



Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal

Thierry Joffroy, Arnaud Misse, Robert Celaire, Lalaina Rakotomalala

► To cite this version:

Thierry Joffroy, Arnaud Misse, Robert Celaire, Lalaina Rakotomalala. Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal. 2017. hal-02025559

HAL Id: hal-02025559

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02025559>

Submitted on 19 Feb 2019

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

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

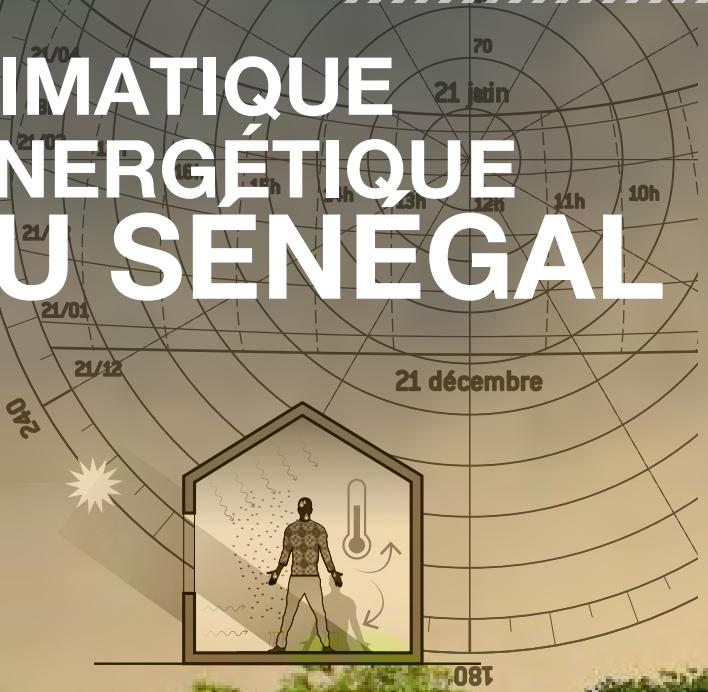
MINISTÈRE
DE L'ENVIRONNEMENT
ET DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE



DIRECTION DE
L'ENVIRONNEMENT ET DES
ÉTABLISSEMENTS CLASSÉS

PROGRAMME NATIONAL
DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS GES
À TRAVERS L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT
PROJET DE PRODUCTION
DE MATERIAUX D'ISOLATION
THERMIQUE À BASE DE TYPHA

ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS AU SENEGAL





MINISTÈRE
DE L'ENVIRONNEMENT
ET DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE

DIRECTION DE
L'ENVIRONNEMENT ET DES
ÉTABLISSEMENTS CLASSÉS

PROGRAMME NATIONAL
DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS GES
À TRAVERS L'EFFICACITÉ ÉNERGIQUE DANS
LE SECTEUR DU BÂTIMENT
PROJET DE PRODUCTION
DE MATERIAUX D'ISOLATION
THERMIQUE À BASE DE TYPHA



ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS AU SÉNÉGAL



RÉALISATION



Direction de la rédaction

THIERRY JOFFROY, président de CRAterre
ARNAUD MISSE, CRAterre

Rédaction

ROBERT CELAIRE, ENSA montpellier
LALAINA RAKOTOMALALA, CRAterre

Contributions

ERNEST DIONE, coordonateur national PNNEB/Typha
MANSOUR SOW, PNNEB/Typha
MBACKÉ NIANG, PNNEB/Typha
MOHAMED ABDESELAM, BE solener
NURIA SÁNCHEZ MUÑOZ, CRAterre
SÉBASTIEN MORISSET, CRAterre
MURIELLE SERLET, CRAterre-ensag
NOËL GEAY

Remerciements

PHILIPPE GARNIER, CRAterre
GIULIA SALA, CRAterre-ensag
ÉTIENNE SAMIN, CRAterre
ROMAIN ANGER, CRAterre, amaco

Illustrations et mise en page

ARNAUD MISSE, CRAterre

Crédits photo

CRAterre, sauf mention contraire



Sommaire

1	Introduction.....	05
2	Le climat du Sénégal.....	09
2.1.	Généralités	09
2.2.	Paramètres climatiques.....	11
2.3.	Effets de site	13
3	Le confort en zone tropicale.....	15
3.1.	Le confort hygrothermique.....	15
3.2.	Diagramme bioclimatique.....	15
3.3.	Autres comforts sensoriels et paramètres correspondants	19
3.4.	Paramètres de confort à évaluer	21
4	Principes généraux de conception	23
4.1.	Dispositifs architecturaux	23
4.2.	Dispositifs techniques	26
5.	Recommandations pour la conception des bâtiments	29
5.1.	Inscription dans le site.....	29
5.2.	Végétalisation des espaces extérieurs et abords	31
5.2.	Espaces intermédiaires et espaces tampons.....	35
5.3.	Protection solaire et isolation de l'enveloppe	37
5.4.	Ventilation et étanchéité	46
6	Recommandations sur les équipements	55
6.1.	Les brasseurs d'air	55
6.2.	Les autres systèmes de rafraîchissement à faible consommation d'énergie	56
6.3.	La climatisation à compression à faible consommation d'énergie	57
7.	Spécificités par zones climatiques	60
7.1.	Dakar.....	62
7.2.	Saint-Louis	66
7.3.	Linguère.....	70
7.4.	Tambacounda.....	74
7.5.	Ziguinchor.....	78
8.	Conclusion	82
	Bibliographie	84



Jeff Attaway - WikipediaCC BY 2.0

1. Introduction

Face à la raréfaction des ressources énergétiques fossiles et aux prévisibles augmentations structurelles à moyen terme du prix des énergies fossiles, ainsi qu'aux conséquences du réchauffement climatique qui, au Sénégal se traduiront par une augmentation de la température moyenne et davantage de journées très chaudes, l'accès au confort thermique pour tous et toutes et, notamment, la protection contre la chaleur dans l'habitat sont des questions essentielles.

Sur le continent africain, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) représente 80% des consommations énergétiques (hors bois de feu et biomasse) et des émissions de gaz à effet de serre (G.E.S). Aujourd'hui si l'Afrique entière ne contribue qu'à hauteur de 4% des émissions mondiales de G.E.S, cette contribution pourrait fortement augmenter à l'avenir. Les causes de cette augmentation sont la croissance démographique, l'urbanisation massive, l'augmentation du P.I.B. par habitant et l'exode rural qui conduisent davantage d'habitants à recourir à des énergies commerciales d'origine fossile.

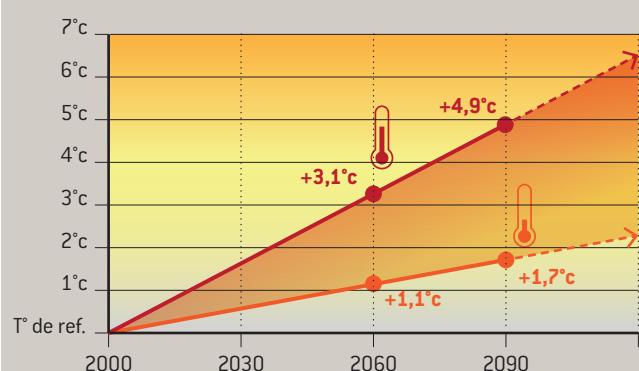
Il est donc essentiel de maîtriser à la fois la hausse des émissions de G.E.S. et la facture énergétique des ménages, des entreprises et du pays par une meilleure maîtrise de la consommation énergétique d'origine fossile. Selon les prévisions, au Sénégal, le prix de l'électricité dont le combustible d'origine est à 90% du fioul importé, devrait largement augmenter.

Par anticipation, il est donc essentiel de concevoir des bâtiments à la fois moins consommateurs d'énergie et plus confortables. Cela est possible en appliquant des principes de bon sens, à appliquer sur les choix architecturaux et les procédés constructifs.

Il s'agit avant tout de se protéger de la chaleur à l'aide de divers dispositifs de protection solaire et d'optimiser la ventilation naturelle grâce à une conception bien pensée qui limite le nombre de bâtiments nécessitant une climatisation, et en minimisant son usage dans ceux qui seront climatisés.

QUELQUES CHIFFRES

PRÉVISION D'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES



SENÉGAL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les températures moyennes annuelles devraient augmenter de 1,1°C à 3,1°C d'ici 2060, et de 1,7°C à 4,9°C d'ici 2090 avec des augmentations plus rapides à l'intérieur du pays que dans les zones côtières. Toutes les projections indiquent une hausse importante de la fréquence des jours et des nuits considérés « chauds » : ces augmentations devraient se produire plus rapidement au Sud et à l'Est du pays. A l'inverse les jours et nuits considérés comme « froids » seront moins fréquents. Concernant les précipitations, les projections sont encore incertaines : les épisodes de sécheresse et les inondations que connaît déjà le pays pourraient s'accentuer.

Une source d'inspiration pour mener à bien ce travail est à puiser dans les savoirs scientifiques tirés de l'observation des architectures traditionnelles sénégalaïses et ouest africaines. Mais depuis l'époque coloniale et l'époque des architectures métisses néo-soudanaises, d'autres pratiques de protection ont été utilisées qui peuvent aussi servir de référence pour la conception contemporaine de bâtiments confortables et énergétiquement efficaces.

Ce guide, réalisé dans le cadre du programme PNNEB/TYpha (Programme National de réduction des émissions de GES à travers l'Efficacité Energétique dans le secteur

du Bâtiment - Projet de Production de matériaux d'isolation thermique à base de Typha) a pour objectif de fournir des informations sur les principes et sur les bénéfices de ce type de conception auprès d'un large public de professionnels (décideurs politiques, maîtres d'ouvrage publics et privés, maîtres d'œuvre de l'architecture et de l'ingénierie du bâtiment, entreprises,...). Il fait également la promotion de l'utilisation de matériaux locaux, notamment ceux à base de Typha et de terre, en les intégrant dans une démarche d'architecture énergétiquement efficace priorisant clairement une démarche d'architecture bioclimatique.

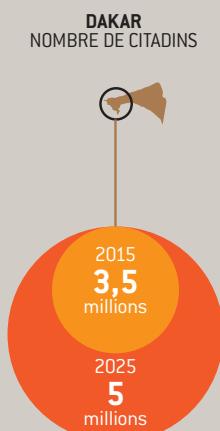
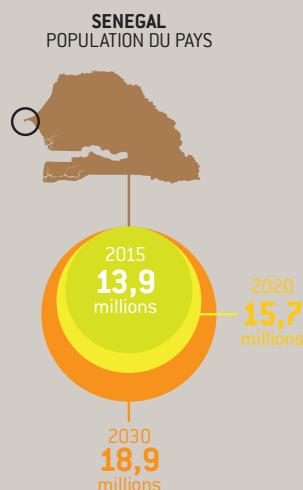
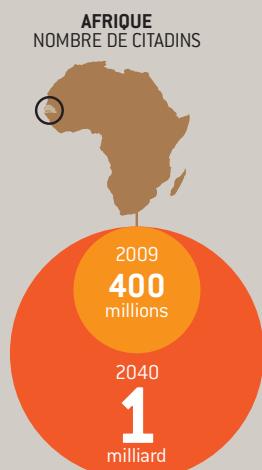
QUELQUES CHIFFRES

ÉVOLUTION DÉMOGRAPHIQUE ET BOOM URBAIN

En Afrique, le boom urbain qui est en cours va se traduire par une augmentation de la population de 400 millions de citadins en 2009 à 1 milliard en 2040. En

2015, le Sénégal compte 13,9 millions d'habitants. Sa croissance annuelle est estimée à 2,5% ce qui conduirait à une population de 15,7 millions d'habitants d'ici 2020 et 18,9 millions en 2030. Dakar,

quinzième ville la plus peuplée d'Afrique, pourrait passer de 3,5 à 5 millions d'habitants entre 2015 et 2025, soit augmenter de 70% en 10 ans.

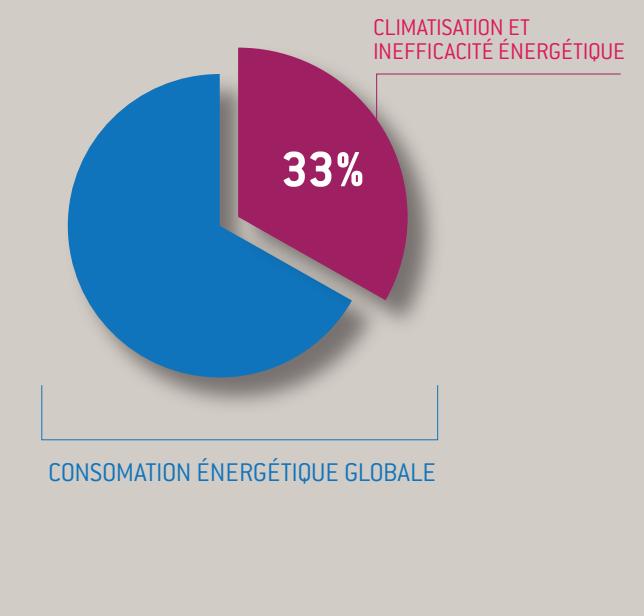


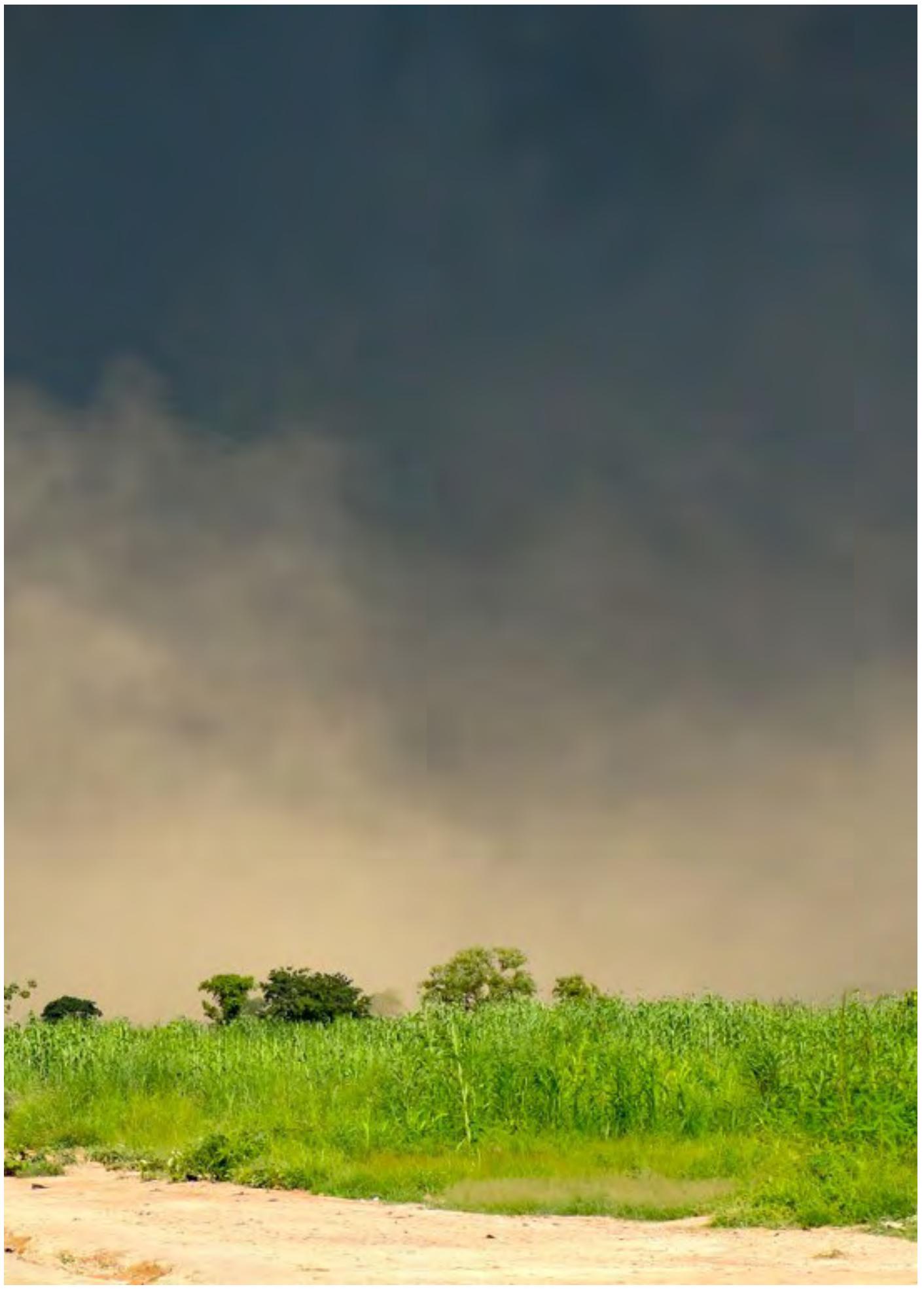
Cependant ce guide n'aborde pas la quantification des performances de chaque composant architectural (toit, murs,...) des dispositifs techniques (brasleur d'air, climatisation performante,...) ou du bâtiment dans son ensemble. Il ne développera pas non plus quantitativement l'impact énergétique global et l'impact en termes d'amélioration du confort de l'usage de ces différents matériaux et composants performants. Il est tout à fait envisageable que des versions ultérieures de ce travail soient plus approfondies en apportant des outils d'aide à la conception et au dimensionnement, des valeurs de référence ou des valeurs d'objectifs en se positionnant par exemple par rapport aux objectifs de la future réglementation thermique pour le Sénégal.

QUELQUES CHIFFRES

LE COÛT DE L'INEFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

En 2007, 33% de la consommation totale d'électricité du Sénégal serait due à la climatisation liée à une inefficacité énergétique du parc des bâtiments existants dont le développement s'est fait majoritairement selon des modèles européens inadaptés aux conditions climatiques locales. Le développement de pratiques architecturales simples pour se protéger de la chaleur et de matériaux locaux isolants pourrait permettre d'accéder à plus de confort tout en limitant la facture énergétique





Jeff Attaway - WikipediaCC BY 2.0

2. le climat du Sénégal

2.1. généralités

Le Sénégal possède un climat tropical variant du tropical de savane (partie Sud-Ouest du pays) au tropical désertique ou semi-désertique (reste du pays). Les températures moyennes mensuelles sont supérieures à 18°C pour tous les mois de l'année. Les conditions climatiques du pays sont contrastées entre l'intérieur des terres et la région littorale : plus on s'éloigne de la côte, plus les températures moyennes et maximales s'élèvent.

Le climat est marqué par deux saisons principales : la saison sèche (ou non pluvieuse, pour les zones du littoral qui conservent, en raison de la proximité de la mer, une humidité relative de l'air ambiant élevée) et la saison des pluies, appelée aussi hivernage. Pendant la saison des pluies, on observe que les précipitations décroissent lorsqu'on va vers le Nord. Elles sont plus abondantes et durent plus longtemps dans le Sud. De plus les précipitations sont très variables d'une année à l'autre.

Trois masses d'air principales, dont la circulation est facilitée par un relief peu marqué, déterminent également les conditions climatiques du pays :

- l'alizé maritime de direction Nord/ Nord-Ouest à Nord/Nord-Est, qui apporte constamment de l'humidité et apporte de la fraîcheur en hiver. Sa zone d'influence est principalement la côte et s'amenuise en allant vers le Sud. L'alizé est surtout influent de Novembre à Mai ;
- l'harmattan qui souffle depuis la direction Nord-Est à Est/Nord-Est qui est frais la nuit et chaud le jour, et transporte souvent des poussières et des sables fins. Il est surtout influent à l'intérieur du pays ;
- la mousson qui souffle du Sud-Est et arrive en période estivale. C'est elle qui apporte la pluie. Elle s'assèche en remontant à l'intérieur du pays. Elle est donc surtout influente au Sud du Sénégal.



LE ZONAGE CLIMATIQUE AU SÉNÉGAL

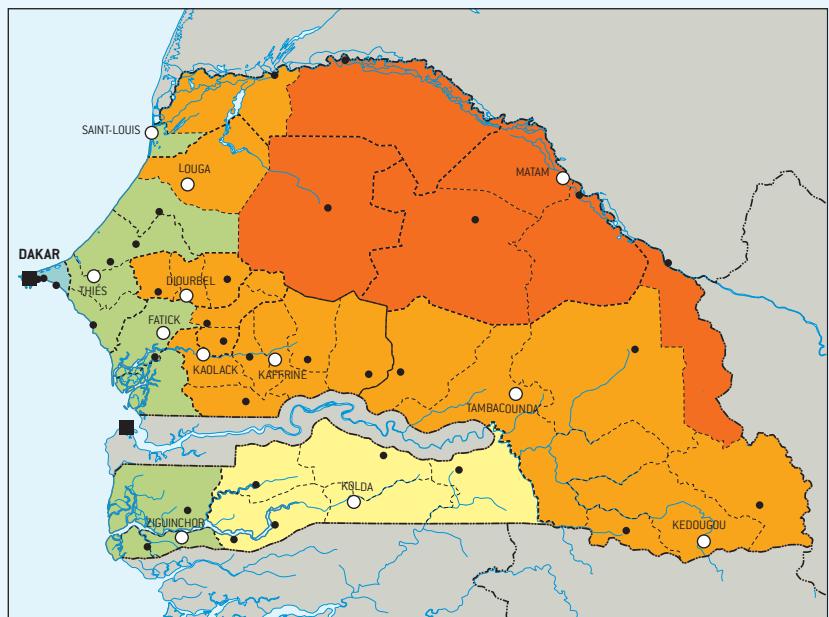
L'ASN (Association Sénégalaise de Normalisation) a entrepris un Avant-Projet de Norme pour établir un premier zonage climatique au Sénégal dans le cadre du programme PNNEB (Programme National de réduction des émissions de GES à travers l'Efficacité Energétique dans le secteur du Bâtiment). Ce zonage est un préalable à la mise en place d'une réglementation thermique des bâtiments.

Ce premier zonage climatique a pour but de regrouper différentes zones homogènes qui présentent des caractéristiques climatiques similaires, afin de « pouvoir appliquer des études ou une réglementation d'une manière efficace et spécifique » à chaque zone.

Ce zonage tient compte des différents aspects climatiques : la pluviométrie, la température, l'humidité, l'ensoleillement et la nébulosité.

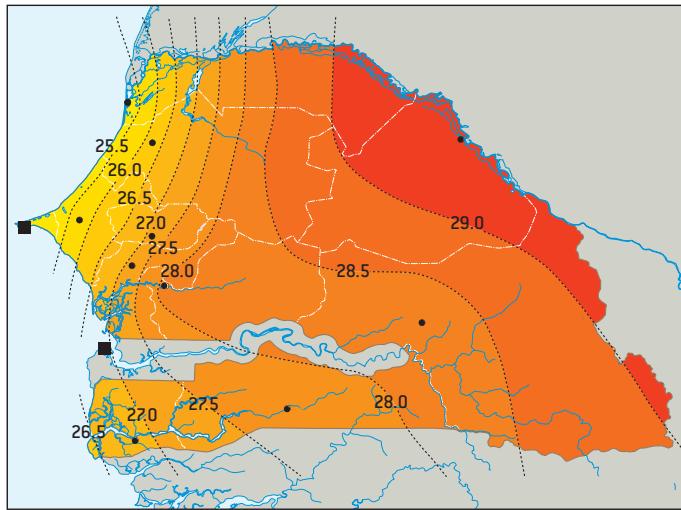
Ainsi le territoire a été découpé en 5 zones climatiques homogènes dont les frontières suivent le tracé des départements :

- une zone ayant pour station de référence Dakar ;
- une zone située le long de la côte Ouest ayant pour station de référence Ziguinchor ;
- une zone située à l'Est ayant pour station de référence Tambacounda ;
- une zone située au Sud du Sénégal ayant pour station de référence Kolda ;
- une zone située au Nord-Est du pays ayant pour station de référence Matam.

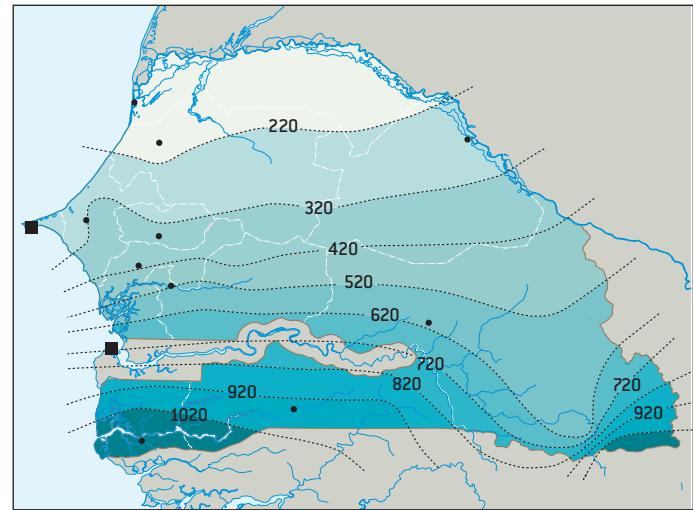


Proposition de zonage climatique du Sénégal

Celui-ci partage le Sénégal en cinq zones climatiques pour la définition des conditions de confort hygrothermique.



Répartition spatiale des températures moyennes au Sénégal (en °C). Source : <http://www.iao.florence>



Précipitations annuelles moyennes sur la période 1971-1990 (en mm/an)

2.2. paramètres climatiques

Plusieurs paramètres climatiques listés ci-après sont importants à connaître pour concevoir des logements confortables, adaptés au climat. Des fichiers horaires de ces divers paramètres sont utilisés pour les méthodes de simulations dynamiques et de calculs détaillés. Toutefois, en première approche pour une caractérisation globale des conditions climatiques et pour une conception d'ensemble, on peut se contenter de connaître les valeurs des moyennes maximales et minimales mensuelles, ainsi que les maxima et minima atteints.

Température de l'air extérieur

Pour les villes de Dakar, Saint-Louis, Ziguinchor, Linguère, Tambacounda :

- les températures mensuelles minimales moyennes varient de 15°C à 20°C ;
- les températures mensuelles maximales moyennes varient de 31°C à 41°C et ;
- les températures mensuelles moyennes se situent entre 20°C et 34°C.

Précipitations

La longueur moyenne de l'hivernage, autrement dit la saison des pluies, varie sensiblement en adoptant le même profil. Les régions sud, les plus arrosées bénéficient de plus de 130 jours de pluies par an. Alors que les régions nord, les plus sèches, comptent moins de 50 jours de précipitations.

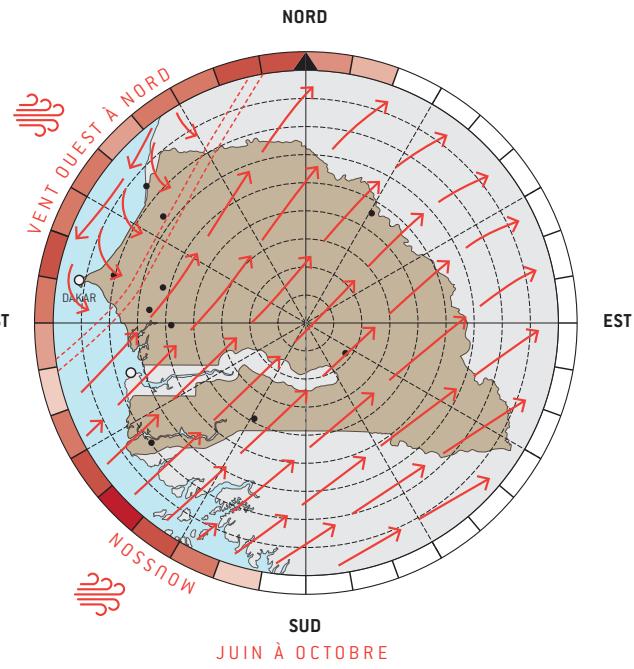
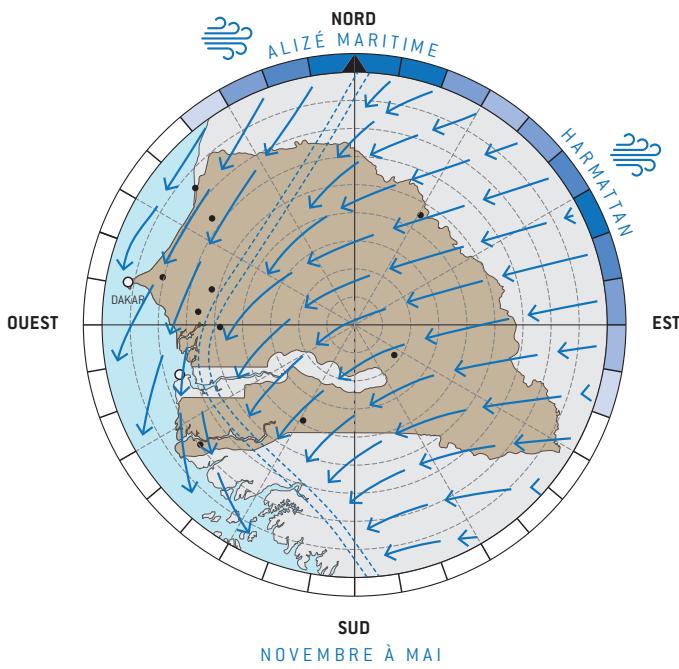
Humidité relative de l'air

Pour les villes de Dakar, Saint-Louis, Ziguinchor, Linguère, Tambacounda :

- l'humidité relative minimale moyenne varie de 11% à 46% ;
- l'humidité relative maximale moyenne varie de 95% à 99% ;
- l'humidité relative moyenne se situe entre 22% et 92%.

Zones à risque d'inondation

Les risques d'inondation constituent le risque naturel le plus important au Sénégal, notamment en raison de sa situation côtière et des crues des fleuves Gambie et Sénégal. De nombreuses villes subissent des inondations : Dakar, Saint-Louis, Matam, Kaolack, Joal, Ziguinchor, Podor, Thiès, Diourbel, Kolda, Kaffrine ou Tambacounda. Dans les zones urbaines cette menace est d'autant plus importante, notamment dans la région de Dakar du fait de déficiences du système de drainage des eaux et de l'urbanisation rapide qui imperméabilise les sols. Ces événements ont lieu lors d'épisodes de précipitations extrêmes durant la saison des pluies.



Vent

La direction et la vitesse des vents avec répartition statistique sont données par la rose des vents. Par exemple la rose des vents annuelle de Dakar met en évidence la prédominance des composantes alizés maritimes et harmattan.

Rayonnement reçu

Les données d'ensoleillement utiles pour les investigations sur le confort et les performances énergétiques sont les valeurs du rayonnement solaire global et du rayonnement solaire diffus sur une surface horizontale qui sont exprimées en kWh/m², avec des valeurs horaires pour les calculs de simulation dynamiques et des valeurs journalières mensuelles moyennes pour les méthodes statiques et les calculs simplifiés.

Dans les méthodes de préconception, la connaissance de la fraction d'ensoleillement mensuelle (nombre d'heures d'insolation réel divisé par la durée du jour), et de la nébulosité du ciel peut également s'avérer utile.

Dans les villes suivantes, Dakar, Saint-Louis, Ziguinchor, Linguère et Tambacounda, le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale est :

- au minimum de 3,5 à 4,6 kWh/m²/jour entre août et janvier ;
- au maximum de 5,3 à 7,2 kWh/m²/jour entre avril et mai.

