



**HAL**  
open science

## Fiche 3-4:Modélisation des comportements de consommation énergétique de bâtiment. Signature énergétique

François Garde, Alain Bastide, Frédéric Miranville, Dalila Bentaleb, Didier Calogine, Ali Hamada Fakra, Éric Monceyron

### ► To cite this version:

François Garde, Alain Bastide, Frédéric Miranville, Dalila Bentaleb, Didier Calogine, et al.. Fiche 3-4:Modélisation des comportements de consommation énergétique de bâtiment. Signature énergétique. Alizés: Revue angliciste de La Réunion, 2007, Colloque “ Equilibres environnementaux, énergies renouvelables et développements urbains ”, 29-II Sciences, pp.141-159. hal-02343110

**HAL Id: hal-02343110**

<https://hal.univ-reunion.fr/hal-02343110v1>

Submitted on 1 Nov 2019

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

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



## PROGRAMME PLURIANNUEL 2003-2005

# FICHE 3-4

## MODÉLISATION DES COMPOTEMENTS DE CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE BÂTIMENT. SIGNATURE ÉNERGETIQUE

---

### Membres impliqués :

François GARDE	Professeur, LPBS, Université de La Réunion ;
Alain BASTIDE	Maître de Conférences, LPBS, Université de La Réunion ;
Frédéric MIRANVILLE	Maître de Conférences, LPBS, Université de La Réunion ;
Dalila BENTALEB	Chercheur associé, LPBS, Université de La Réunion ;
Didier CALOGINE	Chercheur associé, LPBS, Université de La Réunion ;
Fakra ALI-HAMADA	Doctorant, LPBS ;
Eric MONCEYRON	Ingénieur d'étude, Université de La Réunion.

### Partenaires

INSET	Bureau d'études, Ile de La Réunion
T. Faessel Bohe	Architecte
TRIBU	Bureau d'étude HQE, Paris



## RÉSUMÉ

---

Cette fiche présente de nouvelles méthodes de modélisation et de conception permettant d'optimiser la consommation des bâtiments et leur signature énergétique. Celles-ci seront illustrées au travers d'un projet de bâtiment universitaire à faible énergie à l'île de La Réunion. L'objectif est de réaliser un bâtiment consommant deux fois moins d'énergie qu'un bâtiment standard. La méthodologie a porté sur des exigences définies dès la phase programme sur la conception thermique et les systèmes. Les innovations portant sur la conception architecturale du bâtiment, sur les performances des systèmes et sur les simulations numériques sont présentées. Les toitures photovoltaïques intégrées au bâtiment assurent la production de l'énergie électrique qui permettra au bâtiment de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme.

En terme de valorisation de la recherche, ces travaux ont permis une avancée notable dans le transfert de connaissance de la recherche vers le monde de l'ingénierie. Les méthodes de conception novatrices présentée dans ce rapport (utilisation d'Autocad 3D, utilisation de code de simulation dynamique avec module de confort, ergonomies des espaces de travail repensées) ont été développées en collaboration avec l'équipe de maîtrise d'œuvre. Ces méthodes et outils de simulations sont maintenant utilisés de manière systématique dans leurs nouveaux projets.

## INTRODUCTION

---

A l'heure actuelle, peu de données sont disponibles sur le suivi et la consommation énergétique de bâtiments climatisés dans les départements d'outre mer. La gestion technique centralisée (GTC) n'est à ce jour pas généralisée. Par ailleurs, les BET ne disposent pas d'outils simplifiés permettant de prédire la consommation énergétique annuelle et les appels de puissance d'un bâtiment par secteur d'utilisation (climatisation, éclairage, eau chaude).

Les objectifs principaux de ce travail de recherche visent la mise en place d'outils simplifiés à usage de la profession afin de favoriser une démarche de maîtrise de l'énergie et de développer des solutions techniques qui permettent l'utilisation des énergies renouvelables au niveau des secteurs de consommation d'énergie d'un bâtiment. a démarche va être illustrée sur un projet de bâtiment à faible énergie à l'Université de La Réunion : la bâtiment mastère Génie Civil / IUT 5<sup>ème</sup> département.

## L'Université de La Réunion et la MDE

L'Université de La Réunion connaît à son échelle les même problèmes que l'île de La Réunion en général, à savoir, une croissance énergétique similaire, des problèmes de MDE récurrents et un patrimoine immobilier énergivore. Le ratio de consommation énergétique est égal à 165 kWh par an et par mètre carré de surface utile (kWh/an/m<sup>2</sup>SU). Ce ratio comprend la climatisation, ses auxiliaires et l'ensemble des autres usages (principalement parc informatique et éclairage). La facture d'électricité 2004 est de l'ordre de 560 k€ dont 40% est dû à la climatisation. La surface utile 2004 est de 60 000 m<sup>2</sup>. 90 % de cette surface est climatisée. La démographie importante de l'île implique un doublement des effectifs étudiants d'ici 2020. Le nombre sera alors de 20 000 étudiants. La surface utile est donc amenée à doubler en 2020. L'Université a mis en place depuis cinq ans une politique énergétique de MDE et de développement des énergies renouvelables. Les actions portent à la fois sur le patrimoine existant et sur la construction des bâtiments neufs. Nous allons dans ce papier présenter la méthodologie adoptée pour les bâtiments neufs uniquement et illustrerons nos propos en présentant le projet de bâtiment à énergie positive. Les objectifs énergétiques que nous nous fixons à l'horizon 2020 sont ceux fixés par le protocole de Kyoto, à savoir diminuer d'un facteur 4 les émissions de gaz à effet de serre et donc la consommation des bâtiments. La figure 1 représente les ratios énergétiques actuels, ceux fixés pour les bâtiments universitaires neufs optimisés et ceux fixés pour le bâtiment à énergie positive, l'objectif étant d'atteindre en 2020 un ratio de 40 kWh/an/m<sup>2</sup> SU.

