

**PREBAT**

**ENVELOPPE**

**2**

CONCEVOIR UNE ENVELOPPE  
BIOCLIMATIQUE



# SOMMAIRE

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Couvrir les besoins d'un bâtiment : équation énergétique</b> .....	3
Couvrir les besoins en éclairage .....	5
Le gisement naturel .....	5
Optimiser le rendement lumineux .....	6
Les objectifs de performances .....	9
Apports énergétiques liés à l'apport de lumière naturelle .....	11
Assurer la ventilation des locaux .....	13
ventilation dans les locaux climatisés .....	13
Ventilation des locaux naturellement climatisés .....	15
Ventilation naturelle et enveloppe .....	17
Maîtriser les apports des équipements .....	18
Potentialité du climat à assurer les besoins de confort thermique .....	20
Rappel sommaire confort hygrométrique .....	20
Objectifs de confort dans le cadre du climat réunionnais .....	23
Besoins de confort hygrothermique : stratégies résultantes dans le tertiaire .....	26
<b>Les déterminants architecturaux dans l'approche du confort hygrothermique</b> .....	27
Analyse des conditions favorables à la climatisation naturelle ou artificielle .....	28
Exigences du programme .....	28
Les contraintes et atouts du site .....	29
Réponses architecturales selon les stratégies choisies .....	31
Géométrie : les différents leviers d'action .....	31
Architecture et confort hygrométrique : complexité méthodologique .....	33
<b>Optimisation thermique des composants de l'enveloppe</b> .....	35
Un peu de physique .....	35
Étude de cas : bâtiment non climatisé .....	37
Étude de cas : bâtiment climatisé .....	41
Objectif du PREBAT .....	43
Annexe 1 : le cas des parois opaques .....	45
Annexe 2A : définition et principes .....	49
Annexe 2B : le cas des baies vitrées en local non climatisé .....	51
Annexe 2C : le cas des baies vitrées en local climatisé .....	53
Annexe 3 : les protections solaires .....	55
Annexe 4 : l'inertie thermique .....	57



# PRÉAMBULE

**A l'aube d'une nouvelle révolution avec les objets interconnectés et les smart grids, la maîtrise énergétique va faire un pas de géant, notamment dans la sobriété des usages de l'énergie. Cependant les gisements fabuleux d'économie d'énergie promis avec les nouvelles technologies ne seront effectifs qu'avec une maîtrise des fondamentaux de la conception du bâtiment développés dans cette collection d'ouvrages. En effet, aucun progrès ne peut être durable, sans la maîtrise complète de la chaîne décisionnelle suivante :**

BESOINS BÂTIMENT

ÉQUIPEMENTS

OCCUPANTS

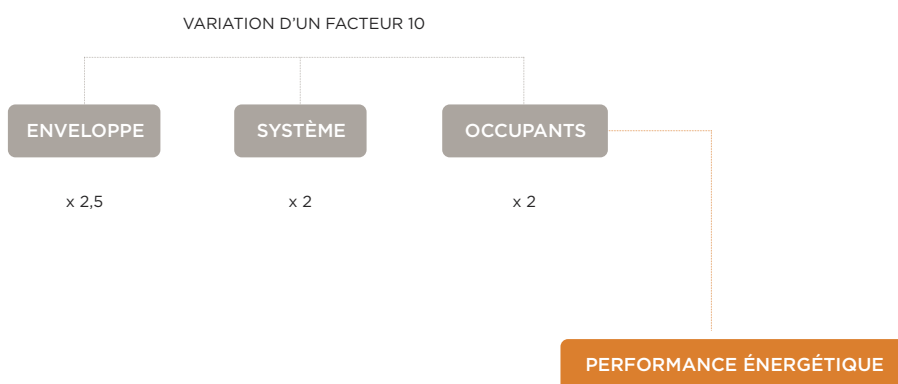
**Comme l'illustre cette figure, le point de départ reste la maîtrise des besoins de confort, de lumière, d'eau chaude... L'efficacité des équipements, la sobriété de la gestion énergétique et l'usage d'énergie renouvelable n'interviennent que par la suite pour éviter une dégradation du bilan énergétique et environnemental. Or, maîtriser les besoins c'est construire selon une approche bioclimatique. C'est l'objet même de ce livret : intégrer les principes de l'architecture vernaculaire, revus et exacerbés en intégrant les progrès méthodologiques, techniques et de modélisation numérique.**

Mohammed Abdesselam (SOLENER)

# INTRODUCTION

**Ce guide, élaboré dans la continuité du livret 1 « Conduire un projet tertiaire performant », aborde la thématique de l'optimisation énergétique de l'enveloppe d'un projet tertiaire à La Réunion. La conception de l'enveloppe est un volet essentiel dans la réussite d'un bâtiment à faible consommation d'énergie. En effet, si on considère les facteurs influençant la consommation d'énergie et les marges d'action possibles dans un projet de bâtiment, l'enveloppe se place de façon substantielle, avant les systèmes et le comportement des occupants.**

POTENTIEL D'AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES



Au-delà de cette quantification sommaire, deux arguments soulignent l'importance d'investir du temps et de la réflexion dans la conception bioclimatique d'un bâtiment :

- L'irréversibilité de certains choix constructifs initiaux, même lors de réhabilitation lourde rarement envisagée avant 30 ans de fonctionnement.
- A contrario, les systèmes sont renouvelés sur des durées de vie plus courtes, entre 5 et 15 ans et un plan d'action sur le comportement des usagers peut être engagé en quelques mois.

Pour aborder le plus simplement possible le sujet, le guide est construit autour de trois concepts :

#### **Le questionnement**

D'après Claude Lévy Strauss « Le savant n'est pas celui qui fournit de vraies réponses ; c'est celui qui pose les vraies questions ». Ceci est d'autant plus vrai dans le domaine vaste et multiple de l'architecture. Nous nous attacherons à faire ressortir les questions clés liées à la question énergétique à chaque phase du projet.

#### **Etude de sensibilité et indicateurs**

Pour progresser sur la question énergétique, il est nécessaire de se reposer sur des indicateurs permettant de quantifier le chemin parcouru entre chaque variante. Les compromis et arbitrages multiples inévitables d'un projet se font ainsi en tout état de cause.

#### **Les conseils et préconisations**

Cette rubrique se propose de donner des modes de résolution de certaines questions spécifiques à travers des exemples tirés de l'expérience des Prébat Réunion.

Ce guide s'adresse essentiellement à la maîtrise d'œuvre - ingénieurs et architectes - avec l'objectif de passer en revue les éléments déterminants de l'approche bioclimatique d'un projet tertiaire. Néanmoins, malgré quelques rappels de base, il ne s'agit pas d'un ouvrage de vulgarisation et certains acquis sont nécessaires. Aussi, le lecteur trouvera les compléments nécessaires, soit dans la collection pour approfondir certaines thématiques, soit dans la bibliographie listée en fin d'ouvrage pour revenir sur des notions de bases.

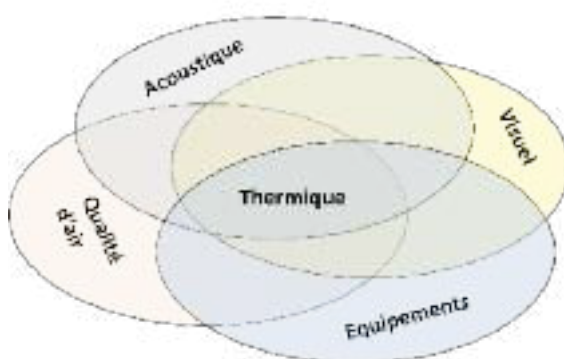
# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

Les besoins réels des occupants d'un bâtiment tertiaire s'expriment d'abord en termes de confort d'ambiance et non en terme énergétique. Les 4 paramètres à prendre en considération sont :

- Le confort visuel.
- Le confort hygrothermique.
- Le confort acoustique.
- Le confort olfactif et la qualité de l'air des ambiances.

La plupart de ces besoins peuvent être assurés en grande partie en s'appuyant sur les éléments naturels et, à défaut, par le recours à des équipements consommateurs d'énergies.

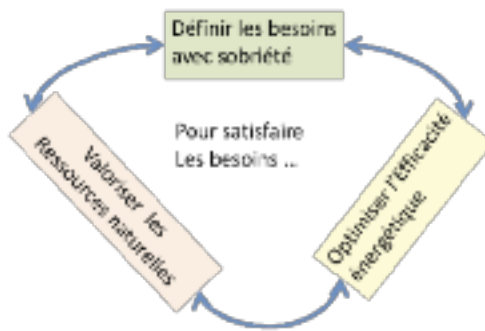
Aussi, évaluer les potentialités du climat et du site pour couvrir les besoins des occupants est une première étape dans un projet bioclimatique(à définir en phase programme).



- Pour satisfaire le confort visuel, il est nécessaire de capter la lumière naturelle, indissociable du rayonnement solaire. L'énergie solaire nécessaire pour éclairer les locaux devient *in fine* une charge thermique, une fois transformée en chaleur.
- Le confort thermique - d'abord déterminé par le niveau d'exposition du bâtiment aux sollicitations climatiques - possède la particularité d'être également impacté par tous les autres besoins ressortant du programme et de se situer à l'intersection de toutes les problématiques en phase de conception.
- Le confort acoustique, tributaire des contraintes de bruits dans le site, conditionne le développement de la ventilation naturelle et les stratégies à déployer pour satisfaire le confort hygrométrique.

- Le confort olfactif et la qualité d'air des ambiances sont liés au renouvellement de l'air. Or, le taux de renouvellement d'air permet d'évacuer les apports thermiques pour les bâtiments ventilés naturellement. Dans les ambiances climatisées, l'énergie nécessaire pour traiter l'air hygiénique est proportionnelle au taux de renouvellement d'air.

De même, toutes les activités développées dans les locaux dégagent de l'énergie contribuant à augmenter la charge thermique et donc le niveau de température.



L'ensemble des flux échangés avec les éléments naturels (soleil, air extérieur) ou induits par l'activité humaine sont détaillés dans les paragraphes suivants. Ils reposent sur une approche inspirée de la démarche négawatt. Trois principes mis sur un même plan doivent guider le concepteur :

- Définir sobrement les besoins (apporter ce qui est nécessaire en lumière, en consigne de température, en renouvellement d'air hygiénique etc...).
- Valoriser autant que possible les ressources naturelles pour satisfaire les différents besoins.
- Optimiser l'efficacité de chaque poste pour deux raisons : d'abord pour économiser l'énergie fossile, mais également limiter la charge thermique du local (les flux énergétiques issus des ressources naturelles ou fossiles finissent par se dégrader en chaleur).

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

## **2.1** **COUVRIR** **LES BESOINS EN** **ÉCLAIRAGE**

L'éclairage est en soi un sujet à part entière, développé avec détails dans plusieurs ouvrages. Dans ce document, il est présenté pour le contexte spécifique réunionnais.

Nous nous intéressons ici à l'optimisation énergétique de l'usage de l'éclairage naturel. Concernant l'éclairage artificiel nous renvoyons le lecteur au livret 3 consacré aux équipements.

### **2.1.1** **LE GISEMENT** **NATUREL**

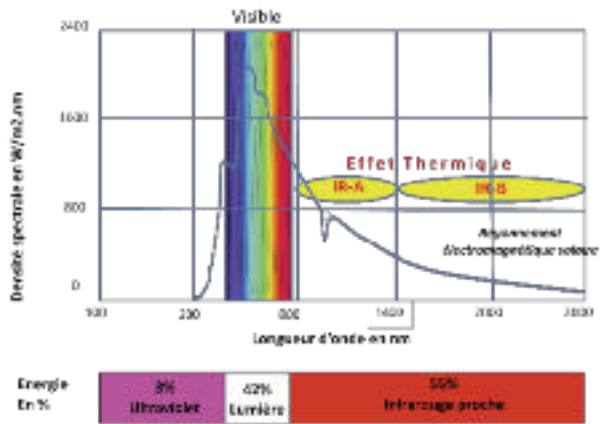
La disponibilité de la lumière dépend principalement de la latitude du lieu, comme le montre le tableau suivant (établi à partir de fichier Meteonorm). Il s'agit du % d'heures entre 9h et 17h où les niveaux 5000, 10000, et 15000 lux sont dépassés :

	5 000 LUX	10 000 LUX	15 000 LUX	20 000 LUX
LA RÉUNION	99 %	89 %	71 %	54 %
MÉTROPOLE (PARIS)	87 %	72 %	55 %	41 %

Comme le montre le tableau, la disponibilité de la lumière du jour est beaucoup plus importante à La Réunion qu'en métropole. Ainsi, la transposition des exigences (réglementaires ou non) ou certaines pratiques métropolitaines notamment en taux de percement, majorent de façon importante les surfaces vitrées nécessaires pour un éclairage naturel de qualité. Citons par exemple la pratique courante consistant à adopter un indice de vitrage de 1/6 de la surface du plancher dans les établissements scolaires métropolitains.

Plutôt que d'adopter des standards importés (adaptés aux sites de latitude élevée), il est préférable pour des projets neufs de faire une étude simultanée de l'éclairage naturel, et des apports solaires induits. Certains outils commercialisés permettent désormais de traiter l'éclairage et la climatisation, en même temps, et économiser ainsi en temps de saisie.

2.1.2  
OPTIMISER  
LE RENDEMENT  
LUMINEUX



La lumière ne représente qu'une partie du spectre du rayonnement solaire. La partie visible du rayonnement solaire pour un ciel clair dégagé est de l'ordre de 40% en terme énergétique.

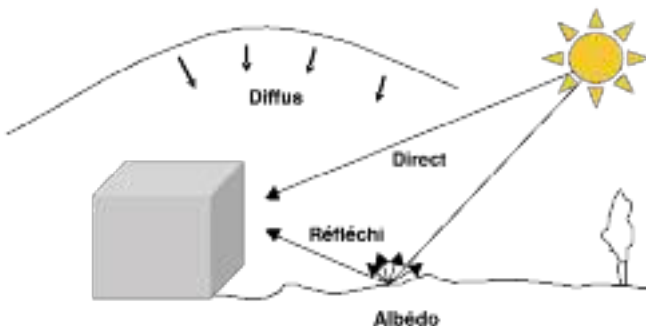
Dans une contrée chaude comme La Réunion, l'apport de chaleur lié au rayonnement solaire - et en particulier à la partie non visible - contribue à chauffer l'ambiance : il doit autant que faire se peut être minimisé, notamment en saison chaude.

La question qui se pose au concepteur est d'examiner comment maximiser la partie visible « utile » du rayonnement solaire en jouant sur les paramètres architecturaux ?

Dans la démarche d'optimisation, le premier point consiste à examiner quelles sont les conditions les plus favorables pour capter la lumière.

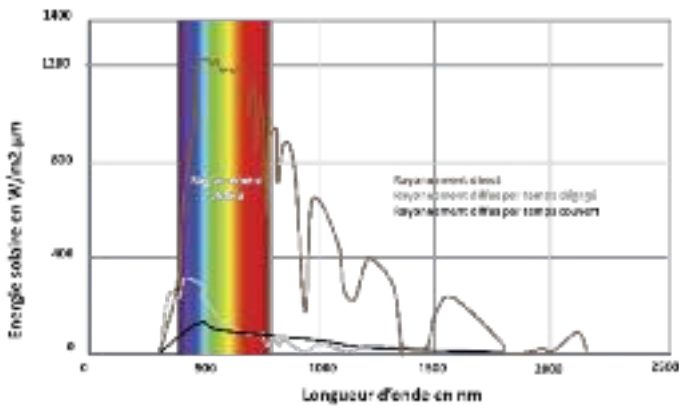
Le rendement lumineux d'un rayonnement solaire s'exprime en lumen/W. Un bâtiment réceptionne le rayonnement solaire :

- Soit directement.
- Soit sous forme diffuse.
- Soit par réflexion par l'environnement environnant.



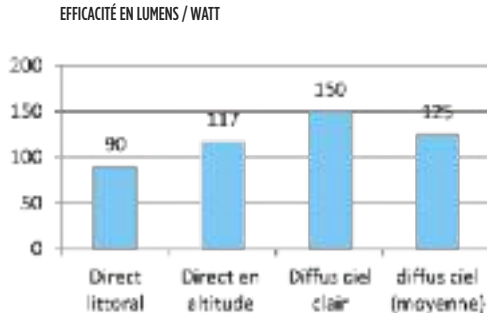
# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

Comme le montre le schéma ci-contre, les efficacités lumineuses atteintes par la lumière naturelle de 90 lumen/Watt à 150 lumen/Watt surpassent les sources d'éclairage artificiel. (Les tubes fluorescents ont une efficacité de 40 à 80 lumen/Watt seulement, avec une qualité inégalée sur les aspects température et rendu de couleur). Sur une base moyenne de rayonnement global de 115 lumen/Watt, et de performance moyenne de 60 lumen/watt pour une lampe fluorescente le gain est quasiment du simple au double pour la lumière naturelle.



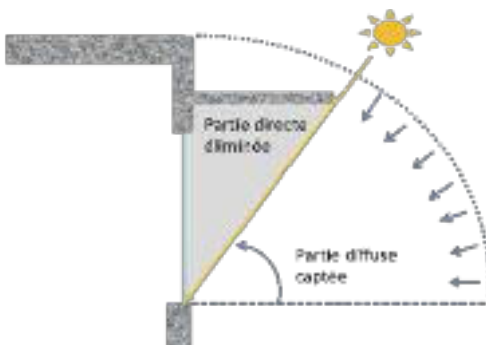
Notons que les efficacités lumineuses des composantes directes et diffuses ne sont pas équivalentes, comme le montrent les schémas ci-contre. Le rendement lumineux de la composante diffuse est nettement plus élevé, notamment dans les conditions de ciel clair : +67 % par rapport à la composante directe en situation de ciel clair ! Notons qu'en altitude la différence entre le direct et le diffus est moindre, mais dans la mesure où dans les Hauts de La Réunion, la problématique est plutôt le chauffage des bâtiments, la recherche du rendement lumineux est moins intéressante.

Ces données de physique de base permettent d'orienter les solutions à privilégier en matière de prise de jour et de protection solaire, notamment en zone littorale, dont la configuration de ciel clair correspond statistiquement à 2/3 du temps.