Course du soleil

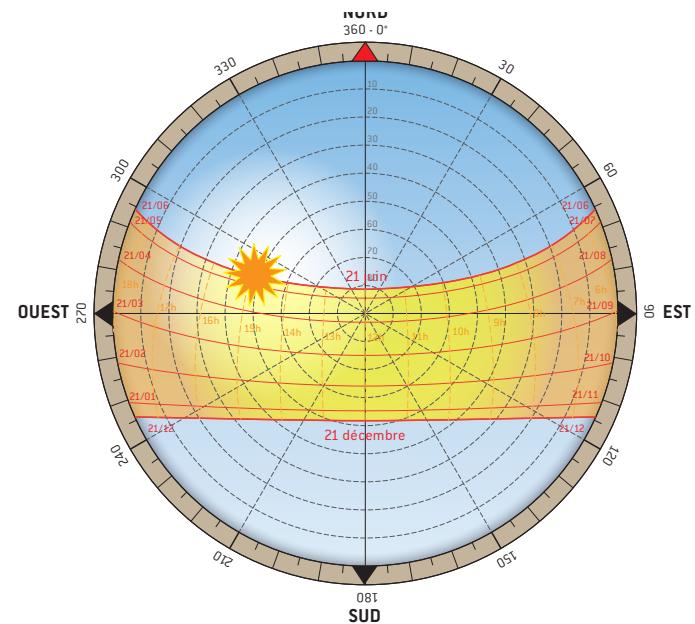


Diagramme solaire de Dakar

Celui-ci représente une projection sphérique du ciel sur un plan, soit une vue complète de la voûte céleste, sur laquelle sont représentées les différentes trajectoires du soleil en fonction des saisons.



Pays Bassari - milieu naturel



Dakar - milieu minéralisé

2.3. effets de site

La topographie, et notamment l'altitude, influence la température, l'humidité de l'air et la pression atmosphérique. Dans une zone climatique donnée, les zones d'altitude élevées sont plus fraîches que les zones de plus basse altitude. La température baisse d'environ 1 °C tous les 150 m de gain d'altitude. Le Sénégal possède un relief majoritairement plat et peu marqué, avec une altitude moyenne de 200 m.

Le point culminant avec une altitude de 581m se trouve à Sanbagalou, au sud-est du pays, sur la frontière avec la Guinée.

Dans les environnements **urbains denses ou semi-denses**, la température peut localement être plus élevée que dans les zones rurales voisines, en raison de la nature des matériaux utilisés qui absorbent davantage le rayonnement solaire que le milieu naturel, de la faible densité de végétation, de la moindre évacuation par le vent de la chaleur accumulée et enfin des activités humaines (transport automobile, usines, etc.). Cette chaleur est en effet captée et stockée notamment par les surfaces sombres et à forte inertie thermique telles que le bitume des voiries et le béton des bâtiments.

Ce phénomène est appelé **effet d'îlot de Chaleur Urbain** (ou ICU). Lors des périodes à faible régime éolien et à fort ensoleillement, l'ICU conduit à des élévations des températures moyennes en ville de plusieurs degrés, avec des maxima diurnes pouvant dépasser 5° ou 6°C.

« Le milieu minéralisé peut connaître un accroissement maximal de température de 7,5°C par rapport au milieu végétalisé »

« La nuit, l'écart maximal de température entre le milieu minéralisé et le milieu végétalisé est de +5,5°C. »

Source: Université de La Réunion

Cet effet peut être considérablement réduit notamment :

- en favorisant la végétalisation des villes (espaces extérieurs, voiries mais aussi toitures et façades des bâtiments) ;
- en privilégiant les matériaux ayant un fort albédo (pouvoir de réflexion) ;
- en améliorant les morphologies urbaines et architecturales facilitant l'écoulement du vent ;
- en réduisant les émissions anthropiques par les véhicules – utilisation des transports en commun, modes doux, organisation des transports et du stationnement - et les activités exothermiques en ville.

L'effet d'îlot de Chaleur Urbain génère un cycle infernal. L'ambiance urbaine s'échauffe inexorablement, entraînant des besoins en climatisation de plus en plus importants. Ceux-ci contribuent de manière significative au réchauffement en ajoutant au bilan thermique global l'énergie dégagée par les compresseurs. Ainsi, plus la climatisation se développe, plus la ville s'échauffe, et plus les besoins en climatisation augmentent.

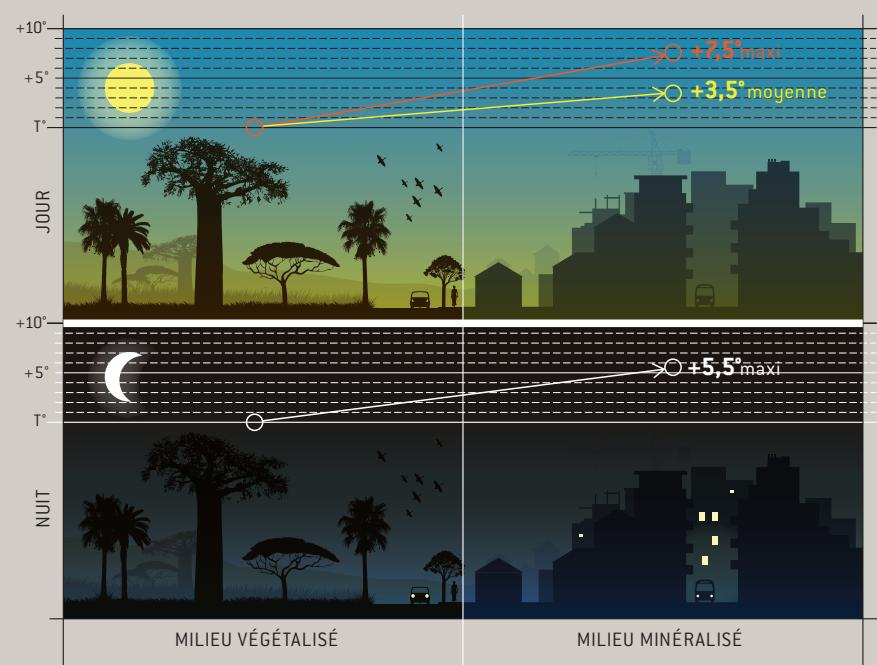
Un cycle vertueux doit être favorisé. La réduction de l'ICU rendra plus pertinente la mise en oeuvre de solutions bioclimatiques en milieu urbain.



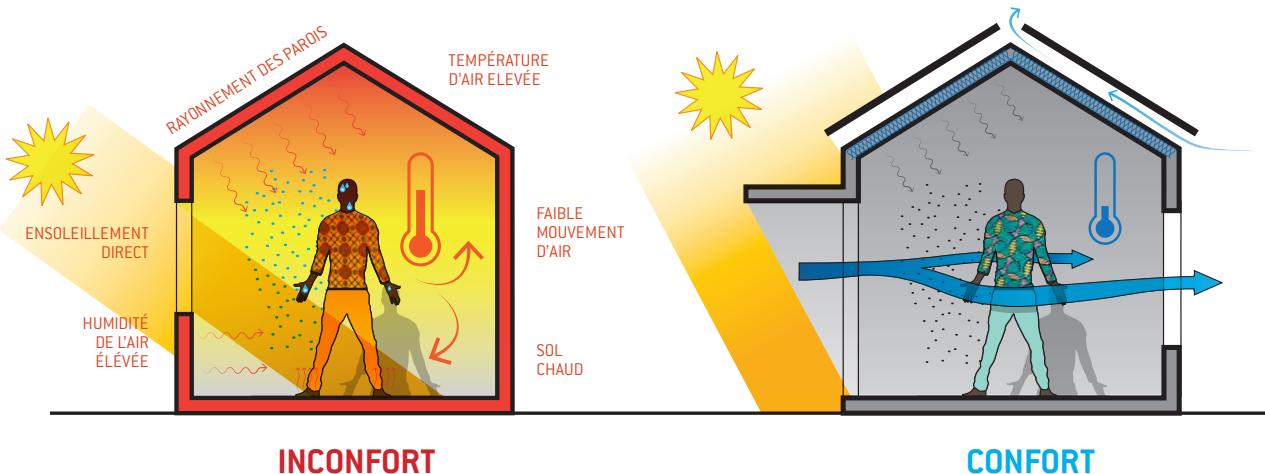
L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) : UN EFFET CONSIDÉRABLE

Un exemple d'étude menée à l'Île de la Réunion (climat tropical insulaire), où la température a été mesurée tout au long de la journée dans 3 types de milieux (végétalisé, semi-minéralisé, minéralisé), montre que :

- au cours de la journée, le milieu minéralisé peut connaître un accroissement maximal de température de 7,5°C par rapport au milieu végétalisé ;
- l'écart moyen de température au cours de la journée entre le milieu minéralisé et le milieu végétalisé est de +3,5°C ;
- la nuit, l'écart maximal de température entre le milieu minéralisé et le milieu végétalisé est de +5,5°C.



3. le confort en zone tropicale



3.1. le confort hygrothermique

Le corps humain produit de la chaleur en plus ou moins grande quantité selon l'activité physique. Pour se maintenir à une température constante d'environ 37°C, il a besoin de se réguler via des échanges thermiques avec l'extérieur en modifiant :

- le flux sanguin (pour conserver les calories, les vaisseaux sanguins se contractent – vasoconstriction, pour perdre les calories les vaisseaux sanguins se dilatent – vasodilatation) ;
- la transpiration : l'évaporation de la sueur qui nécessite un apport de chaleur (chaleur latente de vaporisation de l'eau) préleve celle-ci au corps et lui permet d'évacuer la «surchauffe». Ce processus est d'autant plus efficace que l'air est plus sec et sa vitesse à la surface de la peau est élevée.

Moins ces processus de régulation thermique seront sollicités, plus le corps sera dans sa zone dite de «confort physiologique hygrothermique». Au contraire plus ces processus seront sollicités, plus la sensation d'inconfort sera grande.

Ces échanges avec l'extérieur se font par différents modes de transferts de chaleur : rayonnement, convection, conduction et évaporation. Ils sont conditionnés par :

- l'habillement ;
- la température de l'air ambiant ;
- la température des parois environnantes ;
- l'humidité de l'air ;
- la vitesse de l'air ;
- l'intensité de l'activité de l'individu.

3.2. diagramme bioclimatique

Le **diagramme de confort** (ou diagramme psychrométrique) a été mis au point notamment par l'architecte-médecin Baruch Givoni par superposition de zones limites de sensation de température et d'humidité relative. Ce diagramme permet de visualiser des zones de confort hygrothermique physiologique pour des sujets acclimatés, au repos ou en activité sédentaire, et portant une tenue vestimentaire climatiquement adaptée. Ces zones de température de confort idéales varient en fonction du niveau d'acclimatation de l'individu, de sa corpulence, de ses habits et de son niveau d'activité.

A partir de cet outil, Givoni et Milne ont mis au point des **diagrammes bioclimatiques** qui permettent de visualiser les zones de température et d'humidité pour lesquelles des dispositifs architecturaux ou techniques permettent, en corrigeant les impacts du climat extérieur sur le climat généré à l'intérieur des bâtiments, d'étendre plus ou moins cette zone (également appelée polygone de confort). Le climat local est représenté dans ce diagramme heure par heure ou encore mois par mois, par des ensembles de points correspondant au couple température-humidité.

L'outil permet de choisir des stratégies conceptuelles (architecturales et techniques) à privilégier pour tel ou tel climat, pour optimiser le nombre d'heures de confort dans l'année en fonction des conditions de température et d'humidité et, en conséquence, réduire ou minimiser les consommations énergétiques du bâtiment.

LE POINT SUR : LES MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

Conduction

Dans un matériau solide dans lequel la température n'est pas uniforme, ou entre deux corps en contact n'ayant pas la même température, la conduction consiste à la propagation de la chaleur par transmission de l'agitation entre les molécules.

Convection

La convection correspond à un transfert de chaleur par mouvement d'une masse de fluide (gaz ou liquide). Pour l'air, lorsque celui-ci entre en contact avec une surface plus chaude, il s'échauffe en prélevant de la chaleur à la surface, devient moins dense, donc s'élève et laisse place à une masse d'air plus froid. Un mouvement, dit de **convection naturelle** (par opposition à la « convection forcée » où l'air est poussé ou aspiré par un ventilateur) se met alors en route.

Rayonnement

Le rayonnement est un transfert thermique qui s'effectue par le biais d'ondes électromagnétiques. Un corps émet de l'énergie thermique sous forme de rayonnement dépendant de la température absolue du corps ainsi que des caractéristiques physiques de sa surface. Ce mode de transfert de chaleur a lieu dans le vide et dans les milieux qui s'en rapprochent, c'est-à-dire les milieux gazeux notamment dans l'air. Ce mode de propagation d'énergie par rayonnement dans le vide explique que le soleil parvient à transmettre son énergie jusqu'à la surface de la terre.

Évaporation (changement de phase liquide-gaz)

L'évaporation correspond au passage de l'état liquide à l'état gazeux d'un fluide (par exemple passage de l'eau liquide à l'état de vapeur). Pour s'évaporer un fluide a besoin d'un apport d'énergie sous forme de chaleur : sous la pression atmosphérique, pour évaporer 1 litre d'eau, il faut apporter environ 540 kCal soit 630 Wh. L'évaporation implique donc un prélèvement de chaleur au milieu environnement, donc un rafraîchissement dont bénéficie en partie la surface d'échange, en l'occurrence la peau dans le cas du processus de sudation.

La conduction, la convection et le rayonnement sont des modes d'échanges de chaleur dit sensibles car ils n'engendrent pas de changements d'état tandis que le processus d'évaporation correspond à un échange de chaleur dit latent car il engendre un changement d'état (en l'occurrence l'eau liquide qui se transforme en eau gazeuse et change donc le niveau d'humidité de l'air).

LE POINT SUR : BILAN THERMIQUE DU CORPS

Les échanges thermiques entre le corps et l'environnement extérieur comprennent :

- le métabolisme (transformation de la nourriture en énergie) ;
- l'énergie rayonnante captée ou produite par le corps ;
- la chaleur par convection entre la surface de la peau, les vêtements et l'air ;
- la chaleur par conduction captée ou produite par le corps ;
- la chaleur par évaporation produite par le corps (via la respiration et la transpiration).

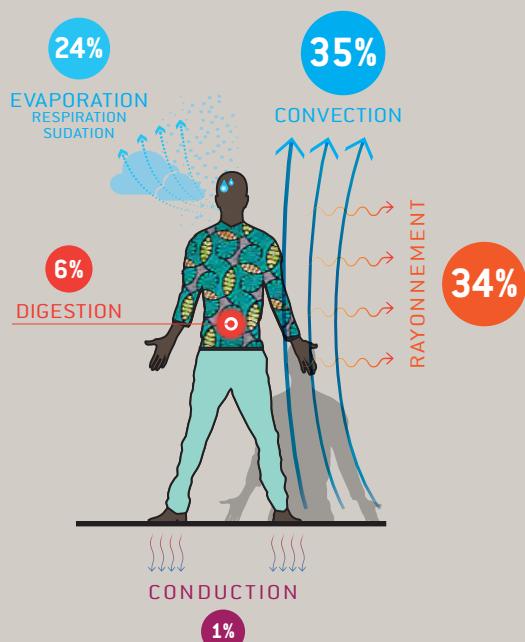
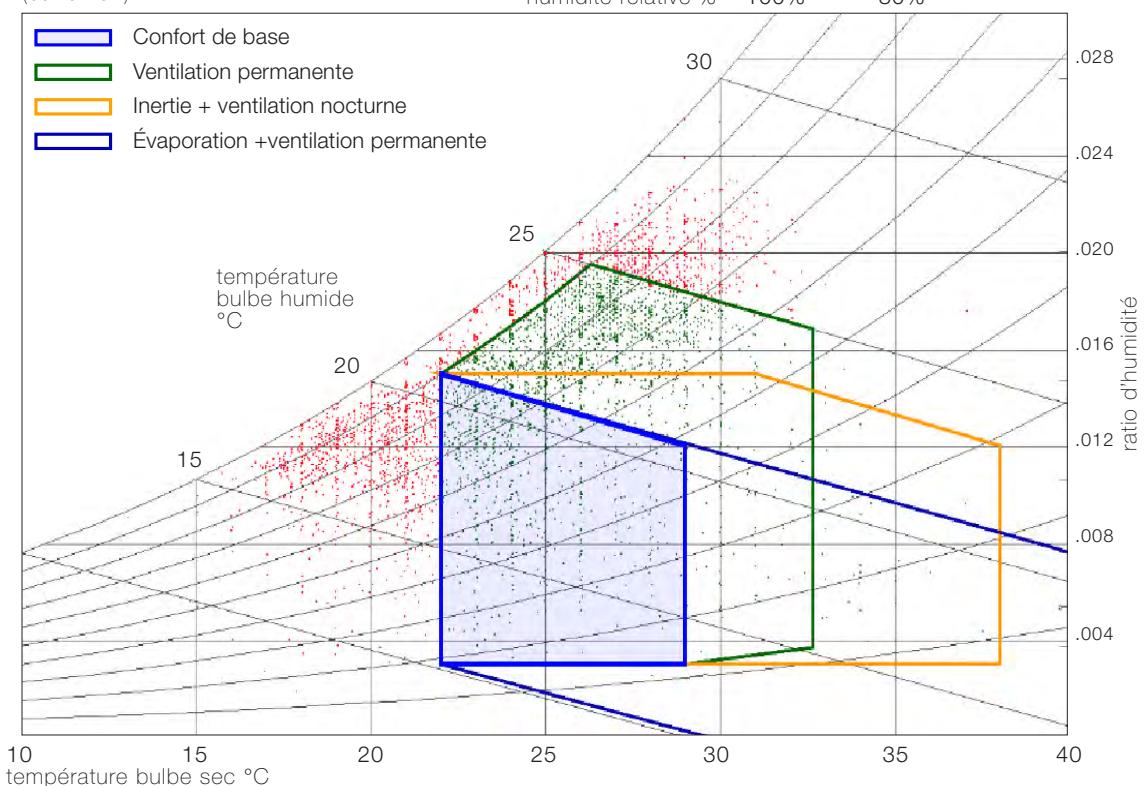


diagramme de Givoni pour la ville de Dakar
(sur un an)



Inversement, il permet d'apprécier la pertinence des réponses architecturales ou techniques apportées à la conception d'un bâtiment pour un climat donné.

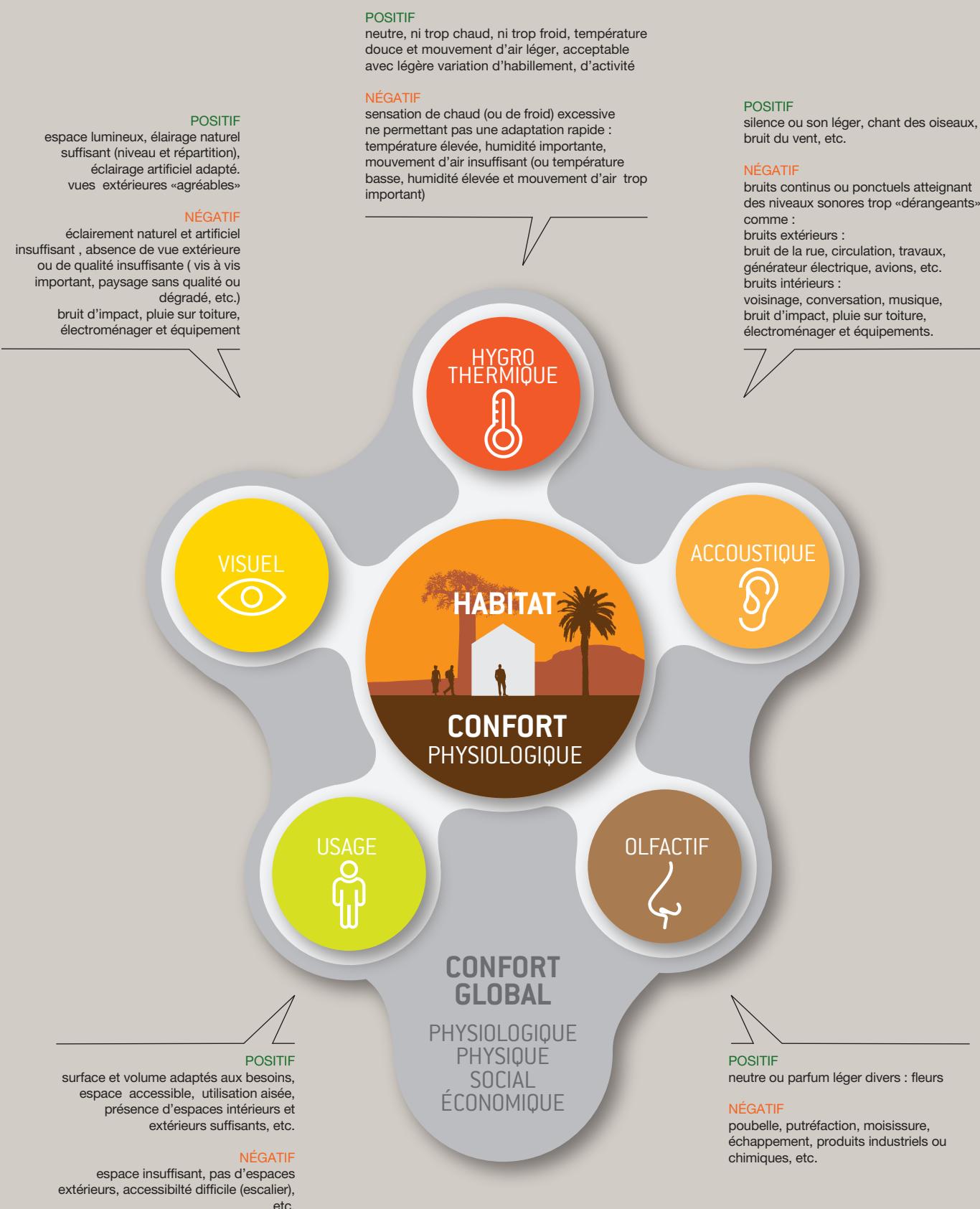
Quatre types de **réponses architecturales adaptées au Sénégal** figurent sur le diagramme bioclimatique :

- la zone dite de « **confort de base** » : lorsque la température et l'humidité relative extérieures sous abri sont dans les limites de confort physiologique acceptable. Pour ces conditions extérieures, il faudra que les conditions intérieures soient aussi proches que possible de ces conditions extérieures (situation dans un endroit ombragé sans vent) ;
- la zone dite de « **confort avec ventilation** » ou encore appelée polygone de confort élargi avec ventilation : où l'inconfort qui sera produit par une température et une humidité plus élevées pourra être compensé par la création d'une vitesse d'air sur l'individu (de 0,5 à 2 m/s) qui permettra d'abaisser la température ressentie en fonction de cette vitesse d'air et du niveau hygrométrique entre 1 et 5°C voire même 6°C ;
- la zone dite « **d'inertie thermique élevée avec ventilation nocturne** » où l'architecture du logement, en stockant la fraîcheur nocturne introduite par ventilation naturelle (ou forcée) dans le bâtiment grâce à sa forte inertie et sa bonne capacité de ventilation, permettra de le maintenir toute la journée dans la zone de confort, à condition bien sûr de l'avoir protégé efficacement de l'ensoleillement ;
- la zone de « **confort avec apports thermiques internes** » : cette zone concerne les périodes où les conditions climatiques extérieures sont légèrement trop fraîches et pour lesquelles la valorisation des apports internes des occupants et des équipements du bâtiment permettront de ramener les conditions intérieures dans la zone de confort. Dans ce cas la ventilation du bâtiment sera limitée aux besoins de renouvellement d'air hygiénique des occupants de manière à ne pas dissiper ces gains thermiques gratuits.

Les diagrammes bioclimatiques permettent donc de faire un lien direct entre le climat et les stratégies bioclimatiques.

LE CONFORT PHYSIOLOGIQUE DANS L'HABITAT

LES 5 COMPOSANTES



La notion d'interdépendance des divers paramètres du bien-être sur le confort global n'est pas le résultat d'une « somme » des confort mais plutôt le « produit » de ceux-ci.

Confort global =
Confort thermique x Confort acoustique x Confort visuel x Confort olfactif x Confort psychologique

Ainsi si l'un des confort est nul (insupportable comme, par exemple, trop de bruit, trop de chaleur, trop d'éblouissement ou trop de mauvaises odeurs) alors le confort global sera égal à zéro, le bâtiment, l'espace urbain, sera invivable.

3.3. autres confort sensoriels et paramètres correspondants

Le confort sensoriel global perçu par un individu est la synthèse des divers confort physiologiques perçus par chacun de ses sens :

- **Le confort hygrothermique** déjà largement évoqué.
- **Le confort visuel.** Ce confort dépend des paramètres suivants (liste non exhaustive) :
 - la quantité de lumière (par rapport à l'activité) ;
 - la qualité et la couleur de la lumière ;
 - l'uniformité de l'éclairage ;
 - le non éblouissement (phénomène dit de « tâche solaire ») ;
 - la qualité des vues extérieures et des vues intérieures ;
 - les couleurs.Ce confort visuel peut être apporté par de la lumière naturelle et/ou artificielle.
- **Le confort acoustique**, dépend de l'acuité acoustique d'une pièce et de la capacité réceptive d'une personne, notamment de son âge qui déterminera une capacité plus ou moins importante à percevoir différentes fréquences.

Ce confort acoustique qui, comme le confort thermique, est très dépendant de l'activité qui a lieu dans un bâtiment donné va dépendre simultanément des bruits extérieurs, des bruits transmis par les parois, des bruits d'impacts, de la réverbération acoustique interne d'un local, des bruits techniques qui y ont lieu, des émergences par rapport à un bruit de fond, des bruits naturels éventuels ou de la musique générée.

• **Le confort olfactif et la qualité d'air.** Ce confort dépend de paramètres comme : l'absence de « mauvaises odeurs », la présence de parfums, l'évacuation des COV, d'autres polluants ou des espèces allergènes. Par ailleurs la qualité de l'air dépend aussi de l'évacuation de CO_2 et de vapeur d'eau (qui n'ont pas d'impacts olfactifs). L'optimisation de ces paramètres du confort doit faire l'objet d'un vrai travail comme c'est le cas du confort thermique dans le cadre d'une approche interdépendante.

• **Le confort global dû à des dimensions non sensorielles.**

Ce confort dépend :

- du bagage culturel de l'individu ;
- de ses capacités d'acclimatation ;
- de dimensions psychologiques qui peuvent largement varier dans le temps comme, par exemple, la sensation de sécurité.

Ces notions de confort sont donc variables d'une personne à l'autre.

In fine on peut affirmer que le confort est un concept synthétique : « **on est bien ou on n'est pas bien...** » dans un espace architectural ou urbain donné. Il est important de réaliser que si un des aspects du confort physiologique ou socio-psychologique est négligé, le confort global de la personne concernée sera très médiocre, voire nul. Le concepteur doit donc analyser chaque paramètre du confort pour réaliser des synthèses guidant la conception architecturale et technique.

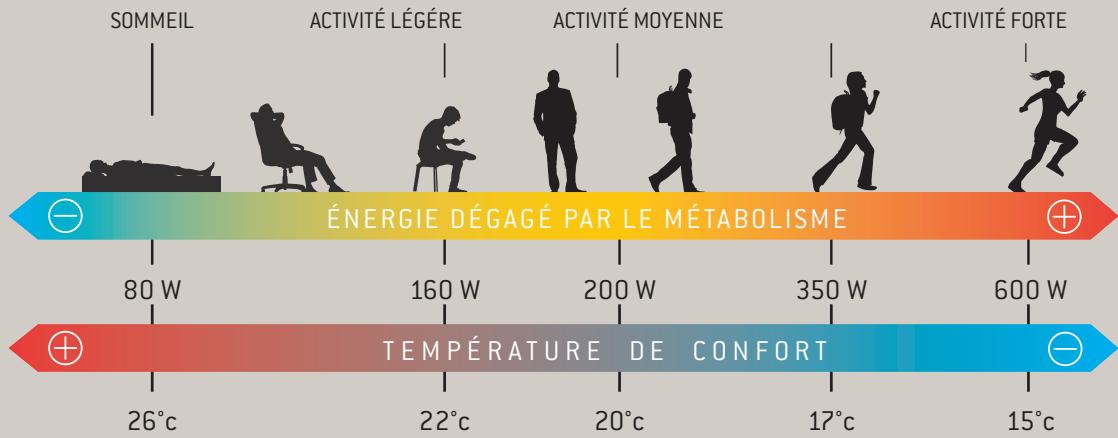
LE SAVIEZ-VOUS ?

La température ressentie (dite température résultante ou encore température opérative) par une personne est égale à la moyenne de la température de l'air et de la température moyenne des parois qui l'entourent :

$$T_{\text{ressentie}} = \frac{T_{\text{parois}} + T_{\text{air}}}{2}$$

Notre corps contribue au réchauffement d'une pièce car notre métabolisme produit de la chaleur. Cette chaleur est évacuée par la transpiration et la respiration (chaleur latente), par convection ou par rayonnement (chaleur sensible).

PRODUCTION DU MÉTABOLISME PAR ACTIVITÉ



Réunion sous «l'arbre à palabre», une pratique culturelle adaptée au climat. Pays Bassari

Photo Sébastien Morisot

Bruits, poussières, pollutions atmosphériques ou même visuelles peuvent créer des situations d'inconforts importants

Jeff Attaway - WikipediaCC BY 2.0



3.4. paramètres de confort à évaluer

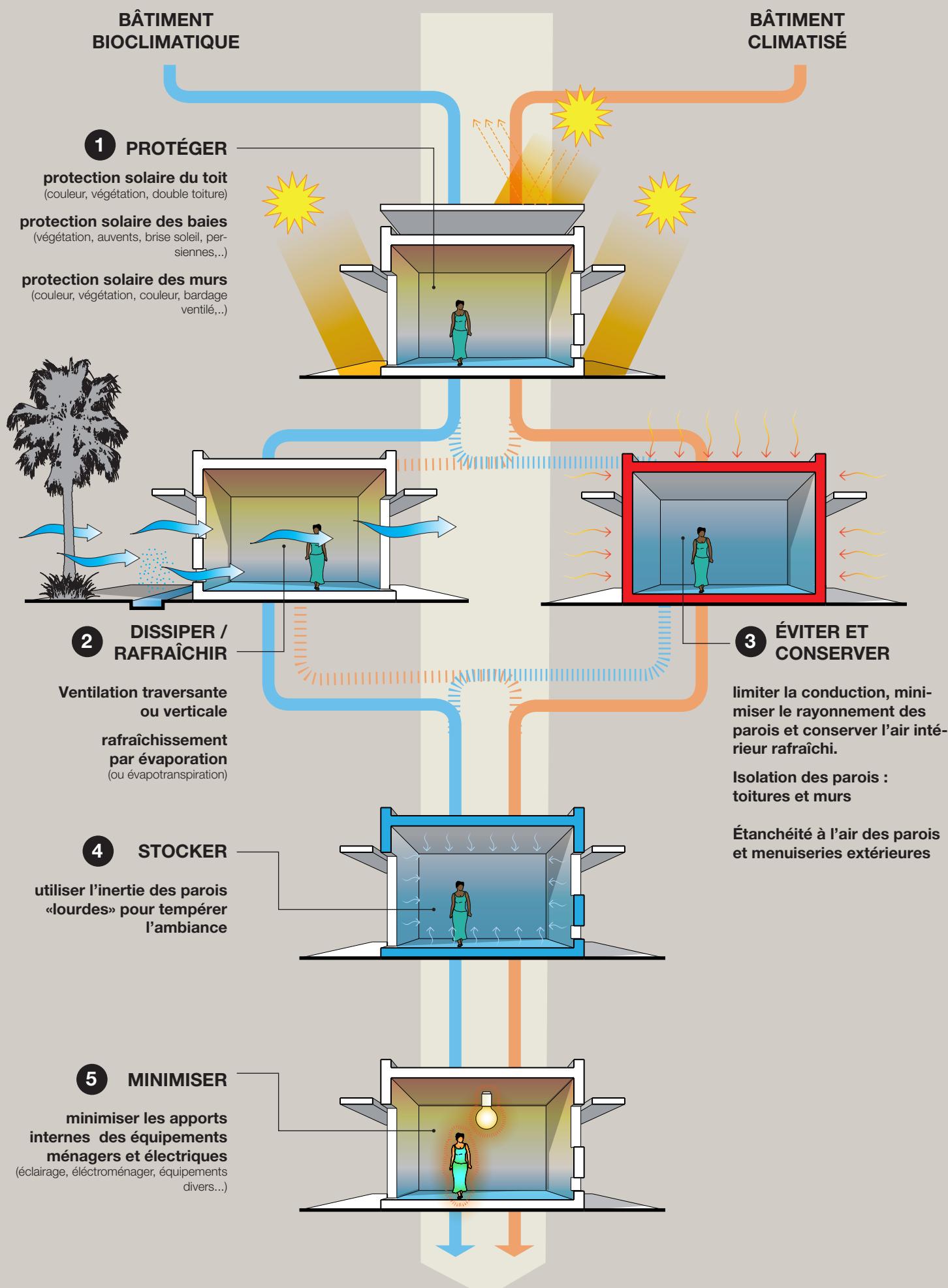
Le confort global dans un bâtiment et le confort spécifiquement hygrothermique, dépendent des activités qui ont lieu dans cet espace bâti ainsi que des personnes qui l'occupent. On comprend ainsi que le niveau de confort (le niveau optimal aussi bien que le seuil acceptable) ne sera pas le même dans un bureau que dans un gymnase, dans la salle de classe d'une école que dans la chambre d'un logement et, pour un même hôpital, dans la salle d'attente que dans une salle d'opération.