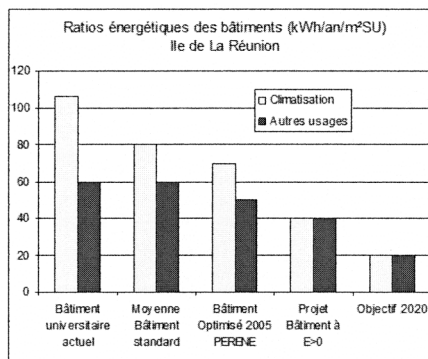


Figure 1 : Objectifs de ratio énergétiques en kWh/an/m<sup>2</sup> de surface utile

## MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS

Le principe de base de notre méthodologie est d'essayer atteindre les conditions de confort thermique et visuel par des solutions passives. La climatisation et l'éclairage artificiel doivent être utilisés en dernière limite. Pour se faire, l'ensemble des bâtiments neufs de l'université doit respecter un certain nombre de critères de qualité portant sur différents points concernant le bâtiment, à savoir :

- L'environnement autour du bâtiment ;
- La conception thermique et aérodynamique ;
- Les systèmes et équipements techniques ;
- La maîtrise et le suivi des énergies.

Ces critères de qualité sont énoncés dans une note MDE intégrée dans le programme de construction du bâtiment. Plus récemment, les bâtiments doivent également respecter des prescriptions contenues dans l'outil PERENE (Garde 05). Le programme PERENE –ie PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE des BÂTIMENTS, est un programme qui préfigure un projet de réglementation thermique dans les DOM pour les bâtiments tertiaires. En effet, devant la lenteur des pouvoirs publics à mettre en place une réglementation, même minimale, dans le domaine du bâtiment, les professionnels locaux ont décidé de mettre en place un outil d'aide à la conception appliqué à la fois au résidentiel et au tertiaire, permettant de bien concevoir un bâtiment quelle que soit la zone climatique de l'Ile (Garde 05). Des objectifs de puissance installée et de consommation énergétique à ne pas dépasser sont indiqués. Cet outil est opérationnel depuis 2004 et est actuellement en phase d'expérimentation. Le projet de bâtiment à énergie positive fait partie des bâtiments retenus lors de cette phase d'expérimentation. Il est également prévu que ce projet obtienne le label Greenlight pour l'éclairage. Ce label européen récompense les bâtiments bien conçus en terme d'éclairage artificiel et naturel. Les objectifs clairement affichés sont de faire de ce bâtiment la référence dans les Départements d'Outre Mer français en terme d'optimisation énergétique des divers postes consommateurs en énergie.

## LE PROJET DE BATIMENT

Le projet est composé de quatre petits bâtiments parallèles les uns aux autres dont les façades principales sont orientées Nord et Sud (voir Figure 2). Les deux bâtiments situés au Nord vont accueillir une formation de Services et Réseaux de Communication de niveau bac +2 et les deux autres bâtiments plus au sud une formation en master Génie Civil de niveau ingénieur.

Les typologies de locaux sont :

- des bureaux pour les deux départements situés au RdC des bâtiments latéraux ;
- des salles dites banalisées pour l'enseignement des travaux dirigés –ieTD ;
- des salles informatiques.

La répartition des surfaces utiles par type de salle est donnée par le tableau 1. On note que 47 % de la surface utile est climatisée. Il s'agit d'une exigence du programme dans la mesure où nous exigeons que les salles de TD ne soient pas climatisées. A charge aux concepteurs de trouver les solutions passives pour atteindre un certain niveau de confort.

**Tableau 1 : Répartition des surfaces utiles par typologie de salle**

Locaux	Surfaces climatisées	Surfaces non climatisées
Bureaux départements	401 m <sup>2</sup>	
Salles informatiques	423 m <sup>2</sup>	
Salles banalisées		401 m <sup>2</sup>
Autres		512 m <sup>2</sup>
<b>Sous Total</b>	<b>824 m<sup>2</sup> (47%)</b>	<b>913 m<sup>2</sup>(53%)</b>
<b>Total surface utile</b>	<b>1737 m<sup>2</sup></b>	



Figure 2 : Vue 3D du bâtiment. L'azimut des façades Nord est de -14°Est/NG.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION : CONFORT THERMIQUE

### Objectifs :

Comme nous l'avons dit précédemment, l'objectif est de réduire voire d'annuler la période de climatisation. Les bâtiments standards ont une période de climatisation qui peut durer toute l'année. En moyenne, celle-ci dure sept mois (de début octobre à mi mai). Pour atteindre cet objectif, l'environnement autour du bâtiment, la conception thermique et aéraulique ont une importance primordiale.

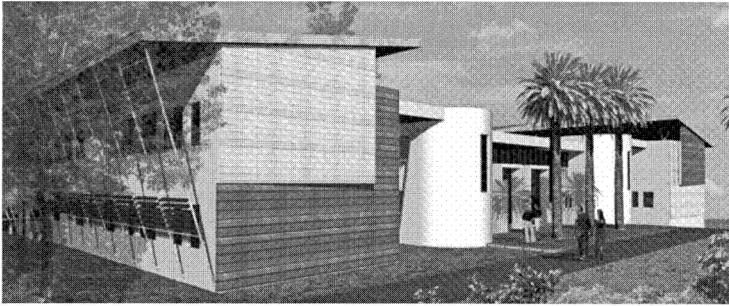


Figure 3 : Vue des façades nord (protections solaires en lame de bois) et ouest (bardage tôle et bois)

#### Environnement autour du bâtiment

Le programme de construction ainsi que PERENE imposent une végétalisation périphérique d'au moins 3 mètres de large autour du bâtiment, ceci pour éviter que l'air s'échauffe et pénètre dans les locaux lorsque ceux-ci fonctionnent en ventilation naturelle. Les figures 2 et 3 montrent que ce point est respecté. Par ailleurs, les orientations des façades principales nord-sud limitent les apports solaires sur les pignons est et ouest. De plus, celles-ci sont perpendiculaires aux brises thermiques soufflant en saison chaude. La ventilation des locaux est donc optimisée.

