



**MANUEL DE BONNES PRATIQUES
ARCHITECTURALES**

**Éco-construction et efficacité énergétique
dans les bâtiments**

Juin 2017

Table des matières

Table des matières	3
Genèse du manuel et remerciements	5
Introduction	6
PARTIE 1 : LES PREREQUIS.....	8
1.1 L'efficacité énergétique	8
1.2 L'architecture bioclimatique	10
1.3 Les différents types de confort	11
1.3.1 Le confort hygrothermique.....	12
1.3.2 Le confort visuel.....	13
1.3.3 Le confort acoustique	14
1.3.4 La qualité de l'air.....	15
1.4 Les types de climat.....	17
1.4.1 Le climat tropical équatorial	18
1.4.2 Le climat sec ou aride.....	18
PARTIE 2 : L'ECO-CONSTRUCTION	20
2.1 Intégration des facteurs extérieurs.....	20
2.1.1 Organisation de la parcelle et orientation du bâtiment	20
Choix du site.....	20
Implantation et emprise au sol.....	20
2.1.2 L'intégration environnementale	23
2.2 La conception architecturale	24
2.2.1 L'organisation des espaces intérieurs.....	24
2.2.2 L'enveloppe du bâtiment.....	25
Forme et compacité du bâti.....	25
Composition des parois.....	26
Conception et protection des baies.....	30
La toiture.....	36
2.2.3 La ventilation.....	39

La ventilation naturelle	39
Le puits provençal ou canadien	44
La ventilation à tirage	48
La climatisation naturelle par changeur adiabatique	52
2.2.4 Les matériaux de construction.....	53
La terre crue et sa mise en œuvre	54
La terre cuite	65
Le bois tropical	66
Le bambou	67
Les matériaux de recyclage.....	69
2.2.5 La durabilité des ouvrages	69
PARTIE 3 : LES ENERGIES RENOUVELABLES	71
3.1 L'énergie solaire	71
3.1.1 Production d'eau chaude solaire	72
3.1.2 Les panneaux photovoltaïques	73
3.2 L'éolien.....	75
3.3 La bio-méthanisation	76
PARTIE 4 : EXEMPLES DE PROJETS INTEGRES	78
4.1 La ventilation naturelle comme axe structurant de la conception du Lycée Français de Damas.....	78
4.2 Double stratégie de l'école de Rudrapur, Bangladesh.....	80
4.3 L'emploi de matériaux appropriés pour le Jardin Botanique de Gulele, Addis Abeba, Ethiopie.....	81
4.4 Puits canadiens et cheminées solaires pour une école à Wadi Al Mughair en Palestine (CTB)	82
4.6 Tour à vent dans un hôpital de district au sud Soudan	85
CONCLUSIONS.....	88

Genèse du manuel et remerciements

Ce manuel fut à l'origine conçu en 2015 pour les besoins de la Direction des Infrastructures, des Equipements et de la Maintenance (DIEM) au Sénégal. Celle-ci était désireuse de promouvoir une architecture plus soucieuse des contraintes climatiques dans les bâtiments dont elle a la charge. Il fut réalisé par l'expert en infrastructures sanitaires du Projet d'Appui à l'Offre et la Demande de Soins (PAODES), Benoit Legrand, avec le concours de la DIEM et des commentaires judicieux de Modou Gueye, l'assistant technique national du projet. Les expériences positives de deux autres projets de la CTB ont largement inspiré ce premier document. Il s'agit, d'une part, du programme de construction d'écoles primaires et secondaires en Palestine (School IV) et, d'autre part, du projet d'appui aux centres de formation des enseignants en Ouganda (Teacher training and Education Project in Uganda).

Le champ d'application du document fut ensuite élargi à l'ensemble des pays partenaires de la coopération belge, à l'initiative de l'Unité Infrastructure et Environnement de la CTB et de son auteur initial. Il fut en cela assisté par le concours actif d'une série de personnes à la fois du siège et du terrain. Des personnes travaillant à Bruxelles nous citerons en particulier Claude Croizer, conseiller en environnement, Céline Roman, expert junior en infrastructures sociales qui a apporté sa connaissance de l'emploi de la terre crue et de son application dans les projets de la CTB au Burundi, et Paul Verlé, coordinateur du Département Expertise et Thématique. Des personnes œuvrant sur le terrain nous mentionnerons Jan Vanlint, assistant technique international en Palestine, puis en Ouganda, et Alexis Doucet qui l'a remplacé en Palestine. Qu'ils soient tous chaleureusement remerciés.

Introduction

Contexte Les infrastructures publiques, telles que écoles et hôpitaux, visent-elles à répondre aux besoins du plus grand nombre, quitte à réduire la qualité des constructions, ou à fournir des interventions pérennes quelles qu'en soit leur prix ? Vaste débat qui occupe beaucoup de responsables en charge des investissements publics depuis de nombreuses années.

Entre quantité et qualité, une réponse univoque ne peut être donnée, l'important étant de répondre aux besoins de la programmation architecturale et des spécificités locales dans le respect du cadre budgétaire imposé. On s'attend de fait à ce que le bâtiment, tout en s'inscrivant résolument dans son époque et la modernité qui la caractérise s'inscrive dans son contexte culturel et géographique et intègre diverses dimensions, tel le genre ou l'environnement. Sur ce point, il ne s'agit plus aujourd'hui de limiter uniquement l'impact écologique du bâtiment mais également de tenir compte, d'une part, de la raréfaction des ressources naturelles et, d'autre part, de la problématique des changements climatiques.

La réponse à ces défis n'est pas uniquement l'apanage des pays du nord, mais également des pays du sud, dont les pays partenaires de la coopération belge. Quel que soit le lieu où un bâtiment s'érige, il est de la responsabilité des auteurs du projet qu'ils y intègrent la question climatique. A eux de concevoir non seulement des bâtiments plus résilients aux catastrophes naturelles, mais aussi qu'ils améliorent leur efficacité énergétique afin de limiter leur impact sur les changements climatiques. Une allocation supplémentaire au budget initial du bâtiment est dès lors nécessaire pour répondre à ce défi majeur.

Objectif Ce manuel s'inscrit pleinement dans la vision du Ministre de la Coopération et de nouvelle stratégie en matière de climat de la CTB, future Enabel, qui vise à promouvoir des actions d'atténuation et d'adaptation aux bouleversements climatiques dans ses interventions. **Son objectif est de proposer de façon non exhaustive différents concepts, approches et techniques visant à garantir le meilleur confort possible des usagers tout en limitant au maximum l'empreinte écologique de l'édifice tout au long de son cycle de vie.** Les différentes composantes de cette stratégie sont à intégrer dans une conception architecturale cohérente répondant aux spécificités du lieu.

Public cible Le document est destiné à l'ensemble des acteurs intervenants dans la conception d'un bâtiment ; maître d'œuvre, maître d'ouvrage, autorités locales, gestionnaires et utilisateurs du bâtiment en devenir.

Structure Le document s'articule autour de quatre grandes sections :

- Les **prérequis** expose une série de notions de base. Après un rappel du contexte énergétique et des changements climatiques, l'architecture bioclimatique est présentée comme une approche permettant de répondre à ces défis. La notion de confort est ensuite déclinée suivant les aspects hygrothermique , visuel, acoustique et de qualité de l'air. Les deux grands types de climat auxquels la CTB doit faire face dans ses pays partenaires sont enfin décrits.
- La deuxième partie dédiée à **l'écoconstruction** présente les différents aspects que l'architecture bioclimatique peut déployer pour faire face aux contraintes climatiques en limitant au maximum les dépenses énergétiques. Les éléments à intégrer dans la conception architecturale proprement dite sont présentés, tels que l'orientation du bâtiment, la ventilation naturelle ou encore le choix des matériaux.
- Les principales sources **d'énergie renouvelable** à valoriser et promouvoir dans un projet de construction sont ensuite brièvement présentés.
- Enfin, quelques **projets remarquables** qui intègrent tout ou partie des éléments exposés précédemment sont présentés.

une synthèse reprend les principales actions pertinentes suivant les deux types principaux de climats opérant dans les pays partenaires de la CTB.

PARTIE 1 : LES PREREQUIS

1.1 L'efficacité énergétique

La construction et l'utilisation des bâtiments représentent une part significative des émissions de dioxyde de carbone produit dans le monde. Considérant leur durée de vie – de l'ordre de 30 à 50 ans au moins – la consommation énergétique qu'ils induisent ont des implications sur le long terme. Il importe dès lors d'intégrer la dimension énergétique tant dans la conception et la production, que l'usage du bâti. Cette problématique n'est plus uniquement l'apanage des pays développés.

L'efficacité énergétique est aussi une question cruciale pour les populations du « sud » en raison d'un coût toujours plus élevé de l'énergie – le creux observé depuis la mi-2014 dans la montée des cours est malheureusement ponctuel – et l'accessibilité réduite en électricité dans beaucoup de régions. Si les réseaux électriques des pays du sud continuent à croître et tendent à couvrir des portions toujours plus vastes de territoire, aucun pays n'est à l'abri de coupures de courant qui sont d'autant plus régulières que la zone est reculée. **Il est dès lors important de répondre à la demande de confort, notamment thermique, des usagers en diminuant drastiquement les besoins en énergie, notamment ceux dévolus à l'air conditionné, par une conception architecturale plus adaptée intégrant des technologies alternatives.**

L'efficacité énergétique des bâtiments devient donc une nécessité. Elle vise à mettre en œuvre des projets qui optimisent l'utilisation de l'énergie tant par une conception adaptée que des moyens techniques appropriés. Elle s'appuie sur le Trias Energetica, stratégie visant à réduire la consommation énergétique des bâtiments en 3 étapes:

1. **Diminuer la consommation d'énergie** en rappelant que l'énergie la plus durable est celle qui n'est pas consommée. Elle inclut différentes actions, dont maximiser l'apport de lumière naturelle pour l'éclairage, isoler les façades et les toitures pour réduire les besoins en chauffage ou en refroidissement, ou encore utiliser des appareils économes en énergie, tels que l'éclairage au LED ;
2. **Utiliser les sources d'énergie durable** telles que le vent, l'eau et le soleil, mais aussi la géothermie via l'installation de chauffe-eau solaires, de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes ou de pompes à chaleur ;
3. **Utiliser l'énergie fossile de la manière la plus efficace possible** pour répondre aux besoins restants en limitant, par exemple, la longueur des conduites des systèmes de chauffage et de refroidissement.

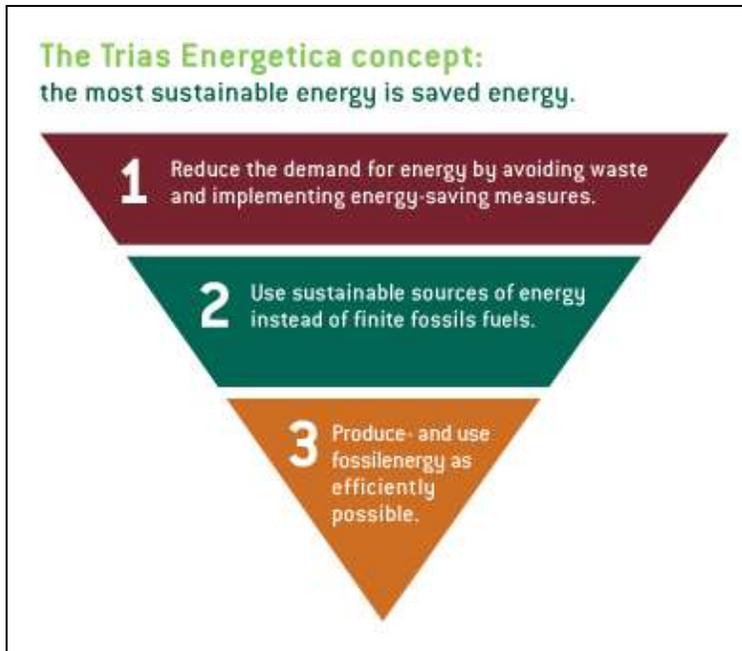


Figure 1: Trias Energetica

Source: <http://www.eurima.org/energy-efficiency-in-buildings/trias-energetica>

L'objectif est donc de réduire l'impact énergétique des bâtiments sur toute leur durée de vie, tout en optimisant leur viabilité économique, le confort, mais également la sécurité et la santé des occupants.

L'efficacité énergétique constitue donc une priorité pour tout projet de construction. En Afrique, la majeure partie des immeubles requiert l'air conditionné et l'éclairage artificiel. Pourtant, d'autres approches architecturales peuvent conduire à un plus grand confort des usagers sans y avoir recours en améliorant la conception, le design et les matériaux utilisés. De telles approches nécessitent une réflexion au stade de la conception et la volonté d'augmenter le coût d'investissement initial – de l'ordre de 10 à 15% – sachant qu'il sera amorti durant la phase d'exploitation du bâtiment.

1.2 L'architecture bioclimatique

Répondre à la fois à un confort optimal et limiter au maximum l'appel aux ressources primaires, oblige à laisser de côté les solutions voraces en énergie. L'architecture bioclimatique tente de répondre à ce défi de la manière la plus naturelle possible. Elle nécessite une approche holistique, impliquant une réflexion tant sur la forme et l'agencement du bâti que sur les matériaux, s'inspirant en cela de l'architecture traditionnelle et vernaculaire, tout en faisant appel à des technologies appropriées et innovantes.

Elle se définit comme une approche architecturale visant à tirer parti des conditions d'un site et de son environnement (le climat et le microclimat, la géographie, la morphologie, la topographie...) tout en se prémunissant des contraintes qu'ils induisent. Elle vise à des conditions de confort adéquates (températures, taux d'humidité, luminosité, insalubrité, etc.), via des moyens dits passifs ; c'est-à-dire en limitant le recours aux moyens techniques mécanisés et aux énergies extérieures au site. Quand ils sont nécessaires, les énergies renouvelables sont privilégiées, tel le solaire, la géothermie ou l'éolien.

Le bio-climatisme fait appel à de nombreuses stratégies, techniques et systèmes de construction qui permettent de rafraîchir, ventiler et éclairer l'ambiance intérieure d'une construction. Ces techniques utilisent généralement des savoir-faire et des matériaux disponibles localement ainsi que des systèmes faisant appel à des technologies simples, bien qu'il soit de plus en plus fait appel à l'électronique pour leur contrôle et leur gestion automatisée.

La "conception bioclimatique" ou « l'écoconstruction » fait donc référence à l'ensemble des stratégies, solutions et techniques architecturales mises en place dans un projet soucieux de son empreinte écologique.

Apporter des réponses aux aspirations de confort par ce biais nécessite des actions parfois contradictoires. Ainsi, l'apport en lumière naturelle induit un accroissement des risques de surchauffe par les rayons du soleil, tandis que le fait de maximiser la ventilation naturelle favorise la propagation des bruits. Le défi sera donc d'atteindre le meilleur équilibre possible entre ces différentes aspirations par l'introduction d'éléments palliatifs, tels des brise-soleils ou des pièges à sons, et à prioriser les demandes.

Aujourd'hui les principes de **l'architecture traditionnelle** reviennent en force comme source d'inspiration. L'architecture bioclimatique vise à optimiser les techniques anciennes sans pour autant renier l'apport des technologies modernes.

Ainsi, certains matériaux, techniques et conceptions issues du passé – tel l'emploi de la terre crue et les techniques constructives qu'elle implique ou les déclinaisons de systèmes de ventilation traditionnels, du moucharabieh de l'Afrique du Nord, au Yazd Iranien, en passant par les badgirs (pièges à vents) du moyen Orient – sont réinterprétés par l'architecture contemporaine.

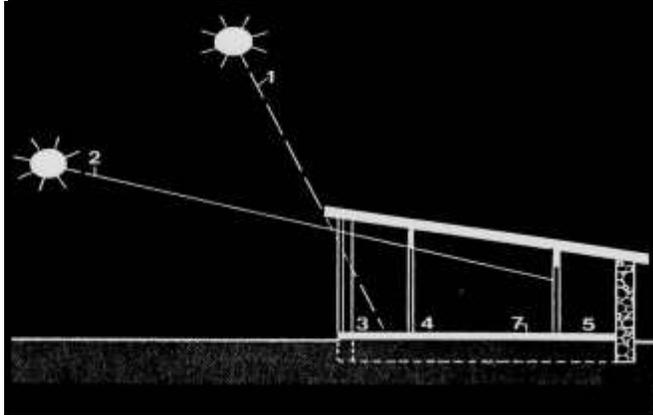


Schéma de maison de la Grèce Antique basé sur la course du soleil en été/hiver



Badgir ou tour à vent, ville de Yazd, Iran

Figure 2 : La tradition comme exemple d'approche écologique

Des techniques traditionnelles de construction, comme l'adobe, sont devenues des sources d'inspiration pour des technologies plus adaptées au contexte local, comme les blocs autobloquants en terre-ciment. Ces technologies dites « **appropriées** », suivant la terminologie initiée par Schumacher dans son ouvrage "Small is beautiful"¹, valorisent l'emploi de techniques et d'ingénieries adaptées aux spécificités du lieu qui minimisent leur impact sur l'environnement et la société.

Pour autant, l'emploi de hautes technologies ne doit pas être rejeté, pourvu que leurs coûts d'achat et d'utilisation demeurent compétitifs. Il ne s'agit donc pas d'une idéologie restrictive mais d'une approche pragmatique.

1.3 Les différents types de confort

Le confort des usagers a quatre dimensions : hygrothermique, visuel, acoustique et la qualité de l'air. Dépendant du climat, de la situation géographique, des habitudes locales et culturelles, le sentiment de confort, par définition subjectif, peut varier énormément.

Pour répondre au mieux aux attentes des usagers, les concepteurs de projets ont besoin de disposer d'une idée précise de la zone de confort optimale attendue dans les bâtiments qu'ils conçoivent. Des recherches ont été menées dans la plupart des régions du globe pour mieux cerner cette notion suivant le contexte local et ses différentes dimensions.

Le Tableau 1 synthétise les caractéristiques de la notion de confort et des types d'actions possibles.

¹ Small Is Beautiful: A Study Of Economics As If People Mattered, E. F. Schumacher, 1973, Trad. en français : *Small is beautiful. Une société à la mesure de l'homme*, Seuil, coll. "Points", 1979.

	Confort hygrothermique		Confort visuel	Confort acoustique	Qualité de l'air		
Eléments	Chaleur	Froid	Lumière	Bruits	Humide	sec	qualité
Gestion naturelle	Eviter et expulser les calories	Capter et retenir les calories	Contrôle de la lumière naturelle et de la réflexion des parois	Isolation, absorption, réverbération des parois et mobilier	Ventilation naturelle et poussée cheminée solaire, puits provençal	Cheminée perse	Contrôle des infiltrations, ventilation contrôlée
Gestion mécanique	HVAC	Chauffage	Lumière artificielle	Panneaux amovibles	Déshumidificateur	Brumisateur	Extraction/pulsion mécanique avec filtres
Minimum	18-21°C		100 à 300Lux suivant les activités	Fonction de la durée d'exposition et du local : <40dB(A) pour un bureau	40%		Renouvellement min. de 2 volumes/heure
Maximum	22 à 27°C		300 à 750Lux suivant les activités Eblouissement	< 60dB(A) pour une salle de réunion	60%		Pour 26°C, vitesse max de l'air 0.20m/s

Tableau 1 : Principales caractéristiques du confort des usagers dans un bâtiment

1.3.1 Le confort hygrothermique

Le confort hygrothermique exprime le besoin de dissiper la puissance métabolique du corps humain par des échanges de chaleur latente via l'évaporation d'eau dans l'atmosphère. Il correspond à la tranche de température et de taux d'humidité autour desquelles le corps humain se sent bien. Aux réactions purement physiologiques de thermorégulation de l'individu, se superposent des réactions d'ordre psychosociologique liées à des sensations hygrothermiques (chaud, neutre, froid) variables dans l'espace et dans le temps, qui dépendent du ressenti de chaque personne. Le confort hygrothermique dépend de plusieurs facteurs : le ratio entre la température interne et externe, le niveau de transmission et d'accumulation des parois, le taux d'humidité ainsi que la perception individuelle influencée par l'habitude, la culture et l'éducation.

Les conditions de confort hygrothermique dépendent de différents facteurs. Certains sont directement liés à l'individu, comme son sexe, son âge, ses activités, son habillement. D'autres dépendent des caractéristiques du local, la température ambiante, d'une part, la température des parois, d'autre part. La chaleur ressentie sera ainsi plus importante dans une pièce à 18°C aux murs bien isolés que dans une pièce à 21°C à la surface des murs froids.

Les sensations thermiques dépendent aussi de l'homogénéité thermique de l'atmosphère dans laquelle l'individu évolue. Elles sont ainsi marquées par les phénomènes transitoires auxquels

la personne est soumise (entrée dans un bâtiment, passage d'une atmosphère intérieure à une autre, évolution / fluctuation des paramètres hygrothermiques dans le temps).

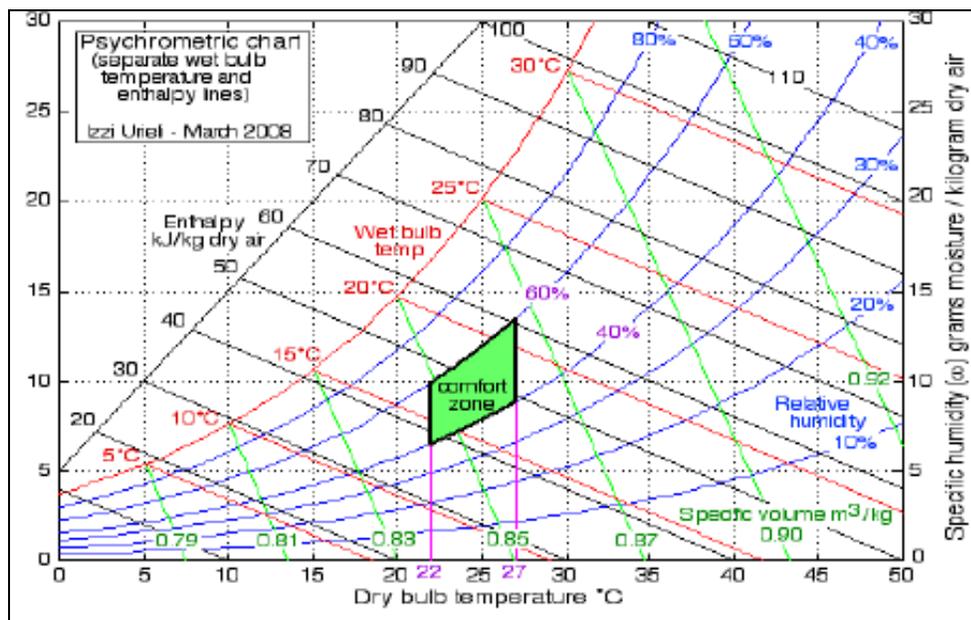


Figure 3 : Graphe psychrométrique simplifié à une pression totale de 1 atmosphère

Source : Izzi Urief, 2008

Au-delà de ces variations, la Figure 3 exprime la relation entre température et niveau d'humidité, les deux composantes physiques essentielles qui influencent la zone de confort ressentie. **Dans la plupart des contextes géographiques et culturels, elle se situe dans des températures variant entre 22 à 27 C° et un taux d'humidité oscillant entre 40 et 60%.**

Cette zone de confort sera également affectée par la vitesse de l'air ; une plus grande vitesse augmentant la sensation de froid.