Si l'on veut donc appréhender finement cette double exigence de recherche de confort hygrothermique et d'efficacité énergétique, il convient d'appréhender les paramètres suivants (liste non exhaustive) :

- quelles sont les périodes d'occupation moyennes et aussi les périodes d'inoccupation à la fois sur des cycles jour-nuit mais aussi sur des cycles mensuels et/ou annuels ;
- quels sont les niveaux optimaux de température et d'humidité dans ce lieu en fonction des occupants et des activités qui y ont lieu, et quelle est la plage de confort idéale correspondante ;
- quelles sont les limites acceptables de ces conditions de confort et la durée acceptable de conditions d'inconfort. On imagine ainsi que dans une salle d'attente d'une administration un léger inconfort lié par exemple à une suroccupation soit plus tolérable que dans une salle médicale ;

- quelles sont les contraintes spécifiques pour atteindre ce confort en fonction d'autres problématiques liées au confort thermique (par exemple projet en zone de fort ICU) ou à un « autre confort ». Par exemple, un projet en zone de fortes émissions sonores rendent plus difficile la mise en œuvre d'une stratégie de ventilation naturelle ;
- quelles sont les attentes spécifiques des occupants en matière de confort hygrométrique en lien avec les autres types de confort. Il sera très intéressant d'interviewer les occupants des lieux et de ne pas s'en tenir qu'à la vision des seuls concepteurs ou représentants du maître d'ouvrage ;
- quelle est la capacité des occupants à intervenir de manière pertinente sur le bâtiment et ses équipements techniques. En d'autres termes, plus les occupants auront la capacité d'être actifs dans leur bâtiment, plus l'architecture de celui-ci pourra être bioclimatique. Cette appropriation du bâtiment pourra et devra parfois faire l'objet d'actions de sensibilisation.

STRATÉGIES DE CONFORT THERMIQUE



4. principes généraux de conception

Une rue de Rufisque, balcons, galeries, débords de toiture, volets persiennés, mitoyenneté des constructions constituent autant de systèmes de protections solaires.

Preeb-Typha



4.1. dispositifs architecturaux

En climat tropical, l'enjeu principal pour atteindre un bon niveau de confort hygrothermique est de se protéger de la chaleur. Pour cela, il existe quatre stratégies complémentaires : la protection solaire, la ventilation, l'inertie thermique et l'isolation.

Conception bioclimatique

vs. Rafraîchissement artificiel

Concevoir bioclimatique, c'est tenir compte et utiliser le climat d'un site pour concevoir un bâtiment confortable. Cette stratégie qui peut être déclinée pour tous les climats, permet non seulement de favoriser des conditions de confort pour les occupants mais aussi de limiter au maximum les besoins énergétiques. Il est donc recommandé de profiter au maximum de toutes les stratégies bioclimatiques, mais aussi de les compléter avec des moyens artificiels là où les dispositifs bioclimatiques ne satisfont pas les occupants. Ces deux stratégies sont souvent complémentaires et favorisent la limitation des dépenses énergétiques.

Néanmoins, on doit faire attention à quelques incompatibilités. Construire bioclimatique revient d'une part à limiter les apports de chaleur solaires ou internes, et d'autre part à favoriser la dissipation de la chaleur accumulée dans le bâtiment vers l'extérieur. A l'inverse, quand on utilise des moyens artificiels de rafraîchissement, on est censé de ne pas utiliser la ventilation naturelle pour évacuer la chaleur accumulée dans le bâtiment vers l'extérieur, mais à rendre le bâtiment étanche au renouvellement d'air.

Les stratégies de conception bioclimatique les plus intéressantes pour atteindre le confort thermique en climat tropical sont :

Protection solaire

Cette stratégie consiste à bien concevoir le plan-masse, choisir une bonne orientation de chaque bâtiment et bien utiliser la végétation.

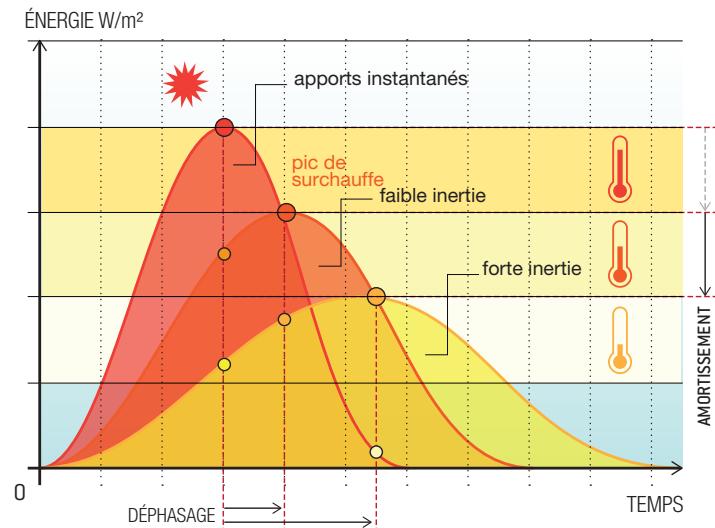
La protection solaire doit également être conçue à l'échelle de chacune des composantes de l'enveloppe des bâtiments :

- en premier lieu protection solaire des toitures : fort albédo (teinte claire), double toiture ventilée et/ou utilisation de matériaux isolants (indispensable pour les bâtiments à climatisation artificielle) ;
- brises-soleil tels que volets ou casquettes pour les ouvertures, fenêtres et portes qui seront, en outre, étanches à l'air pour les bâtiments climatisés ;
- revêtement avec un fort albédo pour les murs les plus exposés au rayonnement solaire et isolation thermique dans le cas de bâtiments à climatisation artificielle.

Pour une utilisation diurne des bâtiments, on peut donc en plus de la toiture prioriser une protection solaire des parois Est, pour une utilisation permanente, il faut protéger les murs Est et Ouest.

L'INERTIE THERMIQUE

En climat tropical, construire bioclimatique revient, d'une part à limiter les apports de chaleur liés au climat notamment les apports solaires mais aussi les apports de chaleur internes et, d'autre part, à favoriser la dissipation de la chaleur accumulée dans le bâtiment vers l'extérieur notamment en ventilant.



Ventilation

Pour les bâtiments bioclimatiques, la ventilation participe au confort thermique des occupants par deux moyens :

- Elle favorise la perte de chaleur du corps par convection (vitesse d'air) et par évaporation de la sueur (environ 640 Wh de chaleur évacuée pour un litre d'eau évaporée). Une ventilation permanente est bénéfique pour les climats chauds et humides.
- Elle permet l'évacuation de la chaleur accumulée dans la masse interne du bâtiment, tant pour les apports solaires que pour les apports internes.

Pour les climats chauds et secs comme la région de Tambacounda, cette fonction de ventilation sera mise à profit, au moyen d'une ventilation nocturne et non d'une ventilation diurne. Ventiler la journée dans un tel climat lorsque la température dépasse la zone de confort contribuerait non seulement à surchauffer les occupants mais aussi à emmagasiner la chaleur dans la structure du bâtiment pour la restituer la nuit sur les occupants. La nuit, lorsque la différence entre température intérieure et extérieure est supérieure à 2°C, la ventilation nocturne permet de refroidir la structure du bâtiment. Un bâtiment possédant une forte inertie thermique dans ce type de climat pourra différer l'onde de chaleur qui entre dans le bâtiment (après avoir réduit l'apport par la protection solaire) tandis que la ventilation nocturne permettra d'évacuer cette chaleur la nuit.

La ventilation joue aussi un rôle essentiel de renouvellement de l'air intérieur pour apporter de l'air neuf aux occupants et pour lutter contre différentes pollutions (CO_2 , composés organiques volatiles COV, moisissures, humidité), facteur primordial pour la santé des occupants évitant aussi les pathologies de l'enveloppe du bâtiment. Dans ce cas précis, on parle de **ventilation hygiénique**.

Inertie thermique

Dans un climat à forte amplitude thermique jour-nuit, recourir à des parois (murs et plâchers) ayant une bonne inertie thermique permet de différer l'onde de chaleur qui va pénétrer dans le bâtiment au cours de la journée, et donc de se protéger de la chaleur pendant les heures les plus chaudes.

Si les épaisseurs des parois sont telles que l'onde thermique atteigne les faces intérieures la nuit (cas des dalles de toiture en béton), il sera nécessaire d'assurer une très bonne ventilation nocturne pour évacuer cette chaleur restituée à l'intérieur du bâtiment. Si toutefois en journée l'inertie ne suffit pas à assurer le confort, on peut ajouter des brasseurs d'air pour procurer une sensation de rafraîchissement (sans ouvrir les fenêtres) par stimulation de l'évapotranspiration sur la peau. Pour les bâtiments utilisés jour et nuit, il est possible également que malgré la ventilation nocturne, il y ait une surchauffe dans le bâtiment : dans ce cas, des espaces extérieurs peuvent être prévus pour le sommeil.

Isolation thermique

L'isolation thermique protège du transfert de chaleur à travers un élément architectural. Elle est d'autant plus intéressante lorsqu'il existe un écart important de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment, notamment quand l'ambiance intérieure est climatisée avec une température de consigne basse. Pour les bâtiments climatisés situés dans des climats très chauds, l'importance de l'écart de température entre les moyennes extérieures et l'ambiance intérieure rafraîchie rend l'isolation indispensable pour limiter les apports de chaleur par conduction. Dans ce cas, pour limiter les coûts liés à un traitement isolant, il peut être envisagé de n'isoler que les parties climatisées du bâtiment.

LE POINT SUR :

LES CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES D'UN ISOLANT

La **conductivité thermique λ** , caractérise la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Plus sa valeur est grande plus le matériau est conducteur, plus elle est petite plus le matériau est isolant. Elle correspond au flux de chaleur traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour un degré d'écart.

Elle s'exprime en W/(m.K).

La **résistance thermique R** correspond au rapport de l'épaisseur du matériau divisé par sa conductivité thermique ($R = e/\lambda$) ; elle s'exprime en m².K/W.

Pour calculer la résistance thermique d'une paroi composée de plusieurs matériaux superposés, on additionne les résistances thermiques de chaque épaisseur de matériau. Plus la résistance thermique est grande, plus la paroi isole.

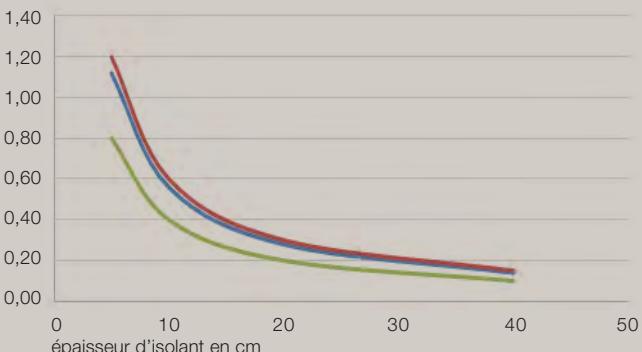
En pratique, on utilise le coefficient de transmission thermique ou la **conductance U** pour caractériser une paroi. Ce coefficient correspond à l'inverse de la résistance thermique d'une paroi ($U=1/R$) et s'exprime en W/(m².K). Plus la valeur de U est faible, moins la paroi laisse passer la chaleur. Le graphique ci-dessous montre que les premières épaisseurs d'isolants sont les plus importantes pour rendre une paroi performante (U faible).

Transmission thermique U en fonction de l'épaisseur de l'isolation

(Pour un mur en aggloméré de ciment de 15 cm d'épaisseur)

- typha panneau
- laine de verre / polystyrène
- laine de mouton

U en W/(m².K)



Résistance thermique R en fonction de l'épaisseur d'isolant (m².K/W)

Résistance thermique R en fonction de l'épaisseur d'isolant (m ² .K/W)	λ (W/mK)	épaisseur			
		5 cm	10 cm	20 cm	40 cm
Typha en panneau	0,056	0,89	1,79	3,57	7,14
Laine de verre, polystyrène	0,04	1,25	2,5	5	10
Laine de mouton	0,06	0,83	1,67	3,33	6,67

Pour les climats **chauds et très humides** lorsque l'écart de température entre un intérieur climatisé et l'extérieur n'est pas très important, l'isolation est utile en tant que complément à une protection solaire. Lorsque la protection solaire est efficace, un climatiseur sera plus utile pour déshumidifier l'ambiance de la pièce plutôt que pour abaisser la température.

Dans tous les cas, ce sont les premiers centimètres d'isolant qui ont le plus d'impact sur le confort thermique et les gains énergétiques.

Il est essentiel de préciser qu'isoler thermiquement un bâtiment bioclimatique peut ne pas constituer une stratégie opportune si l'isolant ralentit aussi l'évacuation de la chaleur de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur pendant la nuit. Il est clair que si le dispositif de ventilation nocturne est peu efficace, ce sera une erreur d'isoler thermiquement les parois.

Dans le cas des bâtiments bioclimatiques en climat **chaud et sec**, il est préférable d'utiliser des matériaux avec une forte inertie thermique plutôt que des isolants. Cependant, la toiture étant la paroi la plus exposée au soleil, il est tou-

jours intéressant d'envisager de l'isoler sauf si d'autres dispositifs spécifiques de protection sont envisagés (couleur très claire, double toiture décollée et ventilée, etc.).

Éléments constructifs

TOITURE

La toiture sera protégée efficacement de l'ensoleillement que le bâtiment soit bioclimatique ou climatisé. L'usage de couleurs claires ou la végétalisation (si cela est possible notamment vis à vis des besoins en d'eau pour l'arrosage) seront toujours des stratégies performantes. L'isolation thermique sera une stratégie de protection solaire efficace par une diminution du facteur solaire mais elle pourra, dans les bâtiments climatisés réduire la capacité de refroidissement nocturne du bâtiment par le toit. Dans le cas de bâtiments climatisés l'usage de toitures à forte inertie sera privilégié car il permettra d'écrêter les pointes d'appels de puissance

MURS-PLANCHERS

La conception des murs obéira à la même logique conceptuelle que les toitures. L'isolation thermique aura plus d'avantages que d'inconvénients pour une paroi de couleur claire si la ventilation nocturne est très efficace.

Les planchers bas devraient permettre une ventilation en sous face pour une conception bioclimatique. Dans le cas de bâtiments en climatisation permanente le choix optimal dépendra de configuration du plancher (sur vide ventilé ou sur terre-plein, isolé ou pas...) et des conditions de confort intérieur.

OUVERTURES

Pour les bâtiments bioclimatiques, l'orientation et l'emplacement des fenêtres et des baies doivent être choisis de sorte à limiter les apports de chaleur dus au rayonnement solaire. Il s'agit de définir alors une véritable stratégie de protection solaire comprenant, en fonction des orientations et des usages du bâtiment, des protections végétales et architecturales (protections fixes et/ou mobiles, extérieures et/ou intérieures). Cette stratégie de conception des baies qui fait partie intégrante de sa conception architecturale bien au delà des dimensions thermiques doit en outre permettre simultanément de maximiser l'éclairage naturel et de favoriser la ventilation naturelle. Par ailleurs la surface vitrée d'un bâtiment et le type de menuiseries doivent aussi tenir compte du besoin d'intimité des usagers, de la vue sur l'extérieur et autres paramètres d'usage.

Pour les bâtiments climatisés, les principes de protection solaire sont les mêmes que pour les bâtiments bioclimatiques. La contrainte liée à la ventilation naturelle est alors moins prioritaire sauf si le bâtiment est à la recherche d'un fonctionnement «mixte» : alternativement climatisé ou ventilé suivant les saisons. Dans tous les cas, il est important de veiller à limiter les infiltrations d'air extérieur en premier lieu grâce à une bonne étanchéité à l'air des menuiseries.

4.2. dispositifs techniques

Refroidissement par évaporation

Dans un climat chaud et sec, il est aisément de refroidir l'air en évaporant de l'eau. L'évaporation préleve de la chaleur à l'air environnant tout en créant de la vapeur d'eau : cela a pour conséquence d'abaisser la température sèche tout en augmentant l'humidité relative de l'air ambiant. Ce type de refroidissement est utilisé dans de nombreux pays et peut faire appel à plusieurs technologies passives utilisées dans l'architecture vernaculaire telles l'utilisation de « jarres poreuses, nattes humidifiées, citernes d'eau sous les maisons, arrosage du sol. [...] Il est possible de perfectionner ces techniques en les rendant actives (avec l'adjonction d'un ventilateur par exemple pour accélérer l'échange évaporatif) et d'en élargir le champ d'utilisation» (Huet, Celaire, 1986).

Ventilation mécanique : assistance par brasseur d'air

Lorsqu'il n'est pas possible de recourir à la ventilation naturelle (bâtiments présentant un faible potentiel de ventilation naturelle, mauvaise orientation, densité urbaine, environnement urbain trop bruyant, périodes peu venteuses ou absence totale de vent, changement de direction des vents dominants), les brasseurs d'air permettent de pallier en partie ce manque de vitesse d'air sur l'occupant nécessaire à l'abaissement de température ressentie. En créant un mouvement d'air, les brasseurs procurent une sensation de rafraîchissement, sur le même principe que celui de la ventilation naturelle. Leur avantage sur les climatiseurs à compression est qu'ils produisent une sensation de fraîcheur avec un abaissement de la température ressentie de 2 à 4°C tout en étant largement moins énergivores dans des proportions de 20 à 40 en fonction des modèles et des conditions ambiantes.



Une erreur courante, étancher la surface des murs pignons avec du bitume, ce qui augmente considérablement l'absorption d'énergie du rayonnement solaire

Les ventilateurs de plafond correctement positionnés, dimensionnés, sélectionnés et entretenus assurent une ventilation plus efficace que les ventilateurs sur pied, grâce à une meilleure répartition de l'écoulement d'air dans la pièce.

Pour les pièces climatisées, il est possible de combiner la climatisation avec un brasseur d'air afin d'une part de retarder la période de mise en route du climatiseur et, d'autre part, d'augmenter la température de consigne de celui-ci, et donc de faire des économies d'énergie.

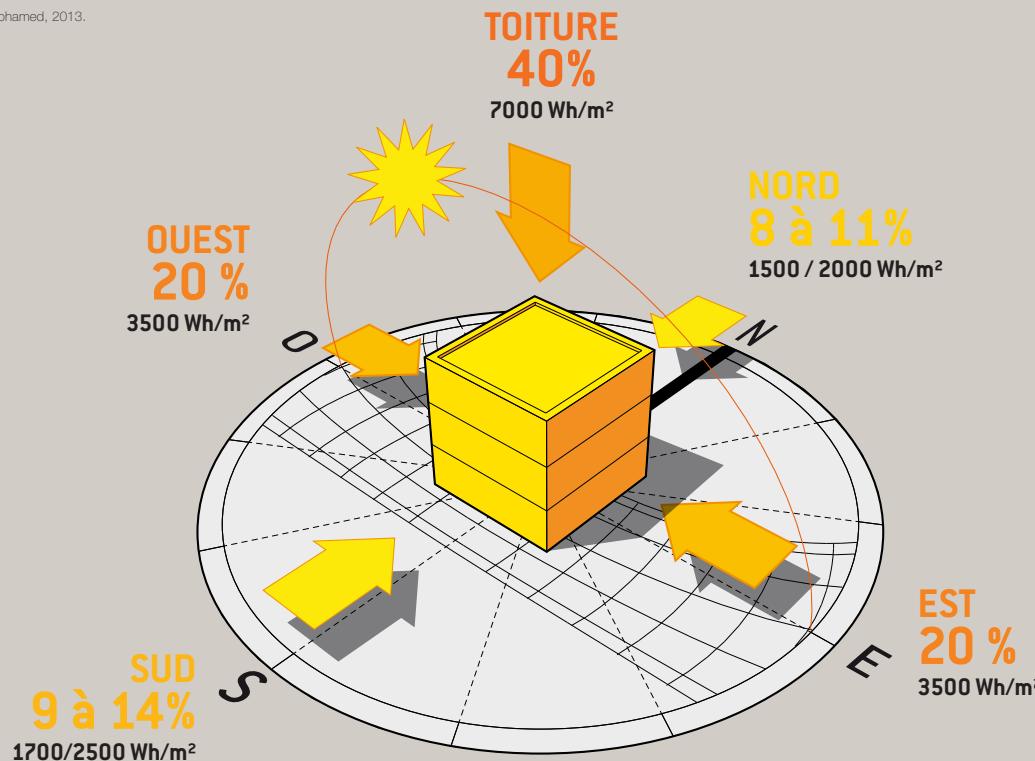
Rafraîchissement énergétiquement efficace

Il s'agit, dans le cas de bâtiments climatisés, d'une part de limiter les surdimensionnements conceptuels (climatisation sobre) et, d'autre part, d'optimiser la chaîne d'efficacité de la climatisation : sélection de matériel durablement efficace, mise en œuvre garantissant un fonctionnement optimal, maintenance adaptée...

ÉNERGIE REÇUE PAR m² DE PAROI

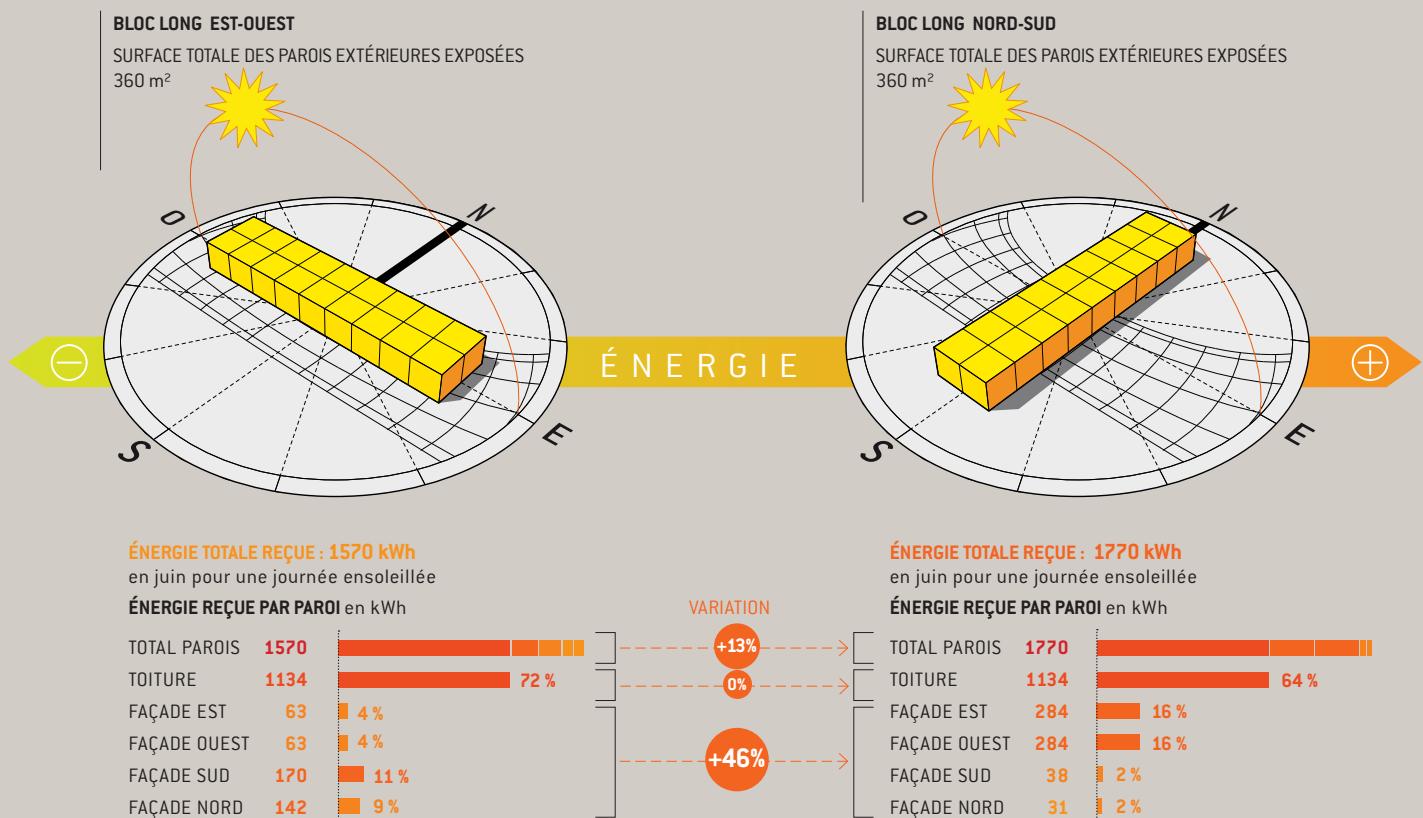
en fonction de son orientation
par jour pour une journée ensoleillée

d'après Abdesselam, Mohamed, 2013.



INFLUENCE DE L'IMPLANTATION

surface de plancher 162 m²

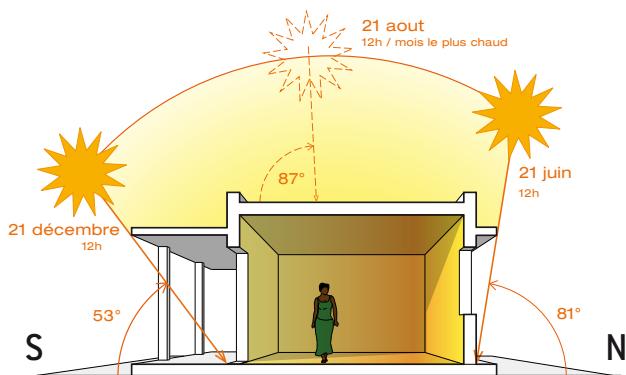
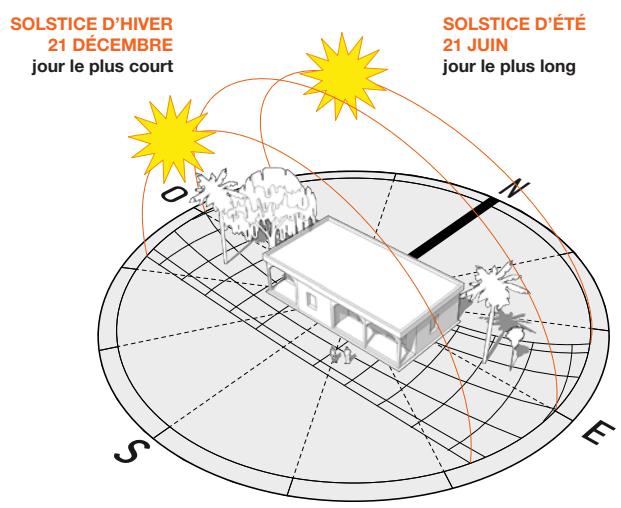


5. recommandations pour la conception des bâtiments

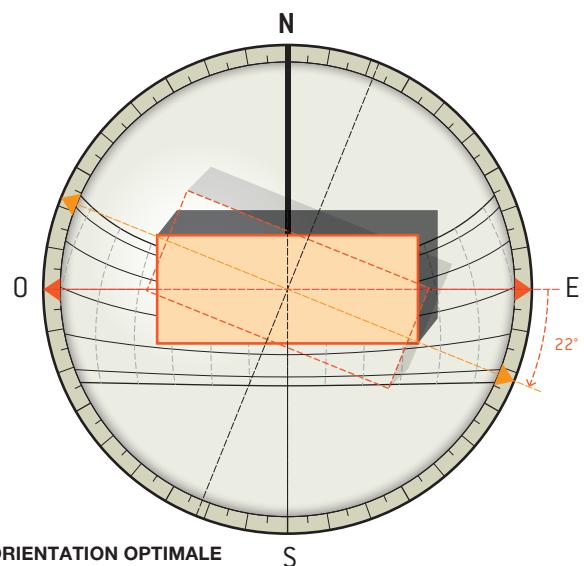
5.1. inscription dans le site

Orientation du bâtiment

En conception bioclimatique le choix de l'orientation du bâtiment consiste à chercher un compromis entre la réduction de l'exposition de l'enveloppe du bâtiment au soleil et une bonne exposition aux vents dominants pour favoriser la ventilation naturelle. Pour se protéger du soleil, l'orientation du bâtiment privilégiera la protection solaire en réduisant l'exposition de larges façades Est et Ouest, qui sont les orientations les plus exposées à l'ensoleillement et qui reçoivent donc le plus d'énergie. Cette disposition est à favoriser aussi bien pour les bâtiments bioclimatiques que pour les constructions climatisées.



Inclinaison du rayonnement solaire à midi pour le solstice d'hiver et d'été
Ville de Dakar. Latitude : 14°41'37" Nord

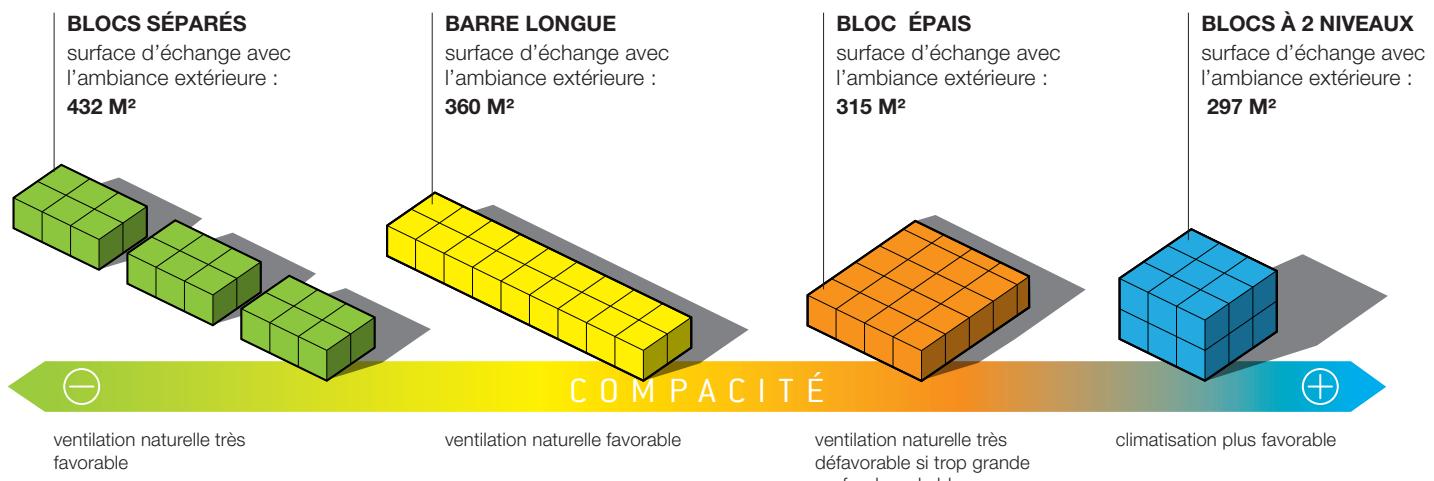


Orientation optimale

On considère généralement que l'orientation d'un bloc en longueur sur l'axe est-ouest constitue la meilleure implantation par rapport à l'ensoleillement. Cette orientation optimale peut varier notamment pour améliorer la ventilation naturelle en recherchant une exposition plus efficace au vents dominants. Elle peut également varier légèrement pour rechercher par exemple, dans certaines zones climatiques, un léger apport solaire pour les soirées les plus froides (+22° de rotation au sud-est). Cette orientation seule ne suffit pas et ne se substitue pas à la mise en œuvre d'autres dispositifs bioclimatiques (brise soleil, couleur de parois, etc.)