La meilleure stratégie énergétique est de capter le rayonnement sous forme diffuse. Les protections solaires architecturales sont les dispositifs les plus appropriés pour discriminer la composante directe et diffuse du rayonnement.

A titre d'exemple, en orientation Nord et Sud, un auvent bien dimensionné peut arrêter totalement la composante directe, tout en préservant la transmission d'une bonne partie de la composante diffuse du rayonnement. Les orientations est et ouest sont plus difficiles à traiter car il est difficile de stopper la composante directe tout en préservant la composante diffuse, liée à l'angle solide de vue de la voûte céleste.



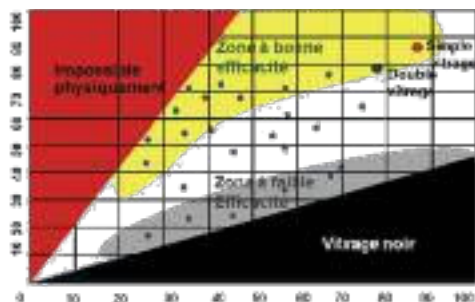
Les dispositifs de stores (intérieurs ou extérieurs) ne permettent pas de différencier les flux direct et diffus. Les verres ou films réfléchissants ne dissocient pas non plus le direct ou le diffus, mais certains types peuvent avoir une action spectrale sélective pour favoriser la transmission de la bande lumineuse et réduire la transmission de l'infrarouge proche. Pour les verres sélectifs, la transmission lumineuse (caractérisée par le coefficient de transmission lumineuse TL) se différencie nettement du facteur solaire qui caractérise le ratio d'énergie solaire transmis par le vitrage à l'ambiance. Ainsi certains vitrages permettent une transmission lumineuse nettement plus élevée du facteur solaire, comme par exemple le verre planistar (TL=70% et S=40%).

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

## 2.1.3 LES OBJECTIFS DE PERFORMANCES

Dans la définition du besoin en éclairage, le principe de sobriété doit prévaloir, d'autant plus que trop de lumière aboutit à un inconfort par excès. Les besoins en éclairage sont exprimés en lux/m<sup>2</sup> sur le plan de travail. Le taux de couverture en lumière naturelle définit le % de temps où la lumière naturelle suffit pour atteindre le nombre de lux/m<sup>2</sup> requis sur une plage horaire définie en fonction de l'usage des locaux. La durée de référence est annuelle et les scénarii d'utilisation doivent prendre en compte les différents profils hebdomadaire ainsi que les congés. Cet indicateur est le plus pertinent car il permet la correspondance énergétique de la consommation d'appoint en éclairage artificiel.

### FACTEURS SOLAIRE ET TRANSMISSION LUMINEUSE DES COMPOSANTS VITRÉS



FACTEUR SOLAIRE SO

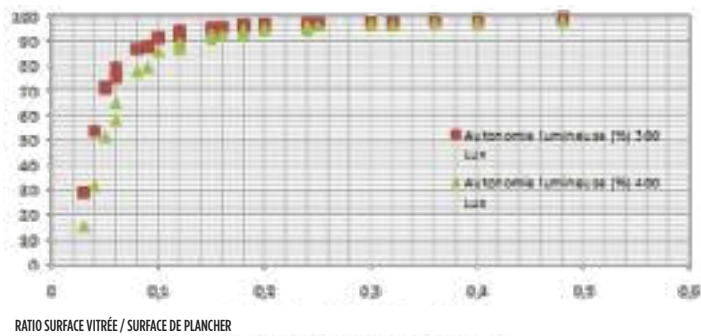
Cependant les exigences en lumière naturelle sont plutôt exprimées en facteur lumière jour (FLJ) dans les programmes. Le FLJ est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point (généralement le plan de travail à 70 cm du sol ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale, en site parfaitement dégagé, par ciel couvert. Il s'exprime en %. La version DOM de la Certification HQE préconise les valeurs ci-dessous (voir tableau) selon le niveau de performance exigée. Les valeurs de FLJ sont minorées de 1/3 par rapport à celles préconisées en métropole pour les mêmes usages compte tenu du gisement de lumière du jour à La Réunion.

Type de locaux	Préconisations Certivea En FLJ (*) pour la Réunion		
Salles de classes	Base	Performant	Très performant
	0.8	1.3	1.7
Bureaux	Base	Performant	Très performant
	0.8	1.3	1.7
Hôtels	Base	Performant	Très performant
	-	-	1 %
Commerces	Aucune exigence minimale		

Pour donner un ordre d'idée de l'optimum de taux de percement, nous avons simulé une pièce rectangulaire d'une hauteur de 2.8 m avec différents ratios de largeur/longueur et ratios de surface de vitrage/surface plancher. L'évolution du taux d'autonomie en éclairage naturel évolue de manière asymptotique en fonction du taux de vitrage.

#### AUTONOMIE EN LUMIÈRE NATURELLE

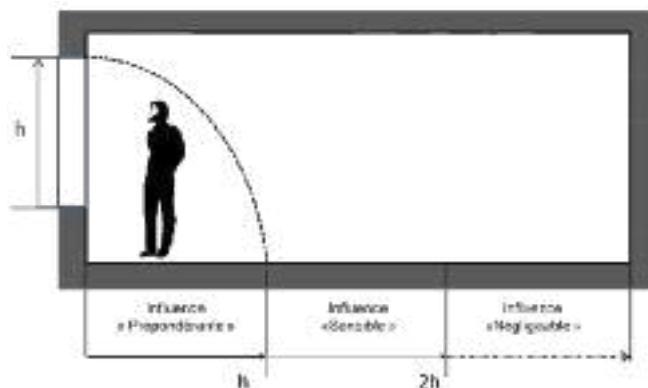
DE 8H00 À 18H00



On note sur le graphique qu'au delà d'une certaine valeur le gain en lumière naturelle stagne alors que les apports solaires continuent de progresser linéairement. Le point d'inflexion se situe autour de 80 à 90% d'autonomie lumineuse, fourchette que l'on peut se fixer comme performante sans risque d'apport solaire excessif, source d'inconfort thermique.

Un autre aspect fondamental dans le travail de la lumière naturelle est la décroissance rapide du facteur de lumière de jour lorsque l'on s'éloigne des prises de jour.

La zone d'influence de la lumière (zone de premier rang) correspond à deux fois la hauteur de la fenêtre comme le montre le diagramme ci-dessous.



Un des défis du concepteur est donc de faire pénétrer la lumière en profondeur. La profondeur des bâtiments est un paramètre de construction à prendre en compte dans l'optimisation de la lumière. Il existe quelques recettes de conception pour projeter un peu plus en profondeur la lumière :

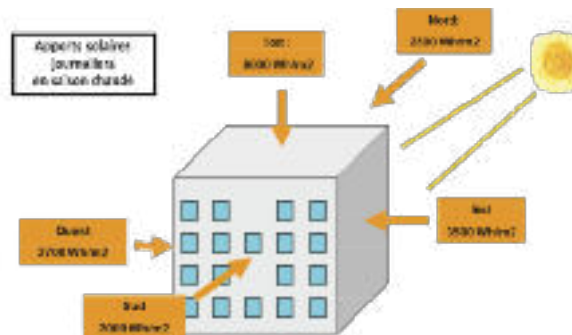
- Les seconds jours
- Les puits de lumière
- Les étagères à lumière
- Les canons à lumière

Dans tous les cas de figure, un des grands enjeux dans le dimensionnement des ouvertures du local consiste à trouver l'équilibre entre l'apport de lumière et l'apport solaire.

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

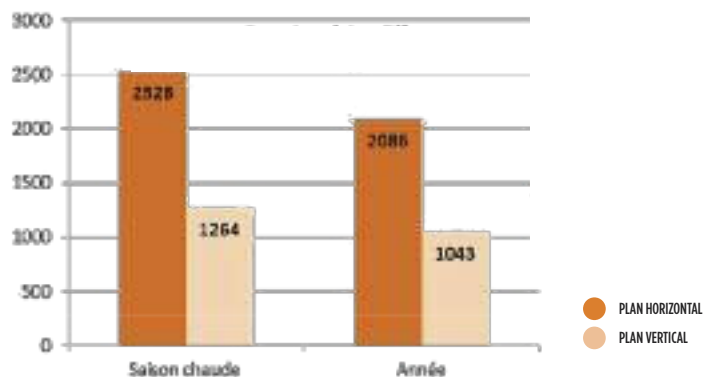
## 2.1.4 APPORTS ÉNERGETIQUES LIÉS À L'APPORT DE LUMIÈRE NATURELLE

Un des principaux défis dans la conception de l'enveloppe est de faire rentrer la lumière naturelle, avec le minimum d'effet secondaire sur le confort thermique. Ci-dessous on peut voir les apports solaires journaliers reçus par orientation en saison chaude.



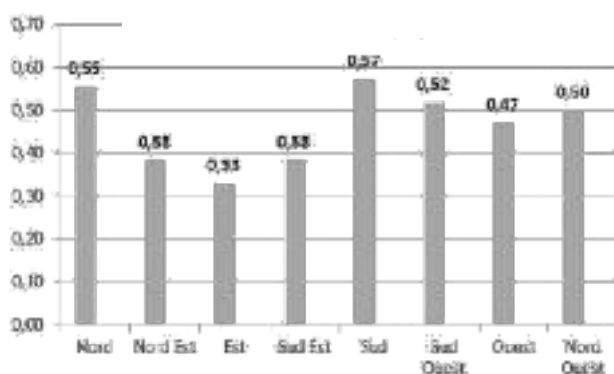
Vu l'énergie reçue, le compromis idéal pour éclairer naturellement serait de ne capter que la composante diffuse à travers les baies. Sur un plan vertical, la composante diffuse est à peu près la même quelle que soit l'orientation verticale et représente la moitié de celle captée sur un plan horizontal.

ÉNERGIE SOLAIRE DIFFUSE EN WH / JOUR DE 8H00 À 18H00



En revanche la composante directe varie beaucoup selon l'orientation : le % de rayonnement diffus/rayonnement global varie de 30 à 60%. Ce rapport représente d'ailleurs l'affaiblissement solaire ou facteur solaire que pourrait apporter une protection idéale selon chaque orientation, qui éliminerait uniquement la composante directe (voir graphique ci-contre). Les orientations les plus intéressantes pour capter la lumière diffuse sont les orientations à dominantes Sud et Nord, et les moins intéressantes l'Est puis l'Ouest.

% DE RAYONNEMENT DIFFUS REÇU PAR ORIENTATION

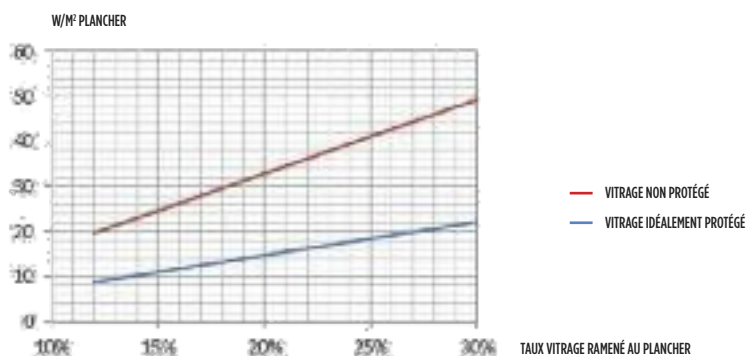


En moyenne, toutes orientations confondues, l'impact en terme d'apport de chaleur de l'éclairage naturel d'un local varie dans une fourchette de :

- 10 W/m<sup>2</sup> (12% taux de vitrage ramené au plancher protégé idéalement)
- À 50 W/m<sup>2</sup> (30% taux de vitrage ramené au plancher sans protection solaire).

Soit un rapport de 1 à 5 ! Les enjeux d'un bon dimensionnement des baies vitrées et des dispositifs de protections solaires sont donc considérables.

APPORT MOYEN D'UN VITRAGE VERTICAL EN W/M<sup>2</sup> DE PLANCHER EN SAISON CHAUDE  
(VALEUR MOYENNE TOUTES ORIENTATIONS CONFONDUES)



# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

## 2.2 ASSURER LA VENTILATION DES LOCAUX

Les enjeux liés à la ventilation sont multiples :

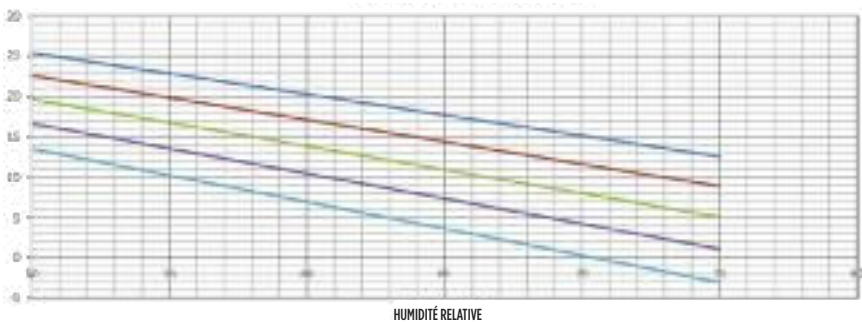
- Apporter de l'air neuf hygiénique aux occupants. Cet aspect santé est encadré par une réglementation, et obligatoire dans les bâtiments occupés par des personnes.
- Évacuer les apports de chaleur qu'ils soient climatiques ou liés aux activités et aux équipements pour les bâtiments conçus en ventilation naturelle, et créer éventuellement des vitesses d'air suffisantes pour abaisser la température ressentie (objectif idéal de 1 m/s pour abaisser de 4°C la température ressentie).

La question de la ventilation est une ligne de fracture franche entre l'approche du confort hygrothermique par la climatisation naturelle et celle de la climatisation artificielle.

### 2.2.1 VENTILATION DANS LES LOCAUX CLIMATISÉS

La ventilation des locaux occupés est nécessaire car l'air ambiant des bâtiments se pollue rapidement : humidité, poussières, graisses de cuisson, odeurs, fumées de cigarette, mais aussi COV, notamment les formaldéhydes (issus des peintures, vernis, produits ménagers)... Cet aspect est encadré par une réglementation qui impose un taux de renouvellement minimal par personne (15 m<sup>3</sup>/h par personne). Notons que les réglementations anglosaxonnes imposent des débits élevés. Selon la nature de l'occupation des locaux tertiaires, les débits requis varient en règle générale de 0.5 à 3 vol/h. Pour certaines applications spécifiques les débits peuvent être beaucoup plus importants.

APPORT DU AU RAFRAÎCHISSEMENT ET DÉSHUMIDIFICATION DE L'AIR  
EN KWH POUR 1 KG AIR SEC PAR HEURE



TEMPÉRATURE DE CONSIGNE (TC)

- TC 22
- TC 23
- TC 24
- TC 25
- TC 26

Dans les bâtiments climatisés, l'air introduit est rafraîchi et déshumidifié. Comme le montre le graphique, le coût énergétique de rafraîchissement et de déshumidification lié au traitement de l'air neuf est particulièrement important (bâtiment climatisé 6 mois dans l'année) : de l'ordre de 15 kWh par m<sup>3</sup>/h pour une consigne intérieure de 24°C et un maintien d'une humidité relative de 60%.

Dans un bâtiment climatisé, il est donc impératif de limiter au strict minimum réglementaire le renouvellement de l'air.

Dans ce but, il est nécessaire de bien maîtriser les infiltrations liées aux imperfections de l'enveloppe.

L'étanchéité de l'enveloppe doit donc être optimisée autant que possible :

- Par le choix de menuiseries de classe A2 ou A3 (classement de perméabilité à l'air), qui doivent rester compatibles avec la ventilation naturelle (jalousies).
- Par une bonne qualité d'exécution en phase chantier : jonction entre parois, étanchéité entre le bâti et les menuiseries, étanchéité des réseaux aux points de passage (électricité, plomberie, aéraulique). Le débit d'infiltration est dans le meilleur des cas égal à 0,3 vol/h pour une enveloppe étanche. (voir plus pour une enveloppe peu soignée).
- De choisir un mode de renouvellement permettant de contrôler avec précision la quantité d'air pour éviter des surconsommations de climatisation liées au traitement de l'air.  
La ventilation hygiénique peut être naturelle (utilisation des moteurs naturels que sont le vent ou le tirage thermique) ou mécanique (utilisation de ventilateurs). Dans ce dernier cas, elle s'appelle Ventilation Mécanique Contrôlée ou VMC.

### **Quels systèmes de ventilation hygiénique choisir dans les bâtiments climatisés ?**

Dans les bâtiments climatisés, le recours à la VMC apporte une bonne garantie pour contrôler le débit effectif de ventilation. Le ratio moyen d'énergie consommée pour convoyer 1 m<sup>3</sup> d'air par l'installation d'un système de ventilation hygiénique (VMC ou autre) est de l'ordre de 0,20 Wh à 0,25 Wh par m<sup>3</sup> pour les simple-flux (voir livret 3).

Pour les installations en double flux ce ratio doit être doublé.

Les systèmes optimisés (moteurs à courant continu), et la conception soignée des réseaux permettent de gagner un facteur 2 sur ce ratio de consommation. Le choix d'un soufflage de l'air hygiénique consommée en surpression permet également de limiter les infiltrations (cas du secteur de la santé notamment).

Au final, pour un bâtiment climatisé, l'apport d'air neuf pour un occupant nécessitant 15 m<sup>3</sup>/h génère donc une double consommation :

- Consommation pour convoyer l'air par la VMC : 25 kWh par an.
- Consommation pour rafraîchir et déshumidifier l'air : 75 kWh par an (climatisation avec un EER 2.5).  
Soit au total de l'ordre de 100 kWh électrique par occupant.