#### Conception thermique de l'enveloppe

PERENE et le programme du bâtiment fixent des valeurs de facteur solaire pour les parois opaques et les vitrages. Le projet respecte ces valeurs de facteur solaire à ne pas dépasser. Les solutions techniques pour atteindre les valeurs PERENE sont les suivantes :

- Toiture : isolation de 9 cm de polystyrène sur la dalle avec une surtoiture ventilée.
- Mur et vitrages nord et sud: Débord de toiture, coursives et brises soleil déportés en lames de bois fixées sur des supports obliques en acier galvanisé.

Concernant l'optimisation des brises soleil, leur modélisation est quasiment impossible avec des codes de simulation thermique classique. Pour toutes les façades, le nombre de lames, leur espacement et leur angle a donc été déterminé à l'aide d'une reconstitution du bâtiment en 3D sous Autocad. La figure 6 montre l'efficacité des protections solaires sur une façade Nord pour une journée du mois d'avril. L'objectif in fine est d'avoir une protection totale pendant les horaires d'enseignement (de 8h à 17h) pour les façades nord jusqu'au 30 avril et pour les façades sud durant le mois de décembre.

#### Conception aéralique

Le principe de base en climat tropical est d'avoir des locaux traversants,-ie d'avoir deux façades opposées donnant sur l'extérieur, avec un niveau de porosité supérieur à 20%. Ce principe est imposé dans le programme de construction. Ainsi, toutes les salles d'enseignements sont traversantes avec un niveau de porosité supérieur à 30% assuré par des menuiseries de type jalousies qui ont l'avantage de pouvoir réguler les flux d'air, mais qui sont également anti-cyclonique et anti-effraction. De ce fait, les locaux peuvent continuer à fonctionner en ventilation naturelle la nuit et être rafraîchis par ventilation nocturne. Grâce à ce principe, on peut atteindre des niveaux de renouvellement d'air compris entre 40 et 100 vol/h et des vitesses intérieures de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  pour des vitesses de vent de l'ordre de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ .

La conception des bureaux est plus problématique car, comme le montre la figure 5, nous sommes dans une configuration standard avec un couloir central qui dessert les bureaux. L'originalité du projet est d'avoir prévu des jalousies intérieures en verre sablé qui favorisent et assurent une meilleure répartition de l'écoulement de l'air intérieur. Ceci permet d'avoir une porosité intérieure de 30 %. Enfin, une autre innovation est d'avoir prévu des brasseurs d'air dans toutes les salles y compris dans les locaux climatisés. Ceux-ci assurent le complément de vitesse d'air pour les jours sans vent et permettent d'avoir une période de transition avant la période de climatisation active (voir Figures 4, 10 et 11).

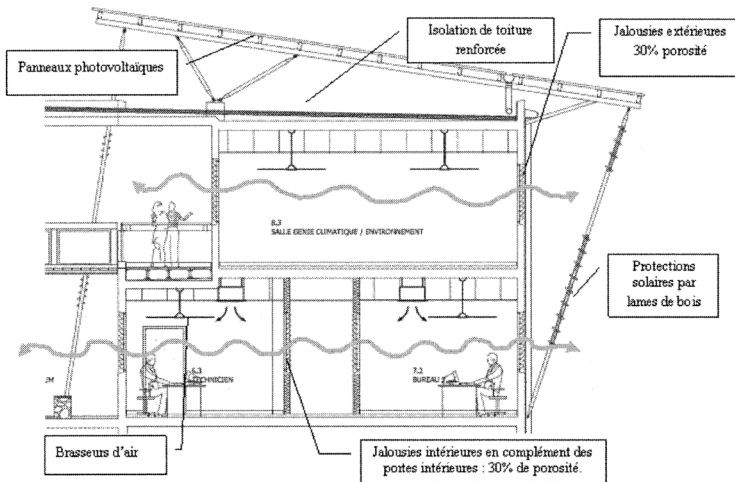


Figure 4 : Principes bioclimatiques



Figure 6 : Simulation de l'efficacité des protections solaires de la façade Nord du bâtiment Nord à différentes heures d'une journée du mois d'avril : 9h 11h, 12h 14h 16h. Les ouvertures sont à l'ombre quelque soit l'heure.