1.3.2 Le confort visuel

Le confort visuel fait référence au flux lumineux nécessaire pour assurer une vision optimale dans un intérieur. Il implique différents aspects, dont la luminance² et l'intensité lumineuse³.

Pour permettre aux personnes d'exécuter leurs activités dans un intérieur sans fatigue visuelle excessive, un éclairage adéquat doit être assuré de façon constante et sans éblouissement. L'éclairage peut être fourni par la lumière du jour, l'éclairage artificiel ou une combinaison des deux ; le concept d'efficacité énergétique, privilégiant la première option.

² La luminance est la seule grandeur réellement perçue par l'œil humain. Elle est directement liée à l'éclairement rétinien et correspond à la sensation visuelle de luminosité créée par une source ou par une surface éclairée. Elle représente le rapport entre l'intensité de la source dans une direction donnée et la surface apparente de cette source.

³ L'intensité lumineuse est une grandeur physique qui correspond, en photométrie, à l'éclat perçu par l'œil humain d'une source lumineuse ponctuelle. Elle est une unité de mesure exprimée en candela (cd) permettant de caractériser un point lumineux. Tout comme les autres grandeurs photométriques, elle dépend directement de la perception humaine : c'est donc une grandeur perceptive.

La lumière naturelle est composée des rayons directs du soleil et d'une lumière diffuse et stable venant du ciel. Son utilisation apporte de nombreux avantages tant physiologiques que psychologiques. Elle est gratuite, offre un rendu de couleurs « réel » et assainit l'air en limitant la profusion de certaines bactéries. Les baies qui laissent entrer la lumière offrent aussi une vue sur l'extérieur, reliant les occupants au monde extérieur.

L'éclairage naturel a également des contraintes. Il change constamment d'intensité et de couleur et peut parfois éblouir. De plus, la pénétration directe des rayons du soleil au travers du vitrage dans un bâtiment induit un apport calorifique pouvant devenir problématique en période chaude.

Type d'espace	Eclairage (Lux)
Bureau	300
Couloir	50
Escalier	100
Sanitaires	100
Laboratoire	500
Salle de lits	100
Salle d'examen	500
Salle d'opération	750

Tableau 2 : Niveau d'éclairage minimum recommandé par activité

Une série de normes ont été produites pour définir l'intensité lumineuse requise selon le type de tâches et la durée de l'activité, en faisant la distinction entre l'éclairage recommandé dans la zone de travail et les zones attenantes. Le Tableau 2 donne un aperçu des niveaux d'éclairage attendus dans différents type de locaux. On y voit, par exemple, qu'un niveau d'éclairage optimal de la table de travail d'un bureau est de 500 Lux et de 300 Lux sur la zone adjacente immédiate.

1.3.3 Le confort acoustique

L'oreille humaine est sensible à des pressions variant du seuil de l'audition (0,00002 Pa) au seuil de la douleur (20 Pa). Elle perçoit les sons dont la fréquence fluctue entre 20Hz (les sons graves), à 20 000Hz (les sons aigus).

Le confort acoustique vise à limiter les bruits⁴ parasites générés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment dans les limites acceptables tout en privilégiant une bonne

⁴ Les bruits sont des mélanges de sons, chacun caractérisé par l'amplitude - le niveau sonore exprimé en décibel (dB) - et une fréquence, exprimée en Hertz (Hz), différente. Ainsi un bruit s'exprime par son spectre et son niveau sonore exprimé en décibel, pour chaque bande de fréquence observée.

transmission des sons (musique et parole) sans distorsion. Pour offrir un confort acoustique optimal, il convient de contrôler la transmission du bruit au travers de l'enveloppe du bâtiment et entre les différents locaux, tout en permettant une diffusion sans parasite des sons dans l'espace donné. Il s'agit pour cela d'intervenir sur les trois types de transmission – directe, parasite et latérale – ainsi que les différents types de bruits⁵. Pour ce faire, il est possible de jouer sur la qualité des matériaux de construction, soit leur degré d'isolation, d'absorption et de réverbération, et leur épaisseur.

Suivant la fonction du local, on veillera à favoriser l'intelligibilité de la parole, dans les espaces où l'écoute doit être privilégiée, ou à réduire le niveau sonore des activités, comme dans un atelier par exemple, en jouant tant sur la forme du local (notamment les angles de ses parois) et les types et la composition de matériaux des parois (absorbants, isolant ou réfléchissant).

1.3.4 La qualité de l'air

L'air que l'on respire dans les lieux clos peut avoir des effets sur le confort de l'utilisateur et sa santé, allant de la simple gêne (odeurs, irritation des yeux et de la peau) jusqu'au développement de pathologies comme les allergies respiratoires. Cette question est d'autant plus prégnante pour les personnes sensibles et fragiles, dont les enfants, les personnes âgées ou malades.

Les polluants de l'air intérieur sont nombreux. Ils peuvent être de nature chimique, physique ou biologique, et peuvent être listés comme suit :

- **La vapeur d'eau** est présente non seulement dans les pièces humides de type salle-de-bain, mais aussi dans tous les locaux occupés ; l'une des sources importantes de production de vapeur dans un intérieur étant le corps humain. Ce dernier rejette jusqu'à 2,5L d'eau dans l'air ambiant en 12h. Un niveau d'humidité trop élevé conduit à la prolifération d'acariens, de bactéries et de moisissures, sources de fortes toxicités. Un trop faible taux d'humidité entraîne un dessèchement des muqueuses, l'augmentation des symptômes des maladies respiratoires (asthme), et favorise les éruptions cutanées.
- **Les moisissures** apparaissent sur le bois, les cloisons sèches, telles que les plaques de plâtre, les meubles rembourrés, le tissu, le carrelage, et les systèmes de ventilation. Elles peuvent affecter la santé des occupants.
- **Les acariens** sont présents dans tous les milieux et sont inoffensifs, mais leurs excréments sont allergènes.
- **Le CO₂**, produit du métabolisme cellulaire, est naturellement émis par la respiration des êtres vivants. L'homme au repos en exhale un volume moyen de 200 ml par minute. A partir de 1 000 ppm, le CO₂ devient nocif pour l'organisme.

Pour caractériser un bruit par une seule valeur, on additionne les niveaux de chaque bande d'octave, corrigés en fonction de la sensibilité variable de l'oreille entre les sons graves et aigus. On obtient ainsi un niveau de bruit global exprimé en dB(A). Les décibels sont des valeurs logarithmiques, ils ne peuvent donc pas être directement additionnés ou soustraits.

⁵ On distingue le bruit aérien extérieur et intérieur, le bruit de choc, le bruit d'équipement, la réverbération et le bruit de voisinage.

- **Les composés organiques volatils** sont des molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène, se trouvant sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Ils résultent de produits manufacturés tels les solvants, les produits imbrulés ou raffinés, et de l'émission de certaines plantes. Ils sont plus ou moins biodégradables par les bactéries et champignons, les UV et les plantes et sont nocifs pour les personnes fragiles et les asthmatiques.
- D'autres gaz peuvent également être présents, tel le radon ou le monoxyde de carbone.

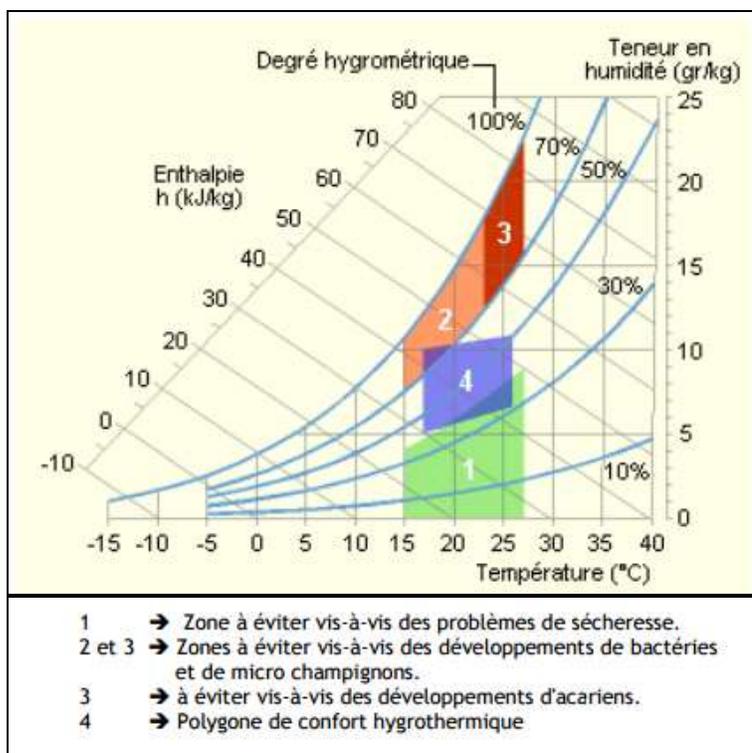


Figure 4 : Facteurs de pollution suivant le niveau hygrothermique

Source : R. Fauconnier, in « Chauffage, Ventilation, Conditionnement », n°10, 1992

Les sources de pollution sont multiples: l'air extérieur, certains matériaux de construction, les appareils à combustion, les équipements, l'ameublement, les produits d'entretien et de bricolage, l'activité humaine (cuisine, etc.), le tabagisme, les bio-contaminants (poussière de maison, allergènes des acariens et du chat), etc... Il importe donc de veiller à la qualité de l'air intérieur en éliminant les sources de pollution potentielles et en disposant d'un système de renouvellement d'air performant.

Une ventilation maîtrisée, c'est-à-dire intentionnelle et automatique, en opposition à la ventilation non intentionnelle provenant, entre autre, de la porosité des parois, est donc indispensable pour fournir la quantité d'air neuf nécessaire aux occupants et à leur hygiène de vie, tout en limitant les consommations énergétiques.

Les valeurs minimum de renouvellement tablent sur un apport d'air neuf de 90m³/h par personne. Ce chiffre doit être adapté aux types de locaux – on parle de locaux secs pour les

pièces de vie, et de locaux humides pour les sanitaires, cuisines, salle-de-bains – et leurs fonctions. Ainsi le renouvellement d’air attendu sera de 2 volumes par heure pour un bureau et pourra aller jusqu’à 4,8 volumes par heure pour une salle de classe.

Un renouvellement d’air par simple ouverture des fenêtres n’est pas efficace dans la mesure où il dépend du bon vouloir des occupants, qu’il est impermanent et qu’il entraîne des débits d’air neufs parfois importants.

1.4 Les types de climat

Le monde est divisé en cinq types de climats, eux-mêmes subdivisés en sous-climats. Les pays d’intervention de la CTB étant principalement situés dans des climats tropicaux, équatoriaux ou arides, ce manuel se penchera sur ces derniers en particulier. Les tendances exposées plus bas doivent être pondérées par les spécificités locales induites par l’altitude, la proximité de la mer, l’exposition aux vents ; sachant que l’on peut trouver des sous-climats, voire des microclimats dans une même région.

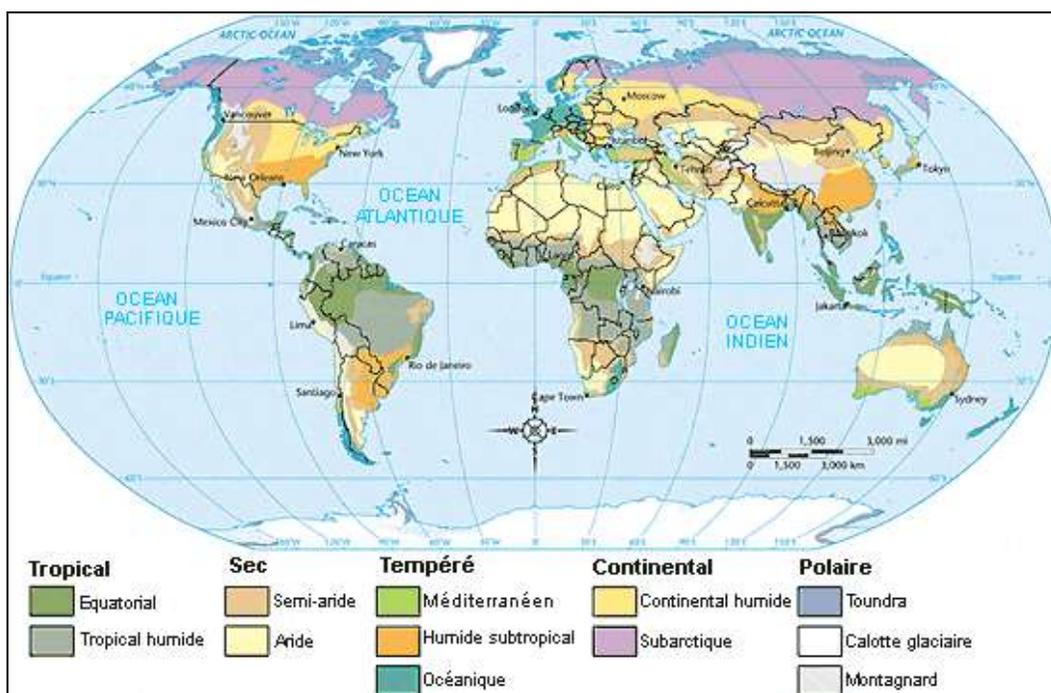


Figure 5 : Climats et sous-climats dans le monde

Les changements climatiques bouleversent ces différents types de climats. Les modélisations de plus en plus précises permettent d’anticiper ces modifications suivant le type de scénario retenu, les plus optimistes tablant sur un réchauffement global de la planète de 2°C d’ici 2100 et une remontée des océans prise dans une fourchette entre 18 et 38cm, les plus pessimistes anticipant un réchauffement au-delà de 6,4°C, avec une montée des eaux allant au-delà de 70cm. La marge est donc sensible. Ces modifications vont entraîner une croissance importante des phénomènes exceptionnels de types typhons, tempêtes tropicales, sécheresses.

En milieu tropical on s'attend également à une augmentation des précipitations durant la saison des pluies qui s'étalera sur une période plus courte. Mais dans tous les cas on s'attend à une augmentation des températures dans les différentes régions où la CTB opère. Travailler sur le confort thermique dans les bâtiments s'avère d'autant plus essentiel.

1.4.1 Le climat tropical équatorial

Ce climat se caractérise par une température moyenne supérieure à 18°C tout au long de l'année. Il peut se diviser en deux sous-climats :

- Le **climat tropical humide** qui connaît deux saisons :
 - La saison humide avec de hautes températures et de fortes précipitations. Les températures y sont d'autant plus élevées que l'on se rapproche de l'équateur ;
 - La saison sèche durant laquelle on observe des températures plus basses et des précipitations quasiment nulles. Elle dure d'autant plus longtemps que l'on s'éloigne de l'équateur.
- Le **climat équatorial** est caractérisé par une seule saison avec des précipitations fréquentes et importantes dont les intensités sont les plus élevées aux équinoxes de mars et de septembre. Les températures moyennes sont de 27°C et la pression atmosphérique est toujours basse.

Les températures élevées, combinées à une humidité forte, sont sources d'inconfort. Une ventilation permettant le refroidissement du corps par convection et par évaporation est essentielle pour obtenir une sensation de confort satisfaisante.

Les nuits, souvent étouffantes, ne contrebalancent pas les chaleurs diurnes. Même les bâtiments aux parois légères correctement conçus libèrent de la chaleur, ce qui fait que les températures intérieures sont souvent plus élevées que les températures extérieures. Minimiser l'inconfort durant la nuit est dès lors d'une extrême importance.

1.4.2 Le climat sec ou aride

Il est caractérisé par une très grande instabilité de l'atmosphère qui rend les précipitations très faibles ou nulles. On distingue deux types de climats secs :

- Le **climat aride** est caractéristique des régions désertiques comme le Sahara. Les températures y sont élevées, encore plus que dans un climat tropical. Les différences de température entre le jour et la nuit sont importantes. Les journées sont invariablement chaudes. Ces températures élevées sont accompagnées d'une humidité faible à modérée, les brises légères sont suffisantes pour éviter la sensation de moiteur sur la peau. La faible humidité durant les heures les plus chaudes atténue la sensation d'inconfort et les larges variations de température entre le jour et la nuit permettent d'avoir des nuits agréables. Les vents sont généralement faibles bien qu'à certains endroits particuliers, ils puissent être plus violents.

- Le **climat semi-aride ou climat de steppe** est caractérisé par une saison sèche la majeure partie de l'année et par une saison humide. Les précipitations sont faibles et réparties inégalement dans l'année. Il est donc globalement plus humide que le climat aride et ses pics de température sont plus faibles. L'écart de température entre le jour et la nuit y est aussi moins important. Le confort nocturne varie beaucoup au cours de l'année. Les nuits sont souvent inconfortables et chaudes dans les bâtiments. Durant la saison des pluies, les nuits peuvent à l'inverse être fraîches.

Dans les deux cas, au plus fort de la période chaude, la chaleur des journées impose des restrictions sur les activités exercées à l'extérieur. Les bâtiments doivent être conçus de manière à ce que les températures intérieures soient basses durant le jour et doivent être aménagés avec des espaces extérieurs ombragés où les habitants peuvent vaquer à leurs occupations.

PARTIE 2 : L'ECO-CONSTRUCTION

Au-delà de l'intégration des contraintes environnementales, largement développées dans ce document, la conception architecturale se doit de répondre à la fonction du bâtiment, aux besoins des usagers, aux caractéristiques du lieu, à l'intégration du genre, au respect des normes de sécurité... Une réflexion sur la relation au temps et à la durabilité des ouvrages doit aussi être menée. Les questions relatives à l'entretien et à la maintenance du futur bâtiment sont également très importantes, elles impliquent l'emploi de formes simples et de matériaux durables qui limitent l'impact des agressions du climat et des usagers.

L'efficacité énergétique et les principes de l'architecture bioclimatique, ici plus bas appelée écoconstruction, appellent au respect d'une série de principes interdépendants à intégrer dès les premières esquisses du projet, en ce qu'ils touchent à l'intégration du bâtiment dans son environnement, sa forme, ses orientations, les caractéristiques de son enveloppe, l'emplacement des ouvertures...

2.1 Intégration des facteurs extérieurs

2.1.1 Organisation de la parcelle et orientation du bâtiment

Choix du site

Le choix du lieu d'implantation d'un bâtiment public dans une localité spécifique est du ressort des décideurs institutionnels et politiques. Quant à la sélection du site proprement dit, il appartient à l'autorité locale, au maître d'ouvrage et au futur bénéficiaire.

Il est de la responsabilité du concepteur de projet de vérifier la pertinence de ce choix en veillant à ce que le terrain réponde à une série de critères, telle que l'accessibilité ou la facilité de raccordement aux réseaux (eau, électricité, égouts). Il faut également que la topographie et la géologie du sol soient compatibles avec la construction d'un bâtiment (au-delà de la résistance du sol, un point d'attention sera la présence de sel, corrosif pour les murs). Une attention particulière sera portée à la salubrité du terrain, aux risques d'érosion ou d'inondation en saison des pluies. Ainsi par exemple, les oueds ou wadis dans les pays arabes du pourtour méditerranéen, ces lits de rivières secs la majeure partie de l'année, sont à proscrire.

Implantation et emprise au sol

Le terrain défini, l'emprise au sol des ouvrages, ainsi que leur implantation et leur orientation sont parmi les premiers choix à poser dans la conception d'un projet. Plusieurs paramètres entrent en ligne de compte : la situation des bâtiments existants et les zones de recul qu'ils impliquent, les possibles alignements et autres exigences urbanistiques, les contraintes topographiques et la déclivité du terrain, la préservation d'éléments remarquables sur le terrain,

en ce compris la végétation, les orientations adéquates par rapport à la course du soleil et aux vents dominants, ainsi qu'aux pluies et poussières qu'ils entraînent.

La notion de **surface constructible** d'un terrain mérite d'être rappelée ici. La plupart des législations, déconseillent d'allouer la totalité d'une parcelle à la construction, même en ville. Il importe de respecter les ratios et normes en vigueur, de tenir compte des besoins de circulation et de parking, des zones de stockage et traitement de déchets, en ce compris des espaces tampons qu'ils induisent, ainsi que les espaces nécessaires à la collecte et l'évacuation des eaux de pluie, voire le traitement des eaux usées, sans oublier les espaces récréatifs et de détente. Il conviendra de valoriser des espaces verts utiles à la préservation de la biodiversité, à la recharge des aquifères et au bien-être des occupants. Une zone de recul sera requise entre chaque bâtiment pour permettre un niveau d'éclairage et une ventilation acceptables, sans oublier l'accessibilité aux véhicules de secours. Un espace libre de 4m entre bâtiments est un minimum. Il importe aussi d'éviter d'implanter le bâtiment au milieu de la parcelle afin d'optimiser son organisation spatiale pour les différents usages, tout en prévoyant d'éventuelles extensions futures.

L'orientation d'un bâtiment doit tenir compte de la trajectoire du soleil et des vents dominants. D'autres éléments, outre l'alignement avec les bâtiments existants, sont également à prendre en compte, comme la présence de sources sonores (voie rapide, usine...) mais aussi de nuisances visuelles (pylône électrique, bâtiments industriels,...). A contrario, il conviendra de tirer profit des perspectives et vues présentant un intérêt afin de les mettre en valeur et ce, de deux points de vue : celui du bâtiment même, en privilégiant les vues sur les perspectives remarquables (paysage, arbres remarquables, patrimoine bâti, ...) mais aussi celui de l'impact du bâtiment sur son environnement en veillant à ne pas boucher une perspective ou gâcher la qualité d'un paysage.

La course du soleil

Les apports de chaleur dans un bâtiment sont fortement dépendant de l'orientation de ce dernier par rapport à la trajectoire du soleil. Il s'agit d'un facteur clé dans les climats chauds. Les toitures étant les plus exposées au rayonnement, il convient de les isoler, de les ombrager ou encore d'utiliser leur masse thermique pour amortir le transfert calorifique qu'il sera possible de rejeter ensuite par une ventilation appropriée.

L'angle d'incidence de l'ensoleillement est plus important à l'ouest et à l'est qu'au sud et au nord, et donc, les rayons plus pénétrants. **C'est pourquoi l'orientation la plus favorable dans les pays chauds se trouve le long de l'axe est-ouest.** Cela signifie que pour un bâtiment rectangulaire, les côtés les plus longs doivent faire face au nord et au sud. Le nord n'est pratiquement pas exposé, il est donc peu soumis aux apports de chaleur. L'exposition sud peut être facilement maîtrisée, le soleil étant au zénith, grâce à un débord de toiture ou un porte-à-faux.

Afin de se prémunir des rayons chauds venant de l'ouest, certaines écoles construites par la CTB au Cambodge disposent d'un auvent sur la partie ouest afin de protéger le pignon d'une

trop forte exposition. A contrario, l'exposition est des écoles en Palestine est privilégiée, en ce qu'elle apporte le matin, quand les élèves sont en classe, la lumière et la chaleur naturelle nécessaires durant les mois d'hiver.



Le pignon ouest de cette école construite au Cambodge par la CTB est protégé par un auvent servant d'espace récréatif pour les enfants. La façade sud est protégée par une toiture largement débordante. Des bouches de ventilation hautes et basses sont également présentes.