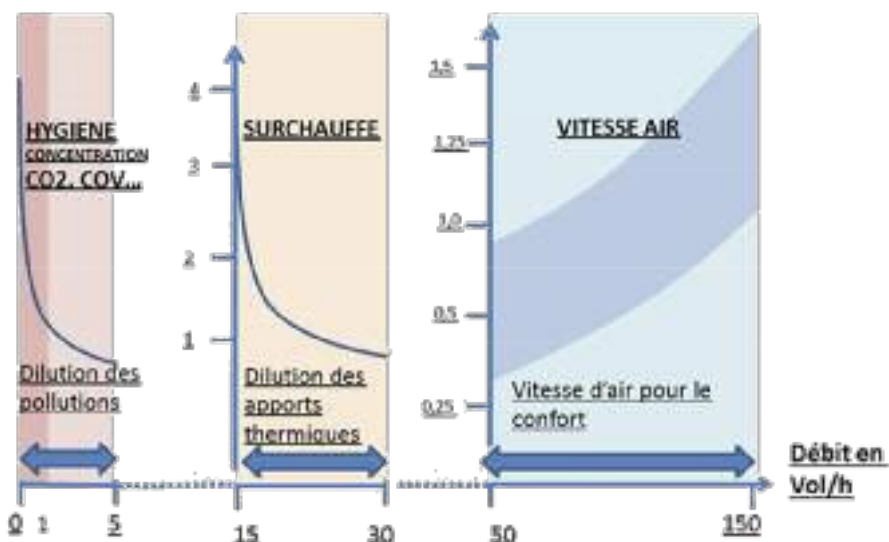
# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

## 2.2.2 VENTILATION DES LOCAUX NATURELLEMENT CLIMATISÉS

A la différence des bâtiments climatisés, les échanges d'air avec l'extérieur dans les bâtiments climatisés ne doivent pas être restreints mais au contraire développés pour créer du confort thermique. Comme le montre le schéma ci contre, il existe une stratification nette dans les différentes fonctions recherchées dans la ventilation selon le niveau de débit de renouvellement d'air :

- Niveau 1 : débits hygiéniques de 0,5 à 5 vol/h pour diluer les pollutions ( $15\text{m}^3/\text{h}$  par occupant selon la réglementation).
- Niveau 2 : 5 à 10 Vol/h pour diminuer légèrement la température d'ambiance.
- Niveau 3 : débits de 10 à 30 vol/h pour évacuer les apports thermiques des locaux et abaisser la température d'ambiance.
- Niveau 4 : débit de 50 vol/h à quelques centaines pour créer de la vitesse d'air, idéalement  $1\text{m/s}$  pour satisfaire le confort hygrothermique des habitants.

### LES TROIS DIMENSIONS DE LA VENTILATION



**NIVEAU RENOUVELLEMENT D'AIR**

0,5 à 5 vol/h

**EFFET RECHERCHÉ**

Santé : débits hygiéniques de 0,5 à 3 vol/h pour diluer les pollutions (15m<sup>3</sup>/h par occupant selon la réglementation).

Ces débits sont calibrés a minima par la réglementation.

**DISPOSITIFS ET MOYENS CORRESPONDANT**

- Ventilation mécanique contrôlée dans les locaux humides.
- Systèmes de tirage thermique\*.
- Systèmes hybrides assistés.

5 à 15 vol/h



Confort hygrothermique : abaissement partiel et insuffisant des températures.

Comme le montre le schéma d'évolution de la surchauffe d'un local, 5/7 vol/h permettent de diviser d'un facteur 2 la surchauffe potentielle d'un local.

- Surventilation mécanique. Certaines centrales de ventilation offrent la possibilité de fonctionner en surventilation et de doper les débits jusqu'à 5/7 vol/h, suffisants en métropole pour évacuer la charge thermique, notamment en ventilation nocturne compte tenu d'un écart diurne important. En revanche, l'amélioration en confort est insuffisante à La Réunion (écart diurne faible de 8°C) : le rapport coût/ bénéfice est bien plus favorable à la climatisation classique.

15 à 30 vol/h



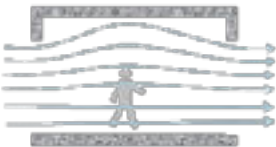
Confort hygrométrique : abaissement efficace des températures\* et atteinte sur une durée partielle de vitesses d'air suffisante.

15/30 vol/h permettent de diviser par 4 ou 5 la surchauffe potentielle d'un local.

- Ventilation naturelle traversante. Ce niveau de débit est aisé à obtenir par une ventilation traversante, c'est-à-dire par des ouvrants donnant sur les façades d'orientation différentes. Même dans les zones à faibles potentiels (sous le vent comme Le Port ou La Possession), avec une conception aérodynamique adéquate, l'atteinte de ces débits est toujours possible. L'obtention de ces débits nécessite un dimensionnement des ouvrants de l'ordre 1/10 de la surface plancher, répartie entre les façades.

La création d'une vitesse de l'air suffisante n'est assurée que partiellement. L'installation d'un brasseur d'air (consommation beaucoup plus faible qu'une climatisation) complète idéalement la ventilation naturelle traversante.

50 vol/ et au-delà



Confort hygrométrique : abaissement très efficace des températures\* et atteinte de vitesses d'air suffisantes la majeure partie du temps.

Comme le montre le schéma d'évolution de la surchauffe d'un local, 15/30 vol/h permettent de diviser par 10 la surchauffe potentielle d'un local.

- Ventilation naturelle traversante optimisée. Ce niveau de débit est plus difficile à atteindre et nécessite une conception aérodynamique soignée pour l'obtention d'une vitesse d'air moyenne supérieure à 1 m/s aux heures les plus chaudes et une bonne répartition de la vitesse d'air (absence de zone morte dans les zones d'occupation).

Les porosités en façades doivent :

- être suffisantes (supérieures à 30%),
- bien exploiter les vents dominants mais également les vents secondaires/

La création d'une vitesse de l'air suffisante est assurée la majeure partie du temps. L'installation d'un brasseur d'air est tout de même recommandé.

\*Notons qu'en l'absence de vent, le tirage thermique permet d'assurer un débit de ventilation minimal (0,5 à 3 vol/h maximum). La complémentarité du tirage thermique et du vent est une donnée intéressante à exploiter par le concepteur.

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

## 2.2.3 VENTILATION NATURELLE ET ENVELOPPE

Les problématiques de ventilation naturelle font partie des « noyaux durs » de la conception de bâtiments énergétiquement efficaces en zone tropicale notamment en raison de la difficulté de travailler en ambiance ouverte. En effet :

1. La ventilation naturelle est un phénomène convectif physiquement complexe influencé par divers phénomènes physiques macro ou microclimatiques ;
2. Le fonctionnement de la ventilation dépend de paramètres architecturaux (que l'on peut maîtriser à l'échelle du projet) mais aussi de paramètres topographiques ou urbains (que l'on ne maîtrise pas à l'échelle du projet) qui facilitent le captage ou l'obstruction à une ressource très aléatoire en vitesse et en direction qui définit en partie ce potentiel de ventilation : le vent.
3. Ventiler signifie ouvrir le bâtiment et donc augmenter sa vulnérabilité aux nuisances d'un site : bruit, poussières, nuisances olfactives, risque d'intrusions, ...
4. La porosité du bâtiment augmente potentiellement son coût de construction qu'il faudra optimiser afin d'en rationaliser la qualité d'usage.

On se reportera au livret 4 pour compléter le sujet.



## LE CONSEIL DE L'ADEME

Pour qu'un programme soit retenu comme performant par l'Ademe, il est nécessaire de prouver que la ventilation naturelle minimale est de 15 vol/h pour l'ensemble des locaux traités. En plus des simulations thermiques, une analyse des coupes produites par les concepteurs, devront démontrer le bon écoulement du flux d'air dans le local (traitement des ouvrants externes et des cloisonnements intérieurs).

**2.3**  
**MAÎTRISER**  
**LES APPORTS**  
**DES ÉQUIPEMENTS**

En raison du second principe de la thermodynamique, toute forme d'énergie finit par se dégrader sous forme de chaleur. Cela a pour effet soit d'augmenter le niveau de température intérieure dans les locaux naturellement climatisés, soit d'augmenter la charge thermique que doit combattre la climatisation d'un local climatisé. Un bâtiment tertiaire performant sur le volet confort hygrothermique est nécessairement efficace sur tous les postes énergétiques, qu'il soit climatisé ou non.

Pour un local climatisé, 1 kWh d'énergie introduit dans un local finit par se transformer en chaleur que la climatisation devra, au bout du compte, évacuer :

1 KWH D'APPORT

1/EER EN KWH ÉLECTRIQUE CLIMATISATION

Pour un appareil électrique, pour 1kWh consommé, l'énergie électrique totale dépensée est en réalité de 1,25 à 1,5 kWh. Si l'on ajoute la dépense électrique de la climatisation (pour des EER entre 3 et 4). On classe les apports selon les niveaux suivants :

- Faibles 5 W/m<sup>2</sup>
- Moyens 10 à 15 W/m<sup>2</sup> moyen
- Forts 20 à 30 W/m<sup>2</sup>

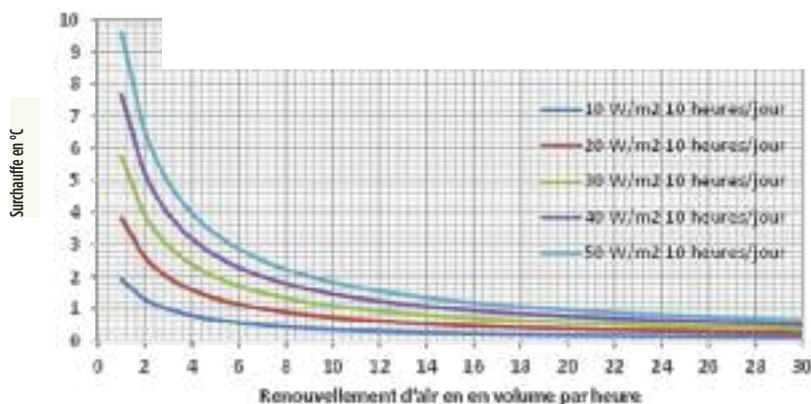
Pour un local ventilé de construction courante, l'énergie introduite dans un local augmente la température et doit être évacuée par le renouvellement d'air. L'impact des apports internes est d'autant plus important que :

- Le renouvellement d'air est faible.
- Le niveau d'apport est important.

L'impact en terme d'augmentation dans un local bien ventilé (au moins 15 vol/h) est de l'ordre de 1°C, pour un bâtiment à fort apport interne (30 W/m<sup>2</sup>).

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE DUE AUX APPORTS EN °C  
EN FONCTION DU TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR

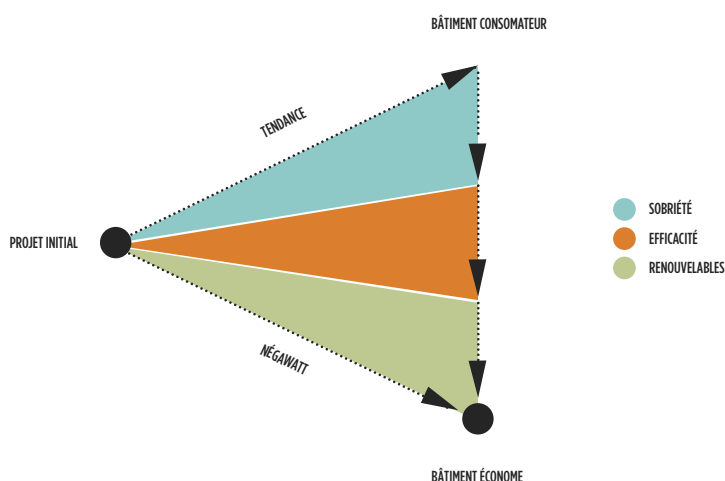


L'impact est d'autant plus important que le local est isolé ou compact (peu de surface d'échange avec l'extérieur pour évacuer la chaleur).

Pour les locaux à forts apports internes (local serveur, bureaux à forte densité...), la conception doit composer avec deux contraintes de forces égales : les apports climatiques et les apports internes. Les choix constructifs doivent être étudiés finement notamment pour ce qui concerne l'isolation des parois.

Dans tous les cas de figure le travail de maîtrise des apports internes est gagnant-gagnant. Pour ne rien oublier dans les potentiels de réduction des consommations énergétiques, la démarche la plus synthétique est la démarche Négawatt, que l'on appliquera pour chaque poste énergétique :

- Sobriété : questionnement sur la réalité du besoin, la maîtrise de l'usage au quotidien : temps d'usage, consigne...
- Efficacité : choix des meilleures techniques disponibles (rendement), gestion (conduits et régulation), réduction des pertes en lignes.
- ENR : la possibilité de substituer l'usage d'énergie fossile par des énergies renouvelables.



**2.4**  
**POTENTIALITÉ**  
**DU CLIMAT**  
**A ASSURER LES BESOINS**  
**DE CONFORT**  
**THERMIQUE**

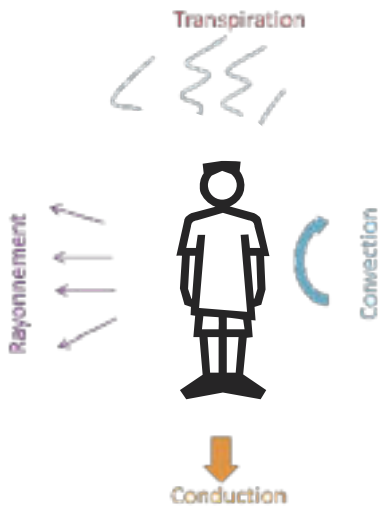
De façon très synthétique nous rappelons ici les principaux points à retenir sur le confort hygrothermique. Le confort hygrothermique est lié à la nature des échanges thermiques (convection, rayonnement, conduction) et hydriques (sudation, transpiration, respiration) entre l'occupant et l'ambiance, pour évacuer la chaleur dégagée par le métabolisme et maintenir sa température à 37°C.

**2.4.1**  
**RAPPEL SOMMAIRE**  
**CONFORT**  
**HYGROMÉTRIQUE**

Pour ajuster ses besoins d'évacuation de chaleur aux conditions d'ambiance, l'homme dispose donc de trois moyens d'action :

- L'adaptation physiologique de l'individu aux conditions d'ambiance, grâce aux mécanismes d'autorégulation du corps.

Le corps humain peut potentiellement s'adapter à une grande gamme de situation en allant du froid au chaud : frisson, vasoconstriction (pour diminuer la température de peau), vasodilatation (pour augmenter la température de peau), et sudation et taux de mouillure (surface d'échange de la sudation). La sensation de confort correspond aux ambiances dans lesquelles l'écoulement de la chaleur se passe correctement, avec un niveau de mobilisation des systèmes d'auto-régulation acceptable.



- Activité

Une adaptation des horaires de travail par rapport aux contraintes climatiques peut être envisagée. De même dans certains pays, la sieste au bureau est admise aux heures les plus chaudes. Dans le cadre de ce guide, nous n'envisageons pas ce type de solution et nous considérons le niveau d'activité comme une donnée intangible.

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

- L'adéquation de la tenue vestimentaire aux conditions d'ambiance.

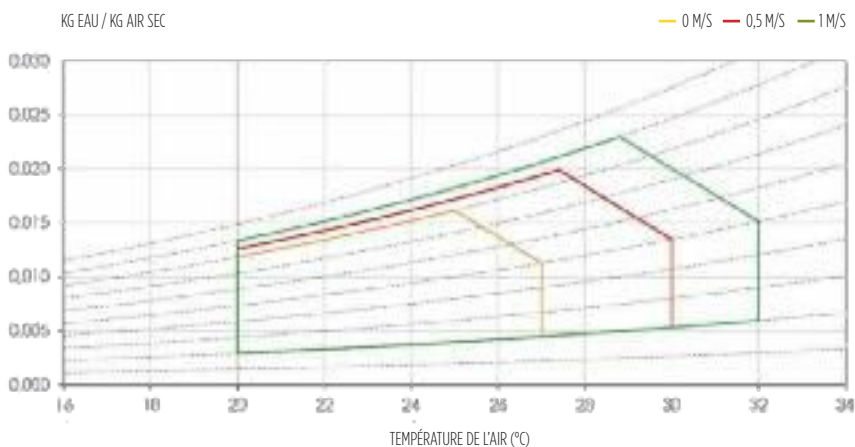
L'assouplissement du code vestimentaire dans les bureaux a permis des économies substantielles en climatisation au Japon lors de la crise énergétique de Fukushima. En effet, le vêtement ralentit les échanges thermiques (convection et rayonnement) et hydriques (sudation) : en ambiance chaude, le vêtement constitue un obstacle à l'écoulement de la chaleur métabolique, par augmentation de la résistance thermique équivalente (échanges convection et rayonnement réduit) et en freinant les échanges par vapeur d'eau (sudation).

En ambiances climatisées, un vêtement léger permet d'augmenter la consigne de climatisation et donc de faire des économies d'énergies. En ambiances naturellement ventilées, un vêtement léger facilite les échanges thermiques et hydriques

A partir de ces paramètres d'ajustement, il est possible de simplifier l'approche du confort hygrothermique en raisonnant sur des zones de confort visualisées sur le diagramme de l'air humide.

## DIAGRAMME DE GIVONI

HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE  
KG EAU / KG AIR SEC



Pour La Réunion, en prenant comme hypothèse de base une activité modérée, une tenue vestimentaire adaptée (légère), on peut définir des zones de confort en fonction des paramètres température, humidité et vitesse d'air :

- Zone de confort à vitesse air calme (vitesse faible, en jaune).
- Zone de confort acceptable avec des vitesses d'air de 0,5 m/s (vitesse moyenne en rouge)
- Zone de confort acceptable avec des vitesses d'air de 1 m/s à 1,5 m/s (vitesse élevée en vert)

La vitesse d'air agit sur les échanges par convection (augmentation du coefficient d'échange) et surtout sur les échanges hydriques pour faciliter l'évaporation de la sueur (1 litre d'eau évaporée permet d'évacuer 700 Wh). On estime qu'une vitesse de 1m/s procure l'équivalent d'abaissement de 4°C en température ressentie.

A partir du diagramme de confort, on comprend aisément les deux écoles de pensée en matière d'architecture :

- Viser comme objectif de placer les conditions d'ambiances dans la zone de confort air calme.

Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, cette zone s'écarte sensiblement des conditions de température régnant à l'extérieur, et nécessite donc le recours à la climatisation.

- Viser la zone de confort acceptable.

Cette zone de confort étendue qui augmente le seuil de température d'inconfort à 30°C voir 32°C, concorde parfaitement avec les conditions climatiques de La Réunion. Viser comme objectif d'ambiance la zone de confort acceptable donne donc suffisamment de marge de manœuvre aux concepteurs pour une approche bioclimatique passive.