COMPACITÉ

Surface d'échange avec l'extérieur pour une construction d'une surface de plancher **162 M²**



Plan-masse

En climat chaud et sec, on privilégiera des morphologies architecturales et urbaines compactes pour favoriser avant tout la protection contre les rayons du soleil.

En climat chaud et humide on cherchera à favoriser la circulation de l'air pour ventiler les bâtiments. Dans ce cas et si les caractéristiques du site le permettent, laisser un espacement suffisamment grand entre les bâtiments sera un aspect conceptuel important d'une stratégie bioclimatique.

Sol-talutage - Enterrement partiel

Le fait d'enterrer le bâtiment ou une de ses façades réduit l'exposition solaire en exposant la ou les parois concernées à une ambiance tempérée (température du sol = moyenne annuelle extérieure qui est en général dans la zone de confort). Toutefois elle réduit également la dissipation de chaleur depuis le bâtiment vers l'extérieur par la paroi concernée : Elle doit donc être privilégiée pour les bâtiments bioclimatiques (en permettant la ventilation par d'autres parois) et dans tous les cas pour les bâtiments à climatisation artificielle.



Saint-Louis. : balcons, galeries, volets persiennés, et même compacité et mitoyenneté des constructions constituent autant de systèmes de protections solaires. Pneeb-Typha



Cour arborée - centre pour femme à Rufisque
HOLLMEN REUTER SANDMAN Architects

5.2. végétalisation des espaces extérieurs et abords

La végétalisation des abords du bâtiment agit de manière bénéfique sur le confort des usagers :

- en assurant une protection solaire des murs par ombrage, dont la qualité dépend de la densité du feuillage (celui-ci peut arrêter de 60% à 90% du rayonnement solaire) ;
- en évitant que le revêtement du sol réfléchisse le rayonnement solaire vers le bâtiment en limitant l'effet d'îlot de chaleur urbain dû à la minéralisation des milieux ;
- en rafraîchissant l'ambiance environnante grâce à l'évaporation de l'eau contenue dans la végétation ;
- en apportant une protection face aux poussières transportées par le vent ;
- en coupant ou en canalisant le vent.

La première fonction visant à limiter l'effet d'îlot de chaleur et de réflexion des rayonnements solaires peut être assurée en privilégiant une végétalisation horizontale (pelouse, arbustes et fleurs).



Végétation protégeant les murs, île de Gorée

Photo Sébastien Morisot



Cour d'école à Pikine

Photo Nuria Sanchez Munoz

La protection solaire peut être réalisée à l'aide d'une végétalisation de haute tige (arbres hauts), ou grâce à une végétation se développant verticalement sur treillis ou sur une tonnelle. Des distances de sécurité doivent être maintenues pour éviter les chutes d'arbres sur les bâtiments. Des précautions doivent toutefois être prises pour éviter de trop humidifier les bases des bâtiments, ce qui pourrait entraîner des problèmes structurels

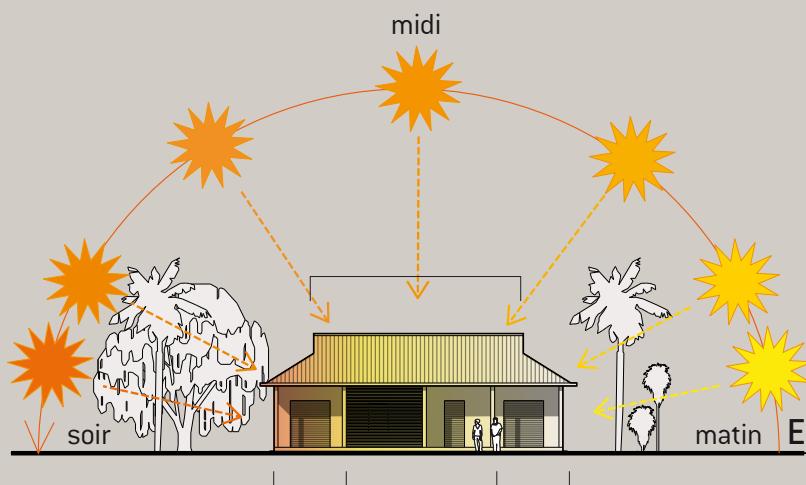
La végétalisation de haute tige sera préférée pour la protection solaire des murs Est et Ouest, car la hauteur du soleil sur ces murs est assez basse. Pour les murs Nord et Sud, on préférera une protection solaire horizontale au-dessus du mur. Il est aussi possible d'assurer la protection de ces façades avec des arbres hauts.

Il est évidemment judicieux de choisir une végétation adaptée au climat local afin de limiter les besoins en arrosage.

Pour les bâtiments bioclimatiques, il faut toutefois veiller à ce que la végétation ne soit pas un obstacle pénalisant la circulation de l'air pour la ventilation naturelle.

La stratégie de végétalisation aux abords d'un bâtiment est une question essentielle à prendre en compte par les aménageurs lorsqu'il s'agit de constructions neuves : elle impacte non seulement le confort des espaces extérieurs et intérieurs mais affecte aussi la gestion des ressources en eau, la biodiversité du site, et d'autres impacts paysagers et climatiques.



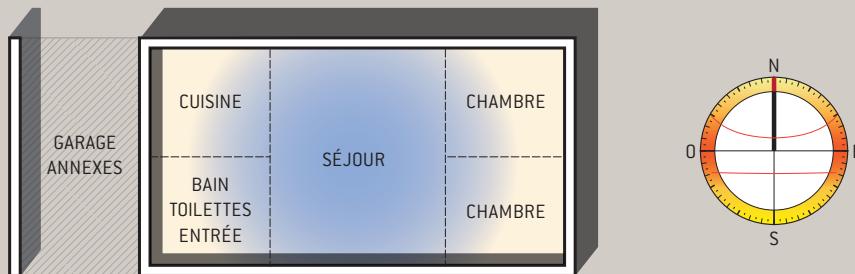


Après la toiture, les parois est et ouest de la construction sont les plus directement impactées par le rayonnement solaire. En effet, le matin et le soir, le soleil est bas sur l'horizon, le rayonnement est alors quasiment perpendiculaire à la surface des murs.

La partie ouest est généralement une zone où l'inconfort générée par l'exposition solaire est importante. En effet, celle-ci entraîne une surchauffe en fin d'après-midi, alors que la température à l'intérieur de la construction a augmenté régulièrement tout au long de la journée.

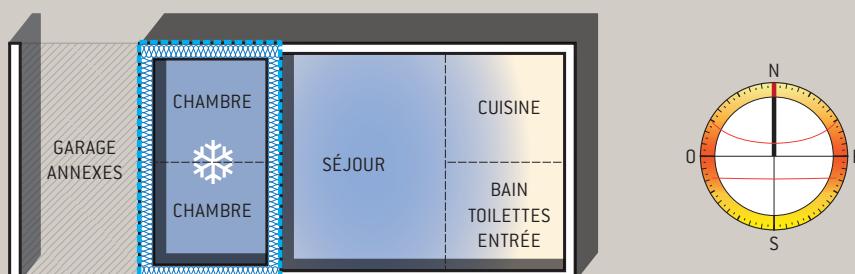
BIOCLIMATISME, ORIENTATION ET AMÉNAGEMENT SPATIAL

La disposition intérieure des différents espaces et pièces d'habitation permet, par une logique de zonage thermique, d'améliorer les conditions de confort. Dans la plupart des cas, les locaux techniques ou de services sont utilisés comme des espaces tampon aux endroits les plus exposés.



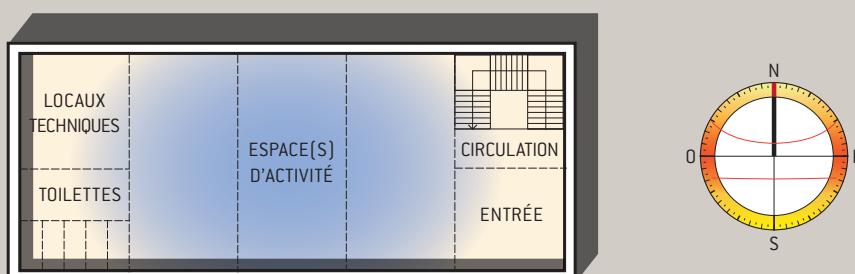
HABITATION BIOCLIMATIQUE

Chambres, cuisine, sanitaire et bains sont répartis au choix à l'est ou à l'ouest, en espace tampon sur les façades les plus exposées. Des espaces annexes comme les galeries, garage, abris pour auto, etc. peuvent être utilisés en compléments comme protections complémentaires.



HABITATION PARTIELLEMENT CLIMATISÉE

Dans la plupart des cas on cherchera à climatiser, donc à isoler les espaces de sommeil. Une disposition centrale de ces espaces permettra de limiter les déperditions.



LOCAUX D'ACTIVITÉS, ESPACES TERTIAIRES ET ENSEIGNEMENT BIOCLIMATIQUE OU CLIMATISÉ

les espaces avec une exigence moindre de confort thermique, les locaux annexes ou de services comme les sanitaires, les locaux techniques ou les circulations, seront localisés à l'est et à l'ouest, en espace tampon des façades les plus exposées.



Maison à Dakar - larges galeries protectrices



Maison à Impluvium, Casamance

5.3. espaces intermédiaires et espaces tampons

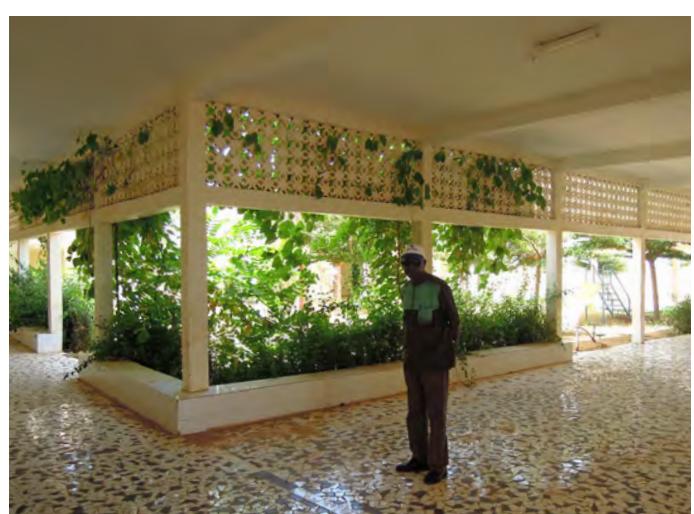
Les espaces intermédiaires entre les espaces extérieurs et les volumes habités tels que coursives, vérandas, loggias, sont des espaces qu'il est essentiel de traiter avec une approche bioclimatique rigoureuse permettant de faire de ces lieux de transit et de convivialité des zones abritées du soleil et de la pluie, bénéficiant d'une bonne ventilation naturelle et d'un bon éclairement naturel.

Cette approche conceptuelle est essentielle non seulement pour l'usage qualitatif de ces zones et leur appropriation par leur occupants mais aussi en raison de l'impact que leur traitement bioclimatique aura sur les logements attenants.

La disposition spatiale judicieuse d'espaces tels que locaux annexes ou de services : cages d'escalier, garages, rangement, locaux techniques (s'ils ne sont pas générateurs de chaleur) permet également d'agir comme tampon thermique dans les zones des bâtiments les plus sensibles à la surchauffe.



Ancienne gare de Rufisque. La construction est dotée de larges espaces périphériques ouverts sur deux niveaux qui protègent les façades.



École bioclimatique à Dagana. De larges espaces en galeries couvertes entourent les cours de récréation arborées.

Terreneuve architecte



Habitation à Dakar. Les teintes claires contribuent significativement à diminuer l'absorption du rayonnement solaire.

5.4. protection solaire et isolation de l'enveloppe

En climat tropical, les apports de chaleur d'un bâtiment sont en premier lieu, liés à l'absorption et à la transmission du rayonnement solaire à travers les parois de son enveloppe

Les différentes parois du bâtiment reçoivent plus ou moins de rayonnement solaire. Comme le montre les schémas de la page 28, les priorités d'intervention de protection solaire sont au niveau de la toiture et des murs Est et Ouest.

Teinte de l'enveloppe : une priorité

Les teintes claires absorbent beaucoup moins le rayonnement solaire que les teintes foncées : il convient donc de privilégier ces teintes et la future réglementation favorisera ce principe essentiel de bonne conception. Le coefficient d'absorption α permet de connaître le pourcentage de rayonnement solaire absorbé par le matériau. Le tableau suivant donne quelques valeurs mais il sera préférable d'employer des nuanciers plus précis.



Catégories de teintes	Couleurs	Valeur α correspondante
Claire	Blanc, jaune, orange, beige, crème, rouge clair	0,4
Moyenne	Rouge sombre, vert clair, bleu clair	0,6
Sombre	Brun, vert sombre, bleu vif, gris clair, bleu sombre	0,8
Noire	Gris foncé, brun sombre, noir	1

Coefficient d'absorption en fonction de la teinte et de la couleur – Source : ECODOM+

Traitements de façades assurant une protection solaire efficace : casquettes brise soleil, balcons, claustras, murs doubles, etc.

LE POINT SUR : LE FACTEUR DE TRANSMISSION SOLAIRE DE LA TOITURE

Le **facteur de transmission solaire** d'une paroi est le ratio entre la chaleur transmise à travers cette paroi à l'intérieur du local et l'énergie solaire reçue sur la face extérieure de cette paroi au cours de la journée. Ce facteur permet donc de caractériser la capacité d'une paroi à plus ou moins transmettre le rayonnement solaire dans le bâtiment. Il est formulé de la manière suivante :

$$Fts = 0,05 \times \frac{\alpha}{R + 0,22}$$

α : coefficient d'absorption de la paroi dépendant de la teinte du mur
 R : résistance thermique de la paroi en $m^2 \cdot ^\circ C/W$

Pour minimiser la transmission du rayonnement solaire à l'intérieur du bâtiment on cherchera à avoir un faible facteur de transmission solaire au niveau de la toiture. Cela peut être obtenu :

- en privilégiant des teintes claires qui absorbent peu le rayonnement solaire ;
- en utilisant des matériaux isolants pour augmenter la résistance thermique de la paroi.

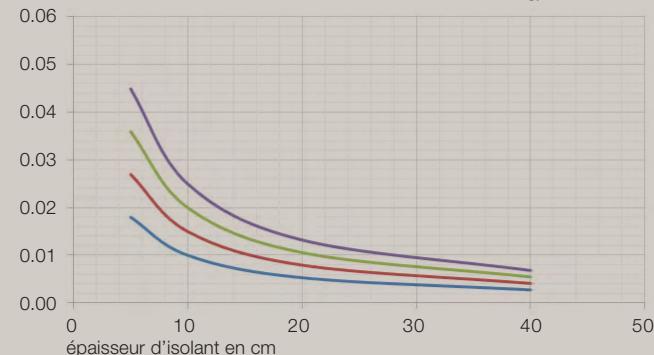
Le diagramme ci-dessus permet de noter que plus l'épaisseur d'isolant augmente, moins le facteur solaire influe. Plus le coefficient d'absorption diminue et plus la toiture est performante en termes de protection solaire.

Facteur de transmission solaire d'une toiture suivant son coefficient d'absorption (sa couleur) et suivant son épaisseur d'isolant (panneaux de typha)

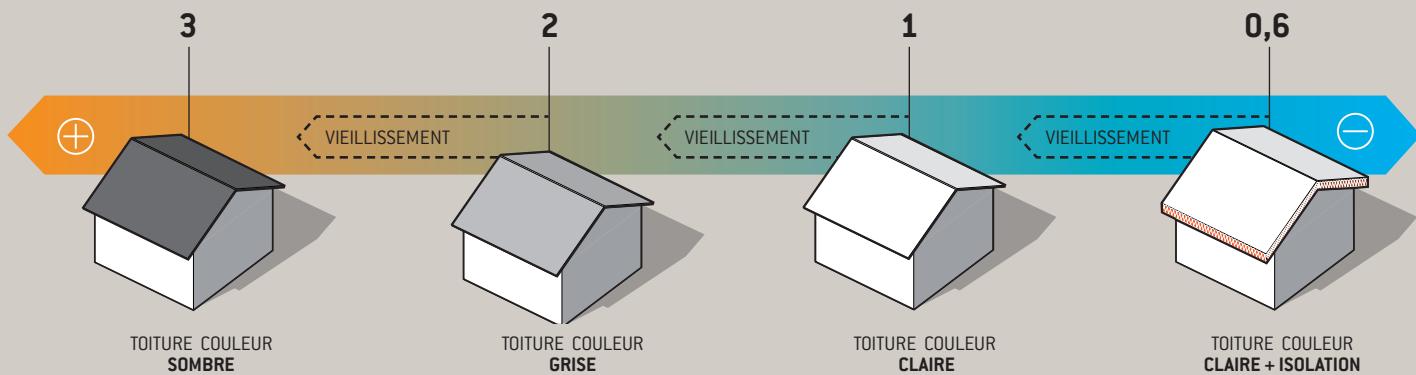
Facteur de transmission solaire

coefficient d'absorption α

- $\alpha = 0,4$
- $\alpha = 0,6$
- $\alpha = 0,8$
- $\alpha = 1$



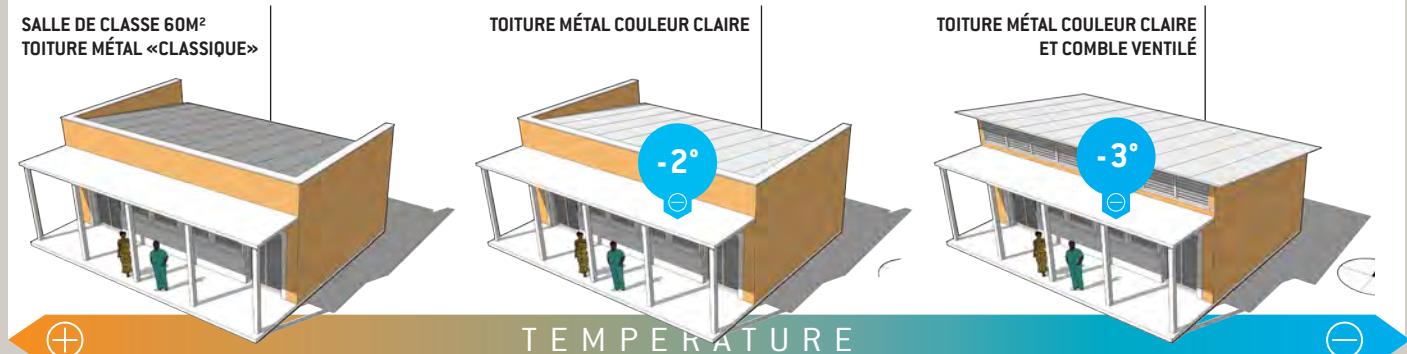
FACTEUR DE TRANSMISSION SOLAIRE DES TOITURES



LE SAVIEZ-VOUS ?

Au cours de la semaine la plus chaude, pour une salle de classe¹ localisée dans un climat du même type que Dakar :

- la température opérative² intérieure maximale peut être abaissée de 2°C en utilisant une teinte claire pour la toiture par rapport à une toiture en tôle classique ;
- la température opérative intérieure peut être abaissée de 3°C pendant les heures les plus chaudes de la journée avec un système de ventilation sous toiture (ou comble ventilé)³.



¹ salle de classe de 60 m² / toiture bac acier - pente de 15°- les ouvertures sont disposées sur les façades Sud et Nord , leur surface est de 35% des parois concernées, elles sont protégées du rayonnement solaire. La ventilation est de 25 volumes par heure. Elle est occupée par 30 personnes de 8h30 à 11h30 et de 13h30 à 16h30.

² température moyenne entre la température de l'air et la température des surfaces des différentes parois

³ comble ventilé avec un faux-plafond en panneaux de Typha. Son renouvellement d'air est de 3 volumes par heure,

Pour une bonne conception thermique et énergétique, il est essentiel et prioritaire d'assurer une protection solaire efficace en toiture



Toiture avec combles ventilés - Ecole primaire à Gangouroubo, Mali
LEVS architecten

5.4.1 PROTECTION SOLAIRE AU NIVEAU DES TOITURES

C'est la toiture qui transmet le plus de chaleur dans le bâtiment : pour une bonne conception thermique et énergétique, il est essentiel et prioritaire d'assurer une protection solaire efficace en toiture.

D'un point de vue pratique, la minimisation des apports solaires par la toiture peut être réalisée :

- en privilégiant un revêtement de teinte claire ;
- en s'assurant d'une bonne ventilation en sous toiture (combles ventilés ou sur-toiture ventilée) ;
- en isolant thermiquement la toiture.

considérablement la transmission par réflexion et d'évacuer par ventilation le rayonnement solaire capté. La transmission directe par conduction de la chaleur captée dans les espaces habités est également minimisée. L'intérêt de ce dispositif est qu'il peut être mis en œuvre en réhabilitation et construction neuve.

Isolation de la toiture

La transmission de chaleur à travers la toiture peut aussi être limitée grâce à l'isolation thermique de celle-ci. Pour une toiture légère, l'isolation peut être réalisée par l'intérieur ou par l'extérieur. Pour une toiture terrasse elle doit être faite par l'extérieur.

Teinte de la toiture : une priorité

Il est toutefois difficile de conserver une teinte claire pour les toitures qui, en vieillissant, s'assombrissent (poussières, champignons, ou oxydation des toitures métalliques): la protection perd donc en efficacité avec le temps. Par conséquent, utiliser une couleur claire pour la toiture constitue une protection efficace mais dans la mesure où sa durée dans le temps n'est pas garantie, il est recommandé de la compléter par un autre dispositif (double toiture et / ou isolation thermique) ou de maintenir cette capacité de protection solaire par son entretien régulier. A défaut de cet entretien on utilisera une valeur de coefficient d'absorption tenant compte de ce vieillissement.

Toiture ventilée

La réalisation de sous-toiture ou de sur-toitures ventilées est très intéressante. Elle peut diminuer la température intérieure de plusieurs degrés en limitant efficacement les surchauffes. En effet, elle permet de réduire

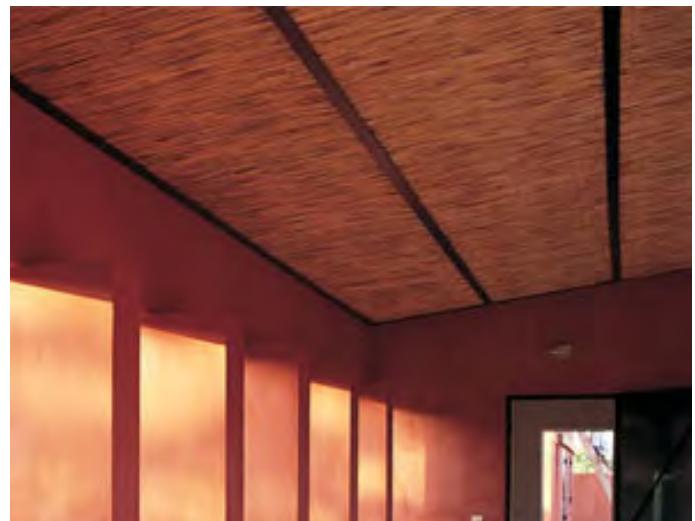
Toiture ventilée dans la Maison de l'Enfant à Joal-Fadiouth
Photo Nuria Sánchez Muñoz





Sur-toiture ventilée - Dakar

Atelier d'architecture MBN



Sous-toiture en nattes - Centre pour femme à Rufisque

HOLLMEN REUTER SANDMAN Architects

LE CHAUME DE TYPHA

Afrika Mandela Ranch, Rao

Association typHAS, Patrick et Michèle LeGoff

Ces toits en chaume de Typha ont été proposés par l'association typHAS : l'utilisation du Typha à la place de la paille traditionnellement utilisée vise une amélioration qualitative de la toiture en améliorant sa longévité de quelques dizaines d'années. En plus de posséder une longévité accrue, le coût actuel de la matière première de cette toiture est moins élevé que celui de la paille.

Isolation des toitures - terrasse

Dans ce cas, l'isolation peut se faire :

- à l'intérieur, en fixant des panneaux isolants sous la dalle, ou en réalisant un faux plafond isolant au moyen d'une structure de soutien ;
- à l'extérieur, sur le toit, sous une couche d'étanchéité. Cette isolation peut être complétée en ajoutant un revêtement réfléchissant. Ce type de disposition est encore rare dans la plupart des constructions récentes au Sénégal bien qu'elles présentent manifestement un grand intérêt.

Isolation des toitures en pente

L'isolation peut être réalisée :

À L'INTÉRIEUR :

- sous la toiture en fixant directement des panneaux isolants ;
- au moyen d'un système de faux-plafond en panneaux isolants ;
- en isolant le plancher des combles. Pour les greniers cela est applicable s'ils ne sont pas fréquemment utilisés.

À L'EXTÉRIEUR :

- les toitures en chaume, souvent rencontrées en contexte rural, sont des toitures végétales isolantes. Au Sud du Sénégal, ces toitures sont souvent pourvues d'une ouverture en partie haute qui permet la ventilation.



ZOOM SUR :

TYPHA ET TERRE : DES MATERIAUX LOCAUX POUR L'ISOLATION DES TOITURES

Isoler avec des matériaux locaux, naturels et abondants, tel est un des objectifs du programme PNNEEB/TYPhA. Concernant le traitement des toitures-terrasses, la recherche sur ces matériaux a conduit à différentes pistes prometteuses telles que :

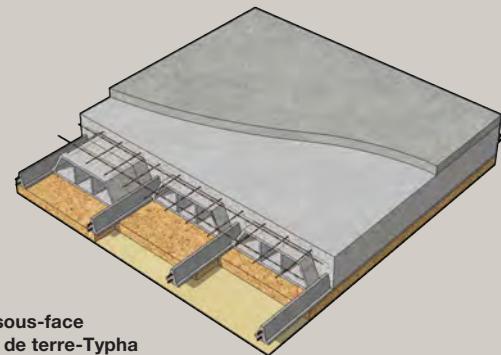
- l'utilisation d'entrevois isolants à base de terre et de Typha, afin de réaliser une dalle isolante. Une fois la dalle réalisée, il serait possible de compléter l'isolation, en ajoutant des panneaux fins isolants sous la dalle ou un enduit correcteur épais en terre amendé de fibres de Typha ;
- l'utilisation de panneaux isolants à base de terre et de Typha à appliquer en sous-face ;
- l'utilisation de panneaux isolants à base de Typha à fixer directement en sous-face, ou à utiliser via un système de faux-plafond.

Pour les toitures en pente, les possibilités d'utilisation du Typha sont les suivantes :

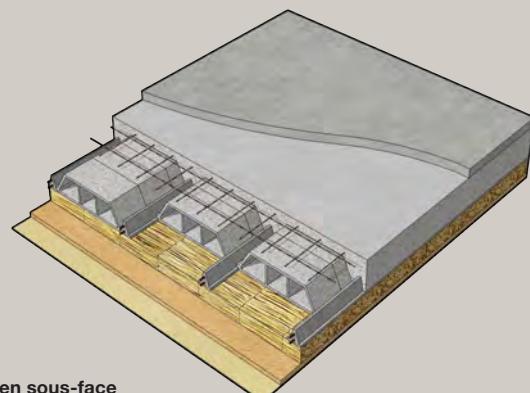
- fixation de panneaux isolants de Typha sous la charpente ;
- faux-plafond en panneaux de Typha ;
- toiture en tuiles de Typha ;
- toiture en chaume de Typha.

Ces matériaux ont un faible impact environnemental, dans la mesure où ils nécessitent peu d'énergie pour être produits. En termes de performances, les premiers essais ont révélé deux propriétés très intéressantes : bonne conductivité thermique et excellente capacité de régulation de l'humidité ambiante.

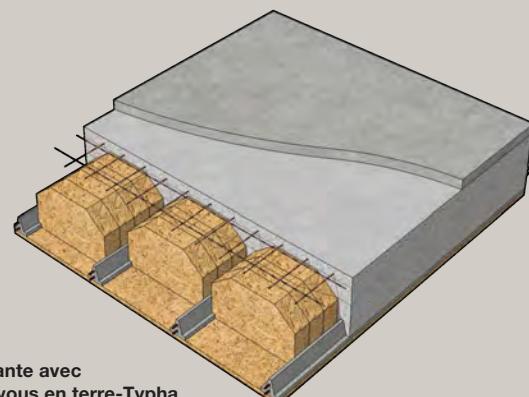
Leur arrivée sur le marché Sénégalais devrait se produire ces prochaines années, suite aux actions menées au cours du programme PNNEEB/TYPhA (GEF, PNUD).



Isolation en sous-face en panneaux de terre-Typha

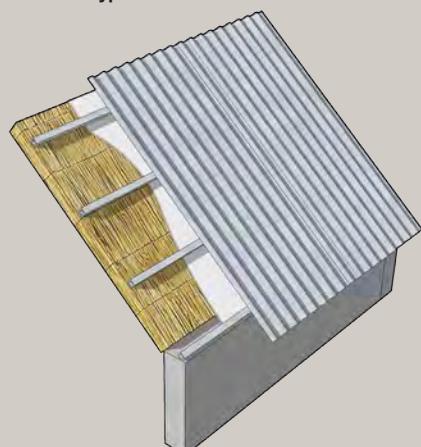


Isolation en sous-face en panneaux de Typha

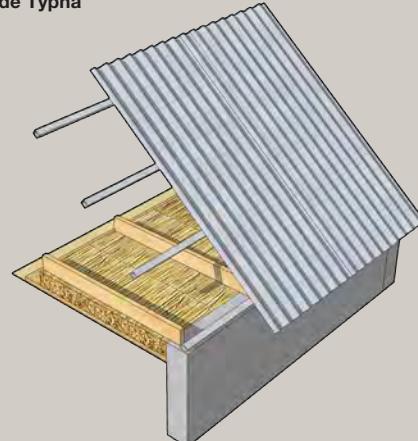


Dalle isolante avec des entrevois en terre-Typha

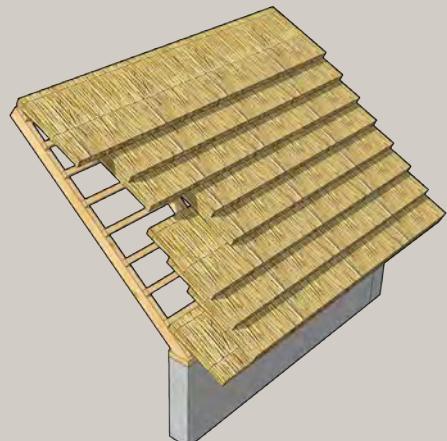
Isolation en sous-face en panneaux de terre-Typha



Faux-plafond isolant en panneaux de Typha



Toiture isolante en tuiles de Typha



5.4.2 PROTECTION SOLAIRE DES FENÊTRES ET DES BAIES

Pour les bâtiments bioclimatiques, l'orientation et l'emplacement des fenêtres doivent être choisis de sorte à limiter les apports de chaleur dus au rayonnement solaire, tout en maximisant l'éclairage naturel et en favorisant la ventilation naturelle. Cependant la surface vitrée d'un bâtiment doit aussi tenir compte du besoin d'intimité des usagers.

Dans tous les cas, l'utilisation de vitrages dans le plan de la toiture est à proscrire.

Pour les bâtiments climatisés, les principes sont les mêmes que pour les bâtiments bioclimatiques, sauf que la contrainte liée à la ventilation naturelle est moins prioritaire. Il sera aussi important de veiller à limiter les infiltrations d'air extérieur grâce à une bonne étanchéité

à l'air (au niveau de la menuiserie elle-même et des liaisons avec la paroi).

La protection des fenêtres et des baies est particulièrement importante : si les ouvrants sont mal protégés, ils représentent alors plus de la moitié des apports solaires des parois verticales.

On distingue :

- les pare-soleil horizontaux (auvents ou casquettes) ;
- les pare-soleil verticaux (avancées verticales) ;
- la combinaison des deux précédents (loggias, claustras).