Figure 6 : Protection du pignon ouest d'une école au Cambodge

Source : Projet BETT, BTC-Cambodge, 2007

En fonction de son orientation, les ombres créées par le bâtiment peuvent également fournir d'agréables espaces extérieurs, dont il conviendra de tenir compte dans le choix de l'orientation et l'organisation des espaces intérieurs et extérieurs.

L'ombre portée des bâtiments limitrophes est à prendre en compte ainsi que le couvert végétal. Les arbres peuvent utilement apporter de l'ombre à l'édifice et rafraîchir l'air qui sera ensuite introduit dans le bâtiment.

L'exposition aux vents

Face aux vents dominants, deux stratégies sont possibles, s'exposer ou se protéger.

Une exposition des façades principales aux vents dominants favorise la ventilation naturelle quand le dispositif est accompagné de bouches de ventilation de façon transversale. Pour donner sens à une telle stratégie, il conviendra d'implanter le bâtiment dans une zone à bonne potentialité de vent, soit au voisinage du sommet d'une déclivité topographique, ou encore entre 2 obstacles en créant un « effet venturi ». A contrario, un creux entre 2 collines, ou un positionnement arrière d'un obstacle important (bâtiment, relief) est à éviter. Idéalement la

distance devrait être de 12 fois la hauteur de l'obstacle dans le sens du vent et de 4 fois celle-ci perpendiculairement au sens du vent.

Il peut être également possible de tirer profit des déviations de vent occasionnées par les obstacles, bâtiments, relief, végétation... Cette dernière peut en effet contribuer tant à se protéger du vent, qu'à le diriger à son avantage, pourvu que le massif végétal soit suffisamment large, haut et bien positionné.

Ces principes, porté à l'échelle urbaine ont des implications diverses. Ainsi la ville de Tel Aviv n'a pas su profiter de la brise venant du large, faute de n'avoir pas suffisamment placé d'axes routiers perpendiculairement à la côte. A contrario, la conception du plan de la nouvelle ville durable de Masdar, à Abu Dhabi a pleinement tiré parti de la modélisation des vents pour développer un concept de petites ruelles de maximum 100m de long afin d'éviter que l'air chaud en provenance du désert ne s'y engouffre.

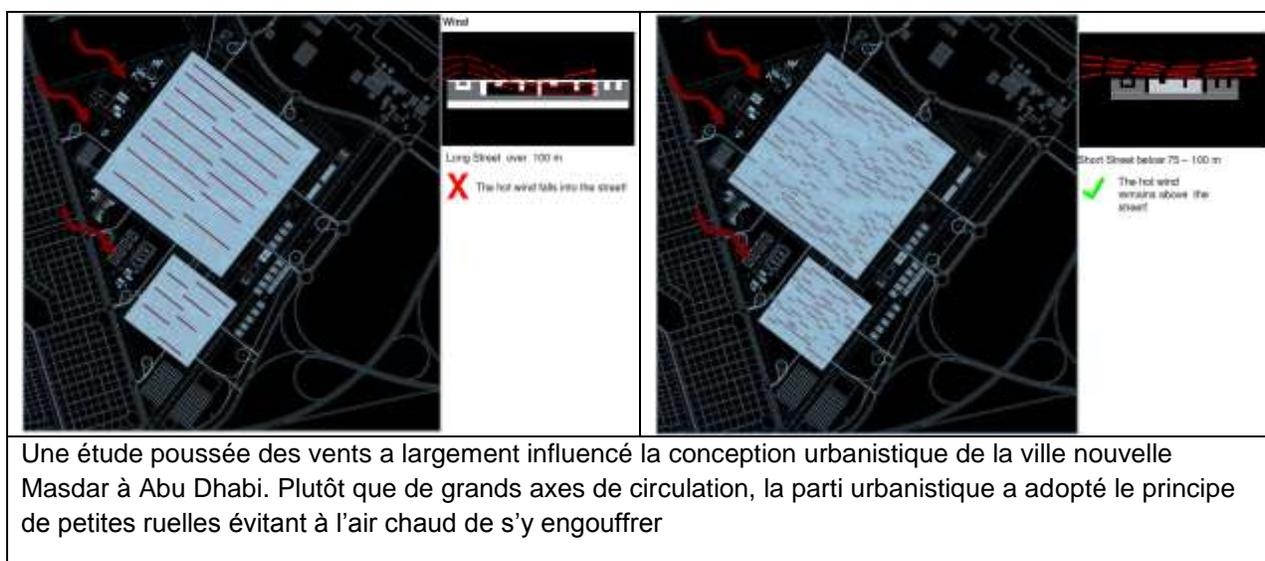


Figure 7 : Etude aérodynamique de Masdar City, Abu Dhabi, Transsolar, 2006-08

Source : Powerpoint Transsolar, 2012

2.1.2 L'intégration environnementale

L'intégration environnementale appelle à minimiser l'impact du bâtiment sur la faune et la flore, et à veiller à la préservation de l'écosystème local, en ce compris les arbres remarquables, source d'ombre et de fraîcheur mais aussi l'habitat de nombreuses espèces.

Le cycle de l'eau mérite également notre attention. Dans les climats arides, il convient d'optimiser son usage en privilégiant d'abord des équipements sanitaires économes en eau de type WC à double poussoir et robinets hydro-économes à double débit. On pensera ensuite à l'installation de systèmes de récupération d'eau de pluie, utile pour l'arrosage des plantes en saison sèche ou l'alimentation des sanitaires si la source est disponible une grande partie de

l'année. Il sera également utile de disposer des tranchées filtrantes couvertes de graviers le long des façades pour limiter les éclaboussures en saison des pluies.

En milieu urbain, la couverture excessive du sol par des matériaux imperméables devra être limitée afin de faciliter le renouvellement de la nappe phréatique et de limiter les problèmes d'inondation en cas de fortes pluies. Le concept de « Sustainable urban drainage System » (SUDS)⁶ maximalise cette approche à l'échelle de la ville, comme cela a été expérimenté en Angleterre ou en Australie⁷.

Un recouvrement complet du sol par des matières réfléchissantes et imperméables sans couvert végétal concourt au développement d'îlots de chaleur – un microclimat artificiel caractérisé par une augmentation de la température tant diurne que nocturne en comparaison aux zones adjacentes agricoles, suite au caractère minéral et réfléchissant du milieu et le manque d'exposition aux vents. Ce phénomène aura tendance à s'accroître avec les changements climatiques⁸.

Une attention particulière sera portée au contrôle et au traitement des différentes sources de pollution générées par l'activité humaine non seulement durant le chantier mais aussi tout au long de la durée de vie du bâtiment. On pensera notamment au cycle des matériaux de construction, soit l'énergie consommée pour leur production et la pollution induite, et à leur recyclage après la démolition. On privilégiera les matériaux disposant de l'empreinte écologique la plus réduite sur l'ensemble du cycle de vie.

Il s'agit enfin de développer un traitement des eaux usées et une gestion des déchets solides performants. Dans le cas spécifique des centres de santé cela passe par le développement de petites unités de traitements d'eau et l'aménagement d'un espace dédié au traitement des déchets hospitaliers intégrant des zones de stockage de produits dangereux, des fosses d'enfouissement et un incinérateur.

2.2 La conception architecturale

2.2.1 L'organisation des espaces intérieurs

L'agencement des pièces dans un bâtiment doit être pensé sur base d'une série de facteurs, à commencer par leur fonctionnalité, leurs relations, la gestion des flux, les possibles nuisances générées, dont le bruit, l'accès à certains fluides... mais aussi compte-tenu de leur exposition et de leur relation avec l'extérieur.

Certaines fonctions peuvent tolérer des chocs thermiques, comme les garages, les zones de stockage, les buanderies, les sanitaires ou les couloirs. Ils peuvent dès lors servir d'espace tampon pour les pièces plus nobles et occuper les zones les moins propices. Certains locaux,

⁶ Oxford services designed by Robert Bray

⁷ Sustainable Urban Drainage Systems, Cristiano Poletto and Rutinéia Tassi, Federal University of Technology - Paraná (UTFPR), Federal University of Santa Maria (UFSM), Brazil, 2012

⁸ Ainsi, la température en ville est en moyenne supérieure de 10°C à celle observée dans les campagnes limitrophes

utilisés de façon exceptionnelles peuvent également s'établir sur les façades les moins bien exposées, laissant aux pièces de vie continuellement occupées les zones les plus confortables.

Il est également intéressant de regrouper les pièces d'eau, comme la cuisine et la salle de bain, de manière à minimiser la longueur des conduites d'eau chaude et par la même occasion, les pertes de chaleur.

2.2.2 L'enveloppe du bâtiment

Un des premiers rôles de l'enveloppe du bâtiment est d'établir un équilibre entre quatre types d'échanges entre l'intérieur et l'extérieur: les calories, la lumière naturelle, l'air et les sons. Ces échanges dépendent de la forme et la de compacité du bâtiment, des caractéristiques des matériaux qui composent ses parois (porosité à l'air et l'eau, degré d'isolation tant thermique que phonique...) et du soin avec lequel sont conçues les ouvertures et les baies.

Le défi de la conception consiste à trouver un optimum dans les échanges entre intérieur et extérieur et la manière de les contrôler. Il s'agira de faire entrer une quantité de lumière naturelle et d'air suffisante pour un minimum de transfert calorique et acoustique non contrôlé à travers l'enveloppe tout en assurant l'évacuation de l'air vicié et de l'humidité issus de l'intérieur. Ainsi, les parties vitrées, telles que les fenêtres ou les portes, peuvent transférer les calories jusqu'à 5 fois plus vite qu'un simple mur de briques de 20cm d'épaisseur. Dans un climat chaud, la taille des baies a une influence certaine sur les besoins en climatisation; plus elles sont grandes, plus les besoins de climatisation sont importants. Il importe dès lors de bien réfléchir à la manière de constituer cette enveloppe, à commencer par sa forme.

Forme et compacité du bâti

La relation du bâtiment à son milieu passe notamment par la définition de sa forme et de sa compacité. Celle-ci se mesure par le ratio entre les surfaces de déperdition du bâtiment et son volume. Une forte compacité est un moyen de réduire les déperditions thermiques de l'enveloppe et donc les pertes d'énergie tant d'un système de chauffage que de refroidissement.

Au-delà des échanges de calories, la compacité a également des implications sur la ventilation et l'apport de lumière naturelle. Ces deux dimensions aspirent quant à elles plutôt à des formes étalées.

Dans les climats arides, où l'on retrouve un écart de température important entre le jour et la nuit, une forme compacte est idéale, afin de minimiser la surface exposée au soleil durant le jour, pourvu que l'on permette durant la nuit à la chaleur accumulée de s'échapper vers l'extérieur. **A l'inverse, dans les climats tropicaux, où l'humidité relative est importante et les écarts de température faibles, on favorisera l'enveloppe la plus ouverte possible**, en vue de favoriser la ventilation naturelle tant la nuit que le jour.

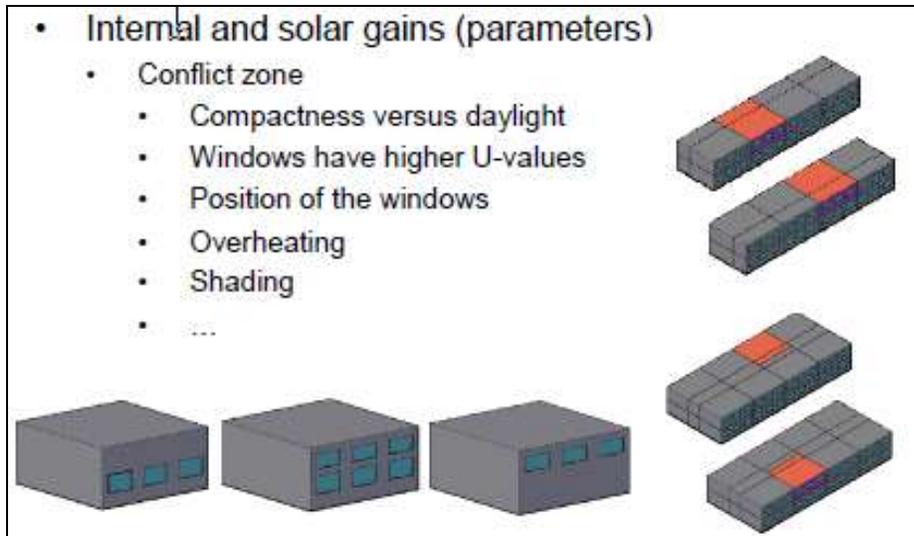


Figure 8 : Paramètres favorisant les apports solaires

Source : 3E, Formation BTC en énergie et construction durable, 2011

Composition des parois

Transmission thermique

L'isolation des parois est un excellent moyen de limiter les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. Tout matériau se caractérise par un coefficient de transmission, appelé valeur U. Celui-ci reprend tous les échanges calorifiques possibles, à savoir la convection, la conduction et la radiation. Plus cette valeur est basse, plus le matériau a des vertus isolantes, le degré d'isolation augmentant en fonction de l'épaisseur du matériau. A titre d'exemple, la valeur U de 50cm de béton est de 2.4 ; celle de briques pleines en terre cuite d'une épaisseur de 50cm est de 1.2 alors qu'elle sera de 0.7 pour 5cm de polyuréthane. Ainsi donc, en termes de transmission thermique, 17mm de cellulose équivaut à 913mm de béton plein.

La valeur U et l'épaisseur des différents matériaux qui composent l'ensemble des parois d'un local définissent le bilan thermique global de ce dernier. Celui-ci s'exprime au travers du coefficient K global, qui reprend l'addition des coefficients de transmission thermique de chacune de ses parois.

Il reflète donc la quantité de chaleur traversant cette paroi en régime permanent, suivant une unité de temps, une unité de surface et une unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi⁹.

Toute infiltration non contrôlée de la paroi est à éviter parce qu'elle concoure à la déperdition thermique du local et perturbe les systèmes de ventilation. C'est pourquoi l'étanchéité à l'air maximale est un des prérequis de l'architecture passive, qui nécessite la mise en place de systèmes de ventilation mécaniques.

⁹ Le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique totale (RT) de la paroi. $U = 1 / RT$ (ou k) s'exprime en W/m^2K . Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée.

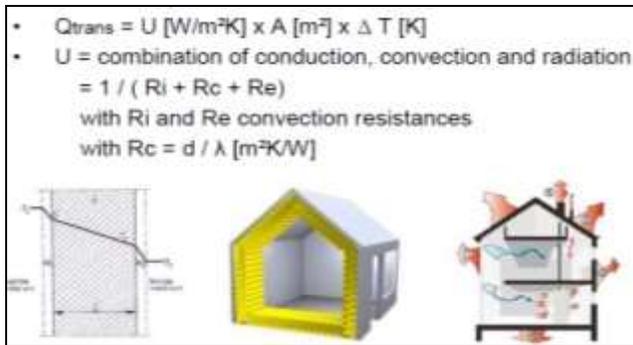


Figure 9 : Niveau d'isolation exprimée en valeur U

D'autres éléments caractérisent un matériau isolant : sa disponibilité sur le marché local, son coût, son degré de toxicité tant à la pose qu'une fois installé, son inflammabilité, sa résistance mécanique, l'énergie nécessaire à sa production, son imperméabilité à l'eau et son étanchéité à l'air... Ces éléments sont également à prendre en compte lors de la sélection des divers isolants, ceux-ci étant souvent différents selon qu'il s'agisse de l'isolation du sol, d'un mur ou d'une toiture. Il importe en effet d'isoler toutes les parois, toute partie non isolée conduisant à des déperditions importantes. Des normes de plus en plus restrictives sont désormais d'application en Europe en matière de transmission thermique des différentes parois d'un immeuble.

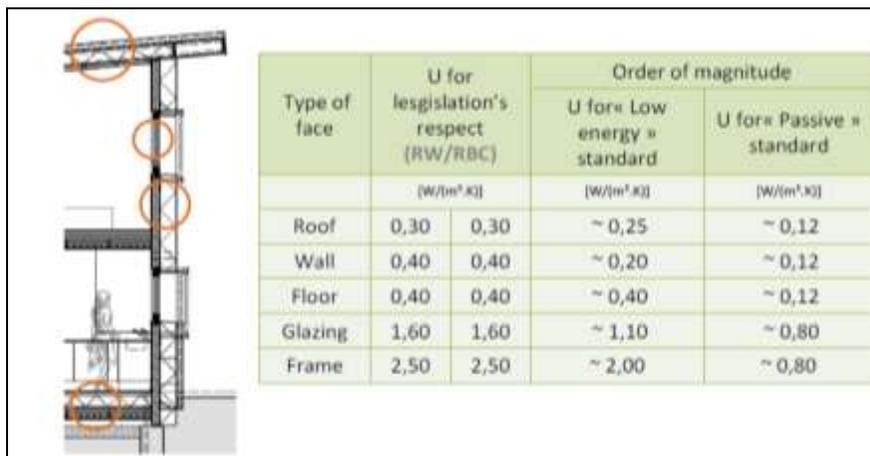


Figure 10 : Moyennes des diverses normes d'isolation européennes

Source : 3E, Formation BTC en énergie et construction durable, 2011

Se pose ensuite la question de la position de l'isolant, ce dernier pouvant être placé soit du côté intérieur, soit du côté extérieur de la paroi. Le choix de l'une ou l'autre position est déterminé par:

- L'usage ou non de la masse thermique de la paroi (voir plus bas) ;
- La gestion des risques de ponts thermiques ;

- Le gestion du point de rosée (le point de condensation de l'humidité de l'air) et des problèmes d'humidité qui lui sont liés ;
- La disponibilité des matériaux et des techniques de construction sur le marché local et leurs caractéristiques.

L'emploi de la masse thermique du mur, les risques de ponts thermiques et de points de rosée plaident pour un positionnement de l'isolant à l'extérieur. Se posera alors la question du parement de la façade. Il importe en effet de disposer d'une finition à la fois esthétique, étanche et résistante aux chocs afin de recouvrir la couche d'isolant qui ne peut être laissée à nu.

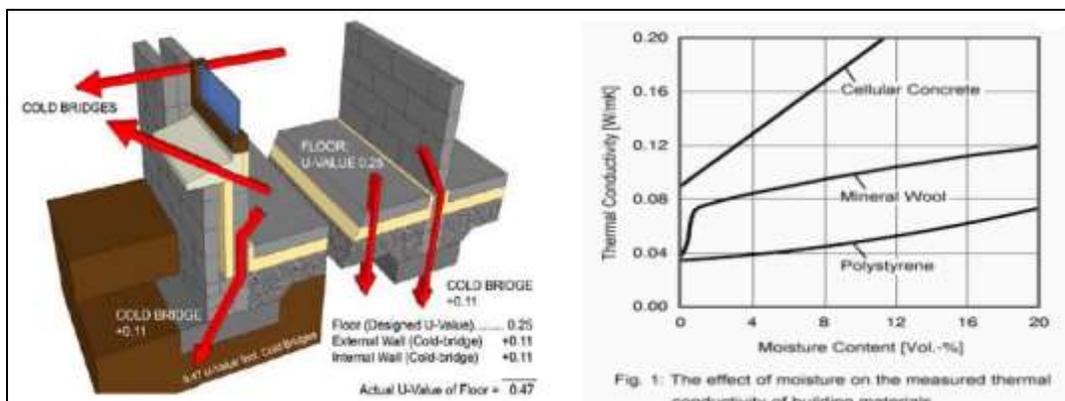


Figure 11: Type et position de la couche d'isolant et principe de pont thermique

Source : 3E, Formation BTC en énergie et construction durable, 2011

Ainsi, aujourd'hui, une paroi est généralement composée de cinq couches au minimum : la finition intérieure, le mur porteur (ou un système de colonnes et d'un mur de remplissage), un isolant, souvent complété d'un pare-vapeur, un vide d'air pour collecter l'eau de point de rosée et le parement (briques, bois, ardoises...). Si l'emploi de telles techniques de construction est devenu une évidence depuis plusieurs années dans les régions tempérées et froides, la recherche d'économie d'énergie des systèmes mécaniques de refroidissement plaide pour leur emploi également dans les régions chaudes, quitte à adapter le système aux contraintes locales.

Placer l'isolant du côté intérieur requiert la pose d'une couche de finition telle qu'une plaque de plâtre, ainsi que d'un pare-vapeur. Il se conçoit si l'emploi de l'inertie thermique du mur n'est pas recherché.

Si l'emploi de l'isolant dans les pays du sud reste encore l'exception, la promotion de murs creux pourrait être une première étape utile. En effet, disposer d'un deuxième mur de parement séparé d'un vide ventilé permet d'absorber une grande partie de la chaleur induite par les rayons solaires.

Inertie thermique

La masse ou l'inertie thermique est la capacité d'un matériau à absorber la chaleur. Une grande quantité d'énergie est requise pour changer la température de matériaux aussi denses que la

brique ou le béton. A l'opposé, des matériaux légers comme le bois, ont une faible masse thermique.

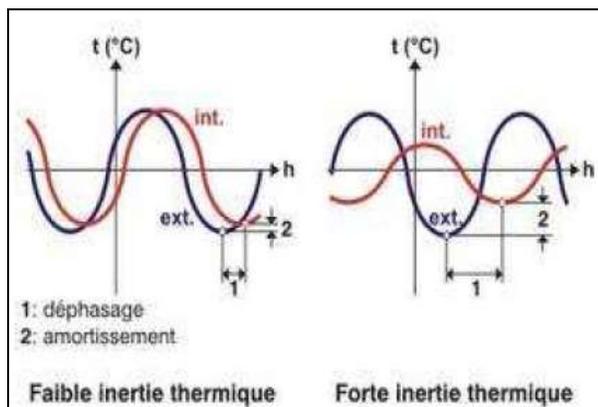


Figure 12 : Effet de l'inertie thermique sur la transmission calorifique jour/nuit

L'inertie thermique définit la vitesse à laquelle le bâtiment se refroidit ou se réchauffe et permet d'amortir les variations non désirées de température extérieure. Plus l'inertie est grande plus on obtient un «amortissement» de la température qui permet d'atténuer l'effet des canicules. La notion de déphasage apparaît aussi, ce qui permet de retarder le front de chaleur accumulé pendant la journée.

Le Figure 12 illustre comment les variations de température entre l'intérieur et l'extérieur fluctuent dans le temps en fonction de la masse thermique. La différence de température est minimale lorsque le mur du local est dépourvu de masse thermique (schéma de gauche). On visualise sur le schéma de droite le déphasage de température entre l'intérieur et l'extérieur lorsque le mur est pourvu d'une forte inertie thermique.