## QUELQUES DÉFINITIONS

**Climatisation artificielle** La climatisation artificielle vise à maintenir les caractéristiques de l'air ambiant d'une pièce ou d'un ensemble de locaux dans des valeurs de température, d'hygrométrie, de qualité de l'air régulières pour satisfaire le confort des occupants et/ou pour leur utilisation de process.

**Rafraîchissement** Le rafraîchissement consiste à maintenir la température d'un local inférieure à la température extérieure, sans contrôle de l'hygrométrie intérieure.

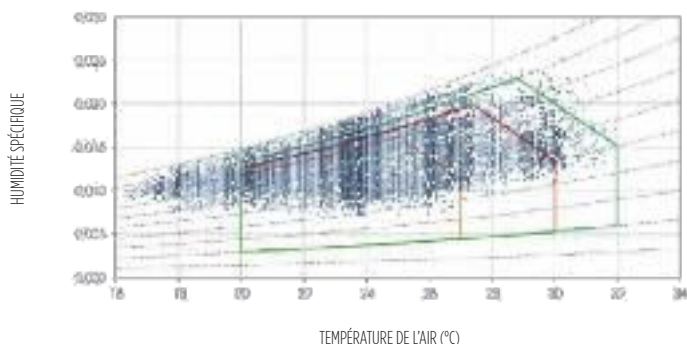
**Climatisation naturelle** La climatisation naturelle s'appuie sur une conception bioclimatique de l'enveloppe pour en optimiser l'effet de filtre climatique et créer des conditions de confort acceptables, sans recours à tout système consommateur d'énergie.

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

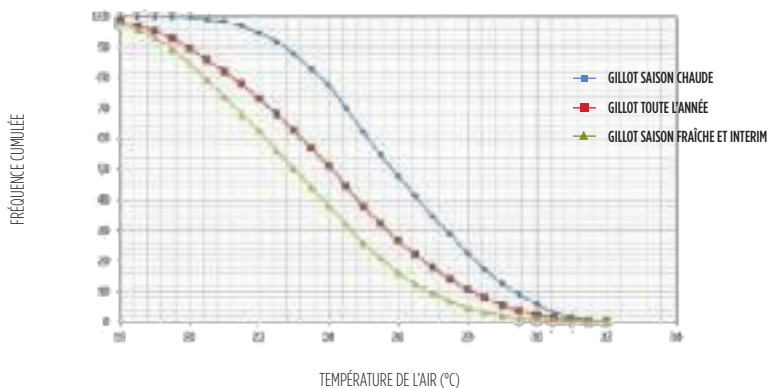
## 2.4.2 OBJECTIFS DE CONFORT DANS LE CADRE DU CLIMAT RÉUNIONNAIS

Le lecteur pourra se référer à l'outil PERENNE, pour des données complètes sur le climat réunionnais. Dans le cadre de cet ouvrage, notre approche prend comme point d'appui la projection des conditions de température et d'hygrométrie d'une année de la ville de Saint-Denis projetées dans un diagramme, inspiré des travaux de Givoni.

FICHER CLIMATIQUE ANNUEL DE GILLOT



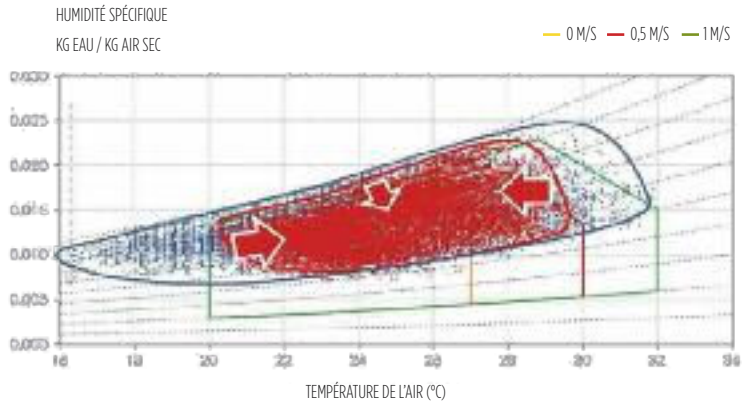
GILLOT : FRÉQUENCE DES TEMPÉRATURES AU DESSUS D'UNE CERTAINE TEMPÉRATURE



L'analyse du nuage montre que les conditions extérieures sont majoritairement à l'intérieur des zones de confort mais attirent l'attention sur trois caractéristiques climatiques à corriger :

1. Les températures fraîches de la saison chaude.  
Le nombre d'heure où la température descend en dessous de 20°C (sans jamais descendre sous 16°C) est d'un peu moins d'un millier.
2. Les pointes de températures en saison chaudes.  
Le nombre au-delà de 28°C s'élèvent à mille et deux cents heures au-delà de 30°C.
3. Une frange importante de points proches de la courbe de saturation.

### ZONE DE CONFORT DÉFINI PAR GIVONI



L'objectif d'une conception en climatisation naturelle sera de corriger ces zones d'inconfort, car les conditions extérieures (sans négliger l'effet de l'occupation) déterminent en grande partie les conditions de confort que l'on retrouvera à l'intérieur.

Or, le filtre climatique de l'enveloppe, sous l'action combinée des contraintes climatiques et de l'activité des occupants, a pour effet :

- De décaler les températures moyennes journalières d'une valeur allant de 1°C dans le meilleur des cas à + 5°C voire plus du fait des apports solaires et internes.
- D'amortir les pointes de température journalière grâce à l'effet d'inertie thermique. L'amplitude diurne de l'ordre de 8°C peut être réduite jusqu'à 3 à 4°C dans les bâtiments bénéficiant d'une importante inertie.
- D'augmenter légèrement l'humidité absolue dans les locaux sous l'effet de l'émission hydrique des occupants ou appareils.

Nous avons superposé le nuage de point des conditions extérieures et conditions intérieures d'un local optimisé en climatisation naturelle en zone littorale (cf graphique ci-dessus).

On constate que l'inconfort en saison fraîche (point 1) est naturellement traité grâce aux apports internes et solaires (augmentation de 3 à 5°C sous réserve de la maîtrise du renouvellement d'air) et l'action de l'inertie thermique.

# COUVRIR LES BESOINS D'UN BÂTIMENT : ÉQUATION ÉNERGÉTIQUE

En saison chaude, l'équation est un peu plus compliquée. Avec une température moyenne de 26°C en saison chaude, la maîtrise de la surchauffe moyenne des locaux doit être particulièrement rigoureuse en visant :

- Une surchauffe moyenne ne dépassant pas 2°C (idéalement entre 1 et 1.5°C).
- Une amplitude journalière à l'intérieur de +/-3°C dans les locaux (avec une amplitude extérieure de 8°C).

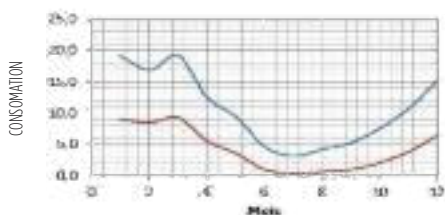
Pour atteindre ce résultat et régler le point 2, il faut nécessairement maîtriser les apports solaires et internes, avoir une bonne ventilation pour évacuer l'excédent de chaleur et disposer d'un minimum d'inertie thermique pour écrêter les extrema de température.

Le point 3 (point proche de la saturation) est le point le plus délicat à traiter. La récupération des apports, combinée à l'effet d'inertie notamment en saison fraîche, augmente la température à l'intérieur des locaux au moment où la température extérieure est basse (points les plus proches de la saturation), ce qui a pour effet mécanique de diminuer l'humidité relative et de s'éloigner de la courbe de saturation. Les points résiduels non corrigés par l'effet de filtre de l'enveloppe correspondent à des points climatiques particuliers (quelques dizaines d'heures) : température et humidité simultanément élevées. L'effet de filtre naturel trouve ici sa limite.

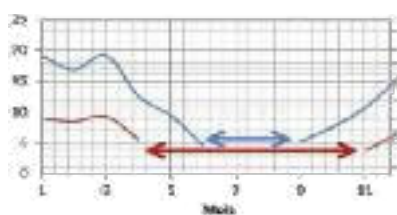
Dans les locaux traités artificiellement, la climatisation maintient la température à une valeur de consigne. La consommation d'énergie est étroitement liée à son temps de fonctionnement et à son niveau de consigne.

Les expériences du programme PREBAT montrent qu'il est possible de réduire le temps de fonctionnement de la climatisation. Ainsi la durée de fonctionnement de la climatisation peut être réduite de 4 à 5 mois pour un local optimisé, contre 12 mois pour un local de base. L'écart de consommation dans ce cas peut varier d'un 1 à 3.

IMPACT DE L'ENVELOPPE  
SUR LA CONSOMMATION DE CLIMATISATION D'UN BÂTIMENT



IMPACT DE L'ENVELOPPE ET DE LA GESTION DE L'INTERMITTENCE  
SUR LA CONSOMMATION DE CLIMATISATION D'UN BÂTIMENT



— LOCAL BASE  
— LOCAL OPTIMISÉ

**2.5**  
**BESOINS DE CONFORT**  
**HYGROTHERMIQUE :**  
**STRATÉGIES**  
**RÉSULTANTES**  
**DANS LE TERTIAIRE**

À La Réunion, deux stratégies sont envisageables en matière de confort hygrométrique, elles mêmes déclinables en deux variantes :

**Climatisation artificielle**

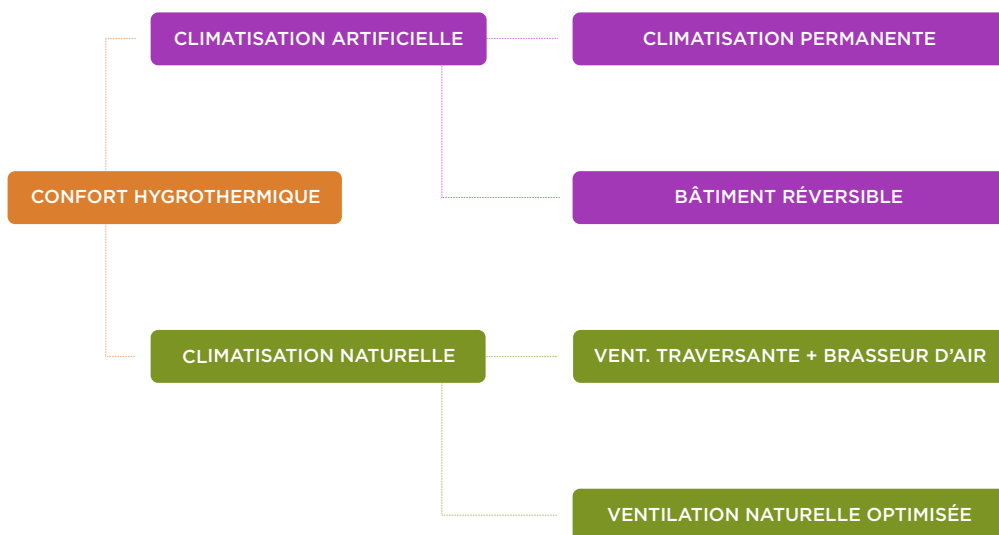
Plutôt que de laisser fonctionner la climatisation permanente toute l'année avec un mauvais rendement, notamment en saison fraîche, une alternative consiste à instaurer une saison « de climatisation » limitée aux quatre mois les plus chauds de l'année et de fonctionner en ventilation naturelle le reste de l'année. En effet en saison fraîche et, intermédiaire, la clémence du climat réunionnais offre cette possibilité de fonctionnement réversible à la plupart des bâtiments tertiaires. Cela nécessite des aménagements constructifs pour basculer d'un fonctionnement à l'autre.

**Climatisation naturelle**

Parmi les deux fonctions de la ventilation naturelle - évacuation des apports et augmentation suffisante des vitesses d'air intérieures - la seconde est beaucoup plus difficile à atteindre et exige des conditions particulièrement favorables (potentiel venteux, relief et environnement urbain).

En revanche le premier palier (niveau de renouvellement d'air au-delà de 15 vol/h) est aisément atteignable dans la majorité des cas. D'où les deux stratégies envisageables correspondant à un découplage des objectifs en ventilation naturelle :

- Objectif centré sur l'évacuation des apports internes (renouvellement d'air supérieur à 15 vol/h), et équipement en brasseurs pour atteindre les vitesses d'air de 1m/s (avec l'objectif de réduire le temps de fonctionnement).
- Objectif centré sur l'atteinte de la vitesse d'air de 1 m/s aux heures les plus chaudes majoritairement par la ventilation traversante (renouvellement d'air supérieur à 50 vol/h).



# LES DÉTERMINANTS ARCHITECTURAUX DANS L'APPROCHE DU CONFORT HYGROTHERMIQUE

## La question centrale du confort hygrothermique dans un bâtiment tertiaire : climatisation naturelle ou artificielle ?

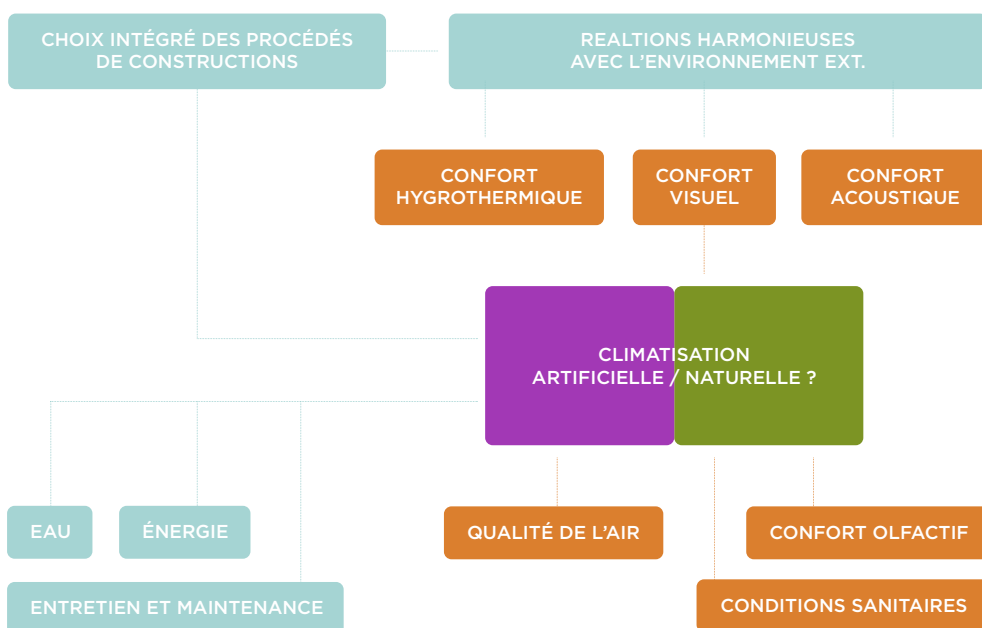
La question du confort interfère avec presque toutes les cibles environnementales comme le montre la figure ci-dessous. C'est donc un axe particulièrement structurant en phase conception.

La climatisation naturelle est fortement interdépendante des potentialités du site. Les atouts naturels du site (végétalisation, localisation par rapport à la mer,...), l'orientation des voies, le relief, le positionnement par rapport au vent et aux brises locales vont conditionner la possibilité de développer une ventilation traversante. Les conditions sanitaires sont également une forte contrainte : gérer les moustiques et évacuer efficacement l'humidité.

Le principe de base de la climatisation artificielle est un découplage total entre les conditions extérieures et intérieures moyennant une dépense énergétique. Le défi essentiel est alors celui de la réduction des coûts énergétiques et des impacts environnementaux induits par ces technologies (consommations énergétiques, fluides frigorigènes,...).

Le confinement des ambiances pose la question de la qualité d'air, de la nécessité d'une ventilation mécanique et d'un traitement de l'air hygiénique.

Compte tenu des implications listées précédemment, le choix et l'affectation du mode de climatisation des différents locaux d'un projet doivent être étudiés très en amont dans les premières phases d'un projet.



**3.1**  
**ANALYSE**  
**DES CONDITIONS**  
**FAVORABLES**  
**À LA CLIMATISATION**  
**NATURELLE**  
**OU ARTIFICIELLE**

**3.1.1**  
**EXIGENCES**  
**DU PROGRAMME**

Une partie des enjeux énergétiques se joue dès la phase programmation à travers :

- Une description très restrictive des conditions de confort peut rendre hors-jeu une approche en climatisation naturelle.
- La densité du programme est un élément important, car elle conditionne la densité des apports internes.
- L'organisation fonctionnelle (open space/cloisonnement) et le zonage thermique (regroupement des zones naturellement et artificiellement climatisées) et la profondeur des locaux conditionnent le choix d'un mode de climatisation, la cohabitation entre les deux approches, de même que la réversibilité de fonctionnement des ambiances.
- Le mode de calcul économique adopté.

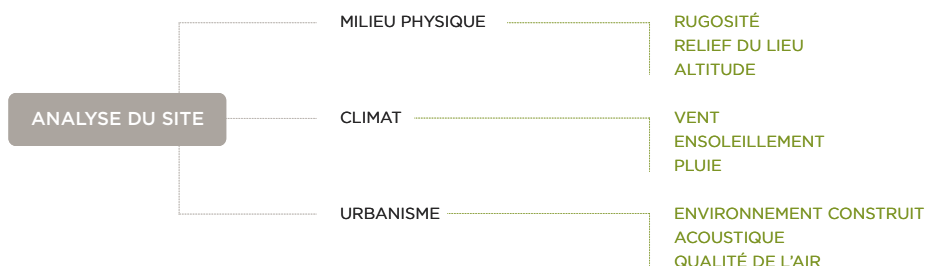
Le tableau ci-dessous présente les conditions d'un projet pour lesquelles une solution de climatisation naturelle va être facilement applicable, et celles pour lesquelles la climatisation artificielle semble « fatalement » être la seule solution possible. Ces conditions sont présentées ici d'une manière globale pour l'ensemble des secteurs d'activité (bureau, hôtellerie, bâtiments scolaires, commerces, logements,), mais devront être affinées au cas par cas selon le secteur considéré.