Pour le dimensionnement des protections solaires, un compromis entre protection et éclairage naturel doit être trouvé. Il permet entre autre de limiter l'utilisation de l'éclairage artificiel, et donc de réduire la consommation électrique.

Galeries et coursives protectrices, bâtiment colonial à Ziguinchor
PNNEB typha



Galeries et coursives protectrices - Dakar
PNNEB - Typha



Les brise-soleil sont à dimensionner en fonction de l'orientation de l'ouvrant selon les heures de protection souhaitées pour une orientation donnée.

Les façades Nord et Sud sont faciles à protéger du rayonnement direct à l'aide des pare-soleil horizontaux (auvents, persiennes), du fait de la position haute du soleil lorsqu'il se trouve face à ces orientations.

Les façades Est et Ouest sont plus délicates à protéger du rayonnement direct car la position du soleil est basse le matin (Est) et en fin de journée (Ouest) lorsqu'il se trouve face à ces orientations. Pour faciliter l'adaptabilité de la protection solaire à la trajectoire du soleil, les protections solaires mobiles sont une solution intéressante et sont utilisées seules ou en complément de protections solaires fixes.

Des enquêtes nationales sur les pratiques de construction courantes réalisées par l'UEMOA, l'OIF-IFDD,

REEEP et Econoler indiquent qu'au Sénégal les protections solaires sont déjà couramment utilisées. Les plus répandues sont les auvents, les loggias et les patios (maisons à cour).

LE POINT SUR : LE FACTEUR DE TRANSMISSION SOLAIRE DES OUVRANTS

Pour les ouvrants, le facteur de transmission solaire se formule de la manière suivante :

$$Fts = f \times S_{(ouv)} \times C_m$$

f : coefficient d' « effet de masque lointain » apporté par la végétation ou les bâtiments environnant

Souv : facteur solaire propre de l'ouvrant

Cm : coefficient d' « effet de masque proche » apporté par la protection

Terrasse et balcons largement débordants, immeuble d'habitation, place de l'indépendance, Dakar - PNNEB typha



Façade à brises soleil - Assemblée Nationale, Dakar
PNNEB typha





Mur double ventilé, école bioclimatique à Dagana
Agence Terreneuve architecte

5.4.3 PROTECTION SOLAIRE DES MURS

La protection solaire des murs est également essentielle, dans la mesure où ces parois sont aussi exposées à l'ensoleillement direct et contribuent aux apports de chaleur dans le bâtiment en absorbant le rayonnement solaire et en transmettant la chaleur vers l'intérieur. Ce sont les murs exposés à l'Est et à l'Ouest qui reçoivent le plus de rayonnement solaire.

Il est possible de protéger les murs de l'ensoleillement de plusieurs manières :

- en utilisant des protections horizontales (auvent, casquette, débord de toiture, pergolas...) qui sont à prescrire surtout pour les murs Sud et Nord (soleil quasi vertical pour ces orientations) ;
- en utilisant des protections verticales (bardage ventilé ou double mur ventilé, végétalisation, claustres...)
- en choisissant des teintes claires mais cette mesure est insuffisante seule, surtout à l'Est et à l'Ouest ;
- en isolant les murs : si les murs Sud et Nord sont de teinte claire, l'isolation n'est pas recommandée. Elle est surtout recommandée pour les murs Est et

Ouest. Quelques centimètres d'isolant seront suffisants. Cette stratégie suppose une excellente ventilation nocturne.

Claustre en protection solaire des murs - Dakar



Mur double ventilé. Lycée français Jean-Mermoz à Dakar

Architecte : Agence Terreneuve - Photo © Daniel Rousselot



LE POINT SUR :

LE FACTEUR DE TRANSMISSION SOLAIRE

Pour les murs, le facteur de transmission solaire s'exprime de la manière suivante :

$$Fts = 0,006 \times C_m \frac{\alpha}{R + 0,17}$$

Cm : coefficient de masque

α : coefficient d'absorption de la paroi dépendant de la teinte du mur

R : résistance thermique de la paroi en m². °C/W



ZOOM SUR :

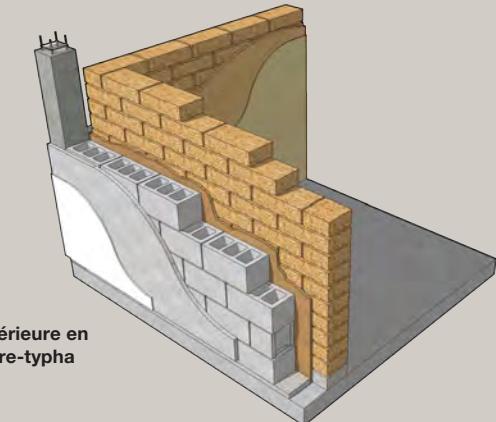
TYPHA ET TERRE, DES MÉTIÉRIAUX LOCAUX POUR L'ISOLATION DES MURS

La gamme de matériaux isolants utilisant le typha et la terre comprend également des blocs isolants qui peuvent être utilisés :

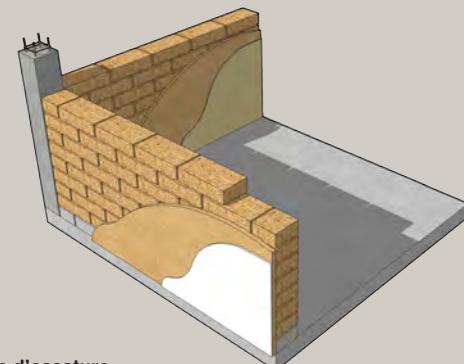
- en isolation intérieure de murs (protection solaire des murs exposés à l'Est et à l'Ouest) ;
- en tant que matériaux de remplissage d'ossature (en remplacement des blocs de ciment).

Des panneaux de Typha isolants peuvent être fixés sur les murs.

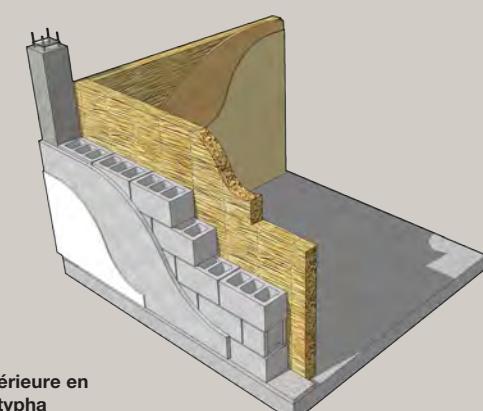
Les finitions peuvent être réalisées avec des enduits de terre crue amendés de fibres de Typha, ou avec des enduits plus lisses offrant une finition contemporaine.



Isolation intérieure en blocs de terre-typha



Remplissage d'ossature isolante en blocs de typha



Isolation intérieure en panneau detypha



Hopital principal de Dakar
PNNEB typha



Mairie de Saint-Louis
PNNEB typha

5.5. ventilation et étanchéité

5.5.1 VENTILATION DES BÂTIMENTS BIOCLIMATIQUES

La ventilation naturelle des bâtiments peut être réalisée de deux manières :

- par tirage thermique dû à une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (ce type de ventilation sera privilégié pour les climats chauds et secs)
- en utilisant les vents dominants (à privilégier pour les climats chauds et humides)

LE POINT SUR : LE COEFFICIENT DE VENTILATION

Le coefficient de ventilation est le ratio entre la vitesse moyenne de l'air dans l'habitation et la vitesse du vent à l'extérieur en amont du bâtiment à une hauteur de 1,5 m. Plus il est proche de 1, plus cela signifie que le bâtiment capte efficacement les vitesses d'air extérieures. La vitesse extérieure peut être augmentée en fonction de la topographie.

$$C = \frac{V_{int}}{V_{1,5\text{ ext}}}$$

C : coefficient de ventilation
V_{int} : vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment
V_{1,5,ext} : vitesse de l'air extérieur à 1,5m de hauteur

Potentiel de ventilation du site

Le potentiel de ventilation d'un site dépend de plusieurs facteurs : la fréquence et la vitesse du vent, le relief local, la végétation, la disposition et la forme des bâtiments environnants. En pratique, il peut être évalué grâce à des études aérauliques, soit en essais soufflerie sur une maquette, soit au moyen de simulations numériques.

De manière qualitative, pour la prise en compte de l'influence de la topographie, la ventilation sera favorisée :

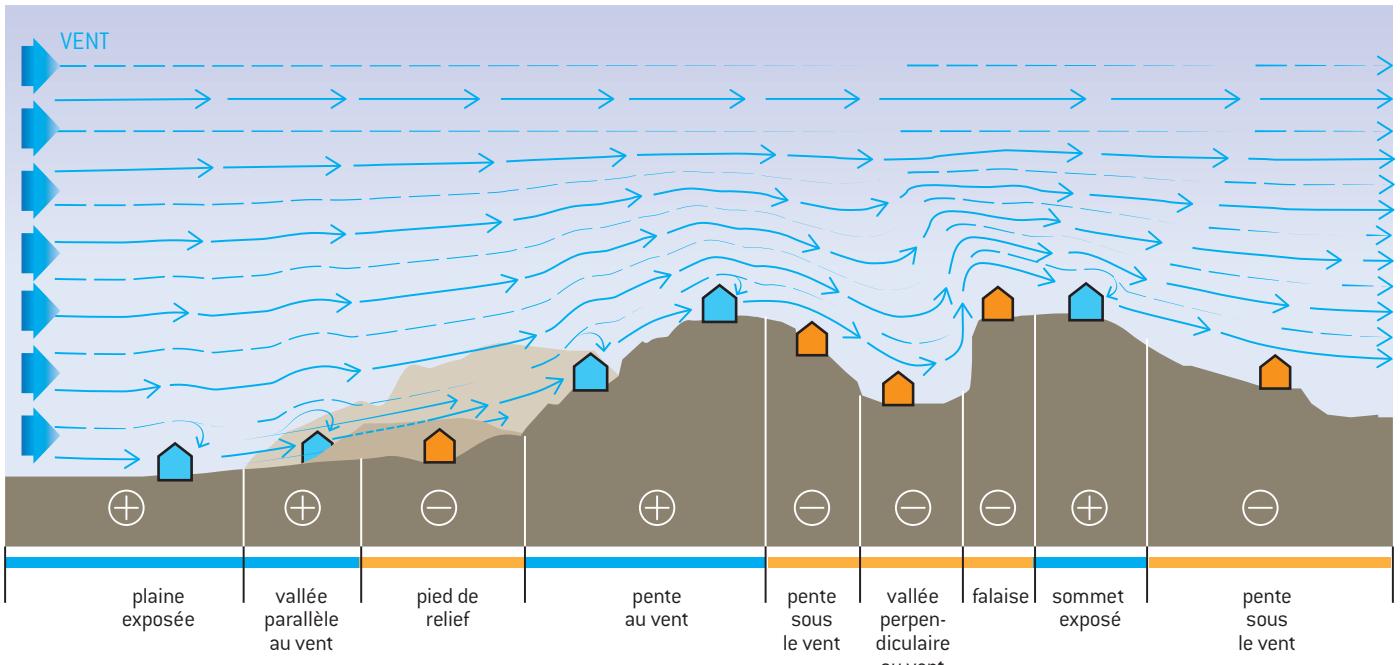
- au sommet des collines car la surpression au sommet de la colline du côté d'où le vent vient génère une vitesse de vent plus élevée
- au niveau des zones de « creux topographiques » parallèles à la direction du vent par exemple entre collines qui créent un phénomène d'accélération du vent

Au contraire, la topographie sera défavorable :

- en pied de colline car le vent «décolle» de ce niveau bas
- dans les vallées perpendiculaires à l'orientation du vent

En ce qui concerne la végétation autour des zones bâties, il faudra veiller à positionner le bâtiment à une distance suffisante pour ne pas trop perturber l'écoulement aéraulique. Lorsqu'on utilise des haies, celles qui sont situées sous le vent par rapport au bâtiment peuvent créer un effet aéraulique bénéfique au niveau du bâtiment. A l'inverse, des haies placées en amont de l'écoulement du vent par rapport au bâtiment vont diminuer le potentiel de ventilation de celui-ci en absorbant une partie de l'énergie du vent.

En ce qui concerne le positionnement respectif des divers bâtiments, il faut également respecter, lorsque cela est possible, une distance suffisante entre bâtiments tenant compte du sens du vent dominant pour éviter un effet d'écran au vent des bâtiments les uns par rapport aux autres.



VENTILATION NATURELLE - INFLUENCE DE LA TOPOGRAPHIE

LE SAVIEZ-VOUS

Avec une vitesse d'air d' 1 m/s (soit de 3,6 km/h) sur la peau, la température ressentie par une personne à l'ombre et avec des parois à une température proche de la température ambiante peut, selon les conditions hygrométriques de l'air, **diminuer de 2°C à 4°C**.

Cette température ressentie s'appelle également « température opérative ».

$$T_{\text{ressentie}} = T_{\text{ambiante}} - 4^{\circ}\text{C}$$

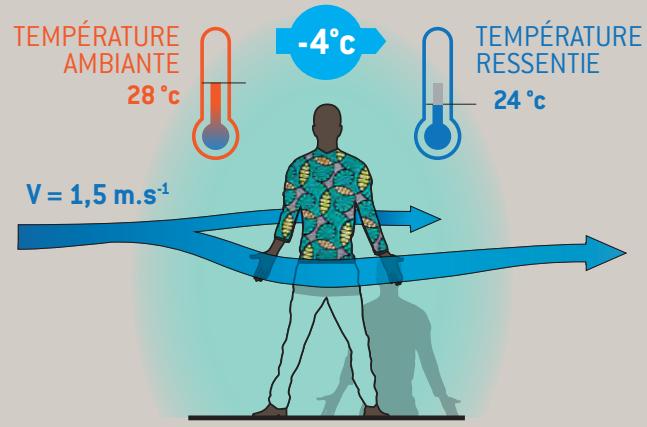
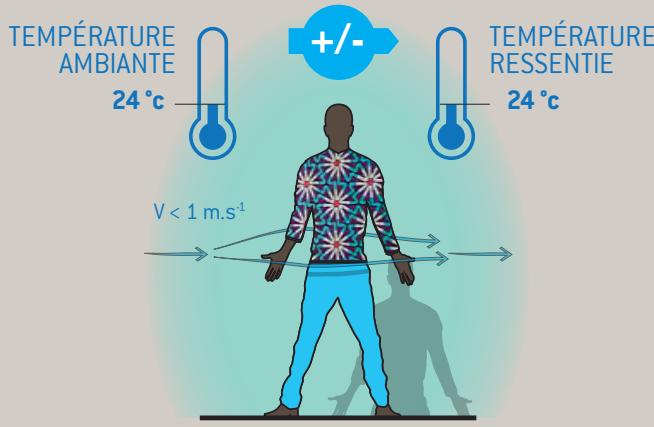
N.B. : la vitesse de l'air si elle est trop importante peut occasionner une gêne :

Vitesse = 0,4 m/s début de sensation du vent sur la peau

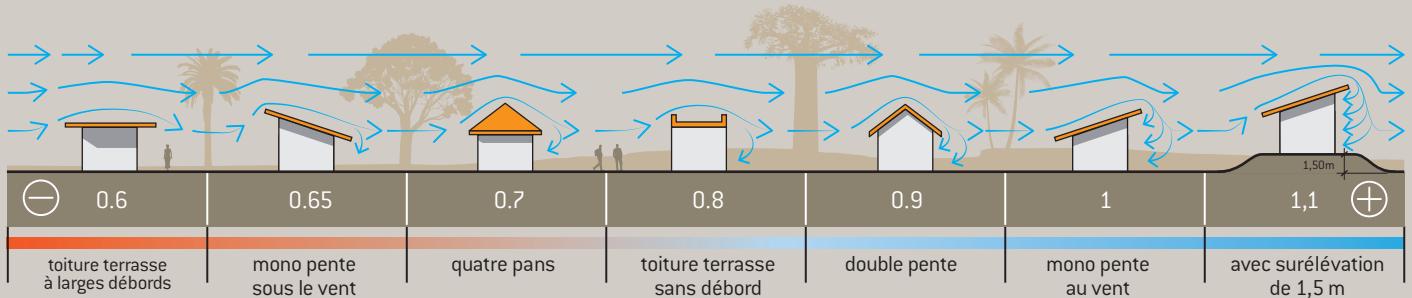
Vitesse = 1,5 m/s vitesse moyenne conseillée dans les locaux

Vitesse = 5 m/s début de l'inconfort par excès de ventilation

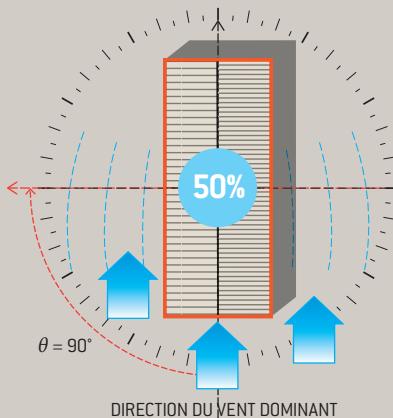
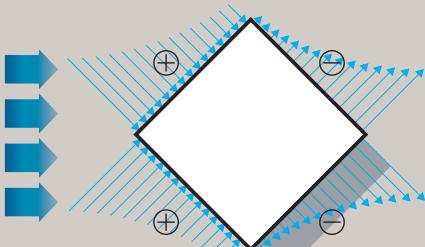
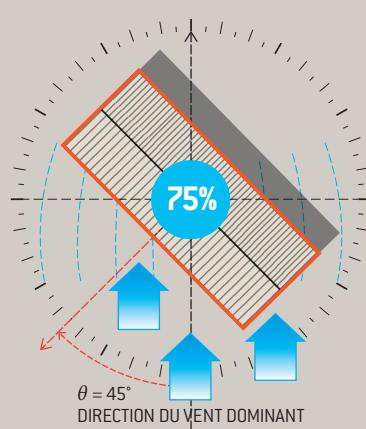
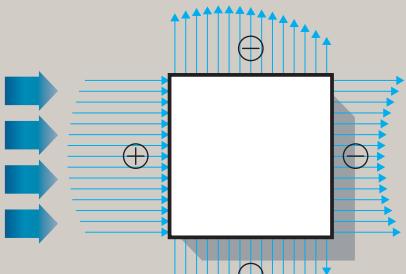
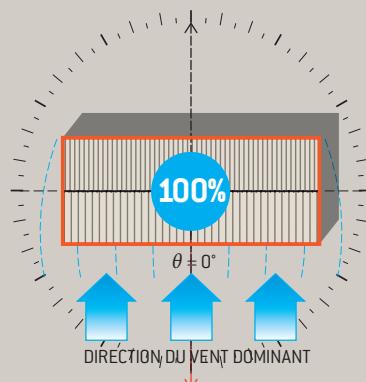
INFLUENCE DE LA VITESSE DU VENT SUR LA TEMPÉRATURE RESENTIE



VENTILATION NATURELLE INFLUENCE DE LA TOITURE

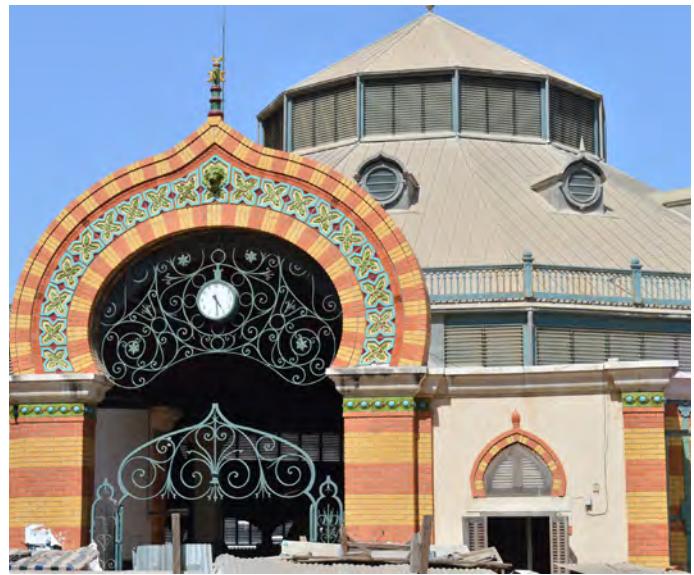


VENTILATION NATURELLE INFLUENCE DE L'ORIENTATION PAR RAPPORT AU VENT DOMINANT





Palais des expositions de Dakar - Cices (Centre international du commerce extérieur). Parois ajourées permettant une ventilation traversante
PNNEEB typha



Marché Kermel, Dakar - Les façades percées, entièrement perméables, permettent une ventilation optimum. PNNEEB typha

Selon les dimensions et la morphologie des bâtiments, il est possible de définir les valeurs de ces distances minimales entre bâtiments pour conserver, pour une direction de vent donnée, un bon potentiel de ventilation (par exemple 80% du maximum). L'effet d'écran entre bâtiments peut, par exemple, être évité en positionnant les bâtiments en quinconce les uns par rapport aux autres.

Potentiel de ventilation du bâtiment

Le coefficient de ventilation (voir page 46 et ci-contre) permet de déterminer le potentiel de ventilation du bâtiment. Plus il est proche de 1, plus cela signifie que le bâtiment capte efficacement le vent extérieur. En termes d'ordre de grandeur, un coefficient de ventilation de 0,5 est déjà excellent. Il est important de préciser aussi que selon la configuration intérieure du logement (voir schémas pages suivantes) et notamment son cloisonnement et la position des ouvrants le coefficient de ventilation ne sera pas le même pour toutes les pièces.

Principes de ventilation traversante ou d'angle

Pour ventiler de manière optimale un local, il est nécessaire d'avoir une entrée ou plusieurs entrées d'air et une ou plusieurs sorties d'air. La ventilation est optimale lorsque deux ouvertures sont disposées sur deux façades opposées et que ces façades sont perpendiculaires par rapport au vent dominant car la différence de pression entre les façades est alors maximale : il s'agit alors de ventilation traversante. Il est fortement recommandé pour un bâtiment, de rendre chaque étage, chaque logement et même chaque zone d'utilisation homogène (zone jour, zone nuit) traversants. La ventilation est bien évidemment optimale lorsque les façades possédant des ouvertures sont positionnées face aux vents dominants pour les mois les plus chauds.

Il faudra également, de par le positionnement des ou-

vrants, faire en sorte que l'écoulement d'air « balaie » efficacement l'espace intérieur afin de permettre d'évacuer les apports de chaleur climatiques et les apports internes mais aussi de créer une vitesse d'air sur l'occupant améliorant son confort. Il est donc recommandé de penser la stratégie de positionnement et de dimensionnement des ouvrants en façade en même temps que la définition des zones où vont se situer les occupants en fonction de l'ergonomie intérieure.

Porosité extérieure

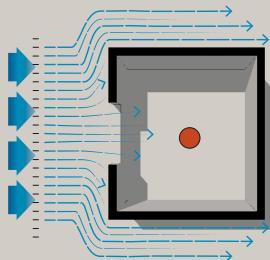
La porosité d'une façade correspond au pourcentage de surface ouvrante par rapport à la surface totale de la façade. Elle est exprimée en %. Cette porosité constitue un paramètre essentiel du potentiel de ventilation d'un bâtiment. Typiquement dans le cas d'un bâtiment recherchant une ventilation traversante on cherchera une porosité nette supérieure à 25%. Cet indicateur n'est toutefois pas suffisant pour caractériser le potentiel de ventilation du logement lié à son enveloppe extérieure : d'une part il faudra que cette porosité soit équitablement répartie sur les façades, en plan et en coupe, pour pouvoir ventiler de manière homogène les diverses zones du bâtiment, et, d'autre part, il faudra privilégier des porosités sous le vent plus importantes que celles au vent afin d'augmenter les débits de ventilation. Enfin il faudra toujours s'assurer que le débit de ventilation est ajustable manuellement par l'occupant.

Porosité intérieure et agencement intérieur

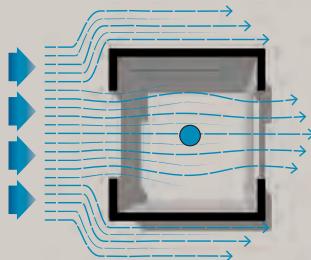
La porosité intérieure c'est à dire, la encore, le pourcentage de surface ouvrante par rapport à la surface totale du cloisonnement doit être supérieure, et idéalement très supérieure, à la plus petite porosité extérieure pour une zone de ventilation homogène donnée. Cette porosité intérieure est assurée par les portes battantes, à jalouses

VENTILATION NATURELLE INFLUENCE DU POSITIONNEMENT DES OUVERTURES

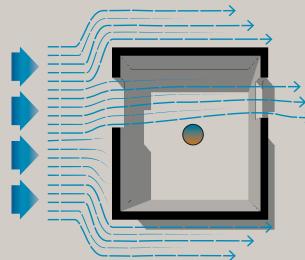
EN PLAN



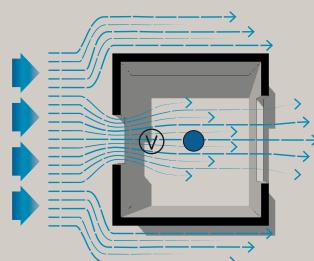
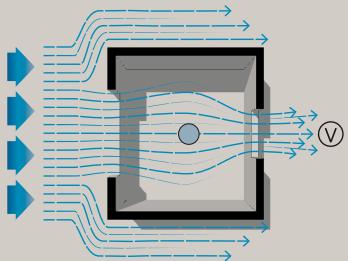
Pas de sortie d'air
Niveau de ventilation très insuffisant
Pas de mouvement d'air à l'intérieur



Entrée et sortie d'air centrées sur la pièce
et sur les murs en vis à vis
Bon potentiel de ventilation de l'espace

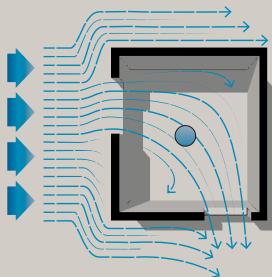


Entrée et sortie d'air décentrées.
Le potentiel de ventilation de l'espace est plus limité. L'air est renvoyé sur le côté

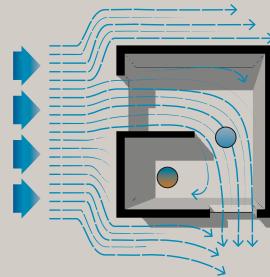


Influence de la taille des ouvertures sur la vitesse d'air.
Si l'entrée est large et la sortie plus étroite, l'espace est ventilé mais le flux d'air est accéléré à l'extérieur de l'espace.
Si l'entrée est étroite et la sortie plus large, le flux d'air est accéléré à l'intérieur de l'espace, la surface couverte par la ventilation est moins importante. Cette disposition est plus intéressante si la ventilation est indispensable

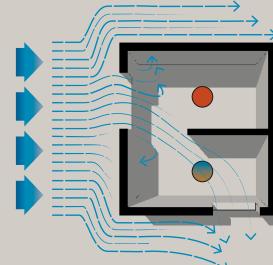
VENTILATION NATURELLE INFLUENCE DU CLOISONNEMENT



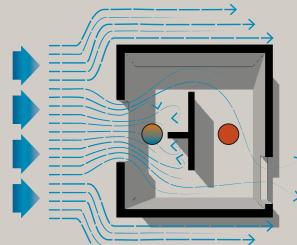
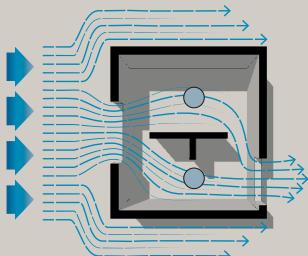
Pas de cloison, les ouvertures sont disposées de telle sorte que la surface ventilée de la pièce soit maximale



Le cloisonnement n'interfère pas sur le flux principal. Légère limitation de la pièce «masquée» par la cloison



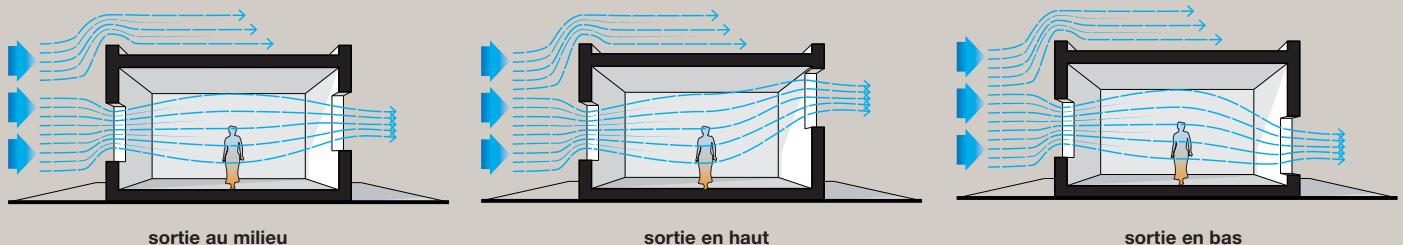
Cloisonnement coupant le flux.
L'absence de sortie d'air limite considérablement le flux d'air dans l'espace pourtant situé face à l'ouverture



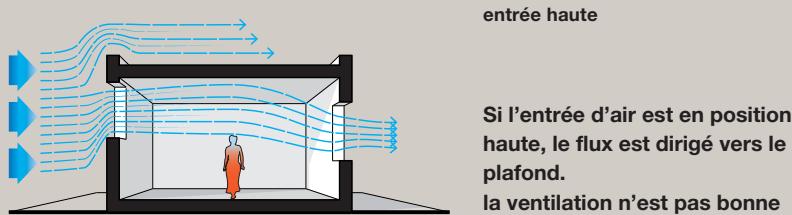
Les cloisonnements positionnés parallèlement aux flux d'air limitent la ventilation mais sont moins pénalisant pour l'efficacité de celle-ci que les cloisons perpendiculaires qui altèrent considérablement l'écoulement

VENTILATION NATURELLE INFLUENCE DU POSITIONNEMENT DES OUVERTURES

EN ÉLÉVATION

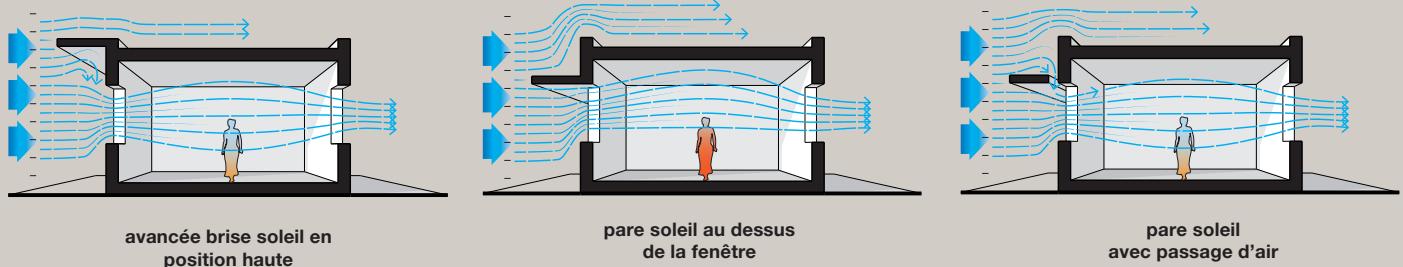


c'est la position de l'entrée d'air qui est déterminante dans la qualité de la ventilation. la position de la sortie influence peu le flux interne.
si l'entrée est bien positionnée, par exemple assez basse, le flux est alors dirigé vers le bas et la ventilation est efficace.



Si l'entrée d'air est en position haute, le flux est dirigé vers le plafond.
la ventilation n'est pas bonne

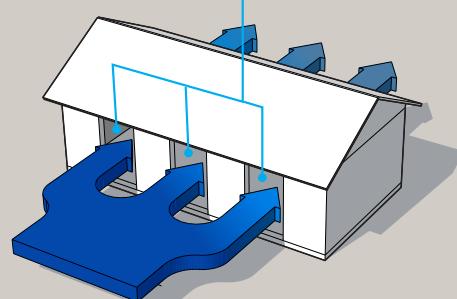
VENTILATION NATURELLE INFLUENCE DU POSITIONNEMENT DES PARES SOLEIL



Les avancées de toitures et pare-soleil devant les ouvertures modifient l'importance et la direction du flux intérieur. Une avancée haute augmente le flux sans modifier sa direction. Un pare soleil horizontal positionné juste au dessus de la fenêtre dirige le flux vers le plafond et diminue l'efficacité de la ventilation. un passage d'air entre le mur et celui-ci permet de compenser cet effet négatif.