Le béton a la propension de restituer durant la nuit par radiation les calories accumulées durant la journée, à condition que le delta entre les températures diurnes et nocturnes soit important. **Afin de tirer profit de cette différence de température, le concepteur de projet aura dès lors intérêt à équiper le bâtiment d'un système de ventilation permettant d'évacuer ces calories à l'extérieur durant la nuit afin de rafraichir les pièces pour le jour suivant, ce qui est intéressant dans un climat aride.**

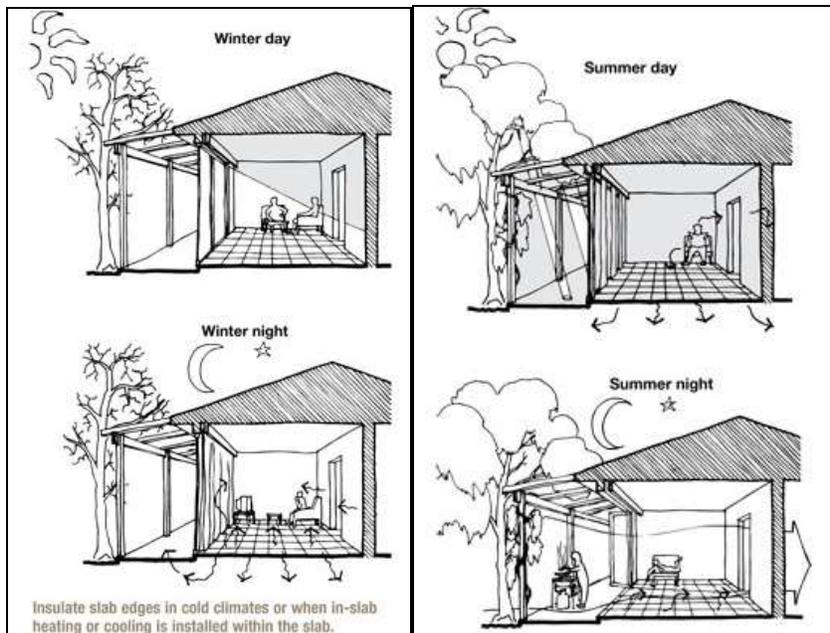


Figure 13: Effet de l'inertie thermique en été et en hiver dans un climat tempéré

Source: <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs44.html>

Un tel procédé est à exclure dans des climats chauds et humides où la variation de température entre le jour et la nuit est faible. L'emploi de matériaux lourds à fortes inerties thermiques exposés au soleil la journée rendrait les nuits encore plus inconfortables. Il est **indispensable dans ce type de climat d'utiliser des solutions à très faible inertie, comme le bois**, comprenant une forte ventilation. La circulation d'air apparaît donc comme le facteur essentiel permettant de diminuer l'inconfort résultant de ce type de climat.

Dans le calcul des calories à évacuer, toutes les sources de chaleurs doivent être considérées, non seulement l'apport des rayons directs du soleil sur les parois et les fenêtres, mais également les sources internes, comme la production de chaleur d'un réseau informatique ou des usagers. Pour rappel, les gains calorifiques internes sont de l'ordre de 100W par occupant, ou +/- 10W/m² dans les bureaux, de 4W/m² par 100 Lux de lumière artificielle, et de 400W par ordinateur ou +/- 40W/m² en moyenne par bureau. Il conviendra dès lors de développer des mesures spécifiques dans les bureaux par exemple.

Conception et protection des baies

La lumière naturelle

Outre la question de l'apport calorifique qu'il convient tantôt de privilégier, tantôt de combattre, tirer parti de la lumière naturelle est essentiel pour fournir un confort visuel optimal tout en minimisant les besoins en énergie (lumière artificielle) quel que soit le climat dans lequel on opère.

Dans les ciels clairs caractéristiques des climats chauds et arides, la luminosité n'est pas uniforme, diminuant de l'horizon vers le zénith, avec une augmentation importante autour de la position du soleil. Dans les ciels plus couverts des climats chauds et humides, la luminosité est plus uniforme mais à l'inverse augmente de l'horizon vers le zénith.

Dans les climats chauds et secs, l'éblouissement provient surtout de la lumière réfléchie par les bâtiments adjacents de couleur claire ou par les sols. Il convient donc de placer les ouvertures de manière à ce que le regard se dirige vers le ciel plutôt que sur le bas de l'horizon. Ainsi, on privilégiera la position des fenêtres au-dessus du regard ou on les protégera par des stores vénitiens. Cela évite une vision directe sur l'extérieur mais permet toutefois à la lumière indirecte réfléchie par les éléments extérieurs de pénétrer à travers les stores et d'être réfléchi par les plafonds, produisant une lumière intérieure uniforme.

Dans les climats chauds et humides, puisque l'éblouissement provient surtout du ciel, on privilégiera les fenêtres placées à hauteur du regard, vers les éléments extérieurs. Des dévers de toiture ou de larges vérandas peuvent être utilisées pour bloquer la vue directe sur le ciel.

Performance des matériaux

Dans un pays chaud, faire entrer la lumière sans la chaleur est un défi de taille. La performance des matériaux constituant la fenêtre joue ici un rôle important. La performance thermique de **cette dernière dépend principalement de son coefficient de transmission thermique et du facteur solaire de son vitrage.** Le premier est liée aux performances du verre, du gaz qui remplit l'interstice, quand il s'agit d'un double vitrage, de l'espaceur et du châssis. Cette performance se mesure avec le coefficient U [W/m^2K]¹⁰ qui quantifie la déperdition thermique de la fenêtre. Le facteur solaire quantifie la capacité du vitrage à laisser passer les gains solaires.

Les performances d'une fenêtre ne se limitent pas à son caractère isolant. Il faut également prendre en compte le facteur solaire et la transmission lumineuse de son vitrage.

Le facteur solaire est la fraction de l'énergie solaire incidente qui passe à travers le vitrage et de son éventuelle protection solaire. Cette grandeur représente le niveau de protection que le vitrage et son ombrage offrent face aux surchauffes et son rôle de « capteur d'énergie ».

La transmission lumineuse est la fraction du rayonnement solaire passant à travers le vitrage, si on ne considère que la partie visible du spectre solaire. C'est une grandeur qui caractérise sa transparence. On opte en général pour un vitrage clair (transmission lumineuse élevée), avec un facteur solaire élevé, pour profiter des gains solaires, en privilégiant l'ombrage en été par des éléments externes de type brise-soleil, auvent, store, volet, ... dont on parlera plus loin.

¹⁰ En Belgique, l'ensemble fenêtre devra respecter la réglementation PEB et présenter une valeur U_w inférieure à $2,5 W/m^2K$. De plus, le coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g) ne pourra pas excéder $1,6 W/m^2K$; cette valeur U_g est la valeur U centrale du vitrage en position verticale. On veillera également à ce que le châssis (à multiples frappes) ne présente pas de ponts thermiques tant au niveau de son espaceur que de sa mise en œuvre.

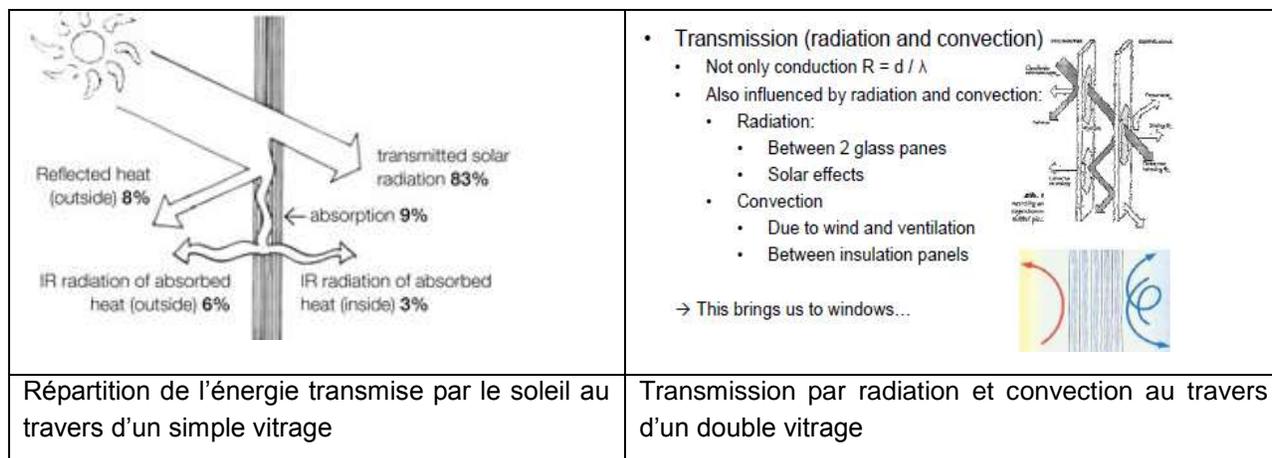


Figure 14 : Transmission par radiation et convection au travers d'un double vitrage

Source: <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs44.html>

Le choix d'un châssis doit tenir compte de son impact environnemental (selon le matériau utilisé, le châssis participera plus ou moins à l'épuisement des ressources, sera plus ou moins recyclable, etc.) et de sa propre performance thermique. Les châssis en bois et en aluminium à plusieurs frappe constituent en général le meilleurs compromis.

Forme et position des baies vitrées

Afin d'optimiser l'apport de lumière naturelle tout en maîtrisant les inconvénients, la baie vitrée doit être conçue suivant une stratégie en 5 actes : capter, transmettre, distribuer, se protéger et contrôler.

Capter

La surface, les dimensions et la position d'une baie vitrée entrent en ligne de compte dans l'apport de lumière naturelle, suivant la latitude, la période du jour et de l'année, l'orientation, ainsi que le niveau d'ombrage et de réflexion de l'environnement extérieur¹¹. Compte-tenu de l'ensemble de ces paramètres, il serait difficile d'établir des règles universelles.

Alors que l'on privilégie de grandes surfaces vitrées orientées sud dans les pays froids afin de tirer profit des gains calorifiques en hiver, **on favorisera dans les climats chauds la multiplication de petites baies, dont l'occultation est plus facile, tout en évitant les fenêtres plein sud, à moins qu'elle ne soient ombragées.**

Transmettre

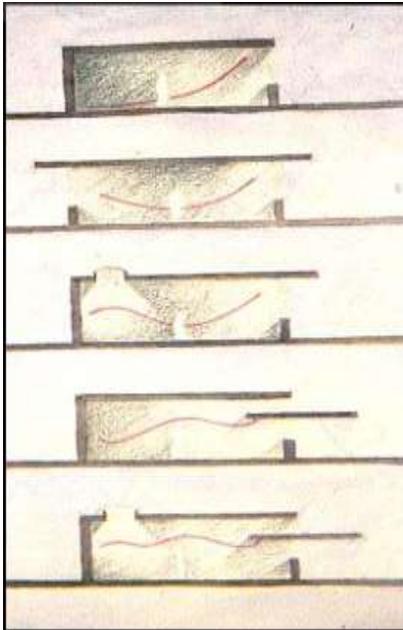
Le niveau de transmission d'une fenêtre est défini par le degré de pénétration de la lumière à l'intérieur d'un local. Celui-ci dépend des caractéristiques de ses matériaux constitutifs et de la baie, dont l'inclinaison, l'orientation, la configuration et les dimensions de l'ouverture. Il sera également influencé par la dimension de la pièce, l'aménagement intérieur et le niveau de réflexion des matériaux qui la constitue.

¹¹ Si le degré de réflexion de la terre n'est que de 0,22, et celui du béton de 0,35, celui d'un plan d'eau sera de 0,7, alors que celui de la neige atteint 0,9.

Ainsi, à surface égale, une fenêtre horizontale placée en hauteur assurera un meilleur niveau d'éclairage et une meilleure pénétration dans le local qu'une fenêtre verticale disposée au bas du mur.

Distribuer

La distribution de la lumière naturelle dans un local peut être diffuse ou focalisée. Pour un bon confort visuel, il importe d'éviter un trop fort contraste en privilégiant une bonne répartition du niveau d'éclairage sur toute la pièce.



Une prise de jour en façade induit une forte variation quantitative de l'éclairage. Il importe dès lors de bien répartir les ouvertures et de veiller à ne pas multiplier les obstacles pour laisser pénétrer la lumière même dans les zones les plus reculées du local.

Une prise de jour en toiture permet d'uniformiser l'éclairage. Elle est 3 à 5 fois plus performante qu'une prise de jour en façade, pour une même surface et un vitrage de même type. On peut aussi améliorer les performances par l'emploi de dispositifs complémentaires via des bandeaux et des mécanismes de réflexion de la lumière.

Dans les pays chauds et secs, la disposition des pièces autour d'un atrium sera une bonne stratégie non seulement pour apporter de l'air frais mais également de la lumière au milieu du bâtiment.

Figure 15 : Diffusion de la lumière

Source: L'éclairage naturel, stratégies et prédétermination, S. Balez, 2007

Pour atteindre les niveaux d'éclairage optimum, il appartiendra au concepteur de projet de jouer également avec le facteur de réflexion et de distribution de la luminance des parois. Ce niveau de réflexion varie suivant la couleur de la paroi, les couleurs claires étant plus réfléchissantes. Ainsi, le taux de réflexion d'un plafond oscille entre 0,7 à 0,9, celui des murs entre 0,5 et 0,8, un plan de travail entre 0,2 et 0,6, le sol allant de 0,2 à 0,4.

Se protéger et contrôler

Afin de maîtriser en toutes saisons la pénétration des rayons solaires au travers des baies, les éléments tant intérieurs qu'extérieurs pouvant les protéger du soleil doivent être étudiés avec soin. On parlera de système de protection, lorsque le système est externe et fixe ou de système de contrôle lorsque ces derniers sont amovibles ou orientables, qu'ils soient positionnés à l'intérieur ou à l'extérieur. Des systèmes de contrôle solaires intérieurs, les volets et rideaux sont les plus courants.

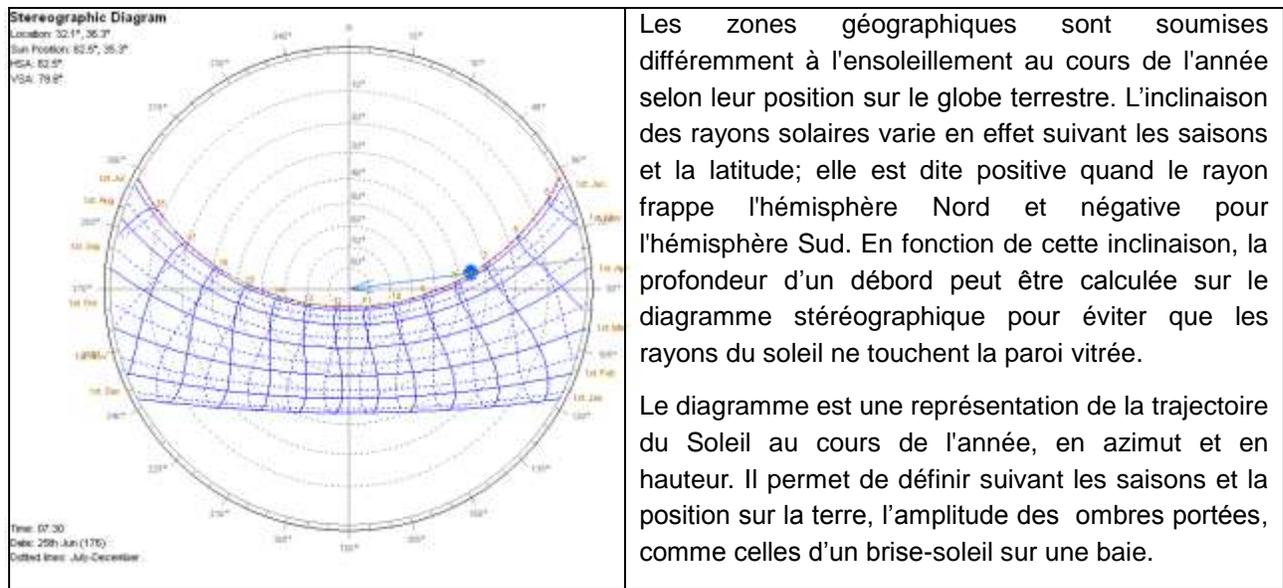


Figure 16: Diagramme de projection solaire en stéréographie

Source: <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs44.html>

Un système de protection extérieur permet d'éviter l'effet de serre ou une occultation complète qui priverait des bienfaits de l'éclairage naturel mais il a l'inconvénient d'être exposé aux intempéries et au risque de vandalisme. Des systèmes simples de protection par débordement de toiture ou de vérandas ont été largement utilisés dans l'architecture coloniale. Dans certains pays où l'architecture à toit plat est très présente, d'autres techniques peuvent être recherchées. L'emploi de diagrammes de trajectoire solaire en stéréographie (voir Figure 16) permet de définir l'amplitude nécessaire du débord, suivant la position sur le globe terrestre, les saisons et l'orientation de la baie.

Systemes de protections solaires

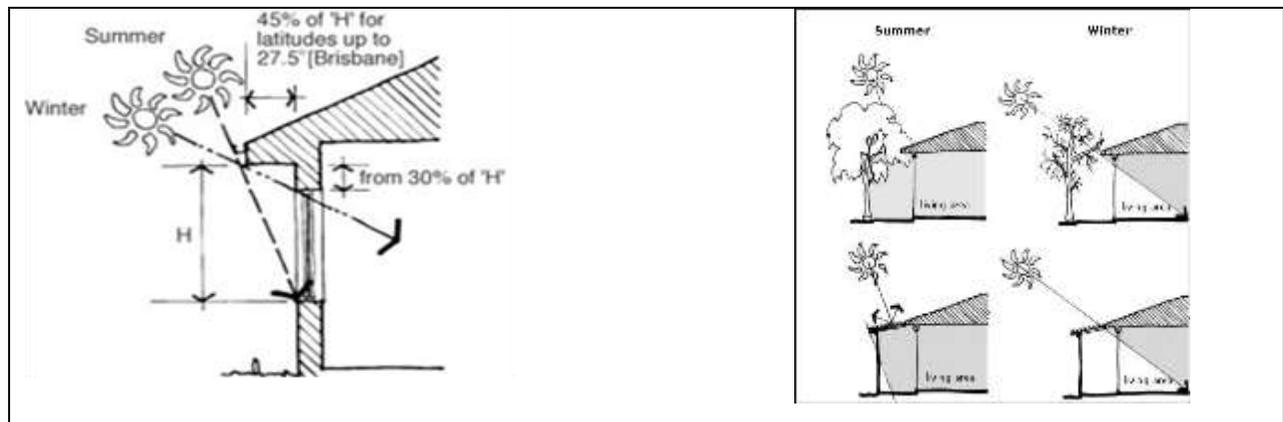


Figure 17: Principes de protection des baies des rayons solaires fixes

Le brise-soleil est un moyen efficace de protection des fenêtres. Il s'agit d'un système de protection rigide placé en haut de la fenêtre ou latéralement. Il consiste le plus souvent en des panneaux pleins, orientables ou non, dont la profondeur est inversement proportionnelle au

nombre de panneaux disposés horizontalement ou verticalement au-dessus ou devant la fenêtre.



Figure 18: Différents modèles de brise-soleils

Les brise-soleils peuvent aussi couvrir l'ensemble de la façade et être utilisés comme moyen d'expression architectural. Le Corbusier fut le premier à en faire un élément du langage de l'architecture moderne au début du siècle dernier.

Quelle que soit l'expression architecturale retenue, sa conception doit être correctement étudiée, notamment en fonction de l'orientation et des vues. **Ainsi des panneaux placés verticalement permettront de limiter l'impact d'un ensoleillement latéral et de la forte inclinaison du soleil du matin ou du soir. Une dalle positionnée au-dessus de la fenêtre est plus efficace pour une orientation sud.** Elle doit idéalement être disposée au plus près du linteau afin que son ombre portée couvre la plus grande partie du vitrage, sa largeur devant être définie en fonction de la hauteur de fenêtre à couvrir.

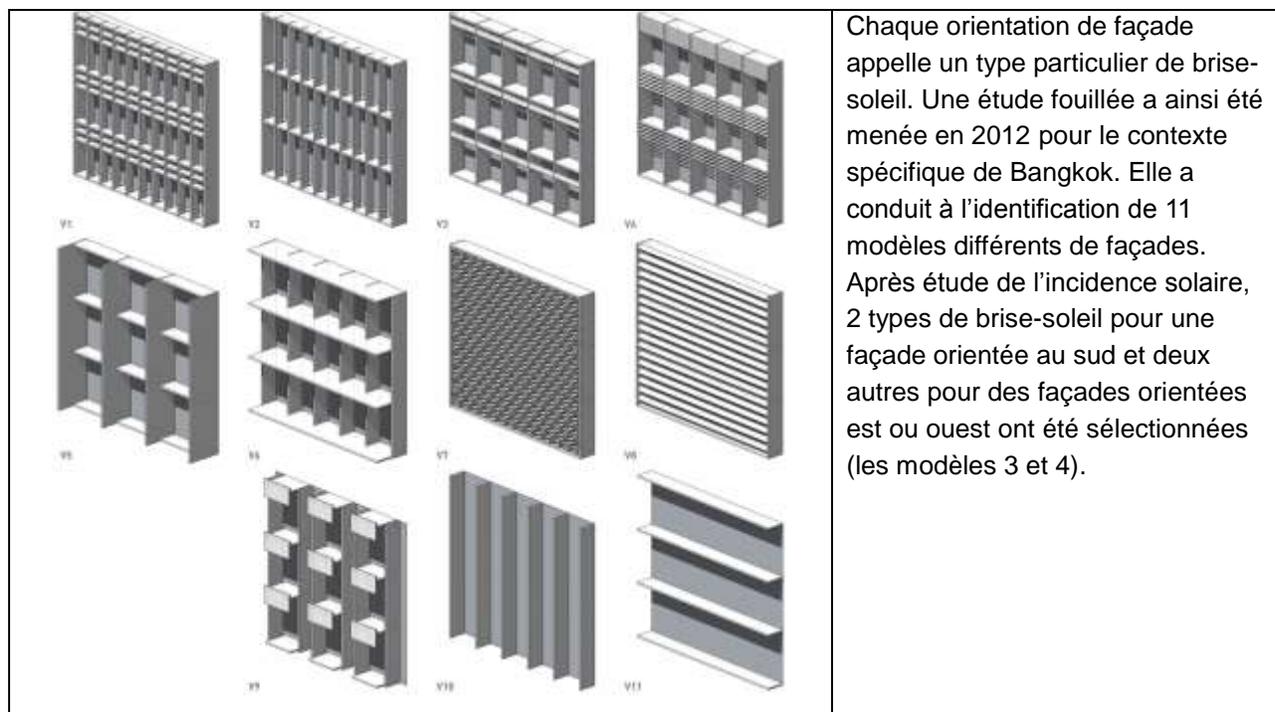


Figure 18 : Etude de différents types de façades avec brise-soleils appropriés pour Bangkok

Source : <http://urbanalyse.com/research/brise-soleil-study-2/>

Comme l'illustre la Figure 19, une étude faite dans le cadre d'un projet de construction d'écoles en Palestine pour la CTB, a permis de définir l'impact du système de brise-soleil retenu sur le niveau d'éclairage à l'intérieur du bâtiment. L'objectif est de garder un niveau le plus diffus et constant possible pour à la fois se passer d'éclairage artificiel et éviter un contraste trop important entre la partie du local située à proximité des fenêtres de la partie la plus éloignée.

