort thermique proposés aux différents usagers (Etudiants, enseignants, administratifs),
- La mesure des consommations énergétique en fonction de divers scénarios d'utilisation,
- La mesure de confort visuel et de l'autonomie en éclairage naturel.

Les premiers résultats au bout d'un an d'exploitation sont très encourageants car la climatisation a pu être évitée durant toute la saison chaude. Les utilisateurs sont par ailleurs très satisfait de leur environnement tant du point de vue du confort thermique que du confort visuel et acoustique.

Discussions

Degré de réalisation des objectifs initiaux

Les objectifs initiaux étaient d'appliquer les outils et les méthodes à deux bâtiments : celui de la Réunion et celui de l'INES à Chambéry. Pour des raisons de retard dans le bâtiment d'INES, la méthode n'a été appliquée qu'au bâtiment de La Réunion. A part ce point précis, l'ensemble des objectifs initiaux ont été atteints et le degré de réalisation est de 100%.

Verrous restant à franchir

L'interconnexion entre les logiciels de dessin destinés aux architectes et les codes de calcul des ingénieurs n'est pas encore aboutie. Une définition de niveau de précision du modèle devra être établie pour que des outils compatibles voient le jour. En tout état de cause, Sketchup reste une avancée notable en termes d'outils de modélisation pouvant à la fois être utilisé par l'architecte et l'ingénieur. Il faut continuer à développer cette interface en ce sens et notamment les modules additionnels de type plugin.

Un verrou majeur indépendant du niveau de finesse des outils, mais entièrement incontournable reste la procédure de réalisation de l'acte de construire en France, où la logique du coût d'investissement est prépondérante sur le coût global. Tant que cette situation reste en l'état, malgré le développement des meilleurs outils, le bâtiment ne pourra être amélioré sans incitations ou modification de la procédure.

Perspectives ouvertes

La climatisation peut être évitée 100% du temps dans un bâtiment dans les bas de La Réunion conçu selon les concepts de l'architecture bioclimatique. Le facteur 4 de réduction des consommations énergétiques possible sans rupture technologique. La « Post occupancy evaluation » est toutefois nécessaire pour évaluer les performances dans le temps du bâtiment dans sa phase d'exploitation.

Les travaux d'ENERPOS sont utilisés dans le cadre d'un travail international porté par l'agence internationale de l'énergie via la « Task 40/Annexe 52. Ce travail porte sur un référencement à l'échelle internationale des solutions techniques portant sur les éléments d'enveloppe, sur les énergies renouvelables et leur intégration architecturale, sur les performances des systèmes par type de bâtiment et par type de climat. François GARDE, coordonnateur du projet ENERPOS est sub-task leader de cette tâche.

Impact scientifique

La prise en compte simultanée des contraintes liées à l'éclairage naturel et à la protection solaire est un domaine qui n'avait pas été exploré jusqu'à présent. L'édition de règles expertes permettra d'optimiser les protections solaires suivant deux critères : énergie et éclairage artificiel.

La prise en compte détaillée du confort thermique des usagers dans un bâtiment à énergie positive passe par développement et validation d'un indice de sensation thermique en climat chaud.

Une avancée notable sur la communication entre les outils de l'architecte et ceux du BE a été proposée dans ce projet ENERPOS (Sketchup, EnergyPlus, Daysim) tel que le montre la Figure 3.

Impact industriel et transfert de connaissance

Les outils et les méthodes développées dans le cadre d'ENERPOS (Sketchup, Daysim, Energy +) sont actuellement utilisées par IMAGEEN dans le cadre d'autres projets. La méthode proposée est donc fiable et reproductible.

Conclusions et recommandations

Le projet ANR PREBAT a réellement permis de proposer une nouvelle méthode de conception basée sur de nouveaux outils type Sketchup. La méthode a été appliquée sur un cas d'étude, s'est révélée performante car elle peut être reproductible. Le bâtiment « ENERPOS » a été livré en octobre 2008 et fonctionne depuis un an. C'est le premier bâtiment à énergie positive des DOM. Les résultats en phase d'exploitation sont meilleurs que les simulations dans la mesure où la climatisation a pu être évitée pendant toute la saison chaude. Dans la continuité d'ENERPOS, nous avons engagé une démarche de validation de la phase études qui fera l'objet d'analyses complémentaires au projet ENERPOS. Une instrumentation complète du bâtiment (systèmes énergétiques et confort), a été installée dans cet objectif. In fine, le bâtiment consomme cinq fois moins qu'un bâtiment standard et produit 5 fois sa consommation d'énergie primaire.

Les principaux résultats sur son comportement énergétique sont les suivants :

Consommation d'énergie finale : 23.06 kWhe/m² (surface utile),

Consommation d'énergie primaire 47 kWhep/m²SHON (pour facteur de conversion Eprim/Efin = 3,3)

Production d'énergie électrique: 123 kWhe.m² (surface utile)