PERMÉABILITÉ
MINIMUM
DES FAÇADES AU VENT

35%
DE LA SURFACE EXPOSÉE





Façade à claustras



Parois des communs équipées de claustras permettant une ventilation naturelle performante
Atelier d'architecture MBN

ou à galandage, cloisons mobiles, claustras, imposte ouvrantes (...) positionnées perpendiculairement au sens du flux d'air d'une façade à l'autre.

Les cloisons seront, de préférence, positionnées parallèlement aux écoulements d'air. Pour les cloisons perpendiculaires aux écoulements, il est judicieux qu'elles soient perméables à l'air

La trame de ventilation

Le bon positionnement et le bon dimensionnement des ouvrants par rapports aux zones d'occupation permettra de mettre en évidence un ou des parcours prévisibles du flux aéraulique dans le bâtiment entre façade(s) entrante(s) et façade(s) sortante(s) : ces parcours définiront des « trames de ventilation » c'est à dire des zones de passage de l'air entre façades. On cherchera à positionner des activités dans l'axe de ces zones. Clairement, selon les usages, on définira plusieurs trames de ventilation, notamment temporelles : par exemple pour le logement la zone « de jour » et la zone « de nuit ». Dans chaque zone et pour chaque pièce de chaque zone on s'assurera que le coefficient de ventilation est élevé.

5.5.2 ETANCHÉITÉ À L'AIR DES BÂTIMENTS RAFRAÎCHIS

Principes, sélection des menuiseries et étanchéité de l'enveloppe

Les menuiseries et, plus globalement, l'enveloppe des bâtiments climatisés doivent être étanches à l'air afin d'éviter des consommations importantes de climatisation pour rafraîchir et déshumidifier l'air entrant dans le bâtiment de manière non souhaitée. Dans les structures en maçonnerie, ces «interstices» existent très souvent à la jonction du gros-œuvre et des menuiseries. Il y aura lieu de traiter cette problématique à l'aide de systèmes spéciaux (de type «comribande»). Les menuiseries¹ doivent elles même garantir un bon niveau d'étanchéité entre dormant et ouvrant.

Par ailleurs le bâtiment, en fonction du type d'activité qu'il abrite, de l'âge de ses occupants, du dégagement éventuel de polluants aura un débit de ventilation exprimé en m^3/h /occupant pendant son occupation, appelée ventilation hygiénique.

Ce débit varie de 15 m^3/h /occupant (enfant) à plus de 30 m^3/h /occupant (sportif) avec des valeurs courantes de 18 m^3/h /occupant. Ce débit hygiénique peut être obtenu par ouverture de fenêtres et ne nécessite pas obligatoirement la pause d'une VMC.

1 Afin de caractériser les propriétés d'étanchéité des menuiseries à l'Air, à l'Eau et au Vent la classification AEV a été élaborée. La classification d'étanchéité à l'air A exprime le débit d'infiltration en $m^3/m^2/h$ pour une pression donnée pour une fenêtre. Elle va de « non classée » à A4 c'est à dire de plus de 15 $m^3/m^2/h$ à moins de 0,5 $m^3 /m^2 / h$.



Centre pour femme à Rufisque
HOLLMEN REUTER SANDMAN Architects



Immeuble d'habitation à Dakar. Les blocs des climatiseurs envahissent les façades.

6. recommandations sur les équipements

« Pour une même plage d'utilisation, un brasseur d'air est 20 fois moins consommateur qu'un climatiseur »
Ecodom+, 2010

6.1 les brasseurs d'air

Les brasseurs d'air procurent une sensation de rafraîchissement pour les occupants en créant une vitesse d'air sur la peau qui génère une évacuation de chaleur par convection (température de la peau plus faible que la température de l'air) et par évapotranspiration (génération de fraîcheur produite par l'absorption de la chaleur latente de vaporisation de la sueur à la surface de la peau). Les brasseurs d'air peuvent compléter une ventilation naturelle insuffisante ou inexistante dans un bâtiment bioclimatique à condition toutefois que les apports de chaleur soient évacués (car sinon on finit par brasser de l'air chaud et humide). Ce sera par exemple le cas lorsque la ventilation traversante ne sera pas possible pour des raisons acoustiques ou que des moustiquaires ralentiront trop la vitesse de ventilation. Ils peuvent aussi être utilisés de manière couplée avec un climatiseur et permettre de réduire la consommation électrique de celui-ci (en permettant d'augmenter la température de consigne du thermostat pour une sensation de confort équivalente. L'utilisation de ces brasseurs doit bien évidemment être couplée avec l'utilisation d'une protection solaire efficace du bâtiment et plus globalement avec sa stratégie de conception bioclimatique.

Les ventilateurs sur pied ont l'avantage d'être déplaçables et faciles à orienter. Cependant ils répartissent moins efficacement le flux d'air (flux très localisés) que les brasseurs d'air de plafond.

Nous proposons les prescriptions suivantes :

Pour les caractéristiques techniques :

- de choisir des brasseurs d'air possédant de grands diamètres de pales ($> 1,4 \text{ m}$) afin d'obtenir un brassage homogène pour des vitesses d'air plus lentes. Cela permet également de réduire les gênes acoustiques qui peuvent se produire avec des grandes vitesses de rotation ;
- de privilégier les brasseurs à pâles métalliques car celles-ci ont une meilleure efficacité aédraulique. Il est possible, pour les grands volumes, d'avoir des diamètres très importants, jusqu'à 3,60 m pour certaines marques ;
- d'équiper les commandes des brasseurs de variateurs de vitesse.
- de choisir des brasseurs ayant un bon niveau de performance énergétique : efficacité supérieure à 500 $\text{m}^3/\text{h.W}$ pour un fonctionnement en grande vitesse. Certains modèles très performants ont une efficacité très supérieure ;
- de sélectionner des modèles tropicalisés dont les pièces vont résister dans des conditions de fonctionnement dans une ambiance parfois très humide.

Pour l'installation :

- de fixer le plan de rotation du brasseur d'air à une distance minimale sous plafond de 30 cm pour que l'air soit convenablement aspiré au dessus du brasseur d'air et que la génération d'une vitesse dans la pièce soit homogène ;
- de positionner un brasseur d'air, ou une attente électrique pour une installation future, toutes les tranches de 12 à 15 m^2 de surface de la pièce en effectuant une calepinage soigné par rapport à la localisation des occupants.



Hopital Dalal Jamm, Dakar. La bâtiment adopte de nombreuses dispositions bioclimatiques afin de limiter les consommations de climatisation.

Bureau Architecture Engineering Verhaegen - BAEV
Photo PNEEB-Typha

Pour la sécurité ou le confort des occupants, les précautions suivantes doivent être prises :

- le brasseur d'air doit posséder une accroche solide durable ;
- le plan de rotation des pâles doit être à au moins 2,30 m du sol ;
- pour éviter les effets stroboscopiques potentiels provoqués par le passage des pales devant la source de lumière artificielle, il est conseillé de calepiner simultanément le positionnement des brasseurs d'air et celui des sources lumineuses ;
- éviter le fonctionnement des brasseurs à des vitesses d'air trop importantes qui pourraient générer de l'inconfort sur l'occupant en plus de la gêne acoustique

Au niveau de l'entretien, il est recommandé de dépoussiérer les brasseurs d'air tous les ans.

6.2 autres systèmes de rafraîchissement à faible consommation d'énergie

C'est le cas en particulier des systèmes de rafraîchissement par évaporation qui seront pertinents pour certaines zones climatiques du Sénégal et à certains moments de l'année.

Ces dispositifs consistent à pulser l'air ambiant en le faisant passer sur un corps poreux humidifié : la température de l'air chaud et sec diminue alors considérablement alors que son hygrométrie augmente, et cet air se retrouve ainsi dans la plage de confort en termes de température et d'hygrométrie relative. Ces systèmes peuvent être utilisés de manière couplée avec des brasseurs d'air.

« Un climatiseur split standard alimentant un bureau fonctionnant uniquement pendant la journée et dont l'unité externe est en plein soleil et à un emplacement non ventilé, peut consommer jusqu'à 20% de plus. De même, une unité externe située dans un comble mal ventilé, peut consommer 40% de plus »

Opticlim ®

6.3 la climatisation à compression à faible consommation d'énergie

Règles de base de conception

Avant d'évaluer les besoins en climatisation d'un bâtiment lors de sa conception ainsi que la puissance de rafraîchissement à installer, il est important d'avoir pris toutes les mesures possibles :

- protéger celui-ci du soleil dans le cadre d'une stratégie globale de protection solaire (toiture d'abord, ouvertures, puis murs) ;
- garantir l'étanchéité des menuiseries et de l'enveloppe architecturale et d'un système de ventilation hygiénique pour assurer le renouvellement d'air qui peut être naturel ;
- assurer l'isolation thermique du bâtiment pour les climats très chauds et sec pouvant conduire à des écarts de température importants entre l'extérieur et l'intérieur ;

Après avoir suivi cette démarche rigoureuse de conception architecturale l'évaluation des besoins en climatisation et la conception et le dimensionnement de celle-ci peuvent être réalisés.

Pour les grosses installations la conception et le dimensionnement de la climatisation constituent un processus complexe qu'il est recommandé de confier à un ingénieur de l'équipe de conception et non pas, pour des raisons évidentes à l'entreprise qui va réaliser les travaux de climatisation.

Nous recommandons fortement de réaliser cette conception et ce dimensionnement en se basant sur le comportement dynamique du bâtiment c'est à dire en tenant compte de la temporalité en continu du fonctionnement

du bâtiment à la fois en ce qui concerne ses apports climatiques et ses apports thermiques internes, que ceux-ci soient des apports sensibles (chaleur sèche) ou des apports latents (humidité). Cette méthode permettra de prendre en compte les foisonnements et la réalité des conditions enthalpiques extérieures et conduira à ne pas surdimensionner la climatisation, ce qui permet de faire des économies d'investissement et de fonctionnement (énergie et maintenance).

Critère de choix

La caractérisation de la performance énergétique intrinsèque d'un système de climatisation depuis les petits climatiseurs individuels jusqu'aux gros groupes de climatisation est donnée par son EER (Energy Efficiency Ratio) c'est à dire le « ratio d'efficacité frigorifique » ; il s'agit du rapport entre l'énergie utile au rafraîchissement et l'énergie électrique nécessaire consommée par le compresseur et les accessoires. Plus cet EER est élevé, moins le climatiseur consommera d'énergie pour une capacité de refroidissement donnée. Il est recommandé de se baser sur des valeurs de EER garantis par des tests normalisés réalisés par des organismes indépendants (type Eurovent)

L'utilisation de climatiseurs split system plutôt que des climatiseurs monoblocs est recommandée. Ils offrent une meilleure performance et un meilleur confort acoustique.

Implantation

Unité extérieure des systèmes de climatisation individuels split system

Il est fortement recommandé d'installer l'unité extérieure dans une zone bien ventilée et à l'abri du soleil et de profiter des vents dominants pour dissiper l'air chaud évacué du condenseur. Il faut également l'abriter des poussières, de la pluie et éviter de la poser directement au sol.

En ce qui concerne la maîtrise des nuisances acous-



Immeuble à Dakar. Les constructions récentes adoptent de plus en plus un style international avec de grandes surfaces vitrées sans protection solaire et souvent avec des capacités de ventilation naturelle limitées. Le recours à la climatisation devient indispensable au confort des occupants. Elle peut s'avérer extrêmement énergivore.

tiques aériennes de l'unité extérieure outre la sélection du modèle en fonction du niveau de ses émissions acoustiques l'utilisation de liaisons flexibles et de supports antivibratoires types silent bloc, ou sur une dalle en béton reposant sur du sable, sont possibles.

Unité intérieure

Les unités intérieures doivent être positionnées pour assurer une distribution optimale de l'air dans la pièce (balayage du plus grand volume possible) en évitant le soufflage direct sur les occupants.

Commande et gestion

Il est conseillé :

- de mettre en marche le climatiseur seulement pendant les heures d'occupation de la pièce sauf dans le cas d'un local avec des besoins spécifiques de dés-humidification. Dans ce cas le thermostat du climatiseur pourra être remonté pendant l'inoccupation.
- si le local ne dispose pas d'un système de renouvellement d'air hygiénique, celui-ci devra être assuré par l'ouverture des fenêtres, mais devra être limité à quelques minutes par demi-journée pour éviter les apports de chaleur extérieure et donc une surconsommation de climatisation (ainsi la charte de qualité Opticlim suggère de limiter l'ouverture des fenêtres à 5 minutes par mètre carré d'ouvrant par personne et par demi-journée d'occupation : ainsi on pourra se contenter d'ouvrir pendant 5 min en fin de matinée et fin d'après midi une fenêtre de 2 m² dans un bureau occupé par 2 personnes).

- de régler le thermostat à une température minimale de consigne de 26°C qui est adaptée à un bon confort thermique pour une personne acclimatée, avec un habillement adapté dans une enveloppe architecturale protégée du soleil. Ce réglage fin de la consigne de rafraîchissement est fondamental pour la maîtrise des consommations énergétiques.

Maintenance

Afin d'éviter l'usure prématuée du climatiseur, ainsi que sa perte en efficacité énergétique, un bon entretien du climatiseur est essentiel. Pour faciliter cette maintenance il est recommandé de placer l'unité extérieure dans un endroit accessible afin de faciliter leur maintenance. Il en va de même pour l'unité intérieure si celle-ci n'est pas directement située dans le local à rafraîchir.

La charte de qualité Opticlim préconise un auto-entretien par les usagers eux-mêmes :

- nettoyage des filtres intérieurs mensuellement ou toutes les 200 heures de fonctionnement
- nettoyage de l'évacuation des condensats tous les trimestres

Pour garantir les performances et la durabilité de la climatisation une maintenance complète doit être réalisée par un professionnel sur une base trimestrielle, semestrielle ou annuelle selon le type de climatisation et sa fréquence d'usage.

En l'absence d'entretien et de maintenance régulières les performances du climatiseur pourront chuter jusqu'à devenir dérisoires (efficacité diminuée de plus de 50%).



Dakar - vue aérienne
Jeff Attaway - WikipediaCC BY 2.0

7. spécificités par zones climatiques

Dans ce chapitre, le confort hygrothermique a été étudié pour cinq villes à l'aide de diagrammes de Givoni. Cette méthode a été décrite dans le chapitre 3.

Elle permet de définir des orientations stratégiques pour la conception architecturale à partir de l'analyse des zones d'influence sur le confort thermique de divers dispositifs architecturaux ou techniques.

Les dispositifs suivants sont les plus pertinents pour les divers climats du Sénégal , et selon le climat de la région considérée et le type d'usage du bâtiment ils devront être privilégiés tout ou partie de l'année :

- la stratégie de **ventilation permanente** qui permet d'apporter une vitesse d'air sur la peau et permet de créer une sensation de rafraîchissement à condition que la température de l'air soit inférieure à celle de la peau et que l'hygrométrie ne soit pas trop élevée ;
- **l'inertie thermique associée à une ventilation nocturne** est une stratégie conceptuelle servant à évacuer la nuit par surventilation les apports thermiques diurnes dans les bâtiments qui auraient tendance la nuit à être chauffés par la chaleur accumulée dans la journée. Cette stratégie nécessite que la température nocturne soit suffisamment basse ;
- la stratégie de **rafraîchissement par évaporation** (à l'aide d'un dispositif actif ou passif) qui utilise le phénomène endothermique de vaporisation de l'eau : l'évaporation de l'eau abaisse en effet la température de l'air en prélevant cette chaleur à l'air ambiant pour passer de l'état liquide à l'état gazeux. Cette stratégie nécessite une faible hygrométrie de l'air ambiant

CLEFS DE LECTURE

L'utilisation de cette méthode de pré-conception suppose que :

- le sujet est acclimaté, il est au repos ou en activité sédentaire, et porte une tenue vestimentaire appropriée au climat tropical ;
- les apports de chaleur thermiques externes par rayonnement solaire dans le bâtiment sont minimisés et donc toutes les mesures possibles de protection solaire sont prises (protection de la toiture, des murs et des baies) ;
- les apports de chaleur interne par les équipements sont minimisés ou évacués par ventilation sauf pendant les périodes fraîches où ils sont valorisés pour contribuer au confort ;
- les bâtiments sont non climatisés.

Les limites de confort de cette étude ont été choisies provisoirement de manière similaire pour toutes les zones climatiques étudiées afin d'avoir de premières indications sur les stratégies et dispositifs à mettre en place de manière prioritaire en fonction des zones climatiques *.

La plage de confort est définie comme suit :

- Température minimale de bulbe sec : **22°C**
- Température maximale de bulbe sec : **29°C**
- Température maximale de bulbe humide : **20,8°C**
- Humidité relative maximale (mesurée à la température minimale de confort): **90%**

De plus, l'analyse du confort a été réalisée pour deux cas d'usage :

- les bâtiments à usage permanent, c'est-à-dire ceux qui sont occupés de jour comme de nuit (tels que, par exemple les habitations, les hôpitaux, etc.) ;
- les bâtiments à usage diurne, c'est-à-dire ceux qui sont occupés seulement le jour (tels que les écoles, les bureaux, etc.). Pour l'étude, les horaires d'occupation de ces bâtiments sont supposés être de 8h et 17h.

* Les limites proposées évolueront au fur et à mesure que des résultats de prochaines enquêtes sur la perception du confort hygrothermique au Sénégal seront disponibles. Ces enquêtes permettront en effet de mieux caractériser les zones de confort des personnes acclimatées en fonction des zones climatiques.

INFORMATIONS AU LECTEUR

Le lecteur remarquera que la déclinaison de cette méthodologie de pré-conception mois par mois pour divers climats du Sénégal et pour diverses typologies de bâtiments en termes de fonctionnalité du bâtiment et d'usage de celui-ci (permanent, diurne,...) peut conduire, pour certains climats, à des préconisations architecturales divergentes d'une saison à l'autre en particulier en terme d'inertie (forte ou faible) même si on retrouve aussi des points communs pour toutes les saisons (protection solaire, possibilité de ventilation,...). Dans la mesure où il s'agit, bien évidemment, dans chaque cas de ne faire qu'un seul bâtiment, il appartiendra au concepteur qui souhaite pousser plus avant les démarches bioclimatiques de trouver des réponses vraiment adaptées à son projet et à l'usage qu'en feront les occupants en développant des méthodologies conceptuelles plus fines en termes de zonage des espaces de vie, de traitement différenciés de diverses parties de l'enveloppe (inertie, surface d'ouvrants), de migration à l'intérieur de ceux-ci ou encore de valorisation d'espaces intermédiaires intérieurs-extérieurs comme les patios ou les toitures pour les activités nocturnes. On se souvient que parmi les premières méthodes de conception bioclimatique en zone tropicale développées par les pionniers Mahoney ou Olgay figuraient des recommandations de type « dormir dehors ».



Saint-Louis - vue aérienne

7.1

Dakar



climat

Le climat de Dakar est caractérisé par un phénomène microclimatique de type côtier¹ avec une humidité de l'air ambiant élevée qui contribue à réduire les élévations de température apportées par l'ensoleillement.

On y distingue 2 saisons principales : **de juin à octobre**

une saison chaude et pluvieuse avec un pic de précipitations en Août ;

de novembre à mai

une saison sèche où les températures sont moins élevées et pendant laquelle il ne pleut presque pas (entre 0 et 5 mm par mois). Les nuits sont sensiblement plus fraîches en Janvier et Février.

TEMPÉRATURE

La température à Dakar est modérée toute l'année. Elle est plus élevée pendant la saison des pluies.

La température moyenne maximale est de 31°C en Octobre, et sa moyenne minimale est de 18°C en Janvier, ce qui donne à Dakar une amplitude de température annuelle peu élevée (13°C).

L'écart moyen de température entre le jour et la nuit (amplitude diurne) est faible: il varie de 4°C (pendant la saison des pluies) à 9°C (en Février) ce qui est caractéristique d'un climat tropical humide.

ENSOLEILLEMENT

en moyenne, l'ensoleillement global horizontal minimal sur une journée est de 4,1 kWh/m² au mois de Décembre. Il est maximal au mois d'Avril et s'élève à 6,2 kWh/m².

PLUVIOMÉTRIE

elle est assez faible, 360 mm de total annuel de précipitations, avec 25 jours de pluie répartis sur 5 à 6 mois durant la saison des pluies.

HUMIDITÉ

assez élevée tout au long de l'année, avec une variation annuelle de 42% (Décembre) à 98% (Juin), avec une moyenne autour de 80%. Le stress thermique de jour comme de nuit, est le plus important de Juin à Novembre.

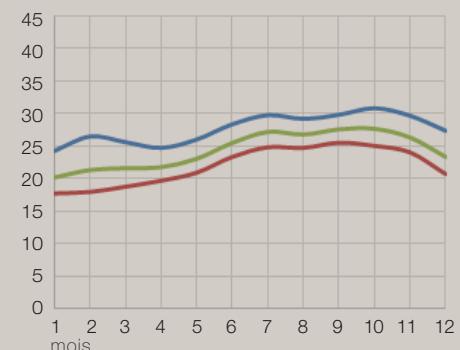
VENTS

de Novembre à Mai, les vents dominants sont de direction Nord à Nord-Est. De Juin à Octobre ce sont les vents de Nord-Ouest qui dominent.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dir. principale	N NE	N N	N N	N N	N NO	O NO	O NO	N NO	N NO	N NE	N NE	
	▼	▼	▼	▼	▼	◀	▶	▶	▼	▶	▶	▶

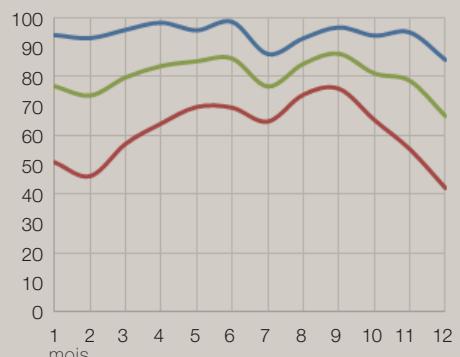
températures

maximale - moyenne -minimale
temp. °C



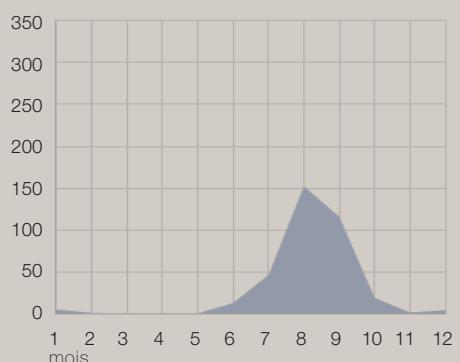
humidité

maximale - moyenne -minimale
humidité relative %



précipitations

total annuel : 360 mm - 25,3 jours de pluie
précipitations en mm



¹ Source : <http://www.unep.org/DEWA/water/groundwater/africa/french/rapport/CountrySummaries/Senegal/French-Summary%20Senegal%2018-2-02.pdf>



Dakar - vue aérienne
Jeff Attaway - WikipediaCC BY 2.0

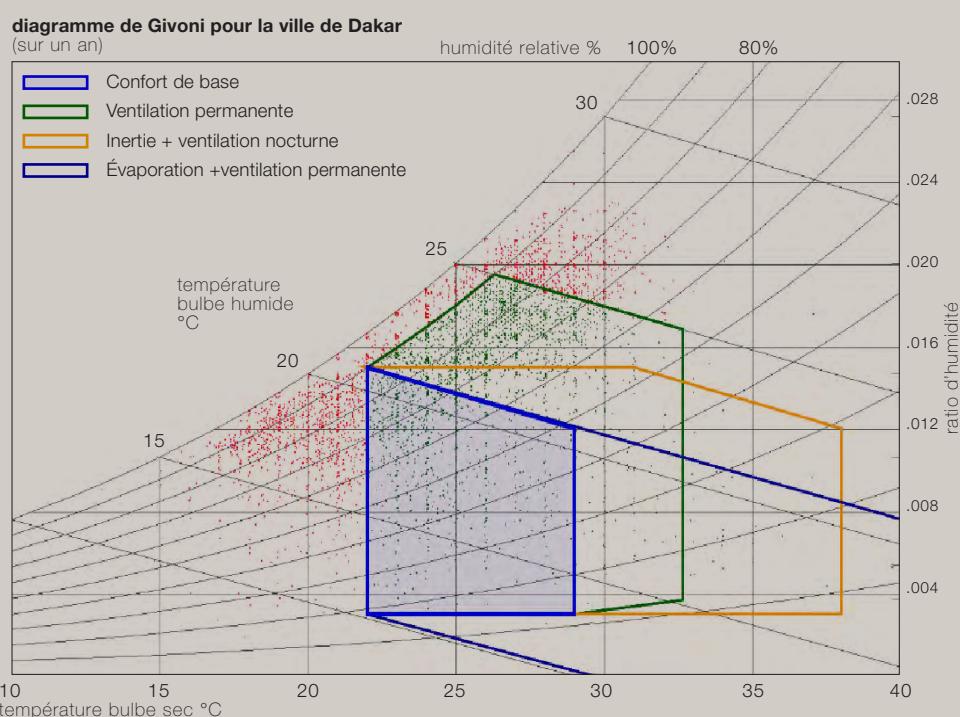
Zones de confort diagramme de Givoni

Le diagramme de Givoni permet de visualiser les zones de confort pour différentes stratégies conceptuelles :

- confort assuré par les conditions climatiques ambiantes avec seulement une bonne protection solaire
- confort avec inertie et ventilation nocturne
- confort avec ventilation permanente
- confort avec refroidissement par évaporation ;

Par ailleurs il est considéré dans notre analyse que la zone de confort assurée par un brasseur d'air est similaire à celle de la ventilation permanente.

Nous avons reporté mois par mois sur les histogrammes des pages qui suivent les pourcentages d'heures de confort sur les plages horaires étudiées afin de comparer les zones d'influence de chaque dispositif.



stratégies de confort retenues pour Dakar

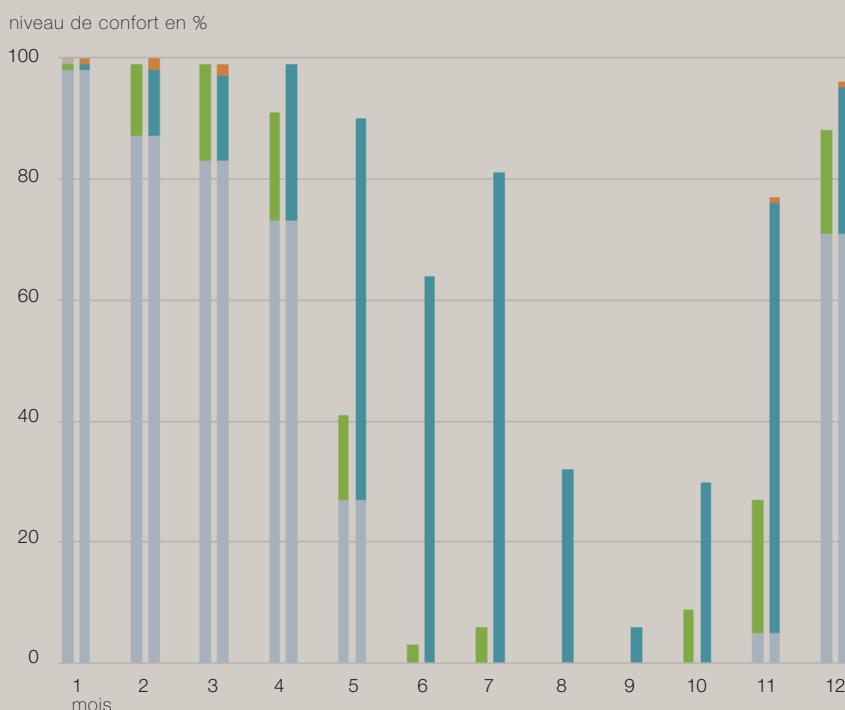
Le climat de Dakar permet d'avoir un «confort de base» de décembre à avril pendant une grande partie de la journée¹.

En journée, dès le mois de mai, la température humide est en dehors de la zone de confort la majeure partie du temps. De juin à novembre elle est presque constamment en dehors de cette zone. La ventilation permanente naturelle ou artificielle (brasseurs d'air) devient alors indispensable, elle contribue à étendre les périodes de confort. Elle est moins opérante en septembre en raison de la très forte humidité de l'air.

L'utilisation de l'inertie thermique reste limitée, par rapport à la ventilation naturelle. elle contribue peu à l'amélioration de confort du fait de la faible amplitude thermique entre le jour et la nuit et de l'humidité élevée de l'air. L'utilisation du rafraîchissement par évaporation à Dakar est également peu justifiée pour améliorer le confort hygrothermique en raison de l'humidité relative élevée.

¹ À condition d'assurer une bonne protection solaire du bâtiment et de valoriser les apports de chaleur interne pendant les périodes fraîches de la journée des mois les plus frais.

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage permanent



bâtiment bioclimatique à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
JUILLET						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						

bâtiment climatisable à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
JUILLET							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

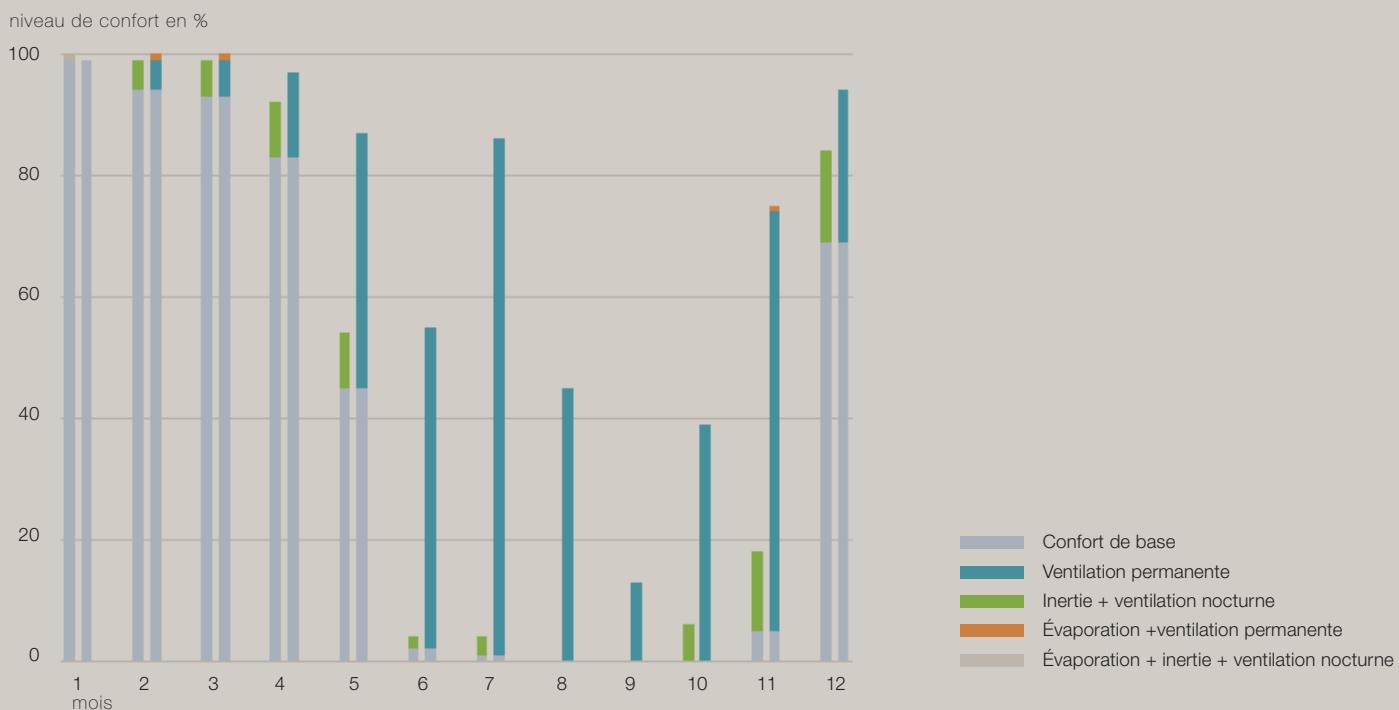
À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : se protéger toute l'année de l'ensoleillement direct au niveau des ouvertures, des murs et de la toiture.
ISOLATION : en protection solaire (toiture, murs Est et Ouest).
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : la ventilation permanente peut être utilisée pour assurer le confort une grande partie de la journée. Pendant la saison des pluies elle ne pourra pas assurer intégralement le confort en raison du taux d'humidité de l'air élevé.