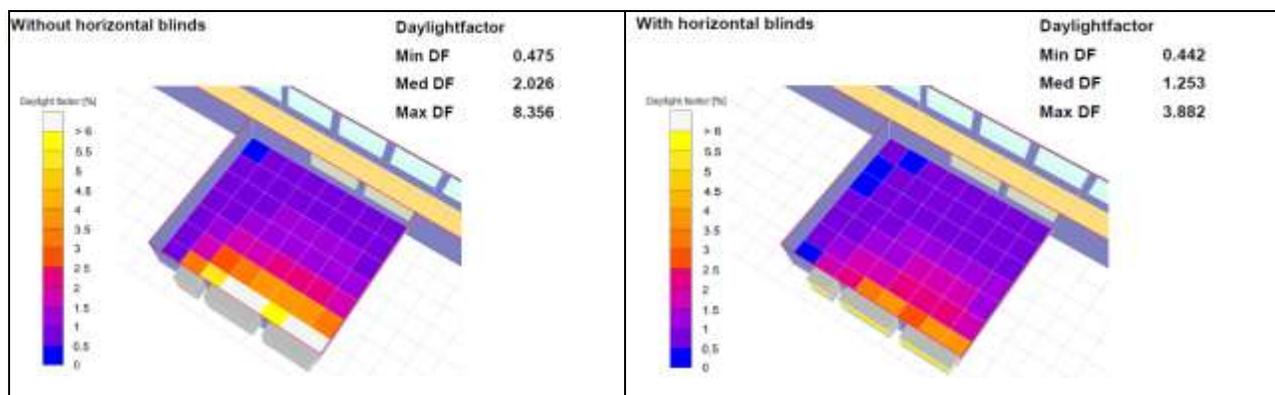


Figure 19 : Etude de niveau d'éclairage avec ou sans brise-soleil horizontal

Source : Transsolar, CTB-Palestine, 2012

La toiture

La toiture, qu'elle soit plate ou inclinée, absorbe une grande quantité de calories provenant des rayons solaires. Pour limiter tout risque de surchauffe, différentes alternatives sont envisageables, certaines étant compatibles l'une avec l'autre.

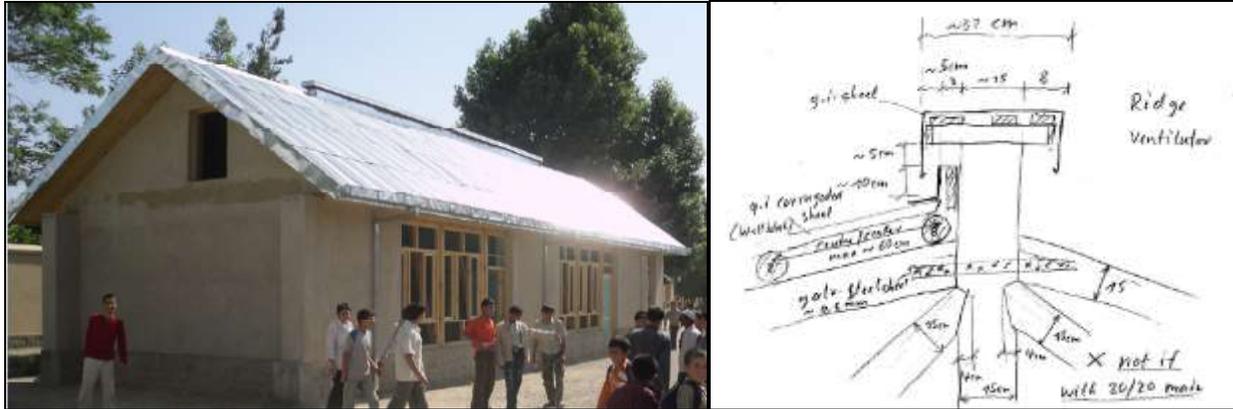


Figure 20 : Système de toiture ventilée avec bouche de sortie en point haut appliqué dans une école en Afghanistan, GIZ, 2010

- L'ombre portée sur la toiture est un premier atout. Ainsi, la pose de panneaux solaires sur la toiture contribuera à limiter la transmission thermique vers l'intérieur du bâtiment, de même qu'un auvent, voire une simple bâche, posée au-dessus d'une toiture plate ;
- La couleur des matériaux est un autre facteur important. Les couleurs claires réfléchissantes sont à privilégier par rapport aux couleurs sombres plus absorbantes. Dans cet esprit, le rouge foncé, le vert foncé, le bleu vif ou même le gris clair sont à proscrire ;
- Le choix du matériau est déterminant, la tôle métallique ondulée étant à éviter. Elle agit comme un véritable radiateur solaire, alors qu'en cas de pluie, elle produit un bruit assourdissant. La tuile de ciment ou de terre cuite dispose de meilleures qualités isolantes et d'inertie thermique ;
- La pose d'un isolant, aussi minime soit-elle, sous la toiture est salutaire. On parlera de « toiture chaude » quand la couche d'étanchéité est située directement au-dessus de la couche d'isolation et de « toiture froide » quand une couche d'air est placée entre l'isolation et la finition de toiture. On parlera également de « toiture inversée » quand l'isolation surmonte la finition de toiture. Chaque option dispose d'avantages et d'inconvénients qu'il conviendra d'étudier en fonction du contexte ;
- La ventilation est une stratégie complémentaire importante, notamment lors de l'emploi de matériaux dont l'inertie thermique est conséquente. Un courant d'air sous la toiture permet d'évacuer l'air chaud accumulé. Pour être efficace, des entrées d'air doivent être réparties uniformément sur tout le périmètre de la toiture, la surface de ventilation devant être supérieure à 15% de la surface de toiture. On veillera à la protection latérale contre la pluie et l'intrusion des nuisibles, tels que chauves-souris et rongeurs. Ce mécanisme peut être renforcé par une prise d'air en point haut de la toiture, à l'image de ce qui fut expérimenté pour des écoles en Afghanistan (voir Figure 20). Une alternative sera de créer une ouverture continue au niveau du faux-plafond, comme expérimenté dans une école technique en Ouganda appuyée par la CTB. L'air chaud et vicié de la

pièce va ainsi pénétrer dans la sous toiture plus chaude, puis sera extrait par les ouvertures pratiquées au point haut de la toiture (Figure 21).

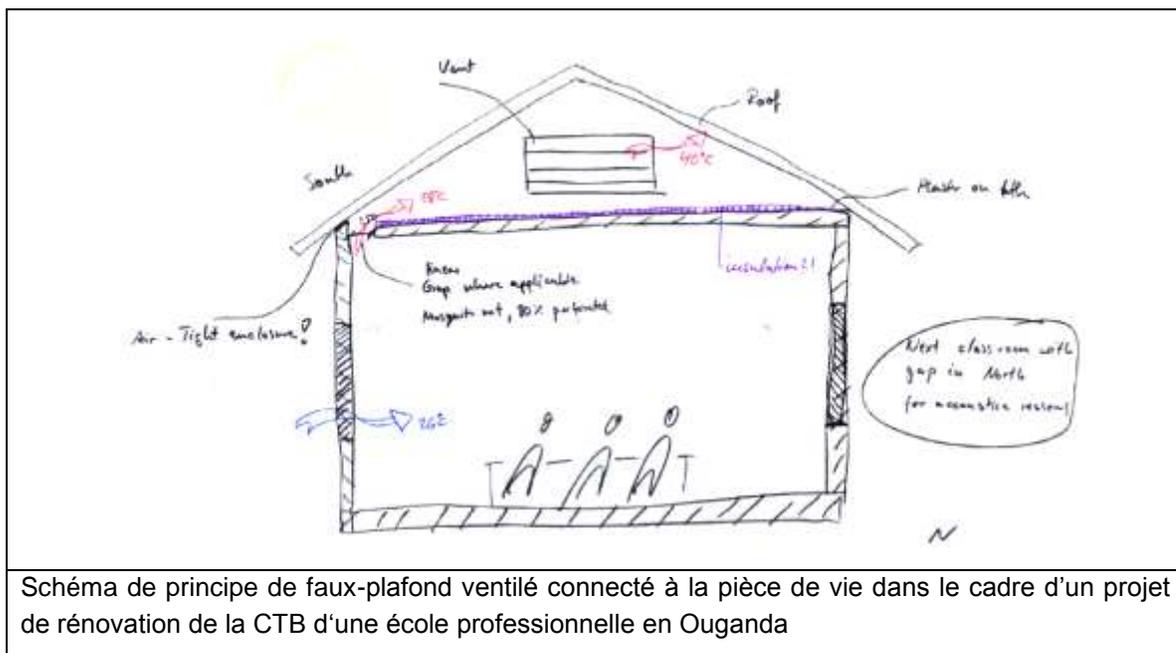


Figure 21 : Principe de faux-plafond ventilé, CTB, Ouganda

Source : Transsolar, CTB-Uganda, 2015

Les toitures végétalisées

La toiture végétalisée a pour origine une technique traditionnelle scandinave qui protège autant du froid que de la chaleur. Elle utilise la terre et les végétaux comme barrière thermique. Le mélange de terre et de végétaux enracinés sur les toits permet de réaliser une isolation phonique, thermique, une étanchéité à l'air et à l'eau, ainsi qu'une résistance au vent et au feu.

L'intérêt des toitures végétalisées est important en saison chaude. Elles permettent de diminuer l'absorption d'énergie solaire contribuant ainsi au maintien d'une température intérieure stable et plus fraîche. Appliqués à l'échelle d'un quartier, ils peuvent atténuer l'effet d'îlot de chaleur, réduisant considérablement la température de l'ensemble de la zone.

Leur impact sur la température intérieure d'un bâtiment est de l'ordre de 2°C, soit une économie annuelle de l'ordre de 10% en électricité de climatisation. Ainsi, la différence de température entre une toiture classique et une toiture végétalisée peut aller jusqu'à 30°C au niveau de la membrane d'étanchéité. Une membrane de toiture exposée au soleil peut en effet atteindre une température de surface de 65°C alors que la membrane recouverte de végétaux demeure à une température de 15°C à 20°C.

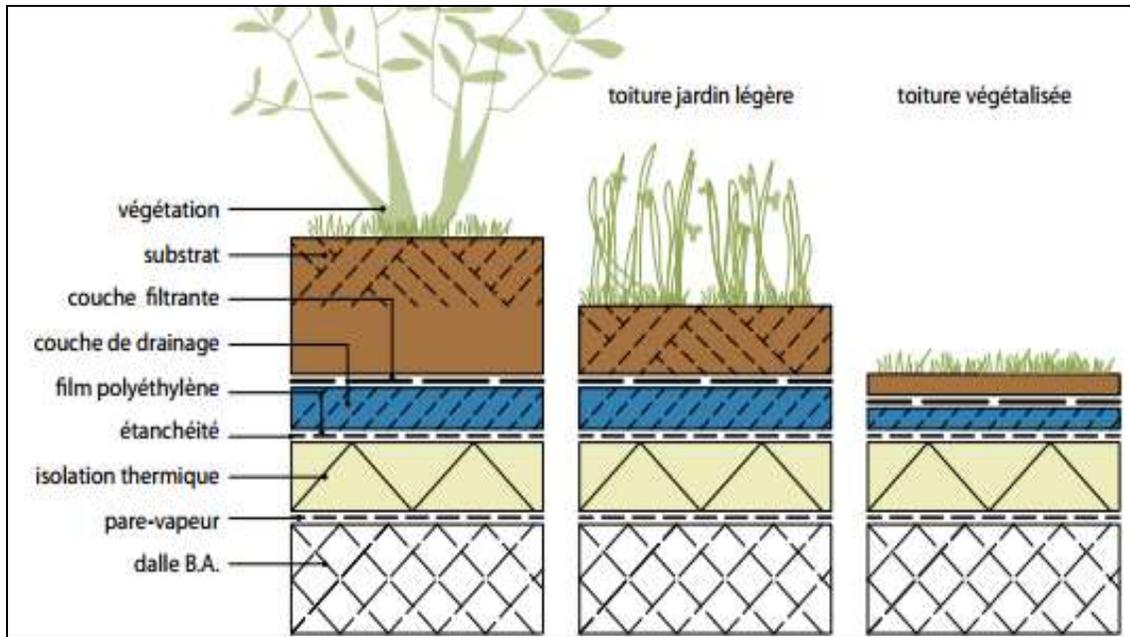


Figure 22: Types de toitures végétalisées

Source : CSTC NIT 229

Caractéristiques	Végétation intensive		Végétation extensive
	Toiture-jardin	Toiture-jardin légère	Toiture végétalisée
Épaisseur des couches au-dessus de l'étanchéité	>0,25m	Entre 0,1 et 0,25m	<0,1m
Poids de la toiture verte saturée	>400kg/m ²	100 à 400kg/m ²	30 à 100 kg/m ²
Accessibilité	Oui	Oui	Non
Pente indicative usuelle du support	2 à 10% (1 à 6°)	2 à 58% (1 à 30°)	2 à 70% (1 à 35°)
Entretien végétation	Important	Moyen	Limité

Tableau 3 : Principales caractéristiques des différents types de toiture végétale

La végétation opère comme un rafraîchissement naturel et évite les alternances brusques de température, prolongeant ainsi la durée de vie de la membrane. Ce type de toiture a dès lors l'avantage d'être plus durable. Le matériau imperméabilisant résiste ainsi plus longtemps à l'abri des ultraviolets et des rayonnements solaires. L'inconvénient principal de ce type de toiture est la surcharge qu'elle induit et le surcoût nécessaire au renforcement de la structure.

2.2.3 La ventilation

La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est la source de rafraîchissement la plus efficace d'un point de vue énergétique et la plus facile à réaliser. **Elle est déterminée par la différence de température et de pression entre l'intérieur et l'extérieur d'un local, ainsi que par la différence de**

hauteur entre l'entrée et la sortie d'air. Elle est ainsi essentiellement basée sur le principe de ventilation traversante et de stratification de l'air.

Outre le fait qu'elle permette de réguler la température et d'évacuer les apports thermiques dus à l'ensoleillement ainsi que les productions de chaleur internes, elle assure aussi le renouvellement de l'air intérieur, et donc sa qualité. Il existe différents systèmes de ventilation, certains s'appuyant sur un simple apport et rejet naturel, d'autres se basant sur des mécanismes passifs plus élaborés.

La ventilation naturelle est garante d'une maintenance limitée pour un coût d'investissement et d'utilisation réduit, mais elle implique un transfert du volume d'air irrégulier dépendant d'une série de facteurs. Elle balaye les pièces du bâtiment et se répartit librement sans l'aide d'un brassage mécanique.



Figure 23 : Système de ventilation basé sur la masse thermique, la ventilation naturelle et les variations de température entre le jour et la nuit

La conception architecturale est déterminante dans la répartition de l'air neuf au sein de l'immeuble. Ainsi, la distribution spatiale de l'air est subordonnée à la disposition des ouvertures. La conception tiendra compte des principes suivants:

- L'air en mouvement a une certaine inertie ; les filets d'air entrant dans le bâtiment ont donc tendance à garder la même direction ;

- La direction des filets d'air à l'intérieur est influencée par la répartition des pressions sur la façade exposée au vent et par la forme de la prise d'air ;
- Le trajet de l'air au travers d'une pièce n'est pas influencé par la vitesse du vent mais par la géométrie interne et l'existence des zones de haute et de basse pression ;
- Le mouvement de l'air dans une pièce doit être considéré aussi bien en plan qu'en coupe afin de tirer profit de l'effet de stratification de l'air. Ce dernier résulte du poids relatif plus important de l'air froid par rapport à l'air chaud, il a donc tendance à demeurer dans les parties inférieures du bâtiment ;
- La hauteur du sous-plafond est sans influence sur le trajet de l'air horizontal mais influe sur le trajet vertical, suite à l'effet de stratification de l'air.

La taille du bâtiment, sa forme, les positions, géométries et dimensions des ouvertures, des débords de toiture... interfèrent donc directement sur les mouvements d'air créés dans les locaux. **On veillera dès lors à promouvoir les principes suivants :**

- Une forme de bâtiment allongée, largement exposée aux vents dominants en climat chaud et humide;
- Des ouvertures situées sur des façades opposées pour favoriser une ventilation transversale ;
- Un cloisonnement intérieur longitudinal permettant la libre circulation de l'air d'une façade à l'autre ;
- Une hauteur des ouvertures telle que le flux intérieur soit dirigé vers le bas. La position basse de la prise d'air sera donc privilégiée ;
- L'ombre des arbres implantés le long de la façade disposant des entrées d'air permettra de rafraichir l'air entrant ;
- Une avancée assez haute augmente le flux d'air sans modifier sa direction ;
- Des sorties d'air plus grandes que les entrées placeront le bâtiment en sous-pression permettant d'obtenir une vitesse de l'air à l'intérieur supérieure à la vitesse à l'extérieur.

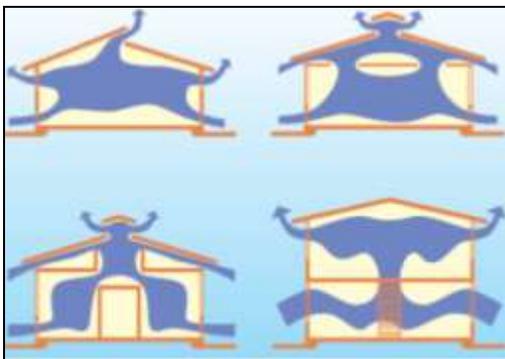


Figure 24 : Types de ventilation naturelle en coupe

Source : ASDER –ENERCODAT

Pour les bâtiments à étages, il sera opportun d'utiliser l'**effet de cheminée** en plaçant des bouches d'aération aux étages, notamment au droit des cages d'escalier (voir Figure 23). Ils permettent à l'air chaud de s'élever par convection et d'être rapidement évacué, créant de surcroît un appel d'air frais aux étages inférieurs.

Le même principe peut être utilisé dans les bâtiments avec toitures à versants en plaçant des ouvertures sur les points hauts de la charpente.

Par ailleurs, le design d'une fenêtre et ses équipements peut directement influencer sur la répartition de l'air à l'intérieur d'une pièce. Les fenêtres pivotantes et les lames mobiles (NACO) doivent être placées de façon à orienter l'air vers le bas de la pièce. De même, la position et la forme d'un brise-soleil influencent directement le flux d'air à l'intérieur du local.

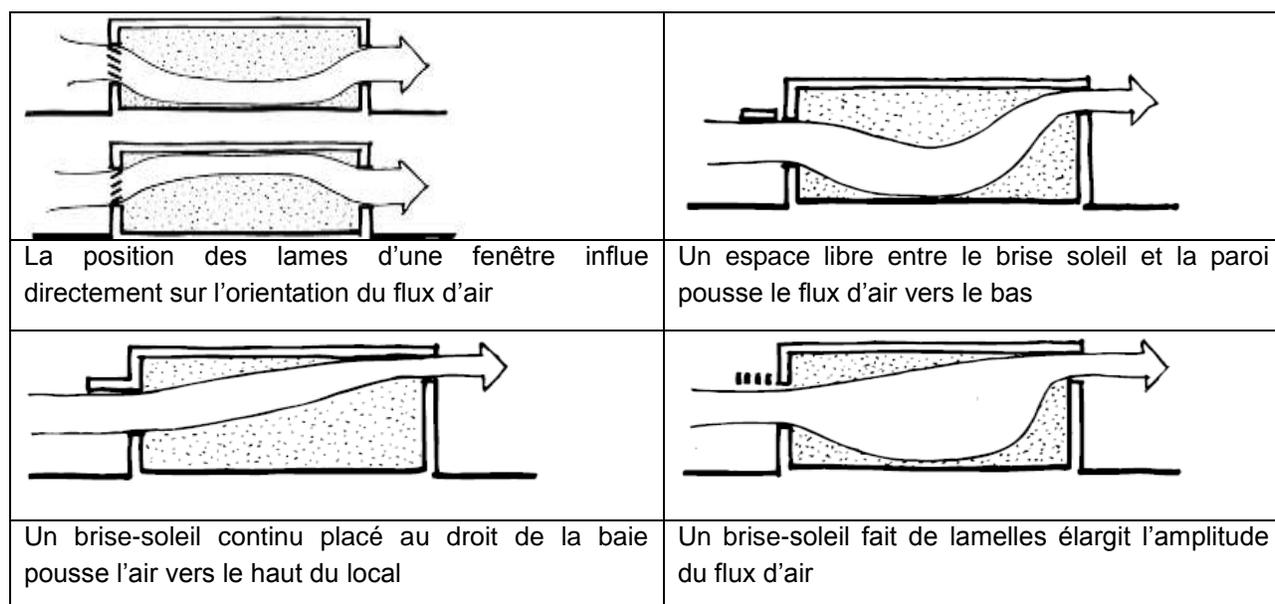


Figure 25 : Influence des lames mobiles et du brise-soleil sur la ventilation

Source: <http://www.yourhome.gov.au>

La ventilation peut être ainsi assurée au travers des portes et fenêtres par l'intermédiaire de lamelles. Ce principe a été expérimenté par un projet de la CTB au Cambodge. Ce dernier a développé un système de portes et fenêtres métalliques à lamelles (orientables pour les fenêtres) qui maximisent la ventilation. Ce système garantit une ventilation permanente ; la différence de température entre le jour et la nuit n'étant pas suffisante pour profiter de la masse thermique du bâtiment et évacuer les calories durant la nuit. Les ouvertures sont protégées de la pluie par une toiture largement débordante et des intrusions par des grilles.

Un système de claustras fixes est une autre option, à condition que les ouvertures soient suffisamment bien conçues pour ne pas être un obstacle au mouvement d'air. Le design du claustra doit maximiser le passage de l'air tout en assurant une bonne protection contre les pluies et les intrusions tant de voleurs que de nuisibles (insectes et rongeurs).

Dans certains cas il sera utile de pouvoir occulter complètement portes et fenêtres à certaines heures du jour. Cela est valable pour les zones disposant d'un bon différentiel de température entre le jour et la nuit. Il sera possible d'extraire la chaleur accumulée durant la journée capturée par l'inertie thermique en l'évacuant par convection durant la nuit. Il faudra pour ce faire que toutes les baies soient ouvertes. Aux premières heures du jour il faudra les fermer afin de préserver la fraîcheur accumulée pendant la nuit.



Figure 26: Exemple de ventilation naturelle maximisée via portes et fenêtres

Source : Projet BETT, CTB-Cambodge, 2006

C'est ainsi qu'un système de double portes a été imaginé pour un projet d'école professionnelle en Ouganda financé par la CTB en 2014. Les salles de classes disposent à la fois d'une porte massive en bois placée du côté extérieur et d'une porte grillagée disposant de moustiquaire coté intérieur. Cette dernière assure la sécurité du local pendant la nuit alors que la porte extérieure reste ouverte. En matinée la porte extérieure est fermée, préservant ainsi la fraîcheur à l'intérieur du local. Une fois que la température intérieure atteint celle de l'extérieur à la mi-journée, il conviendra d'ouvrir à nouveau toutes les baies.