### Simulations en régime dynamique

Les simulations en régime dynamique sont imposées dans le programme du bâtiment. Elles ont pour objectif de prédire les différentes périodes de fonctionnement : ventilation naturelle, brasseurs d'air et climatisation active. Les simulations ont été menées par les chercheurs de l'université en collaboration avec le bureau d'étude thermique. Le code utilisé est un code de simulation thermique et aéraulique pouvant, à l'aide d'un modèles de grandes ouvertures en pression, modéliser l'effet de la ventilation naturelle sur le confort thermique. Le modèle utilisé pour les transferts de masse est le modèle de Walton détaillé dans (Boyer 98). Le modèle considère un seul nœud d'air par pièce. La stratification est négligée. Les indices de confort choisis sont le diagramme de confort de Givoni et la température résultante qui intègre la température d'air  $T_a$  et la moyenne des températures de parois  $T_{rm}$  ( $T_{res} = 2/3.T_a + 1/3 T_{rm}$ ). Le premier indice permet de connaître le pourcentage de points compris dans les différentes zones de confort ( $0 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1 \text{ m.s}^{-1}$  ainsi que le nombre d'heures d'inconfort. Le second permet d'avoir une idée des différentes périodes de fonctionnement. Le fichier météo utilisé est une année type au pas de temps horaire. Celle-ci a été reconstituée à partir d'une base de données incomplète mesurée sur site. La méthode de reconstitution est présentée dans (David 05). Les figures 7 et 8 montrent le résultat des simulations pour un bureau de 3 personnes. Concernant les charges internes, nous avons supposé que l'éclairage naturel est suffisant. Les ordinateurs ont une puissance de 200 W, ce qui est légèrement surestimé par rapport aux ordinateurs plus récents à écran TFT où la puissance moyenne est de 120 W.

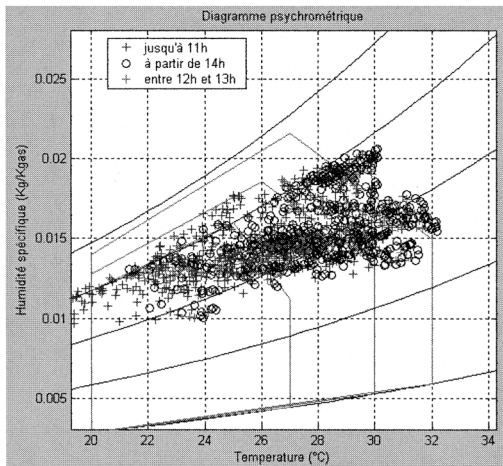


Figure 7 : Résultats des simulations pour un bureau pendant la saison chaude (1<sup>er</sup> octobre au 31 avril).

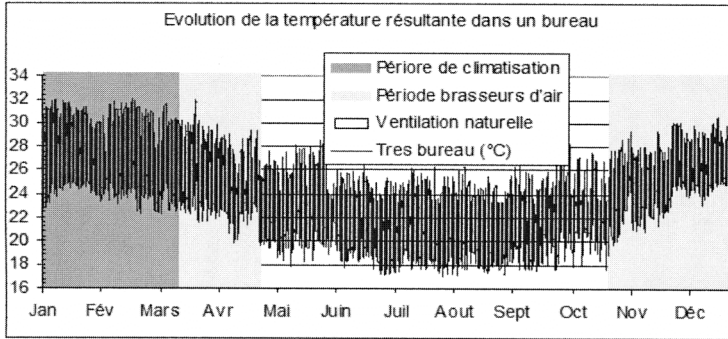
La figure 6 et le tableau 2 montrent que les couples température résultante/humidité sont à 89% compris dans l'ensemble des zones de confort pour la période du 1<sup>er</sup> octobre au 31 avril, ce qui correspond à la saison chaude. Les occupants auront donc une sensation d'inconfort 11 % du temps et principalement à partir du début de l'après midi. En nombre d'heures, cela représente 160 h. On peut donc imaginer un fonctionnement en ventilation naturelle le matin et passer en climatisation active l'après midi.

**Tableau 2 : Pourcentage de points situés dans les zones de confort et nombre d'heures inconfortables**

	Bureau	Salle TD	Salle info
0 m.s <sup>-1</sup>	24%	26%	23%
0,5 m.s <sup>-1</sup>	38%	38%	36%
1 m.s <sup>-1</sup>	27%	22%	23%
<b>Total %</b>	<b>89%</b>	<b>86%</b>	<b>82%</b>
Nbre d'heures inconfortables	160 h	270 h	335 h

Les mêmes simulations ont été menées pour une salle de TD de 60 m<sup>2</sup> avec 40 étudiants et une salle informatique de 50 m<sup>2</sup> avec 20 étudiants et 20 PC. Dans chaque cas, on suppose que l'éclairage naturel est suffisant. Le tableau 2 synthétise les résultats. Bien évidemment, le pourcentage d'inconfort est le plus élevé pour la salle informatique. Le nombre d'heures d'inconfort –ie le nombre de points en dehors des zones de confort, est le double de celles du bureau. Ce nombre d'heures correspond à la durée de fonctionnement de la climatisation active.

La figure 7 permet, grâce à l'évolution annuelle de la température résultante, de prévoir les différentes périodes de fonctionnement : ventilation naturelle, brasseurs d'air, climatisation. La transition ventilation naturelle/brasseurs d'air s'effectue d'une part grâce à notre expérience et connaissance du site et du climat mais également sur le critère d'une température résultante maximale moyenne supérieure à 28°C et enfin sur une étude de la transition des régimes de vents Alizés/brises thermiques. La transition brasseurs d'air/climatisation a été définie selon le critère d'une température résultante supérieure à 30°C. En effet, un occupant en activité du bureau habillé en tenue d'été commence à ressentir une sensation de chaleur au delà de 30°C avec une vitesse d'air de 1 m.s<sup>-1</sup>. Rappelons que la température ressentie à cette vitesse est 4°C inférieure à la température résultante effective. Ainsi, nous voyons que pour un bureau la climatisation active n'est nécessaire qu'à compter de janvier. Le fonctionnement en brasseurs d'air est efficace jusqu'à la fin de l'année civile.



**Figure 8 : Evolution de la température résultante dans un bureau pendant une année type.**

La figure 8 synthétise les différentes périodes de fonctionnement définies grâce aux simulations dynamiques. Nous voyons que les espaces de bureaux sont climatisés pendant 1,5 mois et les salles informatiques pendant 3 mois (15 jours en décembre et de début février à mi avril).