LES EXIGENCES DU PROGRAMME	CONDITIONS FAVORABLES À LA CLIMATISATION NATURELLE	CONDITIONS ACCEPTABLES ET AMÉLIORATIONS	CONDITIONS JUSTIFIANT LE RECOURS À LA CLIMATISATION ARTIFICIELLE
Densité du programme, cloisonnement.	Programme peu dense 1 personne/15 m². Occupation faible (8h).	Open space, espace décloisonné. Occupation moyenne (8-12h).	Très forte densité d'occupation. Profondeur importante des locaux. Occupation forte (12h et plus).
Fonctionnalités : zonage Nat/art.	Interconnexion des zones naturellement sur les façades les plus exposées aux vents.	Regroupement des zones climatisées et non climatisées.	Cloisonnement obérant la ventilation traversante.
Exigences en matière de confort hygrométrique. Et consignes.	Définition souple dans les conditions de confort exigées (se référer aux plages de confort acceptable). Exigence modulée en fonction des saisons.	Locaux techniques : définir les conditions en fonction de l'acceptabilité des matériels (serveur).	Définition trop restrictif des conditions de confort. Ouvre la possibilité de réversibilité.
Approche économique du projet.	Exiger une approche en coût global valorise sur investissement nécessaire pour développer la ventilation naturelle par les économies induites de consommation électrique et d'installation de climatiseurs.	Coût des améliorations (aménagement extérieurs, orifices de ventilation, etc.)	Coûts des modifications trop importantes (en réhabilitation) et/ou impossibilité de les reporter sur les économies de consommation électrique et l'installation de la climatisation.

# LES DÉTERMINANTS ARCHITECTURAUX DANS L'APPROCHE DU CONFORT HYGROTHERMIQUE

## 3.1.2 LES CONTRAINTES ET ATOUTS DU SITE

Dans l'analyse environnementale du site, effectuée en principe au stade de la programmation (voire livret 1), les points cruciaux à examiner en matière de confort hygrométrique sont les suivants :



**Le milieu physique** La rugosité environnante et le relief sont déterminants pour le potentiel venteux de la parcelle. Le relief influe également sur la course visible du soleil notamment en début ou fin de journée. La température diminue avec l'altitude, en moyenne de 0.7°C pour 100 m : les zones d'altitude de quelques centaines de mètres bénéficient d'un climat particulièrement favorable en saison chaude.

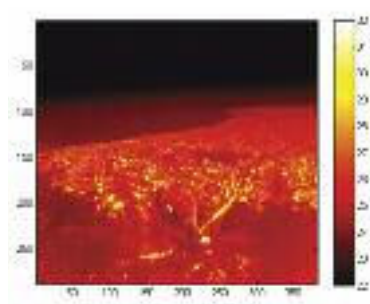
**Le Climat** Les éléments les plus variables d'un site à l'autre sont le vent et la pluviométrie. La partie Ouest de l'île - sous le vent - bénéficie d'un potentiel vent nettement moindre que la partie Est. La couverture nuageuse apporte des variations non négligeables du niveau d'ensoleillement.

**Urbanisme** L'environnement construit modifie la relation avec le soleil (ombrage mutuel des bâtiments) et dégrade le potentiel du vent au niveau de la parcelle. Le niveau de bruit environnant (voir classement acoustique des voies) et la qualité de l'air environnant sont des éléments d'appréciation importants pour le développement de la ventilation naturelle. L'îlot de chaleur urbain dans les zones urbaines particulièrement minéralisées peut aggraver les conditions de température extérieure par une augmentation moyenne allant de 1 à 3°C.

### SAINT-DENIS, LA NUIT

LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LES ZONES DE PARCS ET LES ZONES URBANISÉES EST PROCHE DE 3 °C

CRÉDIT PHOTO REUNIWATT



Le tableau suivant complète les questionnements à passer en revue et les études à mener pour conforter les choix en matière de mode de climatisation :

SITE / ENVIRONNEMENT URBAIN	CONDITIONS FAVORABLES À LA CLIMATISATION NATURELLE	CONDITIONS ACCEPTABLES ET AMÉLIORATIONS	ÉTUDES À MENER
Environnement construit.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence d'obstacles immédiats dans la trajectoire des vents.</li> <li>• Possibilité de capter les vents dominants et secondaires.</li> <li>• Rugosité environnante.</li> <li>• Les ombrages environnants.</li> </ul>	En présence d'obstacles aérodynamiques, optimiser l'implantation par une étude aéraulique à l'échelle de la parcelle. Réduire les ambitions en matière aéraulique : se fixer des objectifs de renouvellement d'air pour évacuer les apports et compter plutôt sur les brasseurs d'air pour créer de la vitesse d'air.	Etudes aérauliques pour : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contextualiser les données de la station météorologique la plus proches.</li> <li>• Simuler les potentiels de ventilation en selon les morphologies projetées.</li> <li>• Visualiser la course solaire sur la parcelle et des ombres portées.</li> </ul>
Environnement acoustique.	Zone calme.	Zone moyennement bruyante, avec possibilité de protection acoustique pour préserver la ventilation naturelle. Le niveau acceptable dépend aussi de l'activité (atelier, bureau, salle de classe, hôpital, logement). La résilience au bruit des occupants est un point d'appui fondamental.	Etude acoustique du niveau de bruit au droit des façades selon le positionnement projetées des bâtiments. Etudes des possibilités d'atténuation des bruits.
Lutte contre l'îlot de chaleur urbain.	Possibilité de végétalisation périphérique par des arbres de hautes tiges.	Végétalisation verticales des murs et horizontales des terrasses.	Pas de modèle fiable permettant de le quantifier. Des études, réalisées à St-Pierre sur l'Îlet du Centre (Université/LEU Réunion) donnent des valeurs indicatives de l'augmentation des températures en fonction du niveau de minéralisation et de végétalisation du site.
Qualité sanitaires des espaces : insectes, moustiques.	Absence d'eau stagnante au voisinage du bâtiment (favorise le développement des moustiques et des termites). Lutte contre l'humidité par drainage en surface au pied des façades (bande de gravier), en association avec de la végétation haute.	Possibilité d'installer des moustiquaires (qui auront toutefois impact sur le potentiel de ventilation naturelle).	
Effraction /sécurité.	Zone tranquille ou étage non accessible par l'extérieur.	Solutions de grilles fixes centrales et fermetures adaptées et de jalousies résistant à l'effraction.	

# LES DÉTERMINANTS ARCHITECTURAUX DANS L'APPROCHE DU CONFORT HYGROTHERMIQUE

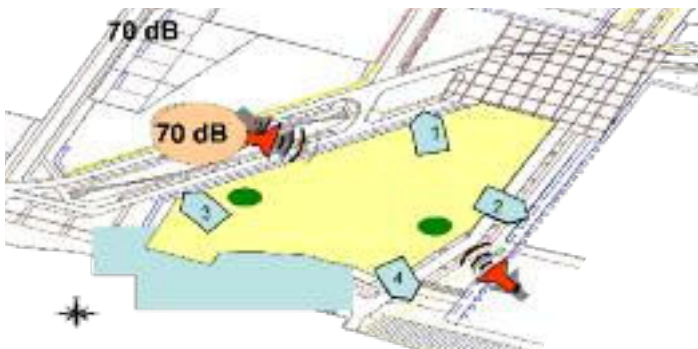
## 3.2 RÉPONSES ARCHITECTURALES SELON LES STRATÉGIES CHOISIES

En tant que chef d'orchestre en phase conception, l'architecte, en fonction des contraintes du site, fait la synthèse et arbitre les choix en matière de plan de masse, de forme, d'épaisseur, d'orientation, de porosité et de zonage... paramètres géométriques particulièrement sensibles pour le confort hygrothermique et la consommation énergétique.

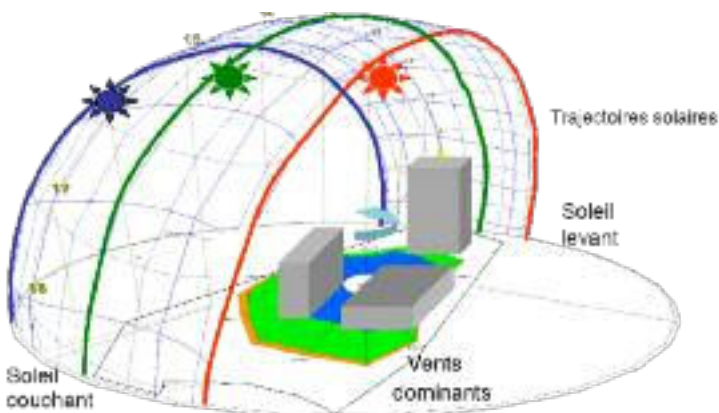
### 3.2.1 GÉOMETRIE : LES DIFFÉRENTS LEVIERS D'ACTION

En effet, les choix architecturaux déterminent les surfaces d'échange entre le bâtiment et l'extérieur mais également entre zones naturellement et artificiellement climatisées, que ce soit des échanges par écart de température, par rayonnement ou flux d'air (ouvertures). Les leviers d'action géométriques permettant de dérouler une stratégie de conception orientée climatisation naturelle ou artificielle sont les suivants :

PLAN MASSE ET ZONAGE



RÉPONSES GÉOMÉTRIQUES VIS-À-VIS DE LA COURSE SOLAIRE



	CLIMATISATION NATURELLE (CN)	CLIMATISATION ARTIFICIELLE (CA)	REMARQUES
Plan masse et zonage.	<p>A l'échelle urbaine, on préservera les meilleures expositions au vent pour les bâtiments naturellement climatisés, notamment les zones caractérisées par 50% de vitesse de vent supérieure à 2.5 m/s.</p> <p>A l'échelle du projet, les zones présentant les meilleurs potentiels seront réservées à la climatisation naturelle.</p> <p>Conception générale (épaisseur, distributions, écopes) adaptée à la ventilation traversante.</p>	<p>Le zonage doit veiller à regrouper les zones climatisées artificiellement et limiter la surface d'échange avec les zones naturellement climatisées.</p>	<p>Il s'agit de limiter les pertes de charge de l'écoulement de l'air dans le cas de la ventilation naturelle et d'obtenir un bon coefficient de forme dans le cas de la climatisation artificielle.</p>
Morphologie générale.	<p>Le positionnement des bâtiments doit viser d'abord une optimisation aéraulique d'ensemble, tout en minimisant l'exposition solaire.</p>	<p>Les zones climatisées ou réversibles doivent être regroupées et plutôt compactes pour limiter les gains de chaleur.</p> <p>La compacité est à rechercher et l'orientation des façades principales minimiser l'exposition solaire.</p>	<p>En climatisation naturelle, la recherche du meilleur compromis entre ventilation et protection solaire est un exercice plus complexe que la simple recherche de protection solaire pour les bâtiments climatisés.</p>
Réponses géométriques vis-à-vis de la course solaire.	<p>En concordance avec la problématique aéraulique, limiter les orientations les plus exposées au soleil et les plus difficiles à protéger, en veillant à capter et bien répartir la lumière naturelle.</p> <p>Développer des protections solaires ad hoc .</p>	<p>Orienter le bâtiment pour minimiser l'exposition solaire et capter la juste lumière naturelle.</p> <p>En ventilation naturelle, l'orientation du bâtiment doit protéger de l'ensoleillement le plus pénalisant Est/Ouest alors qu'en mode climatisé, un compromis doit être géré entre la capacité de ventilation et apports solaires.</p>	
Réponses géométriques vis-à-vis des vents du site.	<p>Chercher à capter les vents dominants, mais également les brises secondaires, par des volumes largement découpés, décloisonnés, de faible épaisseur.</p> <p>Porosité à l'air conduisant à des taux de percement supérieurs à ceux nécessaires à la lumière naturelle.</p> <p>Porosité à l'air modulable et réglable.</p>	<p>Perméabilité à l'air la plus faible si on climatise toute l'année.</p> <p>La compacité d'ensemble permet une meilleure maîtrise de l'étanchéité.</p>	<p>Règles précises de conception en ventilation naturelle sont à respecter (voir livret 3).</p>
Rapport au sol.	<p>Préconisation de construction sur pilotis, parking ventilé ou vide sanitaire ventilé pour évacuer l'excès de chaleur.</p>	<p>Idem sauf si la consigne de température est inférieure à 24°C.</p>	<p>Les planchers sur vide sanitaire doivent être privilégiés car ils jouent le rôle de paroi évacuatrice de l'excédent de chaleur.</p>
Hauteur sous plafond.	<p>Hauteur suffisante pour l'installation de brasseurs d'air plafonniers.</p> <p>Possibilité d'impistes hautes (ventilation en profondeur, évitant les courants d'air dans les zones de séjour).</p>	<p>Pour les locaux destinées à fonctionner en mode réversible, la contrainte d'installation de brasseur s'impose également.</p>	<p>Certain plan d'urbanisme peuvent restreindre la liberté de choix de la hauteur sous plafond.</p>

# LES DÉTERMINANTS ARCHITECTURAUX DANS L'APPROCHE DU CONFORT HYGROTHERMIQUE

**3.2.2**  
**ARCHITECTURE**  
**ET CONFORT**  
**HYGROMÉTRIQUE :**  
**COMPLEXITÉ**  
**MÉTHODOLOGIQUE**

La complexité d'une approche d'optimisation du confort hygrométrique est liée à l'interaction des phénomènes confort lumière/chaueur/air. Le nœud de croisement de toutes ces problématiques se focalise au niveau des ouvertures. Ces trois problématiques doivent être menées de front simultanément, même s'il nécessite la mobilisation d'outils différents et de multiple saisie de projet. Il n'existe pas de méthode «directe» pour accéder à une solution satisfaisante, aussi la méthodologie de recherche de solution repose sur un algorithme de recherche par itération successive. Le test permettant de valider une variante que ce soit en climatisation naturelle ou artificielle est la simulation thermique dynamique du bâtiment grâce à une évaluation de la consommation énergétique et des conditions de confort hygrométrique. Les études lumières/protections solaires/aérauliques permettent d'optimiser à chaque itération les ouvertures pour satisfaire simultanément aux différents critères liés :

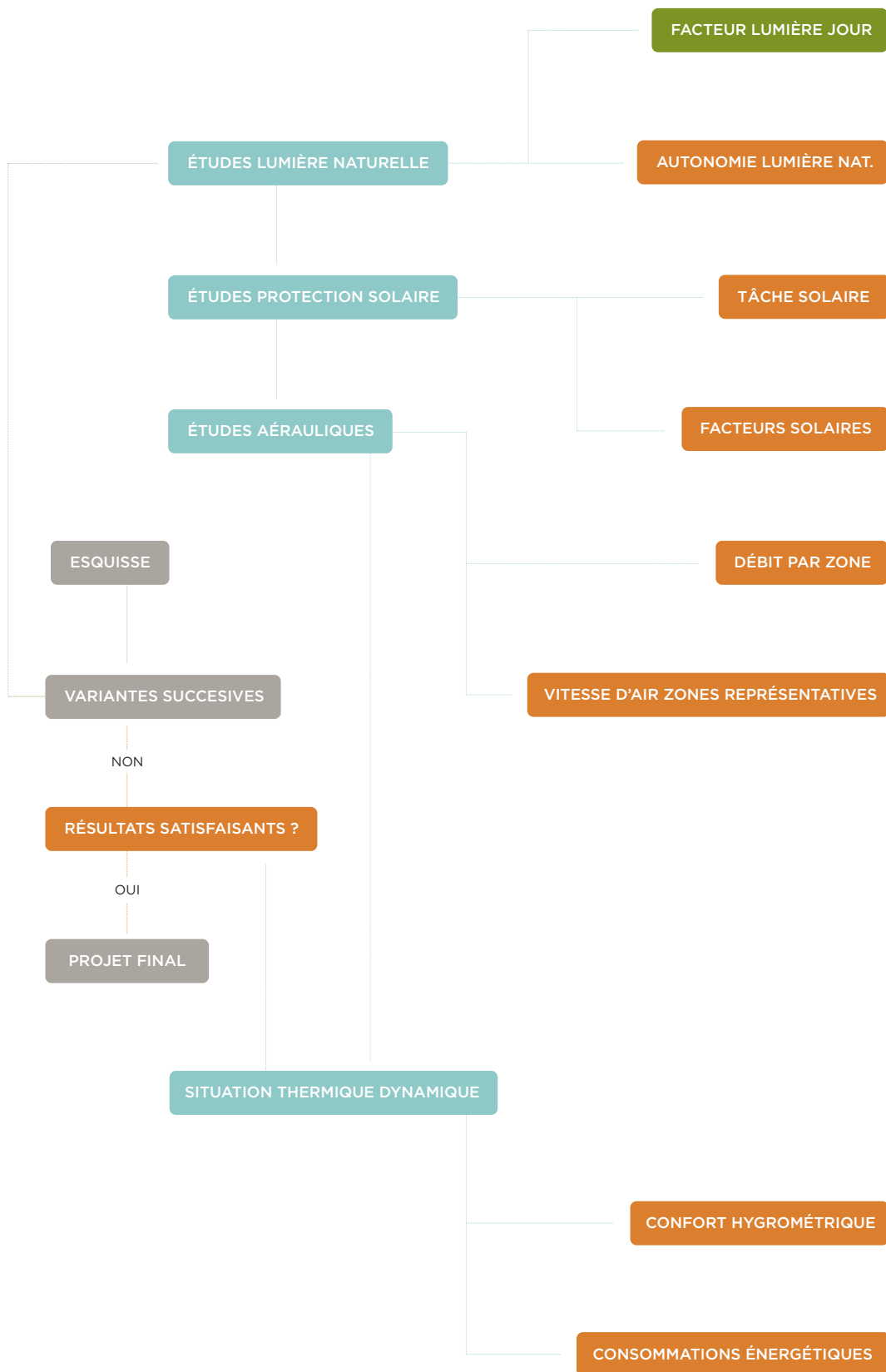
- À la lumière naturelle. Le taux d'autonomie est à ce titre le meilleur critère à observer sur le plan énergétique, pour limiter le complément d'éclairage artificiel.
- La protection solaire des parois opaques et des ouvertures. L'évolution de la tâche solaire à l'intérieur des locaux permet d'optimiser le positionnement des occupants vis-à-vis de l'éblouissement mais également en termes d'inconfort lié à l'exposition solaire directe des occupants.
- À la ventilation naturelle des locaux. Pour les locaux conçus en climatisation naturelle, les deux indicateurs à observer sont les débits d'air pour chaque zone et la vitesse d'air. Un débit d'air d'au moins 15 vol/est requis pour évacuer correctement des excédents de chaleurs. L'autre indicateur est la vitesse d'air, pour abaisser la température ressentie par les usagers. L'état d'avancement des technologiques ne permet pas de généraliser à l'ensemble des zones du bâtiment l'étude des vitesses : on se contentera de simuler quelques zones. L'autre alternative pour qualifier les écoulements consiste à réaliser une étude en soufflerie, particulièrement recommandée pour les espaces complexes.