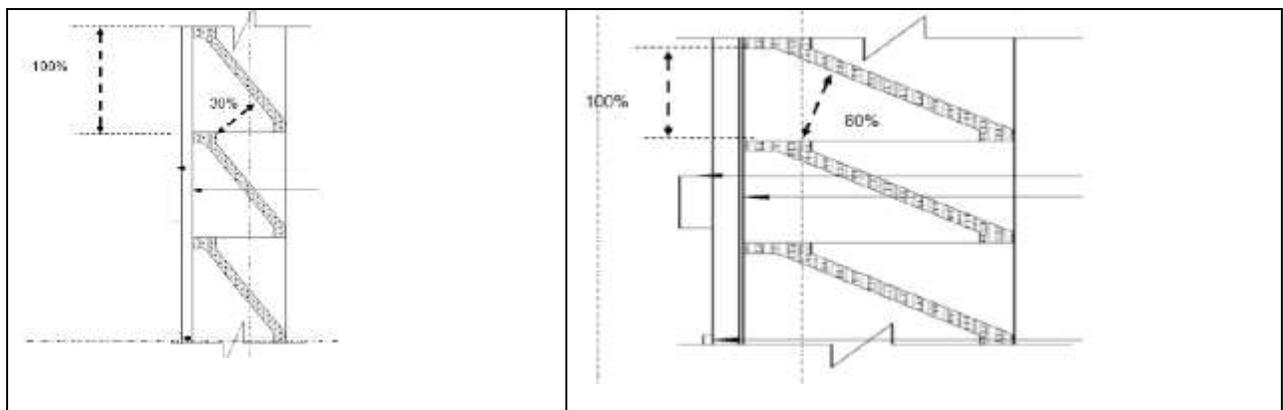


Figure 27: Modèles de claustras en coupe

Source: Final report 3 colleges, Sustainability, Climate and Comfort, CTB-Uganda, Transsolar, 2015

Ces différents principes ne sont hélas pas d'application pour tous les types de fonctions, comme ceux présent dans un hôpital. Il est possible de ventiler naturellement suivant ces principes les sections ne nécessitant pas de mesures de préservation de l'hygiène particulière, à la différences des pièces de consultation, les salles d'opération, certains locaux techniques ou la pharmacie.

Le puits provençal ou canadien

S'appuyant sur les principes évoqués dans le précédent chapitre, des systèmes de ventilation plus sophistiqués ont été développés au cours des siècles qui retrouvent aujourd'hui une certaine légitimité.

Le puits provençal, aussi appelé puits canadien, est un système géothermique dit de surface. **Il utilise l'énergie présente dans les premières couches du sol pour chauffer ou refroidir l'air neuf des bâtiments en s'appuyant sur le fait que la température à quelques mètres de profondeur est stable sur de grandes périodes contrairement à l'air ambiant.** Ainsi, on observe en Europe et au Moyen-Orient des températures variant entre 10 et 15°C en moyenne à 2m de profondeur alors que la température de l'air extérieur peut varier de -20°C à +40°C.

Le principe du puits provençal/canadien est de faire circuler l'air de ventilation neuf dans un conduit enterré avant de l'insuffler dans le bâtiment, généralement grâce à un ventilateur. Dans les pays tempérés en saison froide, l'air se réchauffe au cours de son parcours souterrain. Les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont alors réduits et le maintien hors gel du bâtiment peut être assuré. Le puits est alors dit puits canadien. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température inférieure à la température extérieure. Le puits est alors dit provençal.

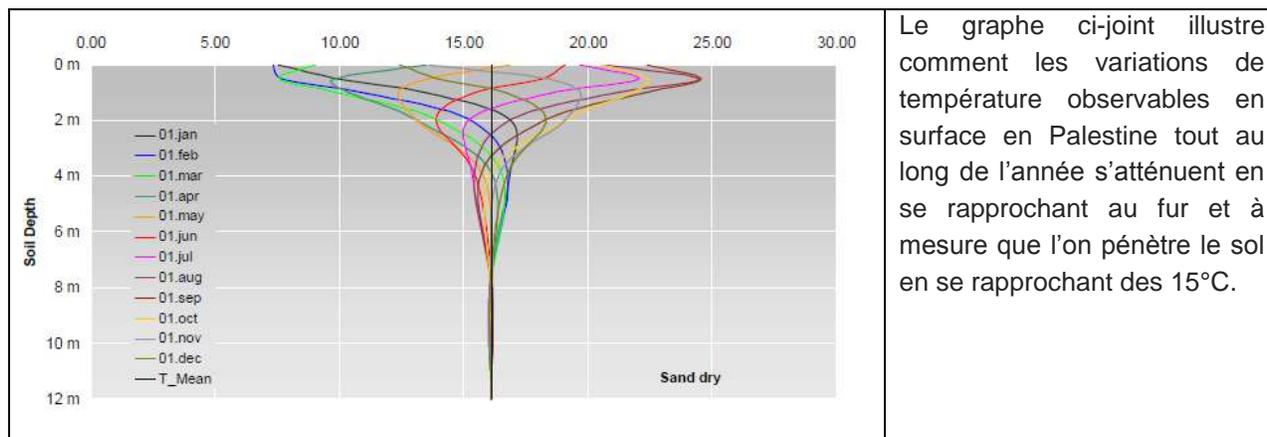


Figure 28 : Variation de la température dans les premiers mètres de profondeur du sol à Jérusalem

Source : Transsolar, BTC-Palestine, 2012

Le puits provençal est composé de quatre éléments : (i) l'entrée d'air neuf, (ii) le conduit, (iii) le système d'évacuation des condensats et (iv) la bouche de sortie d'air. Sa conception dépend des facteurs suivants :

- **La nature du sol** : Les performances du puits sont directement liées à la capacité calorifique et la conductivité thermique du sol. La nature de ce dernier influencera aussi le prix de l'installation ; les coûts de terrassement variant en fonction de la nature du terrain ;
- **La localisation géographique** : le recours à un puits provençal est particulièrement intéressant dans les régions ayant un différentiel de température important entre la saison chaude et la saison froide, soit supérieur à 10 °C ;
- **L'espace disponible**: il est préférable pour l'enfouissement du conduit que la parcelle dispose d'une surface importante et dégagée. Il sera judicieux de profiter des fouilles de fondation pour installer le réseau sous le bâtiment ;
- **Le type de bâtiment**: les besoins en renouvellement d'air ainsi que les exigences en termes d'hygiène varient suivant les fonctions du bâtiment et ses contraintes ;
- **Les besoins en chauffage et/ou refroidissement** : suivant les saisons et le type de fonction des pièces, les niveaux de température à atteindre varient. Une étude thermique peut être utile en s'appuyant sur un logiciel de simulation de type GAEA¹² ou PLEAIDE + COMFIE¹³.

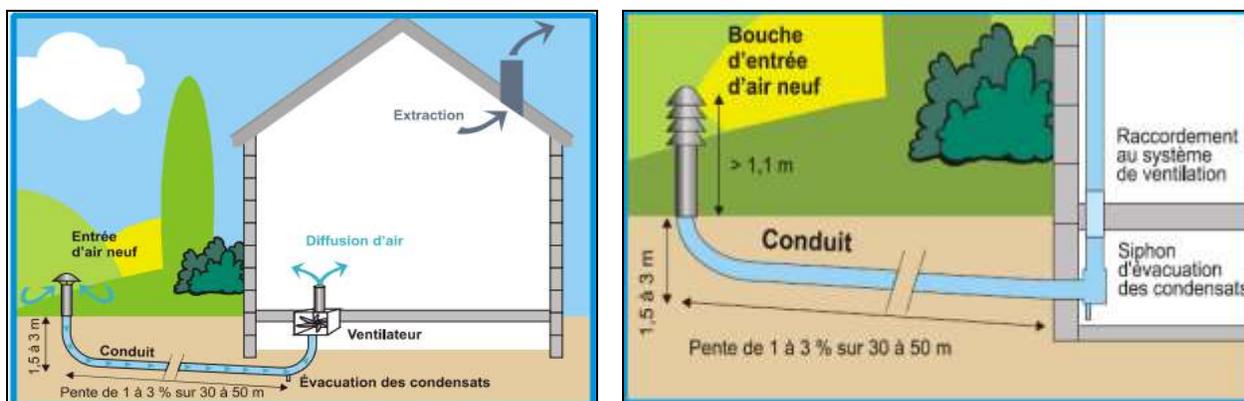


Figure 29 : Schéma de principe d'un puits provençal et de la prise d'air extérieure

Source : Les Puits Canadiens /Provençaux, Guide d'Information, CETIAT, 2007

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ses particules et de la teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur qu'il sera humide. La conductivité thermique d'un sol peut donc varier dans le temps.

La capacité calorifique (C_s) d'un sol s'exprime par la moyenne pondérée des capacités calorifiques de ses constituants : minéraux, matière organique, eau et air, où χ_i , ρ_i , C_i représentent respectivement la teneur du matériau (m^3 de matériau/ m^3 de sol), sa masse volumique et sa capacité calorifique. Comme l'eau et la matière organique ont une capacité

¹² Logiciel téléchargeable sur le site <http://nesa1.uni-siegen.de>

¹³ Logiciel téléchargeable sur le site <http://www.izuba.fr/telechargement.htm>

calorifique supérieure à celle des minéraux, un sol humide et riche en matière organique stockera mieux la chaleur qu'un sol sec, riche en minéraux.

A priori il conviendra donc d'installer un puits dans un sol argilo-marneux ou argilo-sableux humide plutôt que dans un sol sablonneux sec.

La conception des différents constituants doit tenir compte des éléments suivants :

- ***L'entrée d'air***

L'entrée d'air sera implantée loin des sources de pollution (voirie, parking, poubelles) et loin de toute végétation pouvant produire des pollens allergisants.

Il s'agira d'une simple bouche extérieure ou d'un plénum, suivant la taille du bâtiment desservi. La hauteur de la bouche sera supérieure à 1,1m pour éviter l'encrassement. Elle sera munie d'un chapeau pour la protéger de la pluie ainsi que d'une grille à fin maillage pour éviter l'intrusion de rongeurs, oiseaux et insectes. Elle doit être facilement accessible pour le nettoyage. La pose d'un filtre est nécessaire pour limiter l'encrassement par les poussières. Il est recommandé d'inspecter et de changer régulièrement ces filtres.

- ***Le conduit***

Le conduit du puits peut être constitué d'un simple tube posé en méandre ou en boucle autour du bâtiment ou être organisé sous la forme d'un réseau de tubes parallèles installés entre des collecteurs afin d'augmenter le débit d'air circulant dans le puits (boucle de Tichelmann). Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter l'entretien, le nombre de coudes sera limité.

La longueur de chaque tube est de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique et du climat ainsi que du type d'installation choisie.

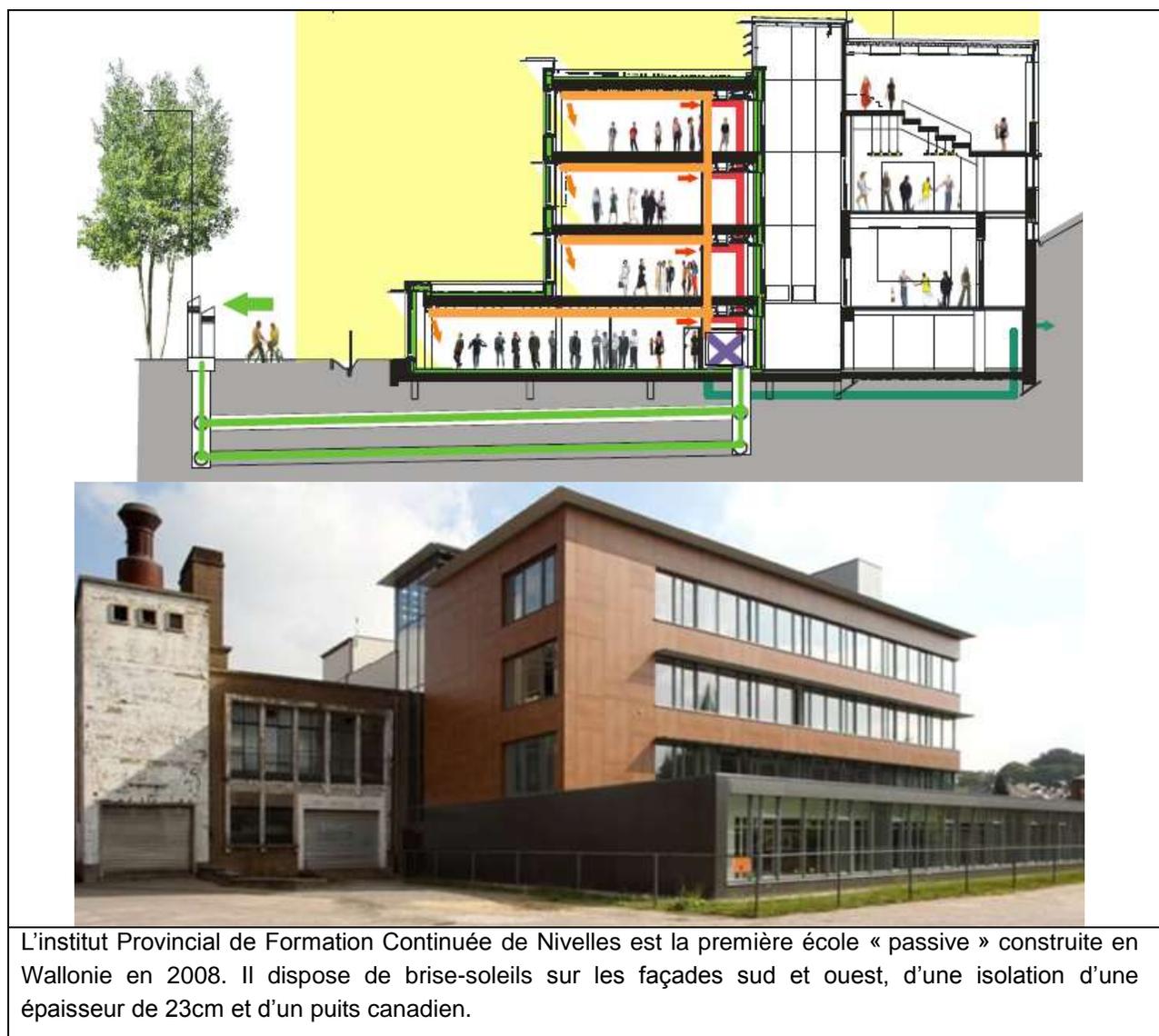
Pour optimiser les transferts thermiques sol/air, la vitesse de l'air au sein du puits doit être comprise entre 1 et 3 m/s. Le diamètre du conduit sera calculé en fonction des conditions de vitesse requises. Mais il ne peut pas être trop important afin de faciliter les échanges thermiques. A flux égal, il est préférable d'employer plusieurs tuyaux de petit diamètre qu'un seul gros tuyau afin d'augmenter la surface d'échange thermique. La moyenne tourne autour d'une quinzaine de centimètres de diamètre. Les tuyaux devront être le plus possible séparés les uns des autres, en privilégiant un espacement supérieur à 3 fois le diamètre des tubes, avec un minimum de 1m.

La profondeur préconisée d'enfouissement est comprise entre 1,5 et 3 m. Au-delà de cette profondeur les contraintes de terrassement et de pose deviennent particulièrement aiguës.

Le passage de l'air ambiant plus ou moins humide dans le réseau peut conduire à la condensation de vapeur d'eau sur les parois intérieures qui favorise le développement de germes et de bactéries. Afin de faciliter l'évacuation de ces condensats, le réseau sera pourvu d'une pente comprise entre 1 et 3%, idéalement placée dans le sens du passage de l'air.

Le système d'évacuation des condensats peut se faire au niveau du sous-sol du bâtiment ou par un regard de visite placé à l'endroit le plus bas du puits. L'évacuation peut se faire soit par infiltration dans le sol à l'aide d'un lit de cailloux, soit en utilisant une pompe de relevage. Le regard permet également l'inspection et l'entretien.

Le choix du matériau a une influence directe sur les échanges thermiques sol/puits. L'utilisation de matériaux à conductivité thermique élevée permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits. Ils doivent également avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 kN/m² est conseillée). Les tubes sont généralement en polyéthylène (PE), en polypropylène (PP) souple ou rigide ou en Polychlorure de vinyle (PVC). Ce dernier, s'il est moins cher, n'est pas très écologique et peut dégager des vapeurs nocives dues au mode de fabrication. Il n'est donc pas conseillé.



L'institut Provincial de Formation Continué de Nivelles est la première école « passive » construite en Wallonie en 2008. Il dispose de brise-soleils sur les façades sud et ouest, d'une isolation d'une épaisseur de 23cm et d'un puits canadien.

Figure 30 : Schémas de ventilation d'une école à Nivelles basé sur le principe du puits canadien

Source : La Maison Passive, 2008

Il sera aussi possible d'utiliser des tuyaux en terre cuite de 150 à 300 mm de diamètre. La conductivité de la terre cuite étant plus élevée que celle du plastique, l'échange thermique est plus important. Le principal inconvénient de cette option est l'exigence d'une mise en œuvre soignée. Les condensats sont quasi inexistantes avec ces tubes, ils évitent donc les bactéries pathogènes et les moisissures.

L'étanchéité du réseau est indispensable pour empêcher la pénétration de racines ainsi que les phénomènes d'infiltration d'eau et de radon au sein du conduit¹⁴.

Un traitement est recommandé pour freiner la prolifération microbienne, source de mauvaise odeur et de dégradation de la qualité de l'air intérieur¹⁵. L'entretien du puits doit être au moins annuel.

- **La bouche de sortie d'air**

La bouche d'arrivée d'air peut être couplée à un ventilateur afin d'accélérer la circulation de l'air. Elle sera au minimum munie d'un système d'occultation afin de fermer le système à mi saison, quand la température ambiante est de 20 à 24°C.

La ventilation à tirage

La cheminée solaire

La cheminée solaire est un système passif sans apport d'énergie extérieur faisant appel à l'énergie solaire pour ventiler naturellement l'immeuble et extraire l'air vicié et chaud en provoquant une poussée induite d'un mouvement d'air. Le mécanisme se base à la fois sur le principe de stratification de l'air et l'effet de cheminée. Ce dernier est accéléré par un accroissement de chaleur au sein du tube de cheminée via l'énergie solaire. Celle-ci est utilisée pour accroître la vitesse de succion de l'air dans le conduit en créant un appel d'air. La partie émergente de la cheminée est pourvue d'une fenêtre exposée au sud, dont la partie opposée à l'intérieur du tube aura été peinte en noir afin de mieux absorber les calories.

Les principaux avantages de la cheminée solaire sont: (i) un taux de ventilation amélioré les jours de canicule sans vent ; (ii) une dépendance du vent réduite pour la ventilation ; (iii) un contrôle du flux d'air amélioré ; et (iv) un taux de ventilation accru en période nocturne.

La performance de la cheminée et la température de l'air à l'intérieur du conduit sont les éléments déterminants du mécanisme. Ils sont définis par la hauteur, la profondeur et la largeur du conduit, le degré d'exposition au soleil, l'inertie thermique des parois de la cheminée et le niveau de déperdition thermique du conduit, et donc son degré d'isolation.

Les éléments constitutifs d'une telle cheminée sont :

- **La surface de capteur solaire** couvre tout le conduit de la cheminée ou au moins sa partie supérieure. L'orientation, le type de vitrage et son angle de pose, l'isolation et les

¹⁴ Une étanchéité des jonctions conforme aux exigences de la norme française NF EN 1277 est recommandée.

¹⁵ L'emploi de sel d'argent est par exemple un excellent traitement antimicrobien.

propriétés thermiques du tube sont cruciaux pour exploiter, retenir et utiliser les gains solaires. Il pourra ainsi être utile d'élargir la baie vitrée tant du côté est que ouest pour accroître l'exposition au soleil ;

- **Le puits de ventilation** définit par la localisation – idéalement placé à l'opposé de l'arrivée d'air frais – sa hauteur et sa section ;
- **Les bouches d'entrées et de sorties d'air**, caractérisées par leurs dimensions, leur emplacement et leur aérodynamisme.

Les études empiriques n'ont pas encore défini le ratio optimal entre la section et la hauteur d'une cheminée solaire. Il est cependant reconnu qu'accroître d'un quart sa hauteur augmente de trois-quarts les gains thermiques. La profondeur de la cheminée est généralement de 25 à 30 cm ; aller au-delà serait contre-productif et réduirait la vitesse de l'air.

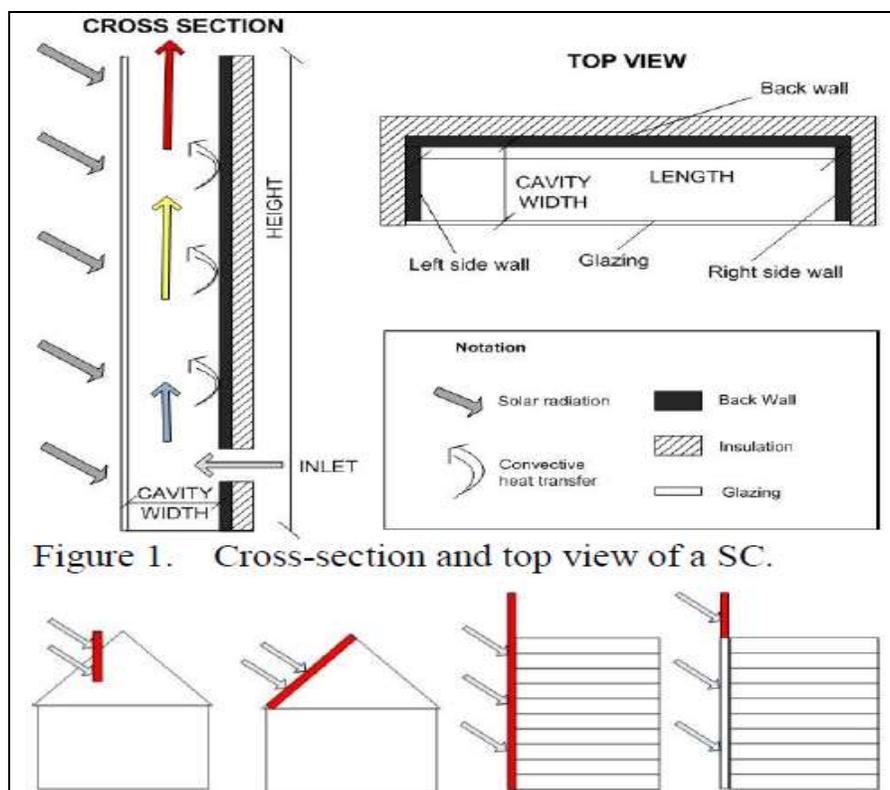


Figure 1. Cross-section and top view of a SC.

Figure 31: Conception d'une cheminée solaire et types d'implantation

Source: Optimization of a solar chimney design to enhance natural ventilation, M. Gontikaki, 2010

Les dimensions de l'entrée d'air jouent également un rôle. Si sa taille augmente avec la largeur de la cavité, la pression va descendre. Différentes études conseillent de rapprocher le plus possible la largeur de la bouche d'air de celle du conduit de cheminée. Une largeur optimale de 55cm et une hauteur minimum de 6m sont recommandées.

La taille de la surface absorbant la chaleur est plus importante que le diamètre du conduit de cheminée. En effet, une grande surface permet un échange de chaleur plus efficace avec l'air nécessaire pour le réchauffement par rayonnement solaire. Ce réchauffement améliore la

convection, et donc le flux d'air dans le conduit. La fenêtre d'exposition au soleil sera donc la plus grande possible. Selon la latitude du bâtiment sur le globe, il pourra être indiqué d'incliner la partie vitrée pour accroître la pénétration des rayons. L'expérience de la CTB en Palestine pousse cependant à la prudence à ce niveau, la partie la plus horizontale de la cheminée étant source d'infiltration.