Afin de valider les résultats sur les vitesses d'air dans les locaux, des simulations en mécanique des fluides numériques sont en cours de réalisation. Elles permettront, à l'aide d'un fichier 3D du bâtiment, de visualiser les écoulements de l'air autour et dans le bâtiment. Les informations recueillies seront utiles pour connaître précisément l'intensité des vitesses d'air intérieures (voir annexe).

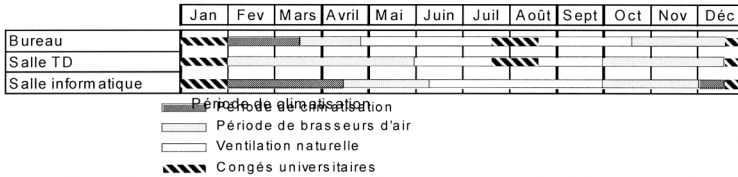


Figure 9 : Périodes de fonctionnement de la climatisation et des brasseurs d'air définies grâce aux simulations en régime dynamique

Ainsi, les consommations annuelles dues à la climatisation et aux brasseurs d'air ont pu être calculées. Au final, le bâtiment consommera quatre fois moins d'énergie électrique qu'un bâtiment standard avec un ratio énergétique de 17 kWh/an/m²SU pour le conditionnement d'air. Ceci comprend les groupes de froid et auxiliaires ainsi que les brasseurs d'air.

RÉSULTATS ET DISCUSSION : CONFORT VISUEL

Contexte et objectifs

De la même manière que le confort thermique, les conditions d'éclairage doivent pouvoir être atteintes par des moyens passifs, c'est-à-dire en éclairage naturel. Concernant l'éclairage artificiel, les normes françaises en matière d'exigence d'éclairément sur un plan de travail ont souvent tendance à surdimensionner les systèmes. Par exemple, les puissances installées sont souvent de l'ordre de 17W/m² pour un niveau d'éclairément mesuré de 700 lux, alors que 300 lux est largement suffisant. On se retrouve donc avec des bâtiments qui consomment deux fois plus d'énergie qu'il n'en faudrait. Le programme de construction et la note MDE imposent que la puissance électrique installée soit inférieure à 7 W/m². Nous allons voir que cet objectif peut être facilement atteint sans surcoût significatif.

Eclairage naturel

L'ensemble des salles a été classé par typologie et a fait l'objet de simulation sous un logiciel capable de simuler le niveau d'éclairage naturel. Ce logiciel est largement répandu dans les milieux des bureaux d'études (DIAL).

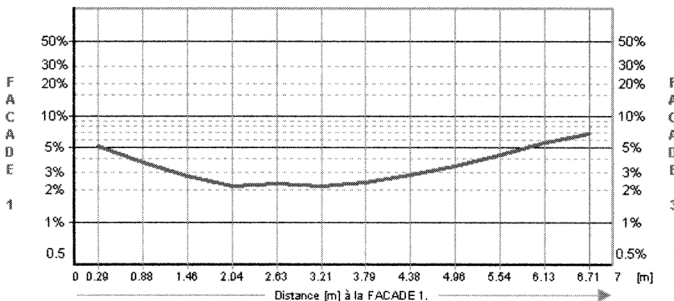


Figure 10 : Evolution du facteur de jour suivant une coupe d'une salle de TD à l'étage

La figure 9 par exemple montre l'évolution du facteur de jour par temps couvert pour une salle de classe située à l'étage. Pour avoir un niveau d'éclairage acceptable, le FJ doit être supérieur à 1,5%. Ce type de figure couplé aux résultats du tableau 3 nous montre que pour l'ensemble des pièces situées à l'étage, l'éclairage artificiel n'est pas nécessaire quel que soit le moment de l'année pendant les heures d'enseignement (de 8h à 17h).

Tableau 3 : Pourcentage de facteur de jour supérieur à 1,5% par typologie de local

Local	% surface pièce avec FJ $\geq$ 1.5%	FJ minimum (%)
Bureau RdC sur patio	60%	1.0%
Salle RdC sur patio	Entre 40 et 82%	1.2%
Salles en R+1	100%	1.6%

Par contre, les seuls locaux qui posent problème sont deux salles d'enseignement situés au RdC des deux bâtiments centraux. Des solutions sont actuellement à l'étude pour améliorer l'éclairage naturel, notamment de réduire ou de percer les dalles terrasse (voir figure 2). En terme de solution technique, les jalousies intérieures des bureaux qui sont utilisées pour la ventilation naturelle jouent également le rôle de second jour dans le couloir (voir figures 4 et 10). Ainsi, les simulations ont montré que l'éclairage artificiel du couloir n'était pas nécessaire.

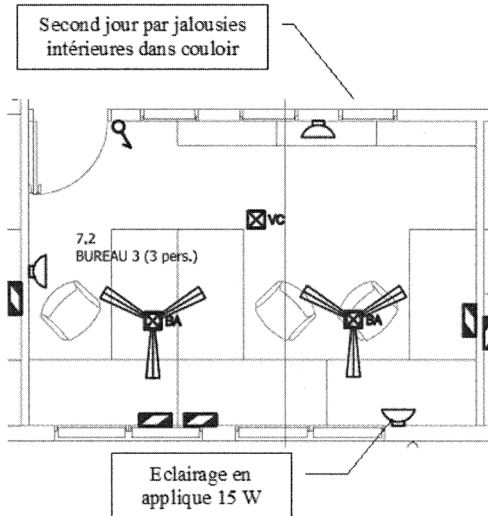


Figure 11 : Principes d'éclairage naturel (jalousies intérieures en second jour) et artificiel (appliques) pour un bureau.