**PROJET DARTI, CENTRE COMMERCIAL AUX AVIRONS**

ARCHITECTE : ALAIN JAVELOT

ÉTUDE ET CRÉDIT PHOTO : LABORATOIRE AÉRODYNAMIQUE EIFFEL



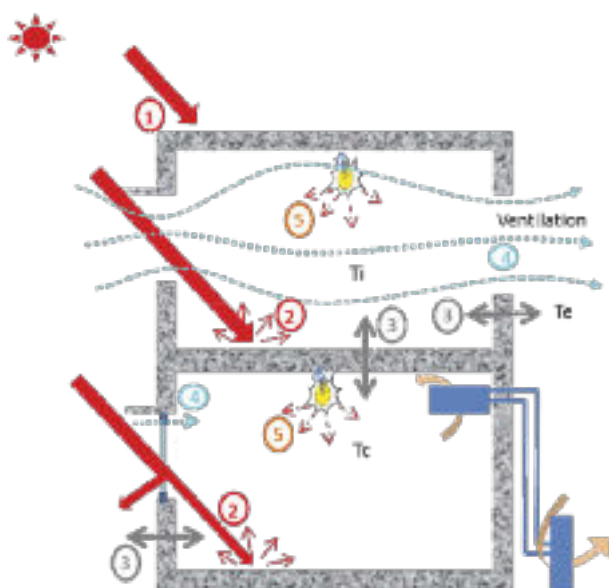


# OPTIMISATION THERMIQUE DES COMPOSANTS DE L'ENVELOPPE

## 4.1 UN PEU DE PHYSIQUE

Après les volets programmatiques (besoins) et architecturaux de la conception énergétique et environnementale du bâtiment, nous abordons ici l'optimisation thermique des composants de l'enveloppe. Cette approche qui intéresse davantage le thermicien de l'équipe de conception - doit être minutieusement étudiée à partir de l'expression des besoins examinés dans la partie précédente et du contexte climatique.

En effet, selon le rapport de force entre apports internes/apports solaires directs/apports solaires indirects et le mode d'échange dominant - par gradient de température/par rayonnement par ventilation - il s'agit de trouver la meilleure composition architecturale sur les différents composants de l'enveloppe.



SCHEMA DES TRANSFERTS THERMIQUES D'UN LOCAL

EN HAUT : LOCAL EN VENTILATION NATURELLE

EN BAS : LOCAL CLIMATISÉ

TE : TEMPÉRATURE EXTERNE

TI : TEMPÉRATURE INTERNE

TC : TEMPÉRATURE DE CONSIGNE

Un bâtiment soumis aux sollicitations climatiques - soleil, vent, air extérieur (température, humidité) - et aux différentes charges internes (équipements, occupants) échange de l'énergie de 5 façons :

- 1.** Les apports solaires transmis par les parois opaques : murs extérieurs et toitures (annexe 1).
- 2.** Les apports solaires transmis sous forme directe par les ouvertures vitrées (annexe 2), qui peuvent être réduits par les protections solaires (annexe 3).
- 3.** Les échanges par gradient de température entre les locaux ou avec l'extérieur (annexe 4).
- 4.** Les échanges par renouvellement d'air, limités au minimum à la quantité nécessaire pour l'hygiène pour un local climatisé ou maximisé en débit pour un local naturellement ventilé. Les échanges par renouvellement influencent non seulement la température mais également l'hygrométrie intérieure.
- 5.** Les apports internes liés à la dégradation sous forme de chaleur de l'énergie nécessaire aux fonctionnements des différents appareils (éclairage, informatique, appareils de cuisine) et du métabolisme dégagé par les occupants.

L'objectif de cette approche est de dresser le bilan énergétique de chaque type de composant de l'enveloppe baie/toiture/murs soumis à ces différents échanges dans le but d'en optimiser les paramètres de dimensionnement en fonction des situations (local climatisé naturellement ou artificiellement).

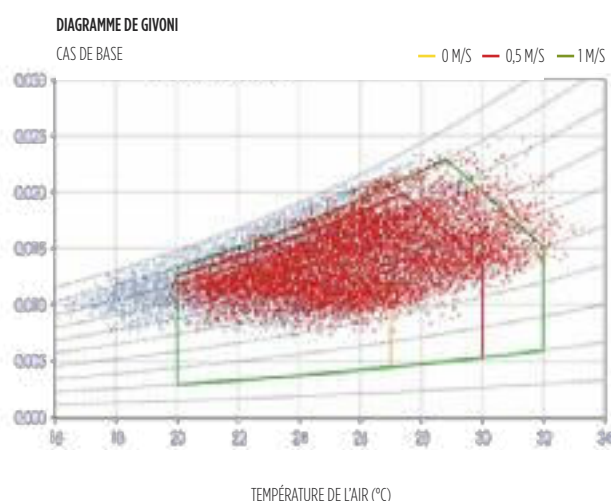
Il est important de mener ce bilan dans la dynamique d'échange globale telle qu'elle se présente en moyenne dans la réalité.

Les études de sensibilités sont menées avec des hypothèses moyennes pour calculer les flux. Il convient de varier certains des ces paramètres pour appréhender l'importance de certains flux. (Exemple : dans le cas d'une école, le poids des apports internes est très important).

# OPTIMISATION THERMIQUE DES COMPOSANTS DE L'ENVELOPPE

## 4.2 ÉTUDE DE CAS BÂTIMENT NON CLIMATISÉ

A travers un cas de base simple de bâtiment de bureaux cubique, comportant deux niveaux de 100 m<sup>2</sup> de 10 m de côté, nous proposons d'illustrer les gains possibles en confort hygrométrique en agissant sur l'enveloppe.



Le cas de base visualisé correspond à un bâtiment construit sans se préoccuper de l'optimisation énergétique de l'enveloppe :

- Façades orientées NS et E/O.
- Paroi verticale en béton de 15 cm, de teinte foncée (absorption 0.7).
- Toiture Bac acier avec 3 cm d'isolation.
- Taux de percement de 1/6. Surface d'ouverture par rapport à la surface de plancher.
- Baies vitrées en vitrage simple, non protégées, disposées équitablement sur les façades.
- Ventilation faible de 3 vol/h.

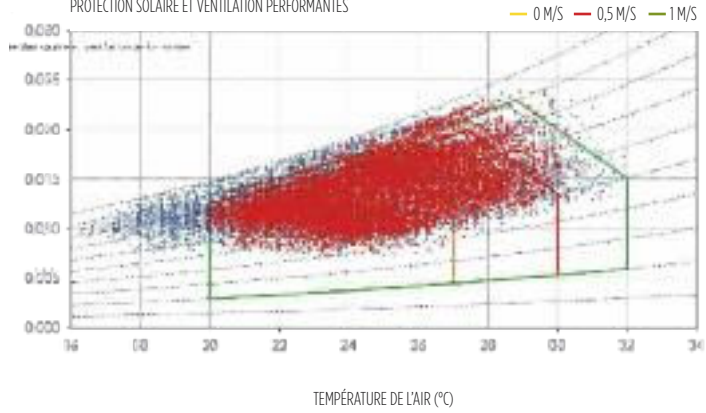
Le nuage de point sur le diagramme de confort montre une translation des points vers la droite traduisant une surchauffe de plusieurs degrés par rapport aux conditions extérieures.

Pour améliorer cette situation initiale, on optimise la ventilation et la protection solaire :

- Ventilation naturelle de 20 vol/h en saison fraîche.
- Application d'un revêtement clair sur les parois (absorption 0.4).
- Isolation de la toiture avec 10 cm d'isolant.
- Protection des baies vitrées avec un facteur solaire de 0.3 en Est/Ouest et 0.5 au Nord et au Sud.

### DIAGRAMME DE GIVONI

PROTECTION SOLAIRE ET VENTILATION PERFORMANTES

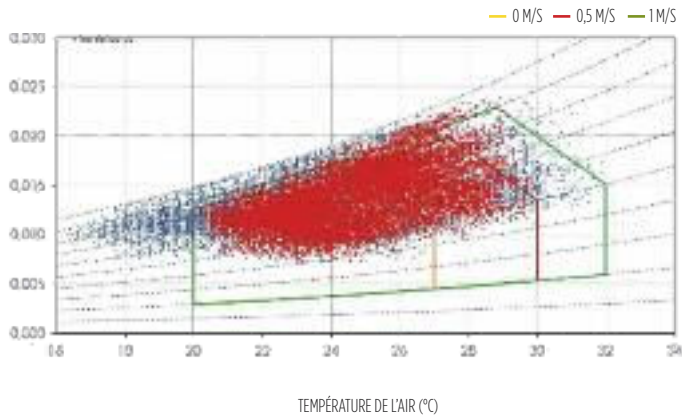


On constate que le nuage de points est confiné dans la zone de confort acceptable, sous réserves d'assurer une vitesse de 1/m/s par la ventilation traversante ou à défaut par un brasseur d'air.

Une variante avec une inertie renforcé en doublant les épaisseurs de béton montre que l'on obtient une légère amélioration des conditions de confort. Cependant, le quasi-doublement de l'énergie grise initial ajouté aux impacts en termes d'investissement donne peu d'intérêt à cette variante. L'intérêt de l'inertie s'explique par amplitude appréciable des températures (8°C) dans un climat réputé tropicale humide. Notons que pour la zone sous toiture, les résultats sont nettement moins bons du fait de l'impact considérable de l'ensoleillement de la toiture, et ce malgré l'isolation conséquente :

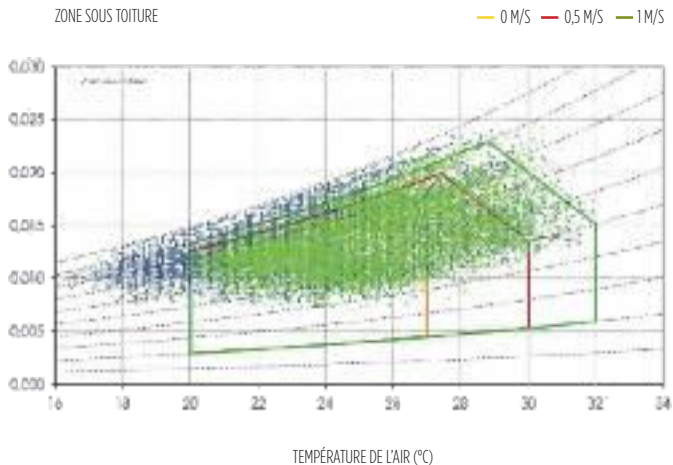
### DIAGRAMME DE GIVONI

INERTIE LOURDE



### DIAGRAMME DE GIVONI

ZONE SOUS TOITURE



## OPTIMISATION THERMIQUE DES COMPOSANTS DE L'ENVELOPPE

Cet exemple permet de valider les objectifs fixés sur les indicateurs intermédiaires, notamment les facteurs solaires et permet de définir la bonne trajectoire le bâtiment en terme de confort.

		Cas où la ventilation naturelle est en fonctionnement H24		Cas où la ventilation naturelle est en fonctionnement de 8h à 18h	
		Nb d'heure >28°C sur toute la période H24	Nb d'heure >28°C sur la période occupation 8h à 18h	Nb d'heure >28°C sur toute la période H24	Nb d'heure >28°C sur la période occupation 8h à 18h
<b>Base</b>	<b>RDC</b>	1914	1087	1962	1092
	<b>R+1</b>	2982	1752	3076	1757
<b>Variante optimisée</b>	<b>RDC</b>	575	400	639	423
	<b>R+1</b>	1173	744	1440	817
<b>Extérieur</b>		<b>1001</b>	<b>804</b>	<b>1001</b>	<b>804</b>

		Cas où la ventilation naturelle est en fonctionnement H24		Cas où la ventilation naturelle est en fonctionnement de 8h à 18h	
		Nb d'heure >30°C sur toute la période H24	Nb d'heure >30°C sur la période occupation 8h à 18h	Nb d'heure >30°C sur toute la période H24	Nb d'heure >30°C sur la période occupation 8h à 18h
<b>Base</b>	<b>RDC</b>	575	355	600	353
	<b>R+1</b>	1541	999	1592	1004
<b>Variante optimisée</b>	<b>RDC</b>	8	7	8	7
	<b>R+1</b>	171	136	208	152
<b>Extérieur</b>		<b>159</b>	<b>146</b>	<b>159</b>	<b>146</b>

En occupation permanente, le nombre d'heure au-delà de 30°C ne dépasse pas 5% du temps en au rdc et 8% à l'étage ; c'est à dire les conditions de confort d'un individu à l'extérieur à l'ombre d'un arbre sous une brise légère... soit la définition du confort thermique idéal en zone tropicale.

En ne comptabilisant que pendant les heures d'occupation, le nombre d'heures d'inconfort descend à moins de 10 heures en étage courant et 150 heures pour l'étage sous toiture, soit en moyenne moins d'une centaine d'heures d'inconfort.

# OPTIMISATION THERMIQUE DES COMPOSANTS DE L'ENVELOPPE

## 4.3 ÉTUDE DE CAS BÂTIMENT CLIMATISÉ

Sur la base du même bâtiment que précédemment, nous avons évalué la consommation du bâtiment pour le cas de base et deux variantes de protection solaire et isolation de toiture. La seule différence réside dans la gestion du renouvellement d'air réduit ici à la quantité d'air hygiénique exigé par le règlement sanitaire. La consommation permanente (y compris la nuit et le WE) s'établit pour le cas de base à plus de 140 kWh/m<sup>2</sup> de consommation électrique de la climatisation (COP de 3). La charge de climatisation est essentiellement concentrée sur les mois de décembre à mars. Notons qu'il existe des différences notables entre le RDC et l'étage sous toiture. Le fonctionnement de la climatisation uniquement en saison chaude est illusoire ici car le nombre d'heures d'inconfort est trop élevé (plusieurs centaines d'heures au-dessus de 28°C).

Cas de base	Fonctionnement climatisation
Bureau maçonnerie courante, toit faiblement isolé (3 cm), baies et murs non protégés	Permanente Tc = 25°C
	Intermittence de nuit
	Fonctionnement de la climatisation uniquement en saison chaude
Variante optimisée en protection solaire de baie et isolation des façades et toiture	Permanente T=25°C
	Fonctionnement de la climatisation uniquement en saison chaude

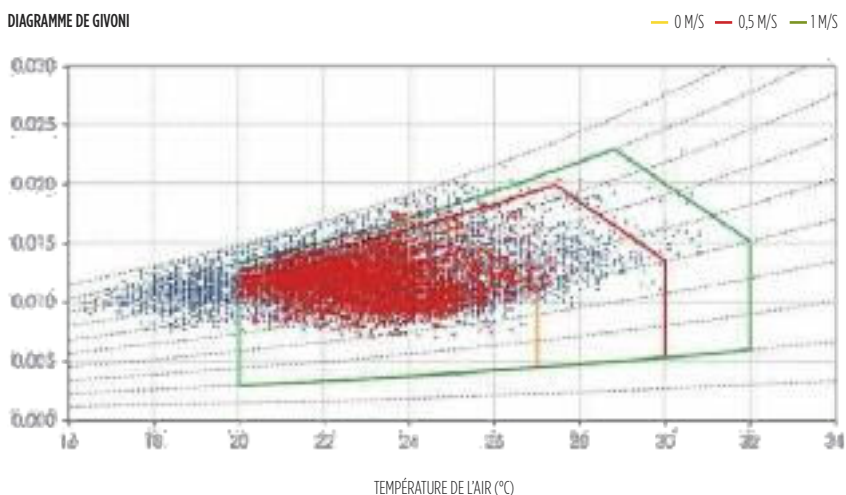
La consommation électrique dans le cas de la variante optimisée en protection solaire et ventilation (air hygiénique avec une maîtrise des infiltrations) s'établit à :

- 37 kWh/m<sup>2</sup> et par an pour un fonctionnement permanent,
- et de l'ordre de 10 kWh pour un fonctionnement limité à la saison chaude.

Le levier de l'intermittence saisonnière permet d'abaisser considérablement la consommation sous réserves que l'on tolère quelques heures d'inconfort (une cinquantaine supérieure à 28°C) dans l'année (voir diagramme de de confort ci-dessus).