Les propriétés du mur opposé à la fenêtre sont également importantes. L'augmentation de sa largeur favorise la ventilation nocturne puisqu'elle affecte le temps de distribution de la chaleur et donc l'appel d'air dans la cheminée. Il est impératif d'isoler l'extérieur du mur afin de prévenir la perte de chaleur. Notons enfin que la bouche de la cheminée doit être du côté opposé au vent dominant.



Différentes technologies passives ont été expérimentées dans cette école pilote, dont des cheminées solaires qui disposent d'une partie verticale et d'une partie horizontale vitrée.

Figure 32: Cheminées solaires de l'école Wadi Al-Mughair située à Hébron, Hébron, CTB, 2015

Source : Projet Schools IV, CTB-Palestine, 2015

La tour à vent

Les tours à vent sont destinées à "capter" le vent et augmenter sa pression. Selon les modèles, l'air peut être insufflé et extrait par deux conduits situés dans la même tour où par deux tours distinctes. Les exemples traditionnels les plus illustres viennent de Perse. L'air issu d'une tour à vent est capté en hauteur. Il est donc plus frais, moins poussiéreux, mais aussi moins humide.

Les tours à vent modernes sont généralement pourvues d'écoques auto-orientables vers les vents dominants. L'énergie éolienne est ainsi utilisée pour accélérer l'appel d'air par effet Venturi. Lorsque le vent dominant est centré sur un secteur étroit, l'écoque est constituée d'une large section verticale qui va en se rétrécissant légèrement jusqu'à celle du conduit intérieur.

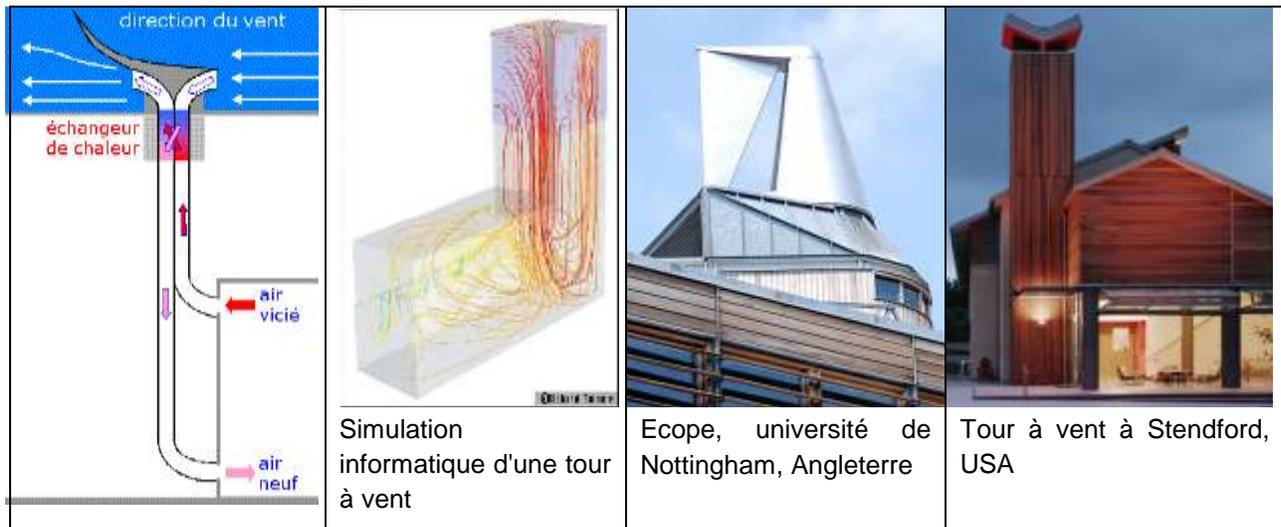


Figure 33: Principes et exemples de tours à vent

Source : Le magazine des architectes.com, 2012

Dans les climats à forte amplitude thermique, utiliser des matériaux à forte inertie pour la construction du conduit permet de rafraîchir l'air efficacement.

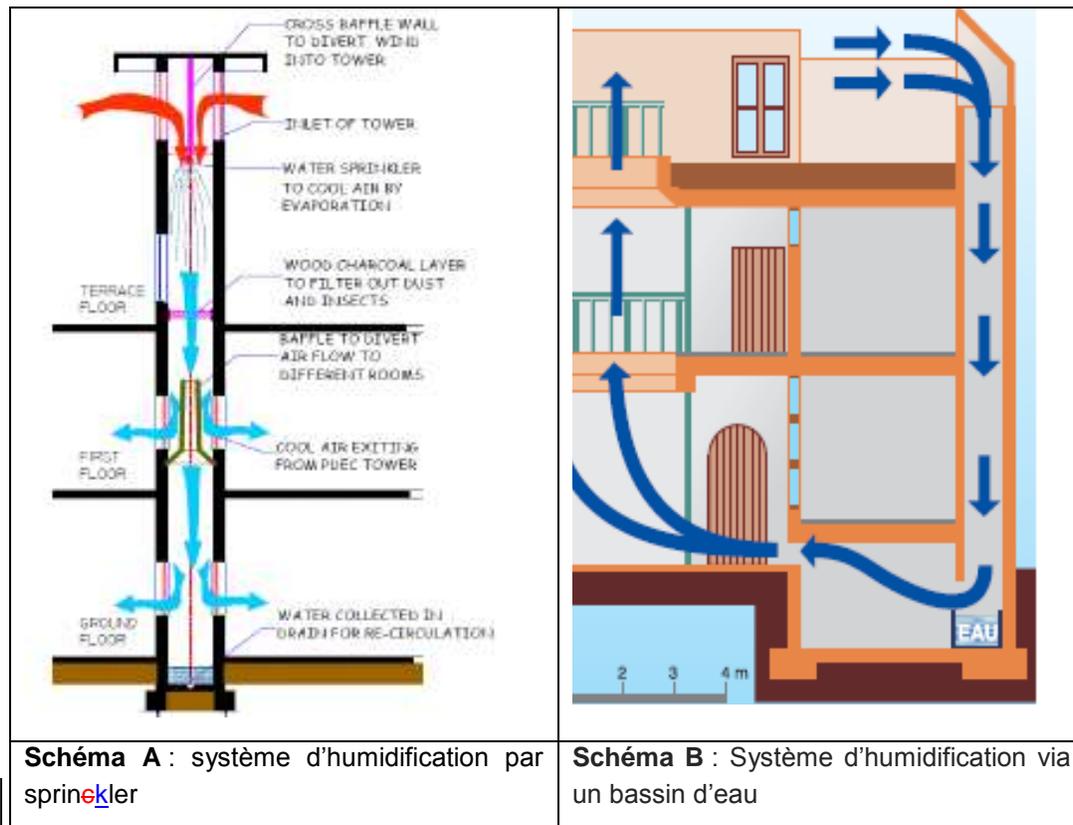


Figure 34: Types de tours à vent avec systèmes d'humidification

Source : Euroméditerranée - CSDAzur – Domene – Invivo

Les tours à vents sont rarement exploitées en climat humide, car le taux hygrométrique de l'air est souvent déjà supérieur à celui requis pour le niveau de confort. **En revanche, avec le climat sec du pourtour Méditerranéen, elles permettent une ventilation rafraîchie des espaces intérieurs, et un taux de poussière diminué.**

En ce qui concerne la capture de l'air en hauteur, les aspects à prendre en compte sont les mêmes que pour les écopos fixes, les pertes dans les conduits aérauliques devant être réduites au maximum. Il convient de privilégier les sections larges et homogènes pour les conduits et les entrées et sorties d'air ainsi que des conduits majoritairement rectilignes.

Dans certaines réalisations, les tours à vents permettent aux vents secs de s'hydrater au contact de l'eau avant de ventiler et de rafraîchir le local. L'hydratation du courant d'air sec permet ainsi d'abaisser sa température grâce à l'évaporation de l'eau. Deux techniques, illustrées dans la Figure , sont possibles ; la première dispose en point haut du conduit un dispositif de projection de gouttelettes (schéma A), la deuxième pourvoit en point bas du conduit de cheminée un bassin d'eau (schéma B). L'air va alors se charger d'humidité pour remonter ensuite dans le bâtiment, l'air neuf introduit chassant l'air intérieur plus chaud et plus vicié.

La climatisation naturelle par changeur adiabatique

Le refroidissement adiabatique est une méthode de rafraîchissement d'air également basée sur l'évaporation de l'eau utilisable en climat chaud et sec. Le principe est simple; l'air extérieur passe à travers un échangeur humide et refroidit naturellement avant d'être pulsé à l'intérieur. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est extraite de l'air qui en conséquence se refroidit. Ce système gagne en efficacité avec l'augmentation de la température extérieure. Au-delà de 30°C, l'air peut se refroidir de plus 10°C, ce qui se traduit par un rendement de rafraîchissement très efficace.

Dans un rafraîchissement d'air par évaporation, une pompe fait circuler de l'eau sur des filtres absorbants. Le ventilateur aspire l'air chaud extérieur et le fait passer à travers des filtres humides. L'air est alors refroidi par évaporation.

Le rafraîchissement par évaporation est un processus adiabatique à enthalpie constante. Il consiste à diminuer la chaleur que nous percevons (chaleur perceptible) et augmenter la chaleur que nous ne percevons pas et que nous évacuons par ventilation (chaleur latente). C'est un processus qui ne demande pas de variation de chaleur.

Pour que ce système fonctionne correctement, les bâtiments doivent être bien ventilés afin de pouvoir rapidement évacuer l'humidité engendrée par le système. Les appareils sont le plus souvent installés à l'extérieur. Un système de gaine permet d'amener l'air dans la zone à rafraîchir avant d'être évacué par les ouvertures naturelles ou par des systèmes d'extraction. Ce type de rafraîchissement convient particulièrement aux grands volumes ainsi qu'aux bâtiments dans lesquels les apports thermiques internes sont importants.

Ce système présente de nombreux avantages grâce au renouvellement constant de l'air qui améliore le bien-être des occupants et permet l'évacuation efficace des odeurs et des fumées.

L'air entrant est filtré, il est donc propre et sain. Le rafraîchissement d'air par évaporation n'assèche pas l'air, ce qui procure une meilleure sensation de confort en plus de pouvoir être utilisé en système «free-cooling» en mi- saison.

Ce système n'utilise aucun réfrigérant, il n'a besoin que d'eau courante pour fonctionner et présente des coûts d'investissements et d'exploitations bas. Il fonctionne moins bien lorsque le climat extérieur est chaud et humide. L'hygrométrie de l'air étant déjà élevée, sa capacité à évaporer l'eau et donc à abaisser la température s'en trouve réduite.

2.2.4 Les matériaux de construction

Les qualités constructives des matériaux sont des critères déterminants de sélection ainsi que leur coût, leur durée de vie, leurs besoins en entretien, leur disponibilité sur le marché, leur esthétique.... A cela s'ajoute les contraintes environnementales de réduction de leur empreinte écologique.

Il s'agit donc de trouver le meilleur équilibre entre ces différents critères, parfois contradictoires. L'emploi de matériaux à base de ciment est un exemple parlant. Leurs caractéristiques constructives sont bonnes, ils sont accessibles dans la majeure partie du monde à un coût relativement modéré et sont appréciés par la population. Mais la production de ciment est vorace en énergie, polluante et source de gaz à effet de serre. Elle représente 8% de la production mondiale annuelle de CO₂, ce qui n'est pas anodin quand on la compare aux 2% généré par l'aviation civile. Cela est dû aux températures importantes (1.450°C) nécessaires à la cuisson de la roche et aux réactions chimiques du processus. Pour faire face à ce problème, certains pays ont fait de gros efforts de rationalisation des cimenteries.

	Matériaux	Climat chaud et humide	Climat chaud et sec
MURS	Pierre	Mauvaise	Bonne
	Adobe	Médiocre	Bonne
	Torchis, pisé	Médiocre	Bonne
	Argile stabilisée	Bonne	bonne
	Bois	Bonne	Médiocre
	Béton	Bonne	Mauvaise
TOITS	Matériaux végétaux	Bonne	Bonne
	Argile	Mauvaise	Bonne
	Argile stabilisée	Mauvaise	bonne
	Tuile	Bonne	Bonne
	Bois	Bonne	Mauvaise
	Béton	Mauvaise	Mauvaise
	Tôle ondulée	Mauvaise	Mauvaise
	Tôle en fibrociment	Bonne	Mauvaise

Tableau 4: Réponse thermique des différents matériaux suivant le type de climat

Source : Economie d'Énergie et Confort Thermique dans l'Habitat en Zone Tropicale, Y. Jannot, T. Djiako, 1993

En plus de ces problèmes de production de gaz à effet de serre, la masse thermique du béton peut être aussi un handicap si elle n'est pas correctement traitée. Rechercher des alternatives aux murs de remplissage en parpaings de ciment prend dès lors tout son sens.

La promotion de matériaux locaux traditionnels est une piste, dès lors qu'ils limitent les besoins en transport et favorisent l'économie locale, car leur processus de production nécessite le plus souvent de faibles besoins énergétiques par l'emploi de techniques simples. Un survol de l'architecture du passé peut nous aider à identifier les matériaux et techniques alternatives les plus appropriées bien qu'ils soient souvent dénigrés tant par la population que les autorités car jugés rétrogrades. Leur utilisation ne peut donc s'envisager qu'après des campagnes de sensibilisation qui mettent en valeur leurs qualités. A charge des différentes instances de l'Etat d'en faire la promotion, par exemple lors de la construction d'édifices publics.

Certaines filières se prêtent mieux à une industrialisation total ou partielle, ; ce qui permet d'en réduire le coût. C'est le cas pour la chaux et, dans une certaine mesure, la brique de terre cuite, qui nécessitent des fours et des chaînes de production maîtrisées.

Au-delà des matériaux traditionnels, on trouve aujourd'hui sur le marché des matériaux recomposés. On pensera aux matériaux en terre-typha, aux tuiles en fibrociment et en argile, au géo-béton (des briques faites de mortier de ciment et d'argile), aux géo-pavés (pavés à base d'argile et de ciment), aux pavés de roche, à l'adobe, ou aux mélanges de mortier de ciment et de coquilles. Ces matériaux permettent de réduire les émissions des gaz à effet de serre, de limiter la consommation d'énergie et d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles renouvelables ou non, tout en offrant du travail aux personnes peu qualifiées. En offrant aux professionnels des solutions techniques performantes et économiquement viables, ils représentent un véritable potentiel qui pourrait contribuer à une « croissance verte » sur le continent africain. Le Tableau 4 classe ces divers matériaux suivant leur aptitude à répondre aux contraintes des 2 formes de climat étudiées dans le présent document.

La terre crue et sa mise en œuvre

Comme l'illustrent certains des plus beaux sites du patrimoine culturel, la terre crue est utilisée à travers le monde comme matériau de construction depuis des siècles. L'Unesco évalue à 17% le patrimoine culturel mondial construit en terre alors que UN-Habitat estime à 40% l'habitat mondial actuel construit avec ce matériau.

Bien que délaissée suite à l'avènement des matériaux de construction industriels et critiqué pour sa sensibilité à l'eau ou son manque de durabilité, la terre a suscité un regain d'intérêt comme matériau de construction ces dernières décennies.

Contrairement au ciment, au béton ou l'acier, **la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériau de construction presque sans dépense d'énergie. Naturel, non toxique et sans ajout chimique, c'est un matériau sain qui régule l'humidité de l'air et la température, absorbe les odeurs et ne provoque pas d'allergies.** La terre crue est simple

d'utilisation, peu onéreuse, réutilisable, réversible et ne produit ni déchet, ni pollution. Autre qualité intrinsèque, la terre, qu'elle soit crue ou cuite, résiste à l'agression corrosive du sel.



Cité de Bam, Iran



Grande mosquée de Djenné, Mali

Figure 34: Exemples d'ouvrages remarquables en terre crue inscrits au patrimoine de l'humanité

Source: www.orgueiletpatrimoine.fr et www.missionmali.ch

Différentes mises en œuvre existent suivant le type de mélange :

- **L'adobe, aussi appelé banco**, prend la forme de briques de terre crue moulées et séchées au soleil. Des liants de fibres ou des agrégats sont parfois ajoutés ;
- **Le pisé** est un procédé de construction de murs, mis en œuvre dans des coffrages, traditionnellement appelés banches¹⁶. Il nécessite d'être protégé par un soubassement contre l'humidité ascensionnelle et d'un débord de toiture contre les intempéries ;
- **Le torchis** est composé de terre et de fibres pour obtenir un mortier de remplissage appliqué sur des structures porteuses, telles des charpentes en bois ;
- **Les briques de terre compactée** font usage de terre tamisée très légèrement humide fortement comprimée à l'aide d'une presse. Des additifs tels que le ciment ou la chaux peuvent être ajoutés pour en augmenter la résistance tant à la compression qu'à l'humidité ;
- **La latérite** est principalement utilisée comme couche de stabilisation dans la construction de routes en couches compactées successives. Les parties les plus dures de la latérite peuvent être taillées comme des blocs de pierre pour obtenir des pièces de parement.

caractéristiques	Briques de terre compactée	Briques cuites	Adobe	Blocs de béton léger
Forme et taille	29,5X14X9	22X10,5 X6,5	40X20X10	40X20X15
Aspect	Aspect lisse Intérêt esthétique moyen	Surface rugueuse Bonne esthétique	Surface irrégulière Esthétique faible	Surface rugueuse Esthétique faible

¹⁶ La bauge est une technique proche mais qui n'utilise pas de coffrage.
Ecoconstruction et efficacité énergétique – Juin 2017

Résistance en compression humide	1 à 4 Mpa	0,5 à 6 Mpa	0 à 5 Mpa	0,7 à 5 Mpa
Dilatation thermique réversible	0,02 à 0,2%	0 à 0,2%	-	0,02 à 0,05%
Isolation thermique	0,81 à 1,04W/mC	0,7 à 1,3W/mC	0,4 à 0,8W/mC	1 à 1,7W/mC
Masse volumique apparente	1700 à 2200Kg/m ³	1400 à 2400kg/m ³	1200 à 1700kg/m ³	1700 à 2200kg/m ³

Tableau 5 : Comparatif d'éléments constructifs en terre avec le bloc de béton

Source : CRATerre EAG, 1995

La durabilité de la terre crue peut être garantie si elle est correctement mise en œuvre et protégée contre l'humidité ; l'eau de ruissellement et l'humidité ascensionnelle étant particulièrement néfastes.

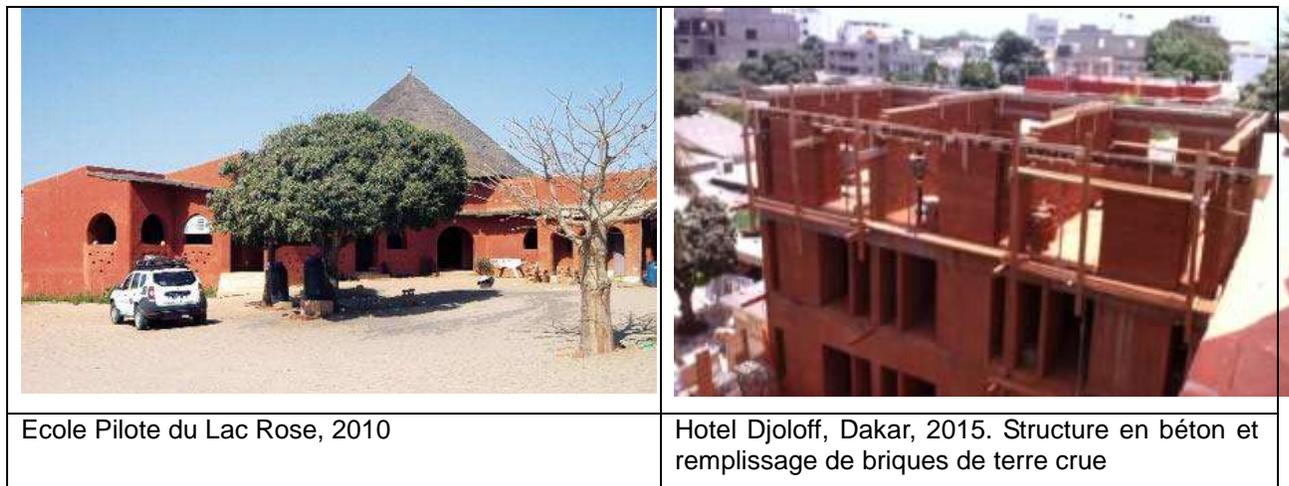


Figure 35 : Exemple de bâtiments en terre crue au Sénégal

Source : B. Legrand, 2016

On a assisté au sortir de la deuxième guerre mondiale à diverses tentatives pour améliorer la durabilité des constructions en terre crue suivant 2 axes :

- L'amélioration du matériau par adjonction d'un stabilisant, en général du ciment, parfois de la chaux ou du bitume, plus rarement d'autres produits comme des fibres végétales telles que de la paille ou le typha;
- L'amélioration de la géométrie et de la résistance mécanique par compression du bloc par l'emploi de presses manuelles ou mécanisées.

Cette double évolution a nécessité l'emploi d'autres types de terres, les terres fines des adobes se prêtant beaucoup moins bien que les terres plus grenues à des mélanges avec un stabilisant et, surtout, à une compression mécanique. Ce constat appelle également à une meilleure connaissance des constituants de la terre et ses propriétés. La terre est de fait caractérisée par 4 propriétés fondamentales :

La texture, qui se réfère à la distribution granulométrique, exprimée en pourcentage de poids des différents types de grains (cailloux, graviers, sables, silts, argiles) ;

- **La plasticité**, soit la capacité d'un sol à prendre une forme donnée et à être soumis à une déformation sans rupture élastique ;
- **La compressibilité** qui définit la variation relative de volume de la terre, sous l'effet d'une pression donnée, pour un taux d'humidité donné ;
- **La cohésion**, ou la capacité des constituants à rester ensemble qui est liée à la plasticité.

Le pisé

Le pisé est un procédé de construction de murs en terre crue, compactée dans un coffrage en couches successives, à l'aide d'un pilon. Le pisé s'élève habituellement sur une assise de galets ou de moellons de pierres. Les parties les plus exposées des murs, angles et encadrements sont souvent renforcés par des lits de mortier.

La terre-paille

La paille et le typha (plante invasive typique des berges d'étendues d'eau calme, de fossés, de lacs,...) sont traditionnellement utilisés soit comme revêtement de toiture – la paille est alors tressée – soit en panneaux ou en bottes pour la construction de cloisons (qui peuvent ensuite être enduits de chaux ou de terre). Elle peut être aussi découpée et incorporée à la terre en torchis ou dans des briques moulées. Cet usage est particulièrement intéressant en ce qu'il augmente les qualités isolantes de la terre.

Les technologies nécessaires à la production de matériaux d'isolation thermique à partir du typha ont été développées et validées en Europe par l'utilisation du typha (*typha latifolia* et *typha angustifolia*) combiné au ciment. Il s'est révélé être un matériau thermorégulateur et hygro-régulateur avec de bonnes performances phoniques. Au Sénégal, la valorisation du typha est depuis 2015 en phase de recherche/développement par un projet du PNUD en collaboration avec le centre de recherche CRATerre de Grenoble. Le mélange du typha avec de la terre ou du ciment est étudié pour le développement de produits préfabriqués de type dalles, panneaux d'isolation, briques et panneaux compressés. Les premiers résultats sont encourageants.