### Eclairage artificiel

Pour atteindre les objectifs de  $7\text{W/m}^2$ , l'ergonomie du bureau et des salles de cours a été repensée afin de tenir compte de la présence des brasseurs d'air et d'éviter tout effet stroboscopique sur le plan de travail. La législation française impose 425 lux d'éclairage moyen dans un bureau et 325 lux dans une salle d'enseignement. Notre démarche a consisté à respecter 400 lux au niveau des tables de travail mais nous avons estimé qu'ailleurs, un niveau d'éclairage de 100 lux était largement suffisant. De ce fait, comme le montre la figure 10, l'éclairage artificiel du bureau est constitué de 3 appliques en verre sablé avec des lampes basse consommation de 18 W chacune et de trois lampes de bureaux également en lampe basse consommation. De ce fait, la puissance installée est de  $90\text{W}/20\text{m}^2$ , soit un ratio de  $4,5\text{W/m}^2$ . Un bâtiment standard aurait eu un éclairage de 3 pavés de  $4\times 18\text{W}$ , soit une puissance totale de  $216\text{W}$  et un ratio de  $11\text{W/m}^2$ . Concernant les salles de TD, le niveau d'éclairage exigé dans le programme est de 250 lux, soit 100 lux de moins que la législation. L'éclairage naturel assurera le complément exigé. De ce fait, en terme de solution technique, les pavés de  $4\times 18\text{W}$  habituellement utilisés ont été remplacés par des pavés de  $2\times 24\text{W}$  avec ballast électronique. La puissance installée pour une salle telle que celle représentée par la figure 11 est alors de  $8,4\text{W/m}^2$ . Elle aurait été de  $14\text{W/m}^2$  pour un bâtiment standard. Cette salle, à l'instar de l'ensemble des salles, est dotée d'un double allumage qui permet seulement d'allumer la trame centrale si l'utilisateur le désire au cas où le FJ soit trop faible. Bien évidemment, les solutions proposées ont fait l'objet de simulations afin de vérifier que les niveaux d'éclairage en éclairage artificiel étaient atteints. A l'échelle de l'ensemble du bâtiment, la puissance moyenne installée est de  $7\text{W/m}^2$ . Le ratio énergétique est de  $5,5\text{kWh/an/m}^2$ , contre  $9,4\text{kWh/an/m}^2$  pour un bâtiment standard. Le calpinage de l'ensemble des salles prenant en compte les contraintes d'emplacement des appareils d'éclairage artificiel, de climatisation et des brasseurs d'air sont par ailleurs fournis en annexe. Les salles d'enseignement étant standardisées pour les collèges, les lycées ou les bâtiments universitaires, ces calpinages pourront être repris et être insérés dans des programmes de construction de bâtiments scolaires.

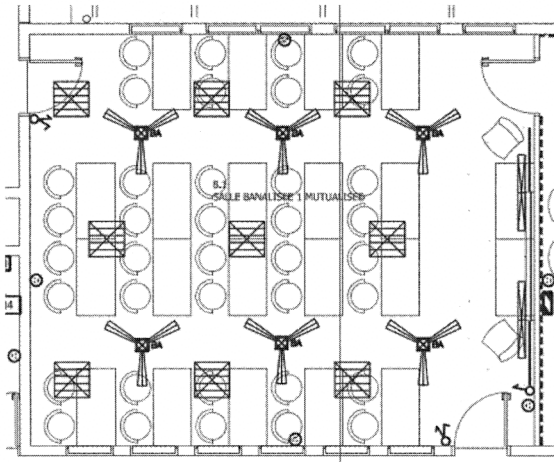


Figure 12 : Principes d'éclairage artificiel et calpinage des luminaires et brasseurs d'air pour une salle banalisée de  $60\text{m}^2$ .

RÉSULTATS ET DISCUSSION EQUIPEMENTS TECHNIQUES

Synthèse équipements techniques

Le programme de construction exige un niveau de performance minimal pour certains équipements techniques. Ainsi, la production de froid sera assurée par deux groupes monoblocs à compression scroll situés en toiture terrasse et de technologie différente :

- 1 groupe d'eau glacée pour le département SRC;
- 1 groupe VRV –ie volume variable de réfrigérant, pour le département GC.

Le VRV est une technologie très peu répandue à La Réunion mais qui donne de très bonnes efficacités frigorifiques Eff –ie ratio de la puissance frigorifique fournie sur la puissance électrique du groupe. L'idée est de se servir du bâtiment comme une vitrine technologique. Les Eff exigées dans le programme doivent être supérieures à 3 quelque soit le taux de charge. La puissance électrique de ces groupes est de 30 kW. Elle aurait été de 78 kW pour un bâtiment standard. Concernant l'éclairage artificiel, tous les luminaires utilisés sont de type fluorescent à basse luminance. L'éclairage extérieur sera assuré par des lampes sodium à haute pression. Les halogènes sont interdits. Les bureaux sont équipés de détecteurs de présence qui remontent la consigne de climatisation à 27°C et coupent l'éclairage en cas d'occupation prolongée. Une gestion technique centralisée assure le contrôle et le suivi des énergies. La GTC permet d'avoir les consommations par type d'utilisation et de reconstituer la courbe de charge du bâtiment en temps réel. L'ensemble des solutions techniques performantes ainsi que la qualité thermique du bâtiment ont permis de réduire significativement l'appel de puissance du bâtiment. En tenant compte des foisonnements et des facteurs de simultanéité, nous arrivons à une puissance électrique appelée maximale de 51 kW. Elle aurait été de 94 kW pour le même bâtiment sans préconisations MDE. La figure 12 donne les ratios de consommation globaux et par type d'utilisation. On peut constater que le bâtiment va consommer 3 fois moins qu'un bâtiment standard avec un ratio total de 50 kWh/an/m². La consommation annuelle est de l'ordre de 87 MWh/an.