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : se protéger de l'ensoleillement direct au niveau des ouvertures, des murs et de la toiture.
ISOLATION THERMIQUE : en protection solaire et réduction des transferts conductifs (toiture, murs Est et Ouest).
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : peut être utilisée pour assurer le confort une grande partie de la journée. utilisée en appoint du climatiseur en saison des pluies pour limiter les consommations d'énergie
CLIMATISATION : elle vient en complément de la ventilation permanente (mécanique) lorsque celle-ci est insuffisante (en Juin et Novembre). Son utilisation doit être minimisée. Elle peut être complétée par un brasseur d'air. Elle sert avant tout à réduire le taux d'humidité élevé pendant la saison des pluies.

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage diurne



bâtiment bioclimatique à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brassageurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier	Recommandé			Souhaitable		
Février	Recommandé			Souhaitable		
Mars	Recommandé	Recommandé	Souhaitable	Souhaitable		
Avril	Recommandé	Recommandé	Souhaitable	Souhaitable		
Mai	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Juin	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Juillet	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Août	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Septembre	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Octobre	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Novembre	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable		
Décembre	Recommandé	Possible	Possible	Souhaitable		

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : Se protéger toute l'année de l'ensoleillement direct au niveau des ouvertures, des murs et de la toiture.
VENTILATION NATURELLE OU PAR BRASSEURS D'AIR : la ventilation permanente est fortement conseillée toute l'année (climat humide).
ISOLATION DES BÂTIMENTS NON CLIMATISÉS : Toiture, murs Est et Ouest.

bâtiment climatisable à usage diurne

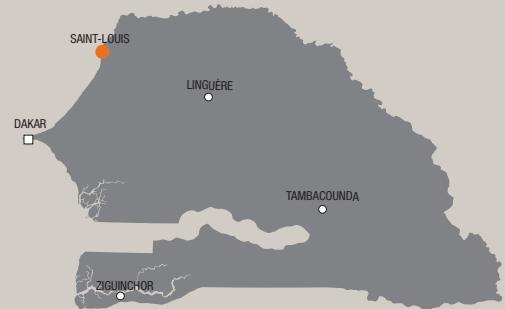
	protection solaire	ventilation naturelle / brassageurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier	Recommandé			Souhaitable			
Février	Recommandé			Souhaitable			
Mars	Recommandé	Recommandé	Souhaitable	Souhaitable			
Avril	Recommandé	Recommandé	Souhaitable	Souhaitable			
Mai	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Juin	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Juillet	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Août	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Septembre	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Octobre	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Novembre	Recommandé	Recommandé	Possible	Souhaitable			
Décembre	Recommandé	Possible	Possible	Souhaitable			

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : se protéger toute l'année de l'ensoleillement direct au niveau des ouvertures, des murs et de la toiture
ISOLATION DES BÂTIMENTS CLIMATISÉS : en tant que protection solaire (toiture, murs Est et Ouest) et de réduction des transferts conductifs
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : la ventilation permanente peut être utilisée pour assurer le confort en saison sèche. En saison des pluies à utiliser en appui du climatiseur pour limiter les consommations d'énergie, elle permet une température de consigne plus haute pour un niveau de confort équivalent.
CLIMATISATION : utile pour assurer le confort en saison des pluies, elle sert avant tout à diminuer le taux d'humidité de l'air plus qu'à réduire la température

7.2

Saint-Louis



climat

Le climat de Saint-Louis comprend deux saisons principales :

de juillet à septembre

une courte saison des pluies avec un pic de précipitations en septembre

d'octobre à juin

une longue saison sèche où il pleut entre 0 et 14 mm par mois.

TEMPÉRATURE

La température à Saint-Louis est assez modérée toute l'année.

La température moyenne maximale est de 33°C en Octobre, et la moyenne minimale est de 16°C en Janvier, ce qui donne à Saint-Louis une amplitude de température annuelle peu élevée (17°C).

L'écart moyen de température entre le jour et la nuit (amplitude diurne) varie de 5°C (pendant la saison des pluies) à 13°C (en Novembre).

ENSOLEILLEMENT

En moyenne, l'ensoleillement global horizontal minimal sur une journée est de 3,5 kWh/m² au mois de décembre. Il est maximal au mois d'avril et s'élève à 5,3 kWh/m².

PLUVIOMÉTRIE

Elle est assez faible, 215 mm de total annuel de précipitations, avec environ 21 jours de pluie pendant la saison des pluies (sur 3 mois).

HUMIDITÉ

Elle varie en fonction de la saison. D'octobre à mai : de 53% à 72% d'humidité relative moyenne. De juin à septembre : de 81 à 83% d'humidité relative moyenne. L'humidité relative moyenne maximale est de 95% en juin et la minimale est de 29% en février. Saint-Louis est en situation de stress thermique tous les mois de l'année en journée, sauf en janvier, et de mai à octobre la nuit.

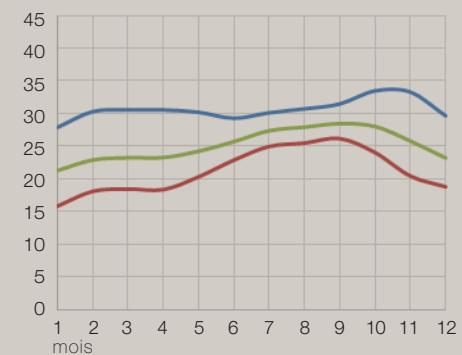
VENTS

De novembre à avril, les vents dominants sont de direction nord et nord-est. De mai à octobre ce sont les vents de nord-ouest et nord qui dominent.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dir. principale	N NE	N NE	N N	N NO	N N	N NO	N NO	O NO	O NO	N NO	N N	N NE
	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▶	▶	▼	▼	▼

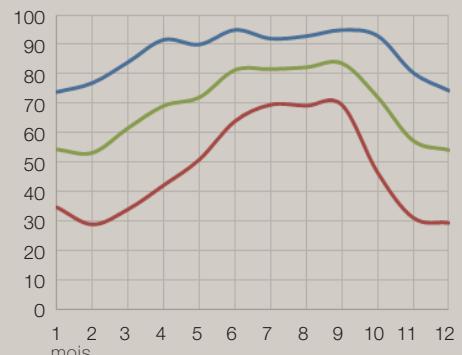
températures

maximale - moyenne -minimale
temp. °C



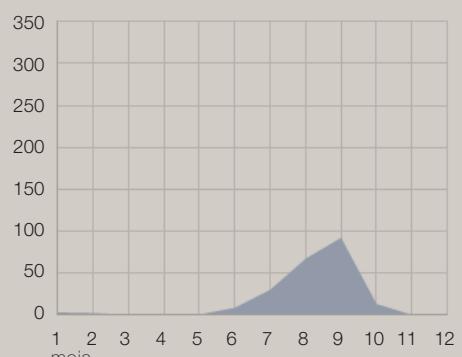
humidité

maximale - moyenne -minimale
humidité relative %



précipitations

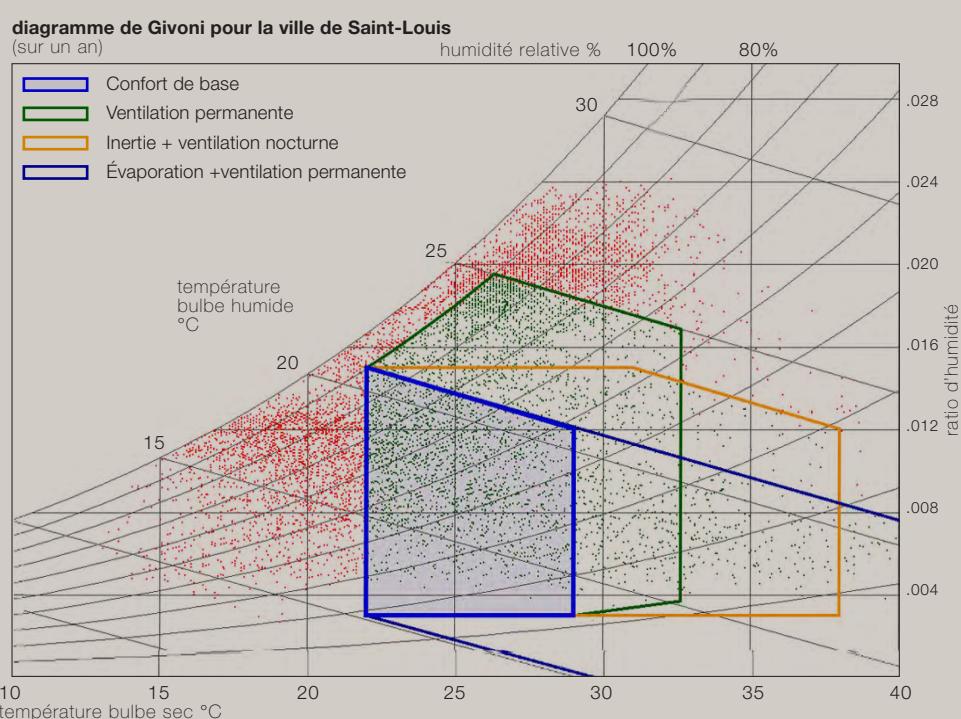
total annuel : 215 mm - 20,9 jours de pluie
précipitations en mm





Saint-Louis
Manu25 - CC

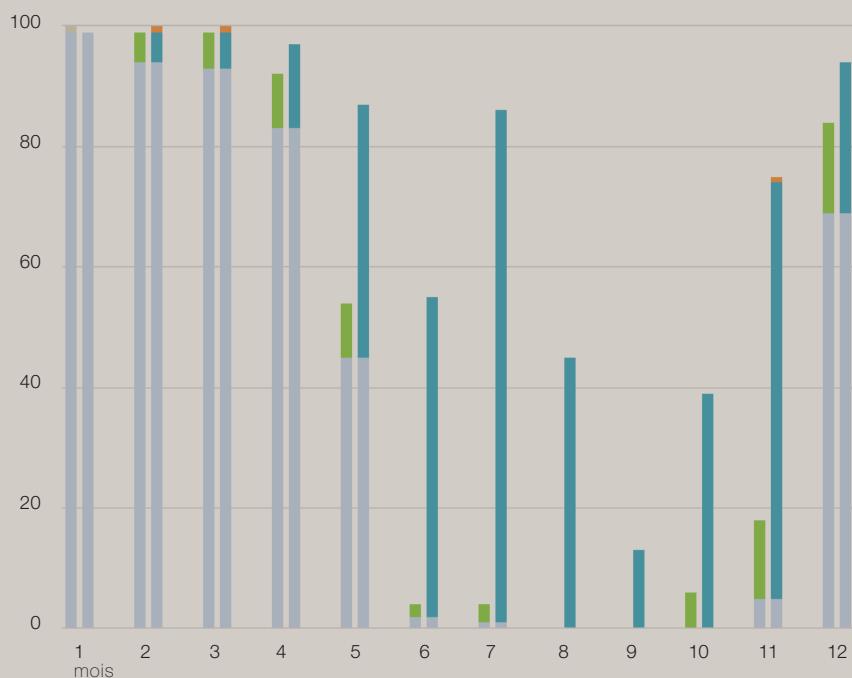
Zones de confort diagramme de Givoni



stratégies de confort retenues pour Saint-Louis

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage permanent

niveau de confort en %



bâtiment bioclimatique à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
Juillet						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, des murs et de la toiture.

ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest en priorité.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : très efficace de novembre à juin. La ventilation permanente reste pertinente entre juillet et octobre. Toutefois le taux d'humidité de l'air élevé (toute la journée) la rend moins efficace.

INERTIE THERMIQUE AVEC VENTILATION NOCTURNE : possible mais moins efficace que la ventilation permanente de mai à juin et en novembre. Entre Juillet et Octobre elle n'est pas recommandée, car peu efficace.

bâtiment climatisable à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.

ISOLATION : toiture, murs Est et Ouest en priorité.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : de décembre à mai, en permanence, permet d'atteindre le confort une grande partie de la journée. De Juin à Novembre : le brasseur d'air peut être utilisé en appoint d'un climatiseur.

INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : possible, mais moins efficace que la ventilation permanente. De mai à octobre, peu efficace donc pas recommandée.

CLIMATISATION : souhaitable de juin à novembre (minimiser son utilisation en la combinant avec un brasseur d'air).

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage diurne



bâtiment bioclimatique à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
Juillet						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : se protéger de l'ensoleillement direct au niveau des ouvertures, des murs et de la toiture.

ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest en priorité.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : très efficace de novembre à juin. La ventilation permanente est vivement conseillée entre Juillet et Octobre. Toutefois le taux d'humidité de l'air élevé la rend moins efficace entre Août et Octobre.

INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : possible mais moins efficace que la ventilation permanente de mai à juin et en novembre. Entre Juillet et Octobre elle n'est pas recommandée, car peu efficace.

bâtiment climatisable à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.

ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest en priorité.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : de décembre à mai, en permanence permet d'atteindre le confort une grande partie de la journée. De Juin à Novembre : le brasseur d'air peut être utilisé en appoint d'un climatiseur.

INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : possible, mais moins efficace que la ventilation permanente de mai à juin et en novembre. De mai à octobre, peu efficace et donc pas recommandée.

CLIMATISATION : souhaitable de juin à novembre (minimiser son utilisation en la combinant avec un brasseur d'air).

7.3

Linguère



climat

Le climat de Linguère comprend deux saisons principales :

de juin à octobre

une saison des pluies avec un pic de précipitations en Août

de novembre à mai

une saison sèche pendant laquelle il pleut entre 0 et 4 mm par mois

TEMPÉRATURE

Les températures à Linguère sont élevées.

La température moyenne maximale est de 33°C en Octobre, et la moyenne minimale est de 16°C en Janvier, ce qui donne à Linguère une amplitude de température annuelle de 21°C.

L'écart moyen de température entre le jour et la nuit (amplitude diurne) est assez important: il varie de 9°C (en Août) à 17°C (en Novembre).

ENSOLEILLEMENT

En moyenne, l'ensoleillement global horizontal minimal sur une journée est de 4,6 kWh/m² au mois de Janvier. Il est maximal au mois de Mai et s'élève à 7,2 kWh/m².

PLUVIOMÉTRIE

Elle est assez faible, 375 mm de total annuel de précipitations répartis sur une moyenne de 31 jours pendant la saison des pluies qui dure 5 mois.

HUMIDITÉ

Elle varie en fonction de la saison. Pendant la saison sèche l'humidité relative moyenne est comprise entre 27% et 37%. Pendant la saison des pluies elle est comprise entre 51% et 77%. L'humidité relative moyenne maximale est de 94% en septembre et la minimale est de 14% en mars. Linguère est en situation de stress thermique tous les mois de l'année en journée, et de mai à octobre la nuit.

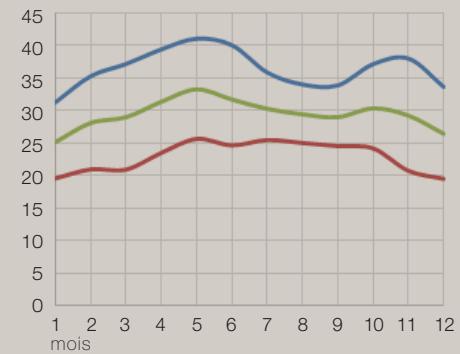
VENTS

D'octobre à mai, les vents dominants sont de direction Nord, Nord-Est, Nord-Ouest. De juin à septembre ce sont les vents de Sud-Ouest et Ouest qui dominent.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dir. principale	N NE	E N	N NO	N NO	N SO	O NO	O SO	S SO	S SO	N NO	N NE	N V
	▼	◀	▼	◀	▼	▶	▼	▶	◀	▼	▶	▼

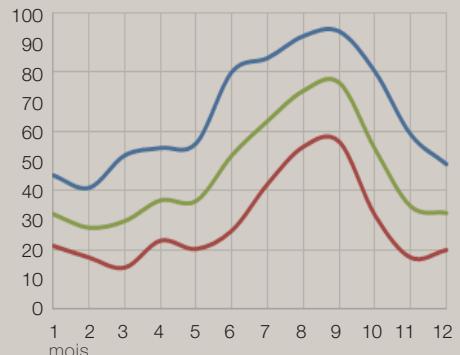
températures

maximale - moyenne -minimale
temp. °C



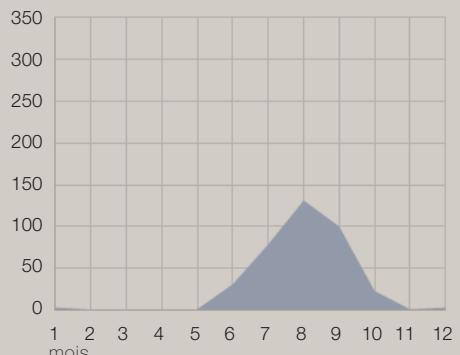
humidité

maximale - moyenne -minimale
humidité relative %



précipitations

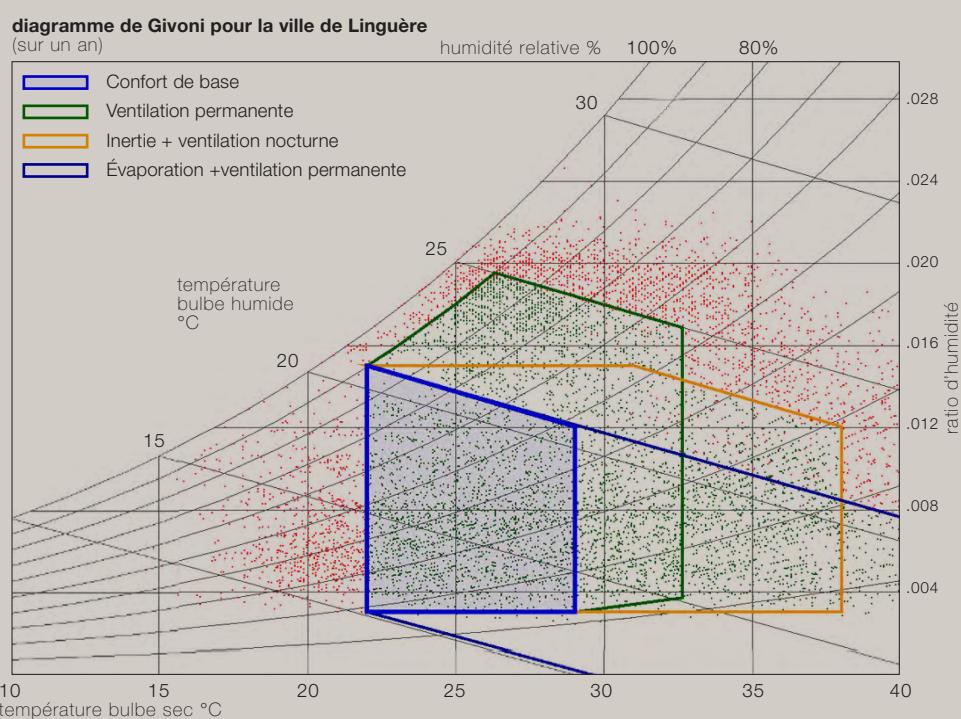
total annuel : 375 mm - 30,6 jours de pluie
précipitations en mm





Paysage de la région de Linguère

Zones de confort diagramme de Givoni



stratégies de confort retenues pour Linguère

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage permanent

niveau de confort en %



bâtiment bioclimatique à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest en priorité.

INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante d'octobre à juin. D'avril à juin et en octobre, elle est à combiner avec de la ventilation permanente. Inopérante de juillet à septembre, l'humidité de l'air étant trop élevée.

RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : possible de novembre à mars pour améliorer le confort (combinée à l'inertie thermique avec ventilation nocturne).

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : la ventilation permanente est conseillée entre juillet et septembre mais avec une efficacité limitée par le taux d'humidité élevé de l'air.

bâtiment climatisable à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest en priorité.

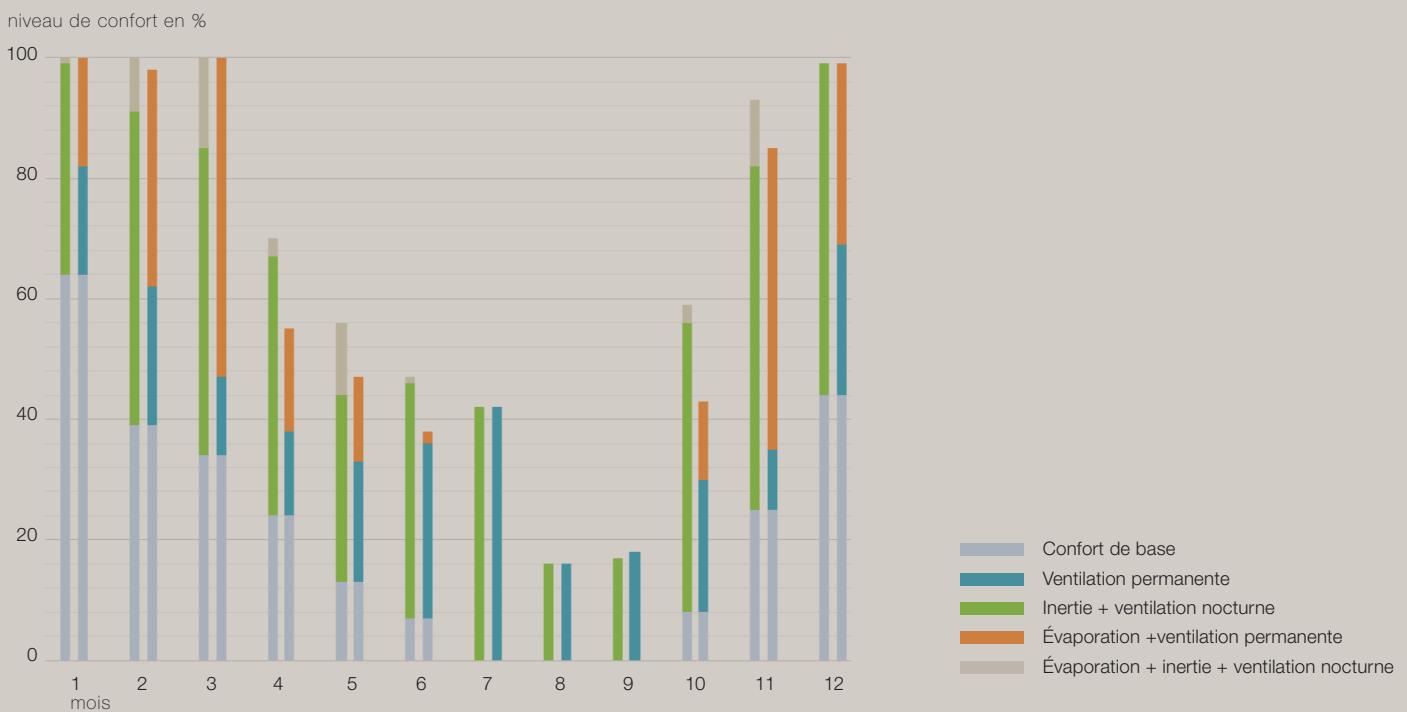
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante d'octobre à juin. D'avril à juin et en octobre, elle est à combiner avec de la ventilation permanente. Inopérante de juillet à septembre, l'humidité de l'air étant trop élevée.

RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : possible de novembre à mars si possible combinée à l'inertie thermique avec ventilation nocturne.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : la ventilation permanente est conseillée entre juillet et septembre mais avec une efficacité limitée par le taux d'humidité élevé de l'air.

CLIMATISATION : à utiliser d'avril à octobre, fonctionnement à optimiser en combiné avec les brasseurs d'air pour une température de consigne plus haute.

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage diurne



bâtiment bioclimatique à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
Juillet						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest en priorité.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de novembre à mars. D'avril à juin et en octobre, elle est à combiner avec de la ventilation par brasseurs d'air pour gagner en confort.
Inopérante de juillet à septembre, l'humidité de l'air étant trop élevée.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : possible de novembre à mars combinée à l'inertie thermique avec ventilation nocturne
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : conseillée entre juillet et septembre. Toutefois le taux d'humidité de l'air élevé la rend moins efficace.

bâtiment climatisable à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest en priorité.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : conseillée entre juillet et septembre mais le taux d'humidité de l'air élevé la rend moins efficace.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de novembre à mars. D'avril à mai, à combiner avec de la ventilation par brasseurs d'air.
Inopérante de juillet à septembre, l'humidité de l'air étant trop élevée
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : possible de novembre à mars combinée à l'inertie thermique avec ventilation nocturne.
CLIMATISATION : à utiliser au minimum et en combiné avec les brasseurs d'air en saison des pluies.

7.4

Tambacounda



climat

Le climat de Tambacounda comprend deux saisons principales :

de juin à octobre

une saison des pluies avec un pic de précipitations en Août

de novembre à mai

une saison sèche pendant laquelle il pleut très peu.

TEMPÉRATURE

Les températures de Tambacounda sont élevées.

La température moyenne maximale est de 40,5°C en avril, et sa moyenne minimale est de 20°C en décembre, ce qui donne à Tambacounda une amplitude de température annuelle de 21°C.

L'écart moyen de température entre le jour et la nuit (amplitude diurne) varie de 8°C (en septembre) à 16°C (en novembre et février).

ENSOLEILLEMENT

En moyenne, l'ensoleillement global horizontal minimal sur une journée est de 4,4 kWh/m² au mois d'août. Il est maximal au mois d'avril et s'élève à 7,1 kWh/m².

PLUVIOMÉTRIE

La ville compte environ 710 mm annuel de précipitations, avec 52 jours de pluie pendant la saison des pluies (sur 5 mois).

HUMIDITÉ

Elle dépend de la saison. En saison sèche l'humidité relative moyenne est comprise entre 22% et 41%, pendant la saison des pluies elle est élevée et est comprise entre 58% et 83%. L'humidité relative moyenne maximale est de 97% d'août à octobre et la minimale est de 12% en février. Tambacounda est en situation de stress thermique tous les mois de l'année en journée, sauf en janvier, et d'avril à octobre la nuit.

VENTS

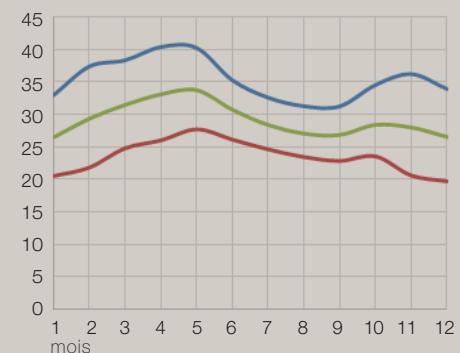
De novembre à avril, les vents dominants sont de direction Est, Nord-Est, Nord et Sud-Est. De mai à octobre ce sont les vents de Sud-Ouest et Nord-Ouest qui dominent.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dir. principale	E NE	N NE	N NE	S S O	SO NO NO	O NO NO	O NO NO	S SO SO	S SO SO	E SE NE	E NE	
↑	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

températures

maximale - moyenne -minimale

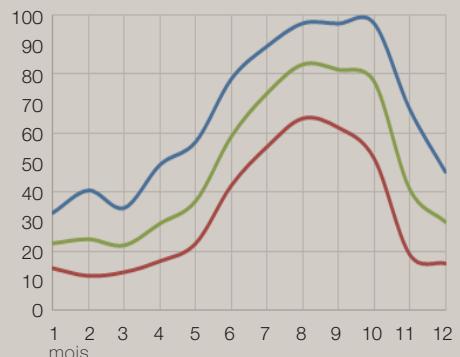
temp. °C



humidité

maximale - moyenne -minimale

humidité relative %



précipitations

total annuel : 710 mm, 51,6 jours de pluie

précipitations en mm

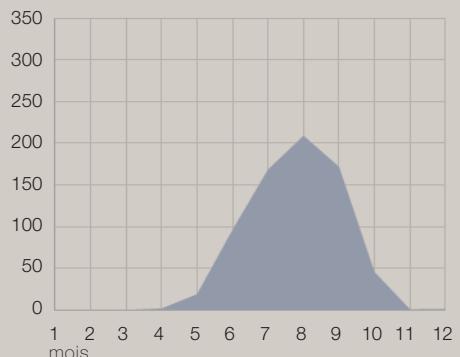
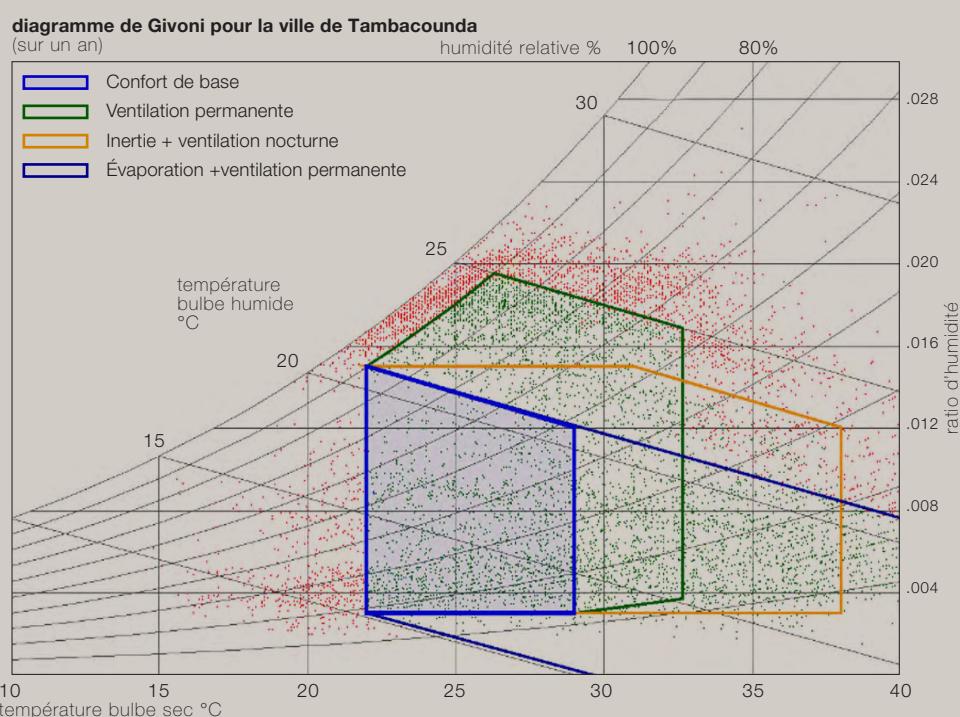




Image du pays Bassari, à l'est de Tambacounda
Photo Sébastien Morisot

Zones de confort diagramme de Givoni



stratégies de confort retenues pour Tambacounda

bâtiments à usage permanent

Le « confort de base » est le plus élevé pendant la saison sèche, et diminue lors de la saison des pluies. Au maximum, on est 66% du temps dans la zone de confort en Décembre. Cette valeur plus élevée que pour les bâtiments à usage diurne s'explique par le fait que les heures les plus chaudes sont en journée.

Pour augmenter les heures de confort sans avoir recours à la climatisation, nous avons étudié les stratégies suivantes :

- l'inertie thermique et la ventilation nocturne (IVN) complétées par du rafraîchissement par évaporation et un brasseur d'air (BA/IVN)
- la ventilation permanente (VP) complétée par l'évaporation.