Consommation climatisation en kWh/m <sup>2</sup> /an			Nombre d'heures d'inconfort >28°C			Nombre d'heures d'inconfort >30°C		
Etage	RDC	Bâtiment entier	Etage	RDC	Bâtiment entier	Etage	RDC	Bâtiment entier
190	90	140	-	-	-	-	-	-
128	59	93	-	-	-	-	-	-
24.1	50.1	37.1	195	556	375	25	192	108
44.7	28.7	36.6	-	-	-	-	-	-
10.7	7.9	9.3	78	26	52	7	0	3.5

DIAGRAMME DE GIVONI



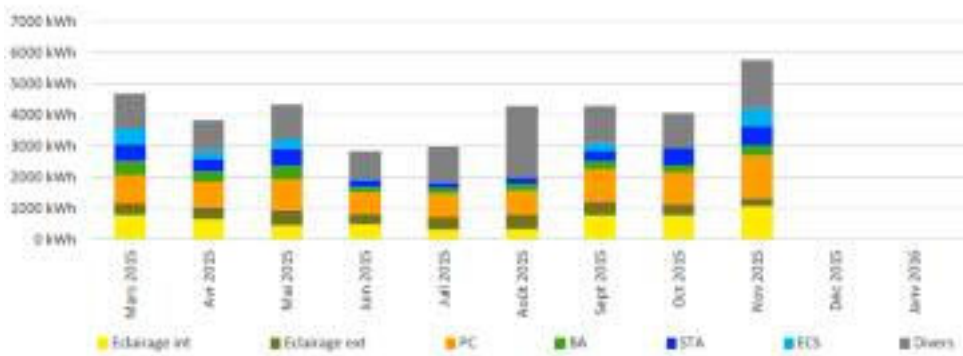
# OPTIMISATION THERMIQUE DES COMPOSANTS DE L'ENVELOPPE

## 4.4 OBJECTIFS DU PREBAT

Les retours de terrain, les expériences du Prebat (voir fiches projet Zayoubayou, Darwin), étayées par les études de simulations de divers typologies de locaux (voir livret 4, et annexe livret 2) accréditent la faisabilité des objectifs suivants pour les bureaux :

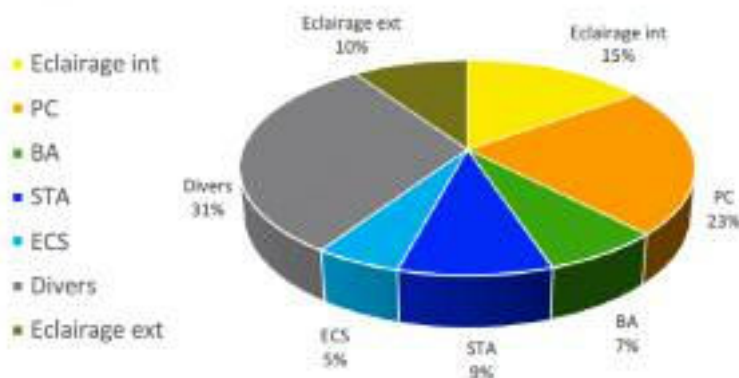
Activité bureau	Consommation totale (énergie finale)
Bureaux non clim	30 kWh/m <sup>2</sup>
Bureau clim en saison chaude	40 à 70kWh/m <sup>2</sup>
Bureau clim en permanence	50 et 80 kWh/m <sup>2</sup>

### ÉVOLUTION MENSUELLE DES CONSOMMATIONS PAR USAGE



### RÉPARTITION DES CONSOMMATIONS SUR LES DIFFÉRENTS USAGES

Mars 2015 - Fév 2016



Consommation climatisation (énergie finale)	Inconfort Nb heures > à 30°C
0	Inférieures à 100 heures
10 à 20 kWh/m <sup>2</sup>	10 heures inconfort
20 à 30 kWh/m <sup>2</sup>	0 heures inconfort

Tous les projets PREBAT ont fait l'objet d'un suivi énergétique qui est contractualisé avec l'ADEME. Les premiers suivis démontrent que les performances envisagées sont réalisables, et atteignables. Ci-contre, les résultats du suivi de l'amphithéâtre du Moufia.



Un bâtiment tertiaire non climatisé peut consommer moins de 30 kWh /an/m<sup>2</sup> (tous usages de l'énergie finale et par m<sup>2</sup> de plancher) et à conditions de confort acceptables. Un bâtiment climatisé seulement 4 mois par an peut consommer moins de 60 kWh /an/m<sup>2</sup>.

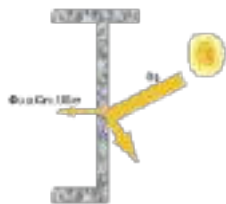
Ces indicateurs sont donnés à titre indicatifs et correspondent à des bâtiments utilisés toute l'année (hors équipement scolaire) et avec un taux d'occupation constant de leurs surfaces. Pour chaque projet, il faudra adapter ses objectifs et paramétrer ses besoins, d'où la méthodologie décrite dans les chapitres précédents.

# ANNEXE 1 : LE CAS DES PAROIS OPAQUES

Le bilan moyen d'une paroi opaque sur une journée de saison chaude moyenne, reprend les mêmes échanges que pour les baies vitrées, les échanges solaires entrants et sortants, et les échanges par gradient :

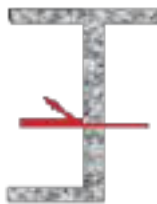
## ÉCHANGES PAR LES PAROIS OPAQUES

### 1. APPORTS SOLAIRES ENTRANT PAR LES PAROIS OPAQUES



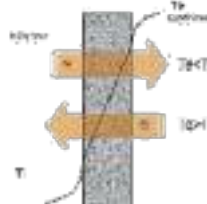
Flux transmis par une paroi  
 $\Phi_i = a \cdot C_m \cdot U \cdot h_e$   
 Facteur solaire d'une paroi opaque  
 $S = a \cdot C_m \cdot U \cdot h_e$   
 Avec  
 a absorption  
 $C_m$  l'effet de masque  
 U conductance de la paroi en  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_e$  coefficient d'échange superficiel extérieur

### 2. APPORTS RADIATIFS INTÉRIEURS



Flux transmis par une paroi  
 $\Phi_i$  le flux reçu par la paroi coté intérieur, après les échanges par multi-réflexion des parois (flux solaire provenant des vitrages et flux de l'éclairage artificiel), prenant en compte l'absorption et la géométrie du local.  
 Le flux perdu par la paroi est  $\Phi_2 = \Phi_i \cdot U / h_i$   
 Avec  
 U conductance de la paroi en  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $h_i$  coefficient d'échange superficiel extérieur

### 3. ÉCHANGES PAR GRADIENT



Le flux échangé s'exprime :  
 $\phi_3 = U \cdot (T_e - T_i)$  en W  
 Avec  
 U conductance de la paroi en  $W/(m^2 \cdot K)$   
 $T_e$  et  $T_i$  en °C

### CAS DU LOCAL NON CLIMATISÉ

En termes d'objectifs de performance de facteurs solaires, si on veut limiter le flux à  $5 W/m^2$  au flux moyens, les valeurs à ne pas dépasser sont les suivantes :

Objectif de d'apports	Nord	Nord-Est	Est
Apports : $< 5 W/m^2$	0,09	0,09	0,06

Concernant le plancher bas en relation avec un vide sanitaire, l'isolation ne présente en climatisation naturelle aucun intérêt, il faut rechercher la conductance la plus élevée pour favoriser l'évacuation des apports.

### CAS DU LOCAL CLIMATISÉ TOUTE L'ANNÉE

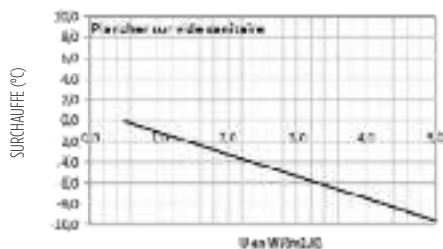
L'objectif de  $5 W/m^2$  aboutit à des exigences très fortes sur les facteurs solaires. Pour se caler sur les pratiques courantes le niveau d'exigence doit être relevé à  $10 W/m^2$ . Ce niveau correspond à peu de choses près à celui de PERENE :

Objectif de d'apports	Nord	Nord-Est	Est
Apports : $< 5 W/m^2$	0,03	0,03	0,03
Apports : $< 10 W/m^2$	0,09	0,06	0,025

Pour les locaux climatisés, on voit ici la limite d'une approche basée uniquement sur le facteur solaire. En effet dans les locaux visant une performance énergétique élevée, les apports par gradient sont du même ordre que les apports solaires. L'isolation peut devenir une solution pour progresser dans la performance énergétique si, on maîtrise son usage (4 à 6 mois de climatisation seulement). Dans le cas contraire, une surisolation du bâtiment peut augmenter l'inconfort et la consommation de climatisation.

- Pour les orientations les moins exposées en saison chaudes – Nord, Nord – Ouest, Sud, Sud-Ouest, une bonne protection solaire est le moyen d'action le plus efficace, car il préserve la fonction « évacuation » de la surchauffe par conduction. Notons que lorsque ces parois sont bien protégées ( $S < 0.3$ ), l'action de l'isolation devient contreproductive.
- Pour les parois plus exposées comme l'Est, Nord –Est, Sud Est, l'Ouest, l'isolation a une action positive, mais le levier d'action de la protection solaire est de même force. On peut jouer sur les deux leviers. Il existe également une autre alternative permettant de préserver la fonction d'évacuation de la surchauffe du local : le bardage ventilé (voir paragraphe).
- Pour les parois horizontales, toiture en pente ou toiture terrasse, l'isolation est une action particulièrement efficace, et facile à mettre en œuvre en toiture.

	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
	0,06	0,09	0,09	0,09	0,09	0,02



	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01
	0,06	0,09	0,09	0,06	0,08	0,03

# ANNEXE 1 :

## LE CAS DES PAROIS OPAQUES

### Le bardage

Le bardage est une alternative particulièrement intéressante à l'isolation : il permet d'atteindre les mêmes facteurs solaires qu'une isolation de 2 à 3 cm sans en avoir les inconvénients. En effet, l'isolation empêche l'excédent de chaleur de ressortir contrairement au bardage qui, de part sa faible conductance laisse la chaleur ressortir. C'est donc un remède très intéressant en climatisation naturelle, mais également en climatisation artificielle si les consignes des ambiances sont raisonnables (25 à 26°C). Pour les températures de consignes plus basses l'isolation reste plus intéressante.

La formule correctrice de calcul pour une paroi verticale avec bardage est :  $S = a.Cm.Kcorr.U/he$

**Kcorr** : coefficient de ventilation traduisant la réduction de la charge solaire mur intégrant un bardage ventilé

Les bardages ventilés par une ouverture basse et haute évacuent une partie de la charge solaire reçue.

La prise en compte de cet effet est intégrée par l'intermédiaire du coefficient correctif Kcorr, dépendant de la teinte du bardage et de la hauteur séparant les ouvertures haute et basse.

Le moteur de ventilation de la lame est le tirage thermique généré par l'échauffement du bardage exposé au soleil. Le tableau suivant donne les valeurs du coefficient Kcorr à appliquer :

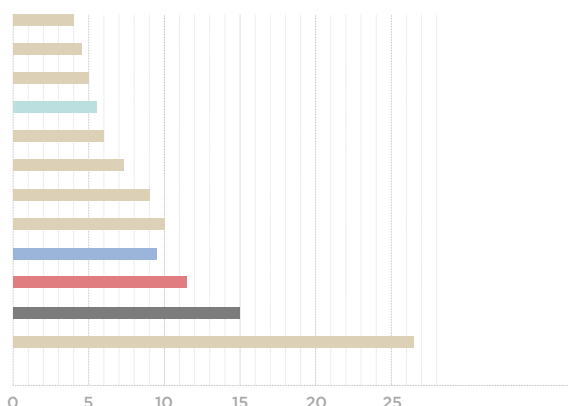
Épaisseur de la lame en m	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.4$
0	1	1
0.05	0.65	0.70
0.10	0.60	0.65
0.5	0.55	0.60

L'effet de bardage permet donc de diminuer de 30 à 40% la charge solaire transmise et reçue par une paroi. Associé à une couleur claire, le bardage ventilé permet d'atteindre les coefficients de transmission solaire inférieurs à 0.04 à 0.05.

### La toiture : ventilation, végétalisation et isolant masse

#### Apport solaire moyen toiture en W/m<sup>2</sup>

Tôle + FP + 10 cm isolant  
Tôle + FP + 9 cm isolant  
Tôle + FP + 8 cm isolant  
Tôle + FP + 7 cm isolant  
Tôle + FP + 6 cm isolant  
Tôle + FP + 5 cm isolant  
Tôle + FP + 4 cm isolant  
Tôle + FP + 3 cm isolant  
Tôle + FP + Faux Plafond ventilé  
Tôle + FP + isolant mince  
Tôle + FP + feuille Alu  
Tôle + Faux Plafond



La présence d'une lame d'air ventilée (comble ventilé) permet d'évacuer vers l'extérieur une bonne partie de la charge solaire reçue par la paroi. Cependant la partie résiduelle transmise à l'ambiance reste importante, car le toit reçoit en moyenne 6 kWh par jour. Une toiture bien ventilée est l'équivalent de 3 à 4 cm d'isolant, soit un facteur solaire de l'ordre de 0.03 (toit de couleur claire). Pour atteindre l'objectif d'un flux moyen inférieur à 5 W/m<sup>2</sup>, 8 cm d'isolant sont nécessaires. Notons que les derniers Watts gagnés sont les plus difficiles à réaliser.

Les solutions jouant sur l'affaiblissement des échanges infrarouges grandes longueurs d'onde comme une feuille d'aluminium ou isolant mince, permet à l'état neuf de réduire de moitié voir les 2/3 de la transmission des apports solaires. La problématique de ces produits est la garantie dans le temps des propriétés de surface soumis à l'empoussiérage et le vieillissement du revêtement.

La présence d'une couche végétalisée permet d'évacuer par évaporation d'une partie de la charge solaire reçue en toiture. L'impact de cet effet est intégré comme précédemment par l'intermédiaire d'un coefficient correctif  $K_{\text{corr veg}}$  :  $S = 0,074 \times \alpha \times K_{\text{corr veg}} / R$ .

Où :

$\alpha$  = coefficient d'absorption de la paroi

**R** = résistance thermique totale de la paroi (calculée avec la couche de végétalisation sèche) m<sup>2</sup>.K/W.

**Kcorr veg** = coefficient correctif pour prendre en compte l'impact de la végétalisation.

Le coefficient d'absorption dépend du type de végétalisation :

- extensive :  $\alpha = 0,70$
- semi-intensive :  $\alpha = 0,40$

Le coefficient correctif est inversement proportionnel au pourcentage de temps durant lequel le substrat reste humide lors de la saison chaude :

$$K_{\text{corr veg}} = (100 - DH)/100$$

DH : % de temps correspondant pour lequel le substrat reste humide pendant la saison chaude. Pour La Réunion, on prendra les valeurs suivantes :

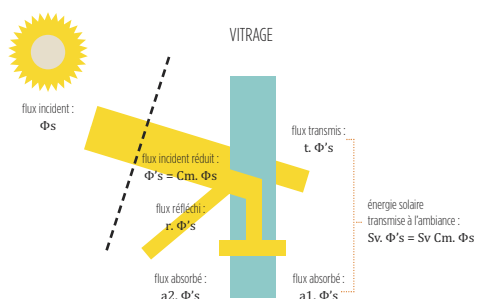
La végétalisation permet avec un arrosage courant de diminuer de l'ordre de 20% la charge solaire reçue en toiture.

	Extensive	Semi-intensive
Sans irrigation	0,93	0,88
Avec irrigation de 20 mm d'eau par semaine	0,88	0,79

# ANNEXE 2A : LE CAS DES BAIES VITRÉES DÉFINITION ET PRINCIPES

Le bilan moyen d'une baie vitrée sur une journée de saison chaude moyenne, est effectué en prenant en compte simultanément, les échanges solaires entrants et sortants et les échanges par gradient :

## 1. APPORTS SOLAIRES PAR LES OUVERTURES



Le flux solaire transmis par une baie s'exprime :

$$\Phi_1 = S_v \cdot C_m \cdot \Phi_s \text{ en W}$$

Le facteur solaire de la baie

$$S = S_v \cdot C_m$$

Avec

$C_m$  l'effet de masque sans dimension

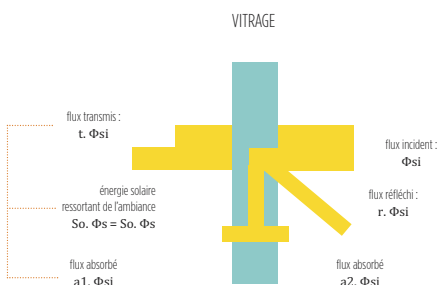
$t, r, a_1, a_2$  coefficient transmis, réflexion

et absorption coefficient sans dimension compris en 0 et 1

$$t + r + (a_1 + a_2) = 1$$

$$S_v = t + a_1$$

## 2. APPORTS RADIATIFS INTÉRIEURS



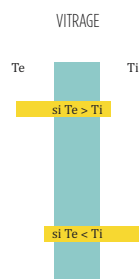
Une partie des rayonnements solaires transmis par les baies vitrées (idem pour l'éclairage artificiel) ressort par les baies, après multi-réflexions sur les parois intérieures selon les caractéristiques géométriques du local et de l'absorption côté intérieur des parois.

Ce rayonnement perdu (négatif) s'exprime en fonction de la densité de flux radiatif intérieur

$\varphi_{si}$  et de du facteur solaire de la baie  $S_o$  :

$$\varphi_2 = -S_o \cdot \Phi_{si} \text{ en W}$$

## 3. ÉCHANGES PAR GRADIENT



Le flux échangé s'exprime :

$$\varphi_3 = U \cdot (T_e - T_i) \text{ en W}$$

Avec

$U$  conductance de la paroi

en  $W/(m^2 \cdot K)$

$T_e$  et  $T_i$  en  $^{\circ}C$

Le bilan de la baie comptabilise le flux moyen échangé  $\Phi$  pour les trois échanges :  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$ .

Les deux premiers échanges sont toujours positifs.

L'échange par gradient va dépendre du mode de climatisation :

- Bilan négatif en climatisation naturelle.  
L'écart entre la température moyenne intérieure et la température moyenne extérieure va de 2°C (voire moins) dans un bâtiment bien conçu à 5°C ou plus dans un bâtiment mal conçu.
- Bilan positif en climatisation artificielle. L'écart moyen en saison chaude est de 1°C si la consigne de la climatisation est de 25°C. Si la consigne est plus basse l'écart peut aller de 2°C pour 24°C de consigne voire 4°C pour 22°C de consigne.

### Remarques

Ci après, les valeurs présentées ici sont calculées en prenant en compte les trois composantes du rayonnement (direct, indirect et diffus) et font l'objet d'une moyenne pondérée sur un fichier climatique annuel (station de référence Gillot).

Ces valeurs correspondent à peu près aux valeurs de l'outil PERENE Réunion, dont les hypothèses de calculs sont différentes. Ici le niveau de protection solaire a été ajuster en taux de vitrage ramené au m<sup>2</sup> de plancher, pour apporter la même quantité de lumière naturelle utile.