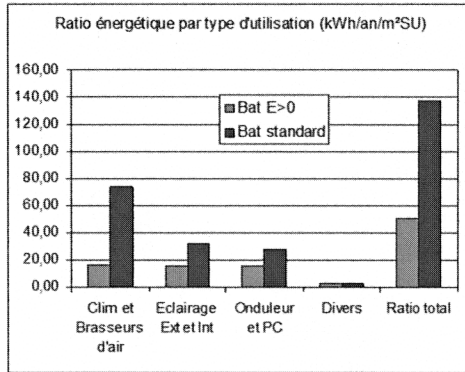


Figure 13 : Synthèse des ratios énergétiques par type d'utilisation pour le bâtiment à énergie positive et le même bâtiment mais avec une conception standard.

### Energies renouvelables

Les quatre sur-toitures mono-pente nord et sud sont constituées de panneaux photovoltaïques poly cristallins fixés directement sur la structure métallique en remplacement d'une tôle classique. Les toits 1 et 3 ont une pente nord de 9°. Les toits 2 et 4 ont une pente sud de 9° (voir figures 3 et 5). Les simulations menées avec PVSYST (PVSYST 3.4) montrent que les toitures au sud ont productivité annuelle inférieures de 5% seulement par rapport aux toitures nord. Celle-ci est de l'ordre de 1500 kWh/kWc/an (voir tableau 4). La puissance nominale est de 149 kWc. La production annuelle est estimée à 226 MWh soit 2,5 fois la consommation prévisionnelle du bâtiment. Nous voyons que les toits 1 et 3 pourraient à eux seuls compenser la consommation et l'appel de puissance du bâtiment. L'ensemble des installations PV est connecté au réseau. Le montage financier est de type location de toiture avec défiscalisation. L'université loue les toitures mais les installations PV ne lui appartiennent pas, ce qui permet de s'affranchir des problèmes de maintenance.

**Tableau 4 : Puissance nominale, énergie produite et productivité pour les quatre toiture.**

	Surf.	P. nom. kWc	Production MWh/an	Productivité kWh/kWc/an
Toit 1	360m <sup>2</sup>	46	71.1	1553
Toit 2	252m <sup>2</sup>	32	47.5	1484
Toit 3	242m <sup>2</sup>	31	47.9	1558
Toit 4	317m <sup>2</sup>	40	59.9	1485
<b>Total</b>	<b>1171m<sup>2</sup></b>	<b>149 kWc</b>	<b>226.4</b>	

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les objectifs fixés en terme de consommation ont été atteints. Ce résultat a pu être possible grâce à une forte collaboration entre l'équipe de maîtrise d'œuvre et les chercheurs de l'université, avec une mise en commun non seulement des outils de dimensionnement et d'expertise, mais également des habitudes de conception. Ainsi, avec quelques innovations architecturales telles que les jalousies intérieures, les lampes en appliques, l'utilisation de brasseurs d'air, une meilleure gestion et un dimensionnement intelligent des systèmes, on peut arriver à réaliser un bâtiment qui consomme trois fois moins qu'un bâtiment standard avec un surcoût quasiment nul et du principalement à la GTC optimisée et à l'optimisation des protections solaires. Les installations PV intégrées en toiture produiront en outre l'équivalent de 2,5 fois la consommation du bâtiment.

Ainsi, nous pouvons affirmer que l'utilisation d'outils de simulations dynamique performants en phase étude couplée avec les compétences actuelles des équipes de maîtrise d'œuvre et des méthodes constructives des entreprises locales, il est possible de construire à La Réunion des bâtiments qui consomment trois fois moins qu'un bâtiment standard, à condition de suivre un certain nombre de règles simples :

- respect des règles de conception fixée dans PERENE (protections solaires, ventilation naturelle traversante etc.) ;
- utilisation d'outils de simulation DAO performants pour optimiser les protections solaires (Autocad 3D) ;
- utilisation de codes de simulations thermique et d'éclairage naturel pour estimer précisément les consommations des systèmes énergétiques (climatisation, éclairage artificiel) ;
- utilisation de systèmes énergétiques performants (brasseurs d'air, éclairage artificiel bien dimensionné à 7W/m<sup>2</sup>) ;
- réflexion sur l'ergonomie des zones de travail (éclairage en applique).

### Perspectives

Les perspectives de ce travail vont porter sur une meilleure estimation des consommations dues aux systèmes énergétiques (climatisation, éclairage artificiel et parc informatique) en ayant une approche probabiliste du taux d'occupation des bâtiments. En effet, le dimensionnement en puissance de ces systèmes (groupe froid, poste de transformation), se fait la plupart du temps en ayant une approche déterministe où l'on suppose une présence de l'occupant déterminée dans chaque pièce et des systèmes énergétiques qui sont en marche dans toutes les pièces. Malgré l'utilisation de coefficients pondérateurs (coefficient de simultanéité, coefficient de foisonnement) souvent basé sur l'expérience des bureaux d'études, les méthodes actuelles conduisent souvent à sur-dimensionner les systèmes énergétiques. Les conséquences sont bien évidemment un coût d'installation plus important et un vieillissement prématuré à cause d'un nombre plus important de cycles marche/arrêt.

Ces travaux font l'objet d'une thèse en cours qui sera soutenue fin 2007.

Une autre piste de recherche est la validation expérimentale des consommations énergétiques. L'université de La Réunion s'est dotée de compteurs électriques pour chaque bâtiment depuis quelques mois sur le campus du Moufia. L'analyse des ratios énergétiques par bâtiment nous permettra de mieux comprendre les signatures énergétiques de bâtiments en climat tropical est de valider les modèles de consommations élaborés et présentés dans cette fiche.