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage permanent



bâtiment bioclimatique à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
Juillet						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						

bâtiment climatisable à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

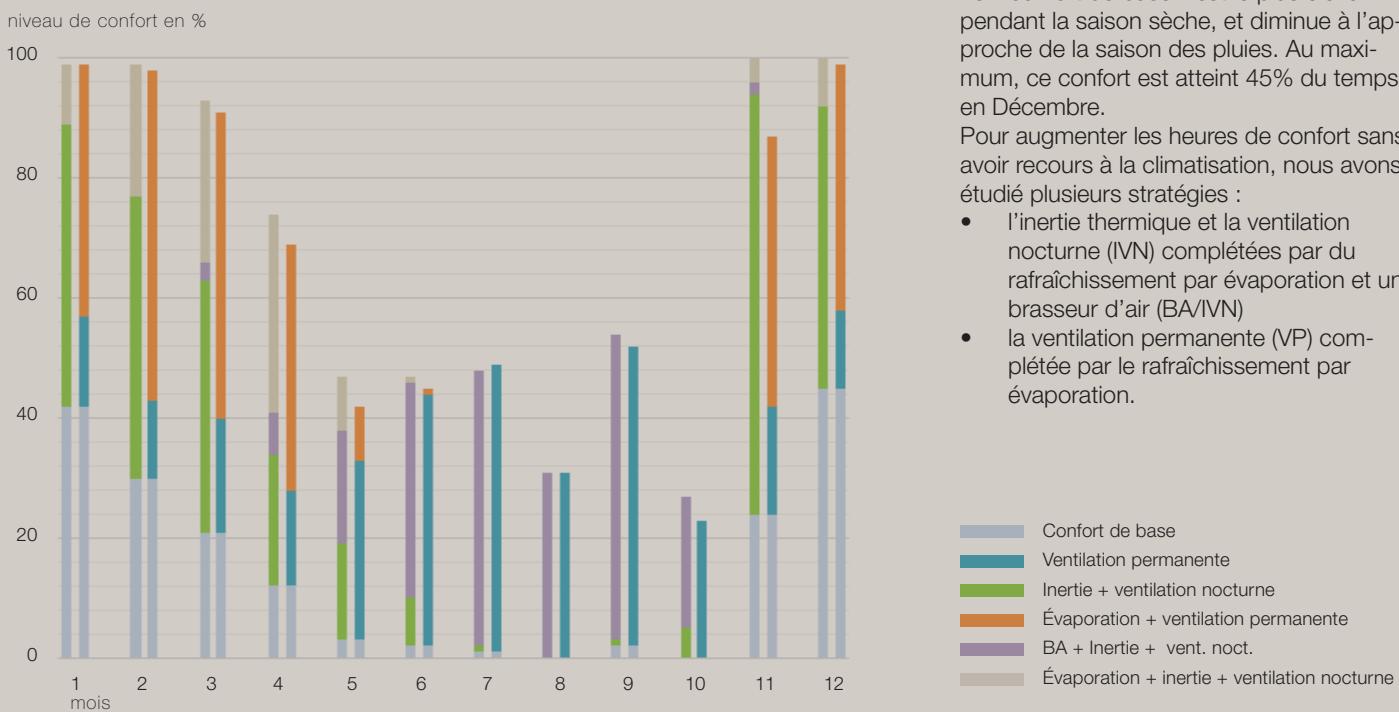
À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest en priorité.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de Novembre à Avril.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : intéressante de février à mai. Inadaptée à d'autres périodes.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : de Février à Avril, l'inertie thermique peut être complétée par l'utilisation d'un brasseur d'air la journée. La nuit la chaleur diurne emmagasinée dans la structure du bâtiment est à évacuer par ventilation naturelle. Conseillée entre Mai et Octobre. Toutefois le taux d'humidité de l'air élevé ne la rend que partiellement efficace.

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest en priorité.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de Novembre à Avril.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : intéressante de Février à mai. Inadapté à d'autres périodes.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : conseillée entre Mai et Octobre. Toutefois le taux d'humidité de l'air élevé ne la rend que partiellement efficace. Elle peut être complétée avec de l'inertie thermique et la ventilation nocturne.
CLIMATISATION : à utiliser surtout entre mai et octobre - minimiser son utilisation en complétant par l'utilisation simultanée d'un brasseur d'air qui permet de remonter la consigne de température.

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage diurne



bâtiment bioclimatique à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai		Recommandé	Souhaitable				
Juin		Recommandé	Possible				
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre		Recommandé	Souhaitable				
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest en priorité.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : conseillée entre mai et octobre. De mai à juin et en octobre, pour gagner en confort elle peut être combinée avec l'inertie thermique et la ventilation nocturne : dans ce cas les fenêtres doivent rester fermées en journée et la ventilation doit alors être créée par un brasseur d'air, puis la nuit il faut ouvrir les fenêtres pour évacuer la chaleur stockée dans la structure du bâtiment la journée. Toutefois des taux d'humidité de l'air élevés peuvent diminuer l'efficacité de cette stratégie.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de Novembre à Avril.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : pertinente de décembre à mai. Non possible par ailleurs.

bâtiment climatisable à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai		Recommandé	Souhaitable				
Juin		Recommandé	Possible				
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre		Recommandé	Souhaitable				
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest en priorité.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : la ventilation permanente est vivement conseillée entre mai et octobre. Toutefois le taux d'humidité de l'air élevé ne la rend que partiellement efficace. Elle peut être complétée avec de l'inertie thermique et la ventilation nocturne.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de novembre à avril.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : adaptée de décembre à mai.
CLIMATISATION : à utiliser surtout entre mai et octobre - minimiser son utilisation en complétant par l'utilisation simultanée d'un brasseur d'air qui permet de remonter la consigne de température.

7.5

Ziguinchor



climat

Le climat de Ziguinchor, comme les autres zones du Sénégal, est caractérisé par 2 principales saisons :

de juin à octobre

une saison des pluies avec un pic de précipitations en Août.

de novembre à mai

une saison sèche où il pleut entre 0 et 4 mm par mois.

TEMPÉRATURE

La température moyenne maximale est de 37°C en mars, et sa moyenne minimale est de 19°C en décembre, ce qui donne à Ziguinchor une amplitude de température annuelle de 18°C.

L'écart moyen de température entre le jour et la nuit (amplitude diurne) varie de 6°C (en août) à 17°C (en mars).

ENSOLEILLEMENT

En moyenne, l'ensoleillement global horizontal minimal sur une journée est de 3,7 kWh/m² au mois d'août. Il est maximal au mois d'avril et s'élève à 6,7 kWh/m².

PLUVIOMÉTRIE

1110 mm annuel de précipitations avec 74 jours de pluie pendant la saison des pluies (sur 5 mois). Ziguinchor est dans la région du Sénégal la plus arrosée.

HUMIDITÉ

Elle dépend de la saison. En saison sèche l'humidité relative moyenne est comprise entre 50% et 76%. Pendant la saison des pluies elle est élevée et comprise entre 77% et 92%. L'humidité relative moyenne maximale est de 97% d'août à octobre et la minimale est de 12% en février

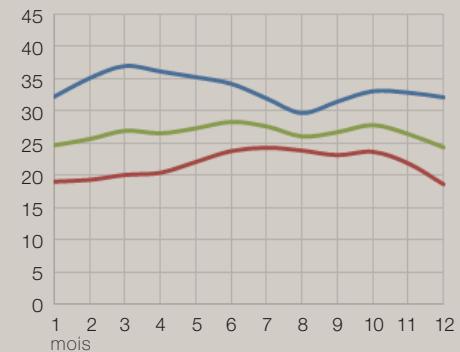
VENTS

De novembre à février, les vents dominants sont de direction Est, Nord-Est, Nord et Sud-Est. De mars à octobre ce sont les vents de Sud-Ouest et Nord-Ouest qui dominent.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dir. principale	E NE	E NE	0 NO	0 NO	0 NO	0 SO	S SO	0 SO	0 NO	0 SO	N NE	
	◀	◀	▶	▶	▶	▶	▼	◀	▶	▼	▼	▼
	◀	◀	▶	▶	▶	▶	▼	◀	▶	▼	▼	▼

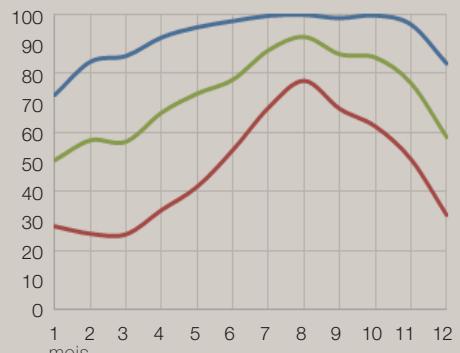
températures

maximale - moyenne -minimale
temp. °C



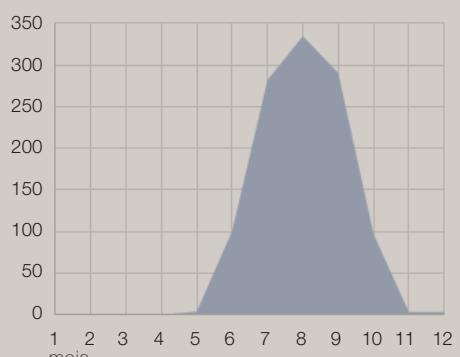
humidité

maximale - moyenne -minimale
humidité relative %



précipitations

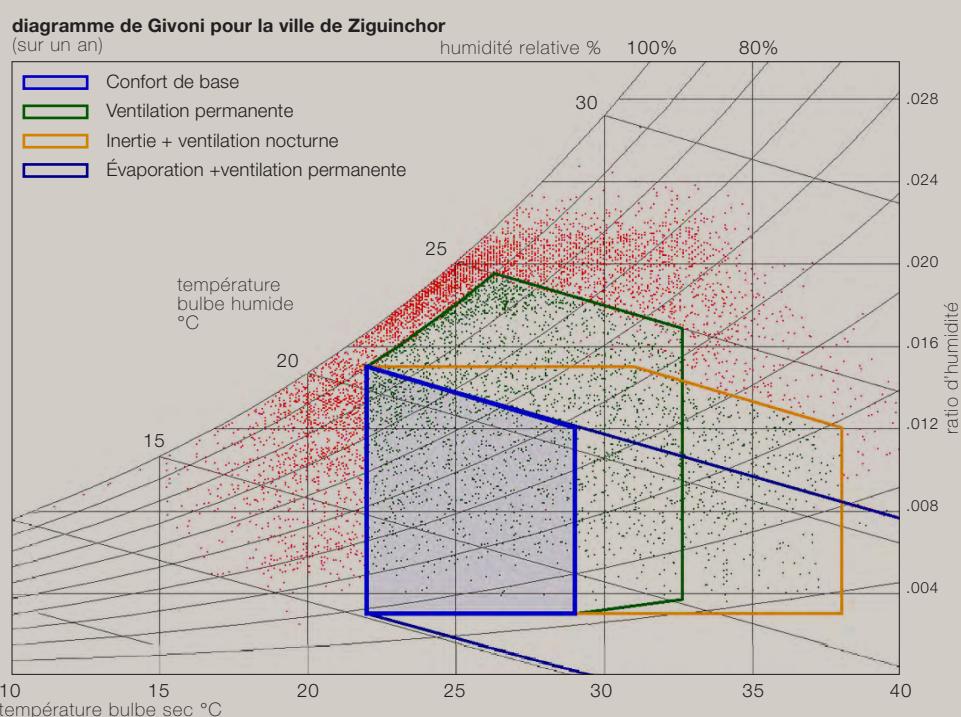
total annuel : 1110 mm - 74 jours de pluie
précipitations en mm





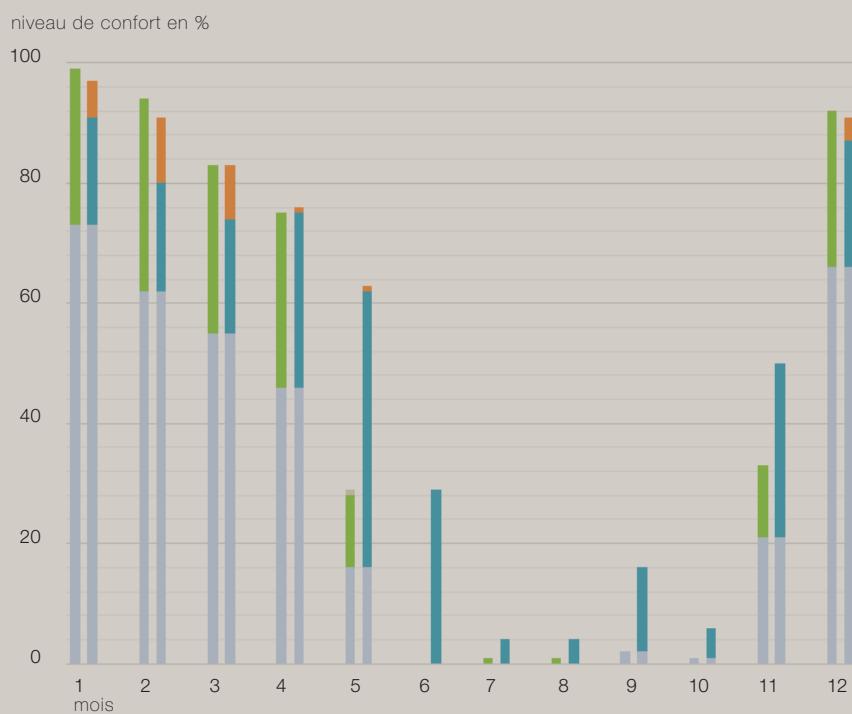
Case à impluvium, Enampore, Casamance
Photo Sébastien Morisot

Zones de confort diagramme de Givoni



stratégies de confort retenues pour Ziguinchor

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage permanent



bâtiment bioclimatique à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai						
Juin						
Juillet						
Août						
Septembre						
Octobre						
Novembre						
Décembre						

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : conseillée jour et nuit de mai à novembre mais avec une efficacité réduite entre juillet et novembre du fait d'une humidité relative élevée pendant cette période.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de décembre à avril. Peu opérante le reste de l'année du fait d'un trop faible écart de température entre le jour et la nuit.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : peu adapté à inadapté.

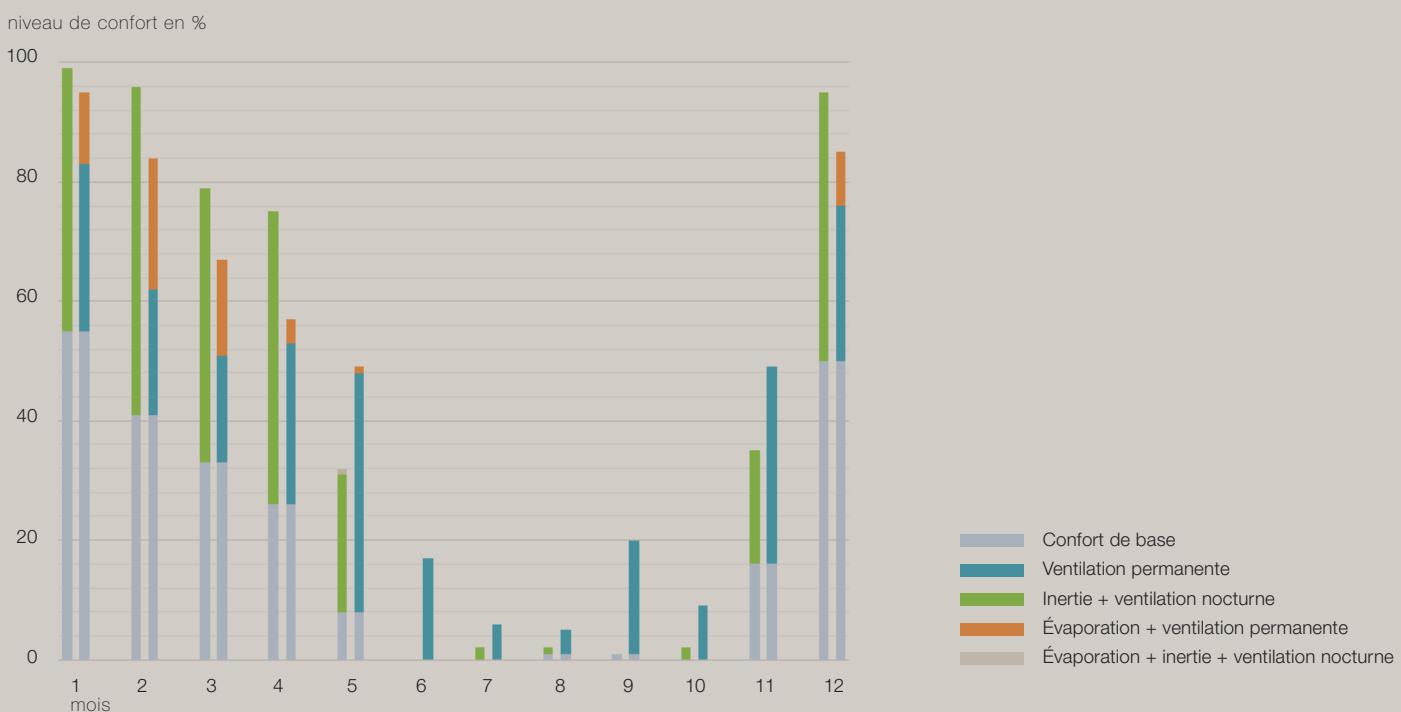
bâtiment climatisable à usage permanent

	protection solaire	ventilation naturelle / brasseurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.
ISOLATION : toiture, murs est et ouest.
VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : permanente avec un brasseur d'air en appui du climatiseur conseillée jour et nuit de mars à novembre mais avec une efficacité réduite entre juillet et novembre du fait d'une humidité relative élevée pendant cette période.
INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : possible de décembre à janvier sans utiliser de climatiseur. Peu opérante le reste de l'année du fait d'un trop faible écart de température entre le jour et la nuit.
CLIMATISATION : surtout en dés-humidification de l'air ambiant de mars à novembre et particulièrement entre juillet et novembre.
RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : peu adapté à inadapté.

histogrammes de confort pour les bâtiments à usage diurne



bâtiment bioclimatique à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brassageurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation
		jour	nuit			
Janvier						
Février						
Mars						
Avril						
Mai		Recommandé	Souhaitable			
Juin		Recommandé	Possible			
Juillet		Recommandé	Possible			
Août		Recommandé	Possible			
Septembre		Recommandé	Possible			
Octobre		Recommandé	Possible			
Novembre		Recommandé	Possible			
Décembre		Recommandé	Possible			

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.

ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : conseillée de mai à novembre mais peu opérante en raison d'une humidité relative élevée pendant cette période.

INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de décembre à avril. Peu efficace le reste de l'année du fait du trop faible écart de température jour/night.

RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : possible de décembre à mai si c'est la ventilation permanente qui est utilisée plutôt que l'inertie thermique avec ventilation nocturne, mais elle est peu intéressante car elle n'est adaptée qu'à certaines périodes de la journée (la nuit). non possible de juin à novembre.

bâtiment climatisable à usage diurne

	protection solaire	ventilation naturelle / brassageurs d'air		isolation thermique	inertie + ventilation nocturne	rafraîchissement par évaporation	climatisation
		jour	nuit				
Janvier							
Février							
Mars							
Avril							
Mai							
Juin							
Juillet							
Août							
Septembre							
Octobre							
Novembre							
Décembre							

À RETENIR

PROTECTION SOLAIRE : au niveau des ouvertures, murs et toiture.

ISOLATION : Toiture, murs Est et Ouest.

VENTILATION NATURELLE OU BRASSEURS D'AIR : la ventilation par brassageurs d'air peut être utilisée en appui du climatiseur et permet de réduire les consommations en remontant les températures de consigne

INERTIE THERMIQUE + VENTILATION NOCTURNE : intéressante de décembre à avril. Peu efficace le reste de l'année du fait du trop faible écart de température jour/night.

CLIMATISATION : adapté à partir de mars particulièrement pour déshumidifier l'air (climat chaud et humide)

RAFRAÎCHISSEMENT PAR ÉVAPORATION : peu adapté à inadapté

8. Conclusion

Cette introspection sur l'optimisation de la conception architecturale pour divers climats types du Sénégal pour répondre au mieux à la problématique de la qualité des ambiances thermiques et à la recherche de la performance énergétique conduit, comme prévu, à des réponses parfois divergentes pour un même cas typologique selon la période de l'année où l'on effectue l'analyse.

Il s'agira donc, pour les concepteurs, d'analyser au cas par cas, pour le bâtiment concerné, en fonction des usages et de manière plus fine qu'avec la seule spécification «occupation permanente» ou «occupation diurne», quelles sont les particularités du projet qui pourront conduire à effectuer des grands choix stratégiques de conception d'enveloppe sur des options majeures notamment en termes d'inertie (léger ou lourd...) si tant est que les concepteurs aient le choix en termes de filières disponibles, de contraintes technico-économiques diverses ou encore de cohérence patrimoniale.

Nous pouvons toutefois déduire de cette analyse climatique fine à partir de l'approche de Givoni les enseignements stratégiques qui suivent.

Dans tous les climats du Sénégal même pour des bâtiments tertiaires très contraints en termes d'apports thermiques internes il existe une partie de l'année plus ou moins longue pendant laquelle le rafraîchissement n'est pas nécessaire. Nous en concluons donc qu'il faut, même dans les cas de bâtiments climatisables, privilégier une conception architecturale permettant une **mixité de fonctionnement climatique**. Cela signifie qu'il faut permettre aux bâtiments de fonctionner, selon les périodes de l'année, mais aussi de la journée

sans ou avec climatisation, cette logique pouvant être déclinée de manière distincte selon les zones du bâtiment en donnant des moyens de participation active à des comportements économies en énergie. Ces comportements économies devront, quant à eux, être expliqués et communiqués dans un langage appropriable par l'utilisateur.

Dans tous les climats du Sénégal également, les stratégies conceptuelles de bonne conception thermique et énergétique, commencent par une **stratégie globale de protection solaire efficace** : celle-ci devrait cumuler des réponses végétales et architecturales fixes et mobiles sans oublier un travail rigoureux sur l'albedo de l'enveloppe qui devrait activement favoriser les couleurs claires.

Dans tous les cas aussi l'**utilisation d'isolants thermiques divers et tout particulièrement d'isolants locaux comme le typha** pourra être un moyen très efficace et sécurisé (par exemple la dégradation des performances thermiques d'un isolant est plus lente que celle de l'albedo de la surface d'une paroi) de traiter durablement la protection solaire des bâtiments et tout particulièrement la protection solaire des parties de l'enveloppe les plus exposées à l'ensoleillement, c'est à dire les toitures. Un bémol est toutefois à apporter dans le cas de bâtiments bioclimatiques dans lesquels il sera d'autant plus important de ventiler la nuit que la toiture ne pourra pas alors participer à la décharge thermique conductive et radiative du bâtiment.

Dans tous les cas les **bâtiments climatisés**, a fortiori ceux qui sont à occupation permanente, devront être isolés thermiquement en privilégiant les isolants locaux.

Dans tous les cas les bâtiments devront pouvoir être **ventilables naturellement** en permanence ou la nuit selon les périodes ou la zone climatique. Par conséquent même si l'optimisation de la dimension des ouvrants dépend de la localisation climatique et de la période de l'année la plus structurante, le concepteur ne se trompera pas en concevant des **enveloppes au bon potentiel de ventilation**, que cette ventilation valorise le tirage thermique ou les différentiels de pression éoliens.

Dans tous les cas aussi **les brasseurs d'air** constitueront un choix technique pertinent à faible consommation d'énergie mobilisable lorsqu'il le faut.

En ce qui concerne l'optimisation des caractéristiques de l'enveloppe opaque, il ressort de cette analyse climatique que, très globalement, **les zones côtières devraient privilégier une architecture légère et ventilable tandis que la forte inertie semble mieux adaptée aux climats continentaux du Sénégal**. On peut toutefois remarquer en conclusion qu'une architecture lourde à condition d'être très ventilable sera moins pénalisée en termes de confort thermique en période à faible gradient jour / nuit (pendant laquelle la ventilation est permanente) qu'une architecture légère en zone côtière et en saison sèche.

Enfin il est important de rappeler que s'il existe dans les climats du Sénégal une courte ou une très courte saison fraîche selon les climats, **la capacité de clore l'enveloppe de manière étanche** suffira pour amener les espaces intérieurs à un bon niveau de confort sans la moindre consommation d'énergie.

bibliographie

ABDESELAM, Mohamed, CELAIRE, Robert, CLAUDOT, Laurent, et al., [s.d.]. Opticlim, charte de qualité des installateurs de climatisation individuelle de Guyane. [s.l.] : Délégation Régionale Guyane de l'ADEME.

ADEME, [s.d.]. Guide des matériaux performants pour la construction à la Réunion. VMC et brasseurs d'air [en ligne]. [s.l.] : Disponible sur : < http://www.envirobat-reunion.com/IMG/pdf_26-Brasseurs_d_air.pdf > (consulté le 1 septembre 2016).

ASER, SENELEC, UEMOA, et al., 2010. Système d'information énergétique du Sénégal. SIE Sénégal : un outil d'aide à la prise de décision. [en ligne]. [s.l.] : République du Sénégal, Ministère de la coopération internationale, des transports aériens, des infrastructures et de l'énergie. Disponible sur : < http://www.renow.itccanarias.org/images/policy/senegal/Secteur_electrique/Rapport_SIE_Senegal.pdf > (consulté le 1 septembre 2016).

BOYÉ, Ababacar, 2001. Situation des ressources génétiques forestières du Sénégal [en ligne]. [s.l.] : FAO, Département des forêts. Disponible sur : < <http://www.fao.org/docrep/003/X6888F/x6888f03.htm#b6-1.1.2.%20Le%20climatUNEP> > (consulté le 1 septembre 2016).

CESSOU, Sabine, 2015, Le Boom Urbain Gagne Dakar. [s.l.] : Le monde diplomatique. 4 p.

ENERGIE+, [s.d.]. « Dimensionner une protection solaire fixe ». In : [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11151#c1422> > (consulté le 1 septembre 2016).

GRET, 2009. Etude préliminaire d'adaptation aux changements climatiques en Afrique : bâtiments. Contribution au projet négociation climat pour toute l'Afrique réussie (NECTAR) [en ligne]. [s.l.] : OIF, IEPF, PNUE. Disponible sur : < http://www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/322_OIF-IEPF_Agriculture.pdf > (consulté le 1 septembre 2016).

HUET, Olivier, CELAIRE, Robert, FRANCE, Ministère de la coopération, et al., 1986. Bioclimatisme en zone tropicale: construire avec le climat. Paris : Groupe de recherche et d'échanges technologiques : Diffusé par La Documentation française. ISBN 978-2-11-084839-0.

IRSTEA, [s.d.]. « Crues, inondations : quelle connaissance ? | Irstea ». In : Irstea [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.irstea.fr/nos-editions/dossiers/risque-inondation/crues-inondations-connaissance> > (consulté le 22 juillet 2016).

KITIO, Vincent, BUTERA, M. Federico, AD-HIKARI, Rajendra, et al., 2015. Conception architecturale durable en milieu tropical. Principes et applications pour l'Afrique de l'Est [en ligne]. [s.l.] : ONU-Habitat, OIF/IFDD. Disponible sur : < <http://www.ifdd.francophonie.org/ressources/ressources-pub-desc.php?id=664> > (consulté le 1 septembre 2016). ISBN 978-92-1-132573-7.

LIÉBARD, Alain, DE HERDE, André, 2005. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Paris : Observ'ER. ISBN 978-2-913620-37-7.

MAILLARD, Stéphane, 2008. Guide pratique pour la maison... vivre dans une maison saine, confortable et économique en énergie! [en ligne]. [s.l.] : ADEME Guyane. Disponible sur : < <http://docplayer.fr/7412310-Vivre-dans-une-maison-saine-confortable-et-economie-en-energie.html> > (consulté le 1 septembre 2016).

NDOUTOUM, Jean-Pierre, POUFFARY, Stéphane, DELABOULAYE, Guillaume, 2015. Guide du bâtiment durable en régions tropicales. Tome 1 : Stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales [en ligne]. [s.l.] : OIF. Disponible sur : < http://www.ifdd.francophonie.org/media/docs/publications/667_Guide_Bati_Durable_T1.pdf > (consulté le 1 septembre 2016). ISBN 978-2-89481-213-6.

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT, [s.d.]. Document de projet. Transfert de technologie : Production de matériaux d'isolation thermique à base de Typha au Sénégal [en ligne]. Sénégal : GEF, PNUD. 112 p. Disponible sur : < https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/SEN/00058558_PIMS%204315%20Sene gal%20Typha%20ProDoc%20version%20FRANCAISE_pour%20CLEP.pdf > (consulté le 22 juillet 2016).

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL, [s.d.]. « Le climat - Gouvernement du Sénégal ». In : [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.gouv.sn/Le-climat.html> > (consulté le 1 septembre 2016).

SACRÉ, C., MILLET, J.R., GANDEMÉR, J., et al., 1992. Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide. Tome 1, Tome 1., Paris : CSTB. ISBN 978-2-86891-220-6.

SIDLER, Olivier, 2008. La démarche Négawatt et son application au bâtiment [en ligne]. [s.l.] : Disponible sur : < <http://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/40/demarche%20negawatt.pdf> > (consulté le 20 septembre 2016).

SOLENER, ABDESELAM, Mohamed, 2013. « Les bases de la bonne conception thermique. » In : Changement climatique et énergie. Atelier sur l'efficacité énergétique dans le bâtiment en zone tropicale [en ligne]. Dakar, Sénégal. Disponible sur : < <http://docplayer.fr/10299956-Les-bases-de-la-bonne-conception-thermique-mohamed-abdesselam-solener.html> > (consulté le 1 septembre 2016).

UNEP, [s.d.]. Disponible sur : < <http://www.unep.org/DEWA/water/groundwater/africa/french/rapport/CountrySummaries/Senegal/French-Summary%20Senegal%2018-2-02.pdf> > (consulté le 1 septembre 2016).

WORLD BANK, [s.d.]. Climate Change Knowledge Portal. Senegal Dashboard : climate future [en ligne]. [s.l.] : GFDRR, Cli-

mate Investment Funds, Climate Change Team ENV, SDNIS. Disponible sur : < http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/home.cfm?page=country_profile&CCode=SEN&ThisTab=ClimateFuture > (consulté le 1 septembre 2016).

WORLD BANK, [s.d.]. « Climate Change Knowledge Portal : Senegal Dashboard ». In : [en ligne]. Disponible sur : < http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/countryprofile/home.cfm?page=country_profile&CCode=SEN&ThisTab=Overview > (consulté le 1 septembre 2016).

WORLD BANK, [s.d.]. « Senegal Makes Disaster Preparedness a Priority ». In : World Bank [en ligne]. Disponible sur : < <http://www.worldbank.org/en/news/feature/2012/09/12/senegal-makes-disaster-preparedness-a-priority> > (consulté le 1 septembre 2016).

2010. Guide Ecodom+, Version Antilles Françaises [en ligne]. [s.l.] : ADEME, Caisse des Dépôts et Consignations. Disponible sur : < <http://www.martinique.ademe.fr/sites/default/files/filieres/mediatheque/publications/GuideEcodom.pdf> > (consulté le 1 septembre 2016).

<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11675>

http://www.thermexcel.com/french/tables/vap_eau.htm

lexique

ALBÉDO

Couleurs claires ou matériaux réfléchissants qui ont un fort pouvoir de réflexion du rayonnement solaire

TEMPÉRATURE DE BULBE HUMIDE

La température de « bulbe humide » est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'ouate humide. Cette température est toujours inférieure à la température donnée par un thermomètre non protégé, à « bulbe sec ».

ACTIVITÉS EXOTHERMIQUES

Activités humaines sources de chaleur : transport, industrie, cuisine, climatiseurs, etc.

STRESS THERMIQUE

Réaction du corps à des niveaux extrêmes de température et d'humidité empêchant le confort.



PROGRAMME NATIONAL DE RÉDUCTION
DES ÉMISSIONS GES À TRAVERS L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT

PROJET DE PRODUCTION DE MATERIAUX D'ISOLATION
THERMIQUE À BASE DE TYPHA