## ANNEXE 2B : LE CAS DES BAIES VITRÉES EN LOCAL NON CLIMATISÉ

Selon les objectifs visés d'apport moyen, les facteurs solaires d'une baie à simple vitrage doivent être ajustés selon les objectifs visés en protection solaire. Si on se fixe comme objectif un apport maximal de  $30 \text{ W/m}^2$  (soit un apport solaire maximal en provenance des vitrages de  $5 \text{ W/m}^2$  de plancher pour un taux de vitrage de 1/6 du plancher) :

VALEURS DES FACTEURS SOLAIRES CIBLÉS POUR UN APPORT SOLAIRE DONNÉ ET PAR ORIENTATION

CAS DU LOCAL NATURELLEMENT CLIMATISÉ	Objectif de d'apports	Nord	Nord-Est	Est
	<b>Très performant : <math>&lt;30 \text{ W/m}^2</math></b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>	<b>0,25</b>

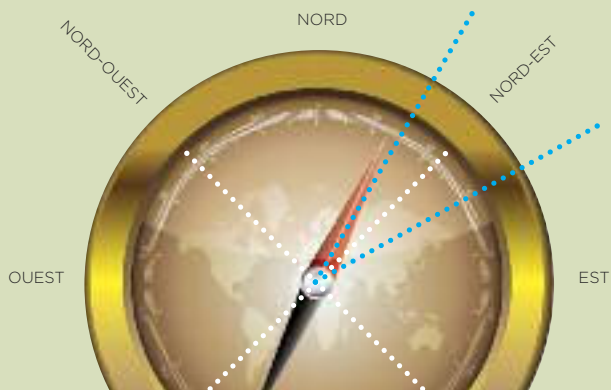
Deux phénomènes prédominent le transfert de chaleur en milieu tropical dans les Bas :

- La prépondérance nette de l'influence du facteur solaire de la baie sur la conductance.
- L'influence négative des vitrages isolants : à facteur solaire égal, le bilan d'un double vitrage ( $U=2.5 \text{ W/(m}^2.K)$ ) est moins favorable qu'un simple vitrage ( $U=5\text{W/(m}^2.K)$ ).

VALEURS DES FACTEURS SOLAIRES CIBLÉS POUR UN APPORT SOLAIRE, PAR ORIENTATION ET POUR UN TAUX DE PERÇEMENT DONNÉ

Taux de percement	Nord	Nord-Est	Est
12% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,53	0,40	0,33
<b>16% surface vitrage/<math>\text{m}^2</math> plancher</b>	<b>0,40</b>	<b>0,30</b>	<b>0,25</b>
20% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,32	0,24	0,20
25% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,26	0,19	0,16
30% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,21	0,16	0,13

Pour un taux de vitrage de 12% - taux de percement suffisant à La Réunion pour ramener la quantité de lumière naturelle nécessaire -, on retrouve les valeurs de facteurs solaires optimales (voir ci-contre).

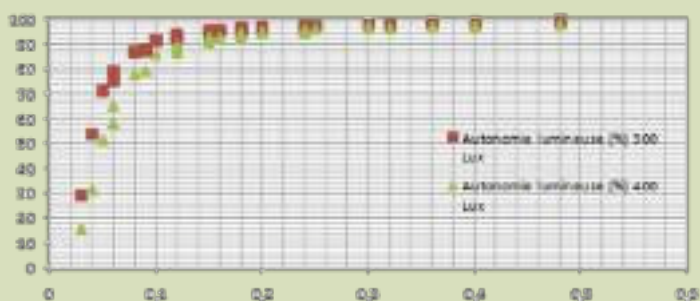


	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,12

	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
	0,40	0,53	0,53	0,40	0,53	0,16
	<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>0,12</b>
	0,24	0,32	0,32	0,24	0,32	0,10
	0,19	0,26	0,26	0,19	0,26	0,08
	0,16	0,21	0,21	0,16	0,21	0,06

#### AUTONOMIE EN LUMIÈRE NATURELLE

DE 8H00 À 18H00



RATIO SURFACE VITRÉE / SURFACE DE PLANCHER

## ANNEXE 2C : LE CAS DES BAIES VITRÉES EN LOCAL CLIMATISÉ

### CAS DU LOCAL CLIMATISÉ

Le même approche énergétique conduit à des conclusions sensiblement identiques, sauf pour les échanges par gradient. On constate en effet :

- La même prépondérance de l'influence du facteur solaire de la baie sur la conductance.
- L'influence faible, voire nulle de la conductance lorsque la consigne est raisonnable ( $T_c=25^\circ\text{C}$  à  $26^\circ\text{C}$ ) : à facteur solaire égal, le bilan d'un double vitrage ( $U=2.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ) est très légèrement amélioré par rapport à double vitrage ( $U=5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ).  
En revanche pour des consignes basses ( $T_c=23$  à  $24^\circ\text{C}$ ), le caractère isolant des vitrages présente un certain intérêt.

Pour les mêmes objectifs que précédemment, soit un apport maximal (solaire + gradient de température) de  $30\text{ W}/\text{m}^2$  (soit un apport maximal en provenance des vitrages de  $5\text{ W}/\text{m}^2$  de plancher pour un taux de vitrage de 1/6 du plancher), les valeurs de facteurs solaires s'établissent :

Objectif de d'apports	Nord	Nord-Est	Est
<b>Très performant : <math>&lt;30\text{ W}/\text{m}^2</math></b>	<b>0,25</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>

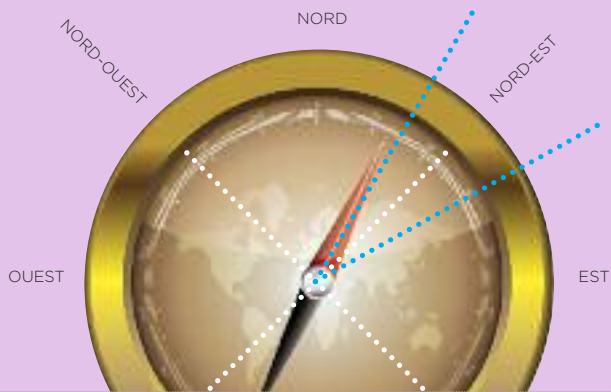
On atteint ici les limites de l'approche thermique, car avec ces valeurs on détériore l'utilisation de la lumière naturelle. Il est donc nécessaire de relever l'objectif d'apport à  $40\text{ W}/\text{m}^2$  pour ne pas grever les performances en lumière naturelle.

Objectif de d'apports	Nord	Nord-Est	Est
<b>Performant : <math>&lt;40\text{ W}/\text{m}^2</math></b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>	<b>0,25</b>

Comme indiqué plus haut, le niveau de protection doit s'ajuster en taux de vitrage ramené au  $\text{m}^2$  de plancher, pour apporter la même quantité de lumière naturelle utile :

Taux de percement	Nord	Nord-Est	Est
12% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,53	0,40	0,33
<b>16% surface vitrage/<math>\text{m}^2</math> plancher</b>	<b>0,40</b>	<b>0,30</b>	<b>0,25</b>
20% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,32	0,24	0,20
25% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,26	0,19	0,16
30% surface vitrage/ $\text{m}^2$ plancher	0,21	0,16	0,13

Ces valeurs sont compatibles comme précédemment avec un objectif d'autonomie lumineuse de 80 %.



Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,1

Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,12

Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest	horizontal
0,40	0,53	0,53	0,40	0,53	0,16
<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>0,40</b>	<b>0,30</b>	<b>0,40</b>	<b>0,12</b>
0,24	0,32	0,32	0,24	0,32	0,10
0,19	0,26	0,26	0,19	0,26	0,08
0,16	0,21	0,21	0,16	0,21	0,06

## ANNEXE 3 : LES PROTECTIONS SOLAIRES DES BAIES

Les systèmes d'occultation d'un bâtiment peuvent être de tout ordre, on les classe généralement en 3 typologies :

- Les protections horizontales (auvents, ou arêtes horizontales).
- Les masques complets ou loggia (protection horizontale et protections verticales).
- Les brise-soleil ou lames.

On distingue généralement les lames verticales qui sont plus adaptées à un soleil bas et donc au début et fin de course du soleil (Est ou Ouest), des lames horizontales, plus adaptées à un soleil haut et frontal (orientation nord ou sud en fonction de l'hémisphère).

Le rayonnement solaire global qui atteint les parois d'un bâtiment est la somme :

- Du rayonnement direct issu du soleil.
- Du rayonnement diffusé par le ciel et les nuages,
- Du rayonnement réfléchi et diffusé par l'environnement, en particulier par le sol.

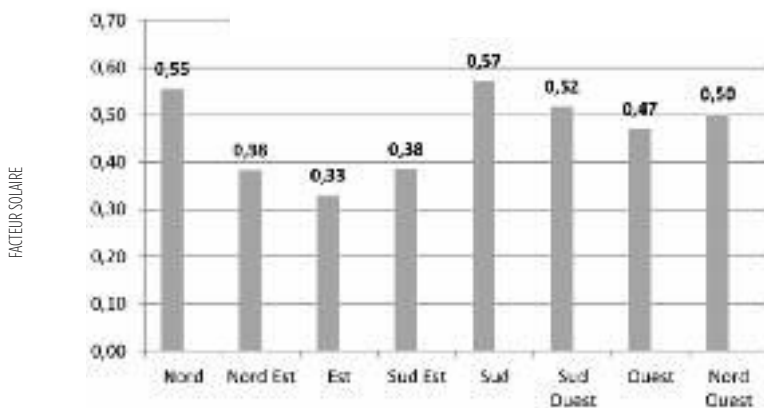
La quantité totale d'énergie arrivant sur une surface est appelée énergie incidente globale. Elle dépend principalement de l'intensité du rayonnement solaire et de la nébulosité, de l'angle entre le rayonnement solaire direct et la surface de la paroi.

A la Réunion, les apports solaires journaliers sur une surface horizontale sont en moyenne de 5 à 6 kWh/m<sup>2</sup> avec une puissance maximale de 1kW/m<sup>2</sup> au zénith.

### Dimensionnement géométrique des protections

Dans cette approche, on se préoccupe d'éliminer la composante directe de l'ensoleillement sans s'intéresser aux aspects énergétiques. Notons que a minima cette démarche garantit l'atteinte des facteurs solaires suivants qui correspond à l'élimination de la composante directe du rayonnement (voir figure ci-dessous).

PROTECTION SOLAIRE OPTIMALE PAR ORIENTATION POUR TRAITER LA COMPOSANTE DIRECTE

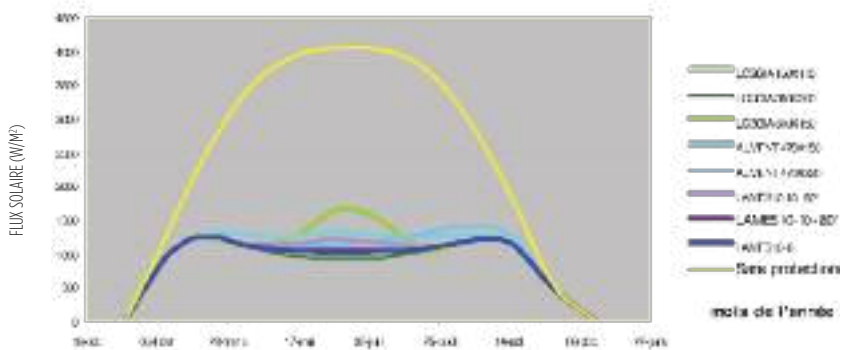


## Dimensionnement énergétique des protections

Pour calculer précisément les facteurs solaires, il est nécessaire de prendre en compte les paramètres énergétiques des composants en jeu pour modéliser une fenêtre et sa protection.

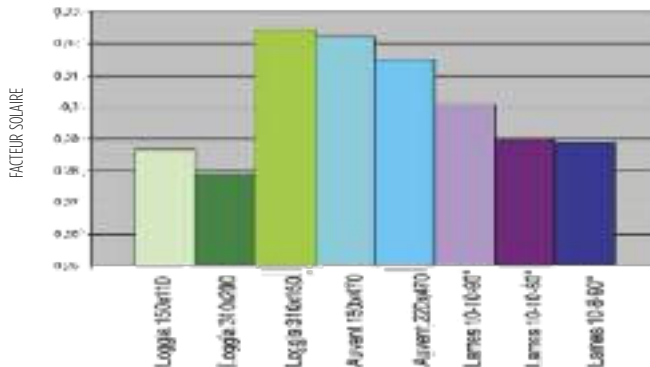
Dans un premier temps, sont implémentés les paramètres qui définissent le vitrage pris isolément (dimensions et propriétés). Les paramètres qui définissent les protections solaires (type de dispositif, emplacement, dimension...) sont définis quant à eux à partir du pré-dimensionnement de la méthode visuelle précédente. Pour chaque dispositif, on obtient ainsi la quantité d'énergie transmise à l'ambiance. Cet indicateur permet alors la comparaison des dispositifs.

On a représenté ci-dessous ici la quantité de flux solaire transmise au local pour chaque type de protection solaire (la courbe jaune représente un vitrage sans protections). Dans l'ensemble les protections solaires sont toutes efficaces et réduisent les apports solaires de plus de la moitié.



Si on compare la quantité de flux transmis au local pour chaque protection, on voit se dessiner un classement par type. Le type de protection le plus efficace s'il est correctement dimensionné reste la loggia. Puis viennent les lames. Bien que ce soit cohérent géométriquement, on notera que diminuer l'écart entre les lames est aussi efficace que donner une inclinaison aux lames. Ces deux paramètres (écart et inclinaison) permettent de diminuer significativement l'apport de flux solaire et de tendre vers une efficacité presque équivalente à une loggia (courbes bleue foncé et prune). L'auvent reste le dispositif le moins performant, sauf si on ajoute des protections verticales (loggia).

Une interpolation de la courbe permet d'évaluer pour chaque protection, la quantité totale d'énergie transmise au local durant une année. Le rapport de cette quantité d'énergie transmise annuelle sur la quantité d'énergie incidente annuelle donne le facteur solaire dimensionné énergétiquement (exemple de calcul ci-dessous).



Dans cet exemple, la loggia surdimensionnée reste le dispositif le plus efficace mais le plus lourd architecturalement. Les lames sont la solution la plus efficace pour un impact sur l'enveloppe moindre.

## ANNEXE 4 : L'INERTIE THERMIQUE

### L'inertie

Jusqu'ici, notre approche statique s'est cantonnée à étudier l'échange moyen du local. Le comportement dynamique (évolution heure par heure) d'un bâtiment a une importance déterminante sur la puissance maximale appelée (Climatisation artificielle) ou les extrema de températures (climatisation naturelle).

En climatisation artificielle, le dimensionnement de la puissance - et donc l'investissement initial - dépend directement de la puissance appelée maximale. L'inertie thermique intervient aussi sur la consommation d'énergie des locaux fonctionnant en mode intermittent. Ces deux arguments soulignent l'intérêt pour le concepteur et le maître d'ouvrage à opérer les bons choix au stade du projet. Une correction ultérieure du comportement dynamique est quasiment impossible.

La conception dynamique relève d'une stratégie d'ensemble, c'est pourquoi cette question est abordée non pas paroi par paroi (comme pour les aspects énergétiques), mais de façon globale.

Comme le montre le tableau suivant l'amortissement et le retard des sollicitations appliquées directement dans l'ambiance est bien moindre qu'à l'extérieur. Dans le tableau qui suit nous donnons l'éventail des possibilités à partir de matériaux et parois classiques :

	Amortissement	Retard
Sollicitations appliquées à l'extérieur	jusqu'à 0.01	jusqu'à 12 h et plus
Sollicitations appliquées sur les faces intérieures	jusqu'à 0.4	jusqu'à 3 h

Pour le transfert de chaleur entre les faces intérieures et ambiance, le paramètre déterminant est l'effusivité de la couche de matériau en contact avec l'ambiance :  $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ .

Plus le matériau est effusif, plus la paroi amortit les fluctuations de températures intérieures et les flux (solaires ou éclairage) reçus. C'est pourquoi il faut préférer l'isolation extérieure à l'isolation intérieure et des matériaux lourds placés en faces intérieures :

Matériaux	Polystyrène	Bois	Parpaing	Béton plein	Marbre
Effusivité en $J/(m^2.K.\sqrt{s})$	32	450	1000	1950	2350

Les matériaux possédant la meilleure effusivité sont :

- Pour les planchers : le béton plein (carrelé ou non) ou, mieux encore, le marbre, les pierres dures.

- Pour les parois verticales : le grès, les roches volcaniques, et dans des performances moindres les voiles de béton, les parpaings.

Si l'on hésite entre deux types de matériaux, on tranchera à l'aide du critère d'effusivité. Les épaisseurs nécessaires pour optimiser l'inertie quotidienne d'un local sont de l'ordre de 1 à 1,5 fois l'épaisseur de pénétration. On notera que la plupart des matériaux atteignent leur épaisseur optimale entre 10 et 15 cm.

#### CONCEPTION DYNAMIQUE D'UN LOCAL

Plusieurs stratégies de dimensionnement sont envisageables selon les conditions de fonctionnement de l'installation :

#### **Climatisation en fonctionnement permanent**

La possibilité d'amortissement de la charge dépend :

- Du pourcentage d'apport solaire direct par les vitrages : amortissement limité (entre 0,7 et 0,8 pour une inertie moyenne).

- Du pourcentage d'apports internes : amortissement faible en général.

- Du pourcentage d'apport solaire par les parois opaques : fortement amortissable.

L'étalement des charges pourra être obtenu :

- En différant vers la nuit, les apports solaires à l'Ouest qui atteignent leur maximum en même temps que la température extérieure.

- Comme il est difficile de différer vers la nuit, le flux solaire reçu à l'Est le matin (un retard de plus de 12 h nécessite des épaisseurs importantes de matériaux), on peut au contraire chercher à transmettre instantanément, grâce à une faible inertie de la paroi, les flux solaires reçus à l'Est pour qu'ils ne contribuent pas à la pointe journalière survenant l'après-midi.

#### **En fonctionnement intermittent**

Pour les locaux à très faible et courte occupation (salle de réunion), la recherche d'une faible inertie peut se justifier pour des raisons de mise en régime rapide du local.

Les intermittences quotidiennes, jour/nuit, sont le cas le plus fréquent dans le tertiaire. La stratégie à appliquer est la même, que celle des locaux fonctionnant en permanence. Une conception à forte inertie vise un double objectif :

- Une diminution de la puissance appelée.

- Une diminution de la consommation en différant les apports maximaux dans les plages horaires où le local est inoccupé. L'action régulatrice de l'inertie conduit à moyenniser les apports sur 24 h, et à des économies d'énergies substantielles : de l'ordre de 20 % selon la conception dynamique du local.









**L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.**

**L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.**

**[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)**