### Valorisation de la recherche

En terme de valorisation de la recherche, ces travaux ont permis une avancée notable dans le transfert de connaissance de la recherche vers le monde de l'ingénierie. Les méthodes de conception novatrices présentées dans ce rapport (utilisation d'Autocad 3D, utilisation de code de simulation dynamique avec module de confort, ergonomies des espaces de travail repensées) ont été développées en collaboration avec l'équipe de maîtrise d'œuvre du projet –ie INSET et l'architecte Thierry Faessel-Bohe. Ces méthodes et les outils de simulations sont maintenant utilisés de manière systématique par ces équipes dans leurs nouveaux projets. Il y a donc bien eu création de valeur ajoutée et de compétence grâce à une forte collaboration entre le monde de la recherche et celui de l'ingénierie.

### RETOMBÉES SCIENTIFIQUES - PUBLICATIONS ET PARTICIPATION À DES CONGRÈS SCIENTIFIQUES

Les travaux réalisés dans cette fiche recherche ont été présentés à deux congrès internationaux et font l'objet d'une publication en cours de soumission à une revue internationale de rang A.

#### Communications présentées à des congrès internationaux

[Garde 06a] Garde F., Bastide A., Bentaleb D., Alihamada F., Ottenwelter E., Pothin E., Ferjani N., *Réalisation d'un bâtiment à énergie positive à l'île de La Réunion. Présentation d'une nouvelle approche de la conception en phase étude*. **Esim 2006**, Juin, 2006, Toronto, Canada,

[Garde 06b] Garde F., Bastide A., Bentaleb D., Ottenwelter E. The construction of a zero energy building in Reunion island. Presentation of a new approach to the design studies. 2006 ASME International Mechanical Engineers Congress and Exposition Association of Mechanical Engineers, 2-3 november 2005, Chicago, Illinois,

#### Publication soumises à des revues internationales

[Garde 06a] Garde F., Bastide A., Bentaleb D. Presentation of a new approach to the design studies for the construction of zero-net energy buildings. Soumise à International Journal of Solar Energy Engineering, ASME.



**BIBLIOGRAPHIE**

---

- [Boyer 98] Boyer ,H., Garde, F., Gatina, J.C., Brau, J. 1998. A multi model approach of thermal building simulation for design and research purposes. *Energy and Buildings* 28 (1):71-79.
- [David 05] David, M., Adelaar, L., Lauret, P. and Fock, E. 2005. Time Delay Neural Networks (TDNN) applied to a weather data generator based on typical meteorological sequence analysis., Proceedings of ISES, Aout 2005, Orlando, USA, p.1-11
- [DIAL] DIAL Europe version 3.4, [www.estia.ch](http://www.estia.ch).
- [Garde 05] Garde, F. Adelaar, L. David, M. 2005. Elaboration of Thermal Standards for French Tropical Islands : Presentation of The PERENE Project. In proceedings of Clima 2005, Lausanne, Suisse.
- [PVSYST] PVSYST 3.4. Université de Genève. <http://www.pvsyst.com>

# Annexes

---

Simulations CFD du bâtiment

Calpinage des salles en fonction des différentes contraintes techniques (climatisation, éclairage, brasseur d'air)

## ANNEXE A - SIMULATIONS DES ÉCOULEMENTS DE L'AIR AUTOUR DU BÂTIMENT

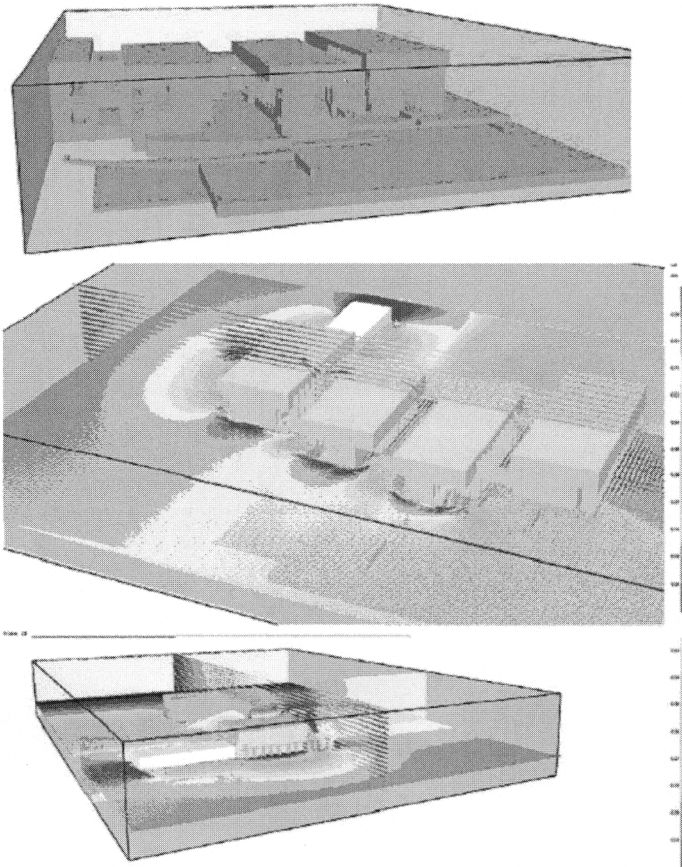


Figure 14 : Simulation en mécanique des fluides numériques du bâtiment Mastere Génie Civil / IUT

**ANNEXE B - CALPINAGE DES SALLES EN FONCTION DES DIFFÉRENTES CONTRAINTES TECHNIQUES (CLIMATISATION, ÉCLAIRAGE, BRASSEUR D'AIR)**