Ce matériau profite des amplitudes thermiques nuit/jour et des faibles transferts thermiques du matériau. La combinaison de plusieurs éléments de densités différentes supportant la force et la capacité d'isolation permet de créer des systèmes intégraux de mur et de toit. En particulier, la combinaison du typha et du ciment offre une conductivité thermique basse [$\lambda \sim 0.05-0.06 \text{ W/mK}$] et une chaleur spécifique haute [$c \sim 1,600 \text{ J/kgK}$].

Ces caractéristiques permettent la création de matériaux d'isolation à la chaleur très efficaces, pouvant être facilement adaptés aux contraintes spécifiques de la construction par la variation de leurs proportions relatives dans le matériau final. La combinaison du typha et du ciment ou de la terre offre donc une bonne protection contre la chaleur dans tous les climats avec des amplitudes thermiques significatives.

La voûte nubienne

La voûte nubienne est un procédé architectural antique venu du haut Nil qui permet de construire des bâtiments aux toitures voûtées avec un outillage réduit, des briques de terre crue et des compétences techniques simples. La forme caractéristique de la voûte, dite à chaînette, s'obtient en laissant pendre naturellement une chaînette tenue par ses deux extrémités. La voûte est plus ou moins ouverte selon les facteurs multiplicatifs. Cette technique a été popularisée par les constructions réalisées par l'architecte Hassan Fathy en Égypte dans les années soixante.

Ses avantages sont : l'emploi de matériaux locaux, une meilleure isolation, la durée de vie – de l'ordre de cinquante ans – et la simplicité. Les constructions sont fraîches, bien isolées, faciles à construire, faites de matériaux disponibles à portée de main et bon marché. Cette utilisation de la terre réduit aussi la consommation de bois dans des régions sahéliennes très largement déboisées.



Figure 36: Bâtiments construits avec voûte nubienne: l'école des sables, Toubab Dialao, Sénégal

Source : B. Legrand, 2016

Cette technique permet de se passer de l'utilisation de coffrage pour la partie voûtée. Ce voûtement est donc construit directement au-dessus du vide jusqu'à sa fermeture.

La simplicité de la technique de construction permet une formation rapide des maçons. Bien qu'historiquement inconnue en dehors de sa zone d'origine du haut Nil, la méthode connaît actuellement une certaine expansion dans d'autres régions, en particulier dans la partie sahélienne de l'Afrique de l'Ouest.

Depuis l'an 2000 l'association La Voûte Nubienne (AVN)¹⁷ a simplifié et codifié la technique de construction qui est relativement simple. Les fondations des murs porteurs de voûte doivent être enfouies d'une soixantaine de cm minimum en fonction du type de sol et comblées de grosses et moyennes pierres et de banco. Les murs porteurs de voûte font 60 centimètres de largeur et sont bâtis en rangs alternés de grosses briques, une posée dans sa largeur, une posée dans sa longueur. La hauteur de ces murs est de 10 à 14 rangs, soit de 1,4m à 2m, avant le démarrage de la voûte. La partie en contrefort au-dessus des voûtes est composée de 5 à 9 rangs de grosses briques et comblée pour obtenir un toit plus ou moins plat. Les toits les plus plats sont

¹⁷ AVN a lancé le programme de vulgarisation à grande échelle « pour des Toits de Terre au Sahel » afin de propager ce modèle architectural à l'ensemble de l'Afrique sahélienne. Fin 2008, AVN avait contribué à la formation d'un réseau de plus de 120 maçons burkinabé, maliens, togolais, sénégalais qui avaient réalisé plus de 500 voûtes nubiennes au Burkina Faso, Mali, Togo, Sénégal, Guinée et Côte d'Ivoire.

conseillés pour faciliter l'utilisation des toits en terrasse et assurer une meilleure tenue des finitions terre.

Les murs pignon de fond de voûtes sont composés de grosses briques posées dans leurs longueurs (plus ou moins 38cm) et sont montés légèrement penchés vers l'intérieur du bâtiment, avec un fruit de 1 centimètre pour 1 mètre. Les murs de cloisons sont faits de grosses briques posées dans leur largeur (plus ou moins 20 centimètres).

De nombreuses ouvertures avec linteaux en voûtains de 80cm de large maximum sont conseillées¹⁸.

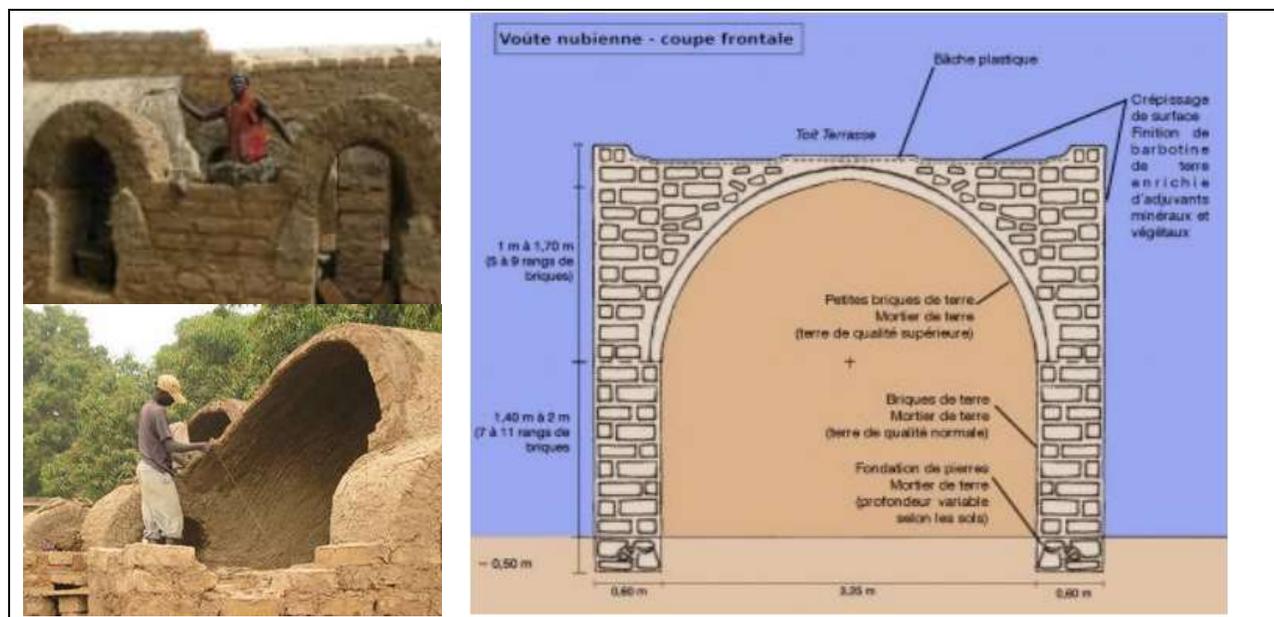


Figure 37: Voûtes en construction et coupe d'une voûte nubienne

Source : <http://www.lavoutenubienne.org/fr>

Une voûte couvre en général un espace de 3,25m sur 12m de long. Des largeurs plus grandes seront couvertes par une succession de voûtes. La hauteur intérieure varie généralement entre 2,5 et 3,5m. Descendre le sol intérieur d'une vingtaines de centimètres augmente la hauteur sous plafond tout en accroissant la fraîcheur intérieure. La construction de voûtes en étage (avec escalier intérieur) est possible sous le contrôle d'un maçon expérimenté.

La pose d'une bâche plastique (Faso plast) sous la dernière couche de crépissage est indispensable. Celle-ci offre une garantie d'étanchéité qui vient compléter celles que donnent des crépissages d'entretien corrects. La bâche ne doit jamais être laissée à nu sous le soleil et doit toujours être recouverte de terre de crépissage pour éviter son vieillissement par les UV. Les crépissages doivent être contrôlés annuellement et obligatoirement entretenus en cas d'usure. Beaucoup de matériaux peuvent être mélangés à de bonnes terres pour obtenir des crépissages résistant aux pluies, telles que les eaux de rinçage du néré et du karité, le kapok,

¹⁸ On peut laisser 75cm d'ouverture pour 100cm de mur plein dans les murs extérieurs et 75cm d'ouverture pour 80cm de mur plein dans les murs porteurs intérieurs. Ces ouvertures pourront servir de portes ou être refermées en armoires ou en fenêtres.

les bouses de bœuf, etc. Des enduits de ciment ou de goudron sur les murs et sur la toiture (le ciment est exclu en toiture) permettront de supprimer les crépissages d'entretien annuels.

Briques pressées en terre crue stabilisée

La technique artisanale de production de briques cuites nécessite de l'ordre de 50m³ de bois au moins pour la cuisson de quelques 5.000 briques, concourant ainsi à la déforestation. Des techniques alternatives plus écologiques sont possibles, comme la technique de Blocs de Terre Stabilisée (BTS).

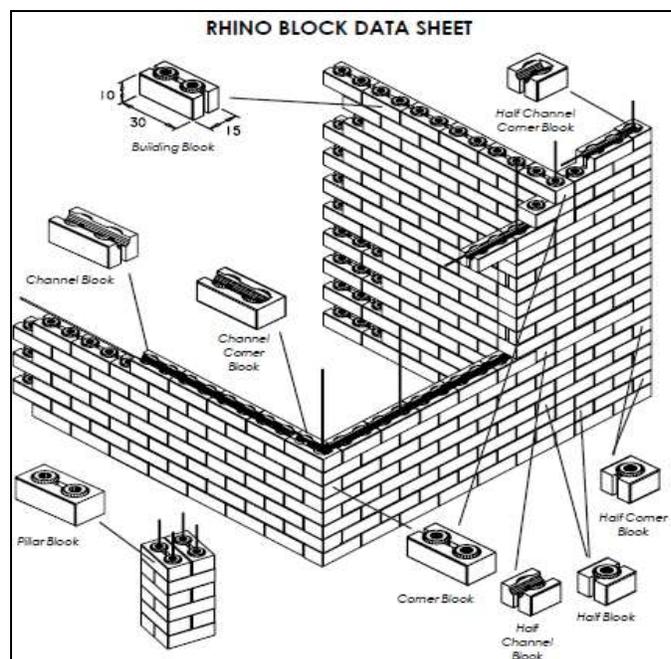


Figure 38: Profil des différents types de brique pressées

Source: Interlocking Compressed Earth Blocks, Vol. II. G. Wheeler, 2005

Les résultats obtenus montrent que l'humidité modifie considérablement les propriétés thermo-physiques de la terre et que la stabilisation au ciment augmente la résistance du matériau face aux variations d'humidité. L'influence notable de la masse volumique sur la conductivité thermique a été également démontrée.

Lors de la production des blocs, deux paramètres interviennent, la compressibilité du sol et le type de liant utilisé.

- **La compressibilité**

La compressibilité est le premier facteur à prendre en compte. En général, on recherchera une granulométrie et une structure continues. Cela signifie que la terre doit contenir suffisamment de particules inertes (graviers et sables, de 45 à 50%) qui seront liées entre elles par les silts et l'argile. Il est déconseillé d'utiliser des sols contenant moins de 10% d'argile ou moins de 25% de silts et d'argiles car il serait impossible d'obtenir une structure dense et cohérente.

- **Le liant**

Les liants les plus répandus sont le **ciment** et la **chaux**. Ils réagissent différemment en fonction des sols utilisés.

Le **ciment** agit sur les graviers et sables mais moins bien sur les silts ou l'argile. Dès lors, un sol sableux convient bien pour une stabilisation au ciment. Sur base d'essais, la distribution optimale de la granulométrie pour une stabilisation au ciment se rapproche de 15% de graviers, 50% de sable, 15% de limon et 20% d'argile¹⁹.

La **chaux** agira également sur les graviers, les sables et les silts mais dans une moindre mesure en comparaison du ciment. Elle interagit par contre fortement avec l'argile. Elle crée des liaisons stables entre cette dernière et le sable. Sur base d'essais, la distribution optimale de la granulométrie pour une stabilisation à la chaux sera de 15% de graviers, 30% de sable, 20% de limon et 35% d'argile²⁰.

Les proportions mentionnées ci-dessus correspondent à un optimum. Il est rare que des sols aient de telles proportions à l'état naturel. Il est par contre possible de les améliorer en ajoutant du sable ou des graviers ou encore en mélangeant différents types de sols.

Les briques pressées requièrent une presse – manuelle ou hydraulique²¹ – selon la quantité de briques à produire. Plusieurs profils de briques seront produits suivant leur usage, soit des briques de renfort, de remplissage ou de coffrage perdu pour linteau ou dalle. Une fois pressées, les briques sont stockées et mises à sécher en phase humide, sous une bâche, durant une à trois semaines.

- **Types de blocs**

Les blocs peuvent être fabriqués selon différents types, formes et tailles. Différents modèles sont conçus pour répondre à des usages particuliers :

- **Les blocs pleins** peuvent être utilisés pour des structures porteuses allant jusqu'à 3 ou 4 étages. Ils ont généralement une forme rectangulaire mais ils peuvent aussi être carrés, trapézoïdaux ou polygonaux.
- **Les blocs creux** peuvent aussi être utilisés dans des structures porteuses mais pour des bâtiments de moindre hauteur. Ils ont de meilleures propriétés isolantes. Ils existent sous forme rectangulaire ou carrée.
- **Les blocs autobloquants** peuvent être pleins ou creux. Les blocs pleins peuvent être mis en œuvre plus facilement par de la main d'œuvre peu qualifiée. Seuls les blocs creux seront utilisés en zone sismique car ils peuvent être renforcés avec du béton armé. Ils sont disponibles sous forme rectangulaire ou carrée.

¹⁹ Source: Auroville Earth Institute, Inde

²⁰ Idem

²¹ Ce type de presse est produit notamment en Afrique du Sud.

- **Les blocs spéciaux** sont utilisés dans des buts divers : les blocs creux circulaires pour des colonnes, les blocs à indentation pour permettre le passage de gaines électriques ou encore les blocs en U pouvant servir de coffrage à béton. Les blocs spéciaux sont souvent produits par un moule standard avec différents types d'inserts. Ils sont utilisés dans différentes parties d'un bâtiment.



Figure 39 : Exemples de différents types de blocs de terre compressée et stabilisée

Source : Auroville Earth Institute, Inde

- **Types de presses**

Depuis les années 50 un grand nombre de presses ont été développées à travers le monde. Le marché offre aujourd'hui un large éventail de presses spécialisées pour tous les types de production. Les presses manuelles sont toujours les plus couramment utilisées mais les presses motorisées les remplacent petit à petit.



Figure 40: Exemples de presse à main et de presse motorisée

Source: Auroville Earth Institute

Les presses motorisées sont actionnées par un moteur. Deux à 3 travailleurs sont nécessaires pour alimenter une presse de ce type et manipuler les blocs après la compression. Les presses motorisées peuvent être mobiles et être attachées à un véhicule. Leur productivité varie de 3.000 à 10.000 frappes par jour.

On distingue deux catégories:

- Les machines uniques qui nécessitent en général des accessoires périphériques comme un mélangeur ou un broyeur ;
- Les unités mobiles qui intègrent souvent un mélangeur. Le degré d'intégration des accessoires comme le broyeur, le convoyeur... augmentera leurs possibilités et leur coût.

La construction de la cour suprême du Burundi, plus haute juridiction du pays, fut l'occasion de valoriser la terre auprès des institutions et de la population. Les cloisons intérieures ont en effet été érigées en blocs de terre comprimée et stabilisée. Elles ont ensuite été recouvertes d'un enduit à la chaux afin de ne pas altérer leurs propriétés hygrothermiques.



Parallèlement, la ventilation naturelle a été favorisée grâce à la disposition réfléchie d'un ensemble de fenêtres équipées de vantelles métalliques. Ces vantelles, au même titre que le bardage métallique qui recouvre la façade, contribuent également à la limitation des apports thermiques du soleil. Enfin, une étude acoustique poussée a conduit à la mise en œuvre d'un appareillage spécifique des briques, comme piège à son (voir photo intérieure).

Figure 41: Exemple d'un projet en BTS: La Cour suprême du Burundi, CTB, 2014

Source : Atelier D et Projet Justice, CTB-Burundi, 2014

L'évolution de l'usage de la terre crue n'a pas conduit à un remplacement des constructions traditionnelles en adobe, mais a généré un nouveau type de construction, certes de meilleure qualité, mais de coût plus élevé, comparable au parpaing de ciment. La technique par BTS n'est pas parvenue à concurrencer sérieusement ce dernier malgré les qualités de cette technique plus écologique. Un de ses principaux freins est la nécessité de développer une filière spécifique qui requiert la création de petites entreprises capables de produire ce type de briques et de les mettre en œuvre. La CTB a ainsi promu son développement en RDC, au Burundi et au Rwanda ainsi que la création de plusieurs entreprises spécialisées.

De la terre bicouche à l'ado-béton

Le concept de terre bicouche a vu le jour dans les années soixante-dix. Il fait suite au constat que l'adjuvant à la terre est principalement utile pour améliorer la résistance de la brique à la pluie et lui donner une meilleure portée mais n'est pas indispensable pour les bâtiments à un seul étage. Dans ce procédé, le stabilisant est concentré sur la face verticale soumise aux intempéries. Le bloc comprend donc une couche "stabilisée" extérieure, de 3 ou 4 cm d'épaisseur et une "couche" non-stabilisée couvrant le reste de l'épaisseur du bloc.

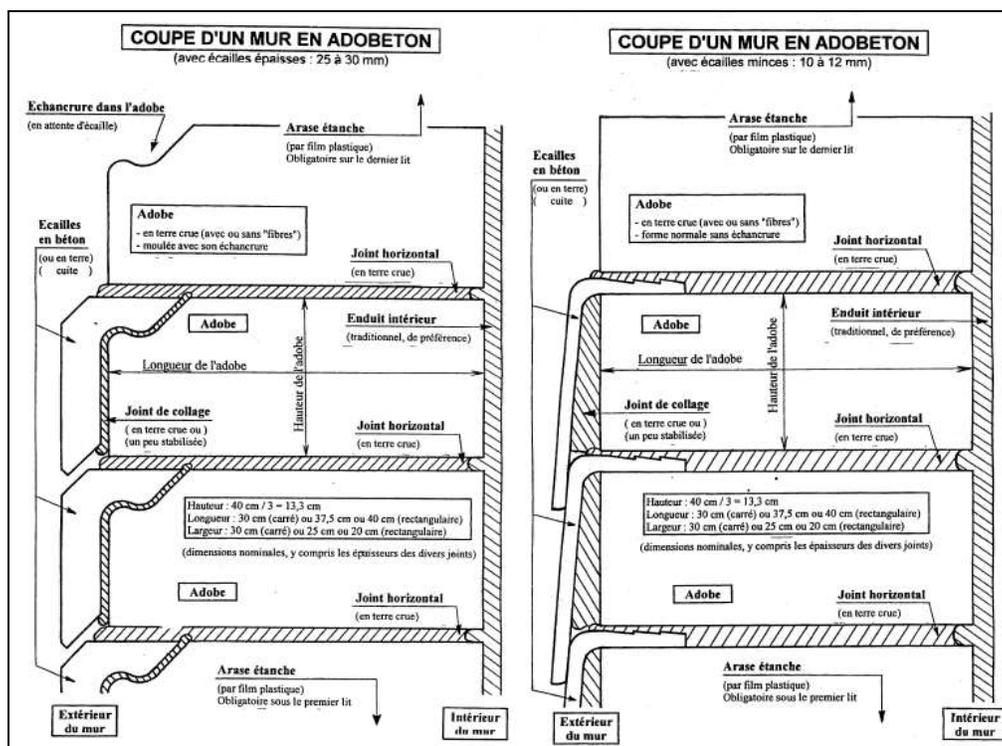


Figure 42: Profil d'un mur en ado-béton

Source : L'ado-béton, Une Technologie Appropriée, M. Martin, 1998

Cette technique a l'avantage de faire de sérieuses économies de stabilisants, mais elle n'a pas eu le succès escompté du fait d'une productivité peu élevée, les blocs étant plus complexes à fabriquer. Une réflexion a dès lors été amorcée dans les années 80 au Maroc pour aboutir à la conception de l'ado-béton.

Le bloc est composé de deux parties : l'élément porteur intérieur en adobe et l'élément de protection extérieur en béton ou en terre cuite. L'association de ces deux composants ne se fait plus au niveau de la préfabrication des blocs avant maçonnerie, mais lors de la mise en œuvre sur le chantier.

L'innovation consiste surtout dans le système d'association des éléments de protection (appelés couramment "écailles") avec la maçonnerie des blocs porteurs. Etant plus rigides, une tolérance doit pouvoir s'établir entre les écailles afin de laisser un mouvement possible tout en leur permettant de rester fixées aux blocs. Ceci est réalisé grâce la forme des écailles, qui se présentent comme des "L" renversés, et par l'ancrage de leur aile horizontale au niveau des joints de maçonnerie.

Ce type de matériau est utile dans les régions où les précipitations sont importantes. Ses deux principaux inconvénients sont, d'une part, une expression architecturale limitée – les formes doivent rester simples, rectilignes à angles droits, à l'instar des constructions en pisé – et, d'autre part, une mise en œuvre nécessitant un savoir-faire spécifique. Mais il a l'avantage de pouvoir utiliser tous les types d'argile, de ne nécessiter qu'une faible portion de ciment et d'accroître la durabilité de l'ouvrage, ainsi que le confort thermique des utilisateurs.

La terre cuite

La terre cuite est un matériau ancestral aux qualités unanimement reconnues parmi lesquelles on peut citer la solidité, la durabilité et l'esthétique. **C'est aussi un matériau sain, durable et respirant, parfaitement stable, proche de la pierre naturelle, qui ne requiert que peu d'entretien.** Pour les pièces dont la température de cuisson n'a pas été parfaitement maîtrisée, une saturation à l'huile de lin pourra être appliquée.

Elle nécessite une cuisson progressive et maîtrisée jusqu'à des températures de 900 à 1.100°C suivant un processus semi-industriel ou artisanal. **D'un point de vue écologique, son emploi est à proscrire si la brique est issue de fours artisanaux non performants exigeants beaucoup de bois, et d'autant plus si le bois ne provient pas de forêts éco-gérées.** En outre, les briques issues de fours artisanaux présentent le plus souvent un format irrégulier ainsi que des propriétés mécaniques variables suivant le degré de cuisson. Un contrôle qualité exigeant et systématique sera dès lors nécessaire avant leur emploi.

La brique industrielle existe sous deux formes principales :

- La brique cuite pleine de dimensions standards (par exemple : 22x10.5x6.5cm) qui résiste très bien aux agressions climatiques et est donc généralement utilisée comme parement extérieur ;
- La brique creuse qui présente l'avantage d'être plus légère et plus isolante. Elle est principalement utilisée pour les murs porteurs, les murs de remplissage et les cloisons intérieures.

L'industrialisation de sa production a permis d'accroître la gamme de produits disponibles et leurs dimensions. On citera notamment les briques alvéolaires à perforations horizontales ou

verticales, à joints minces ou épais. Les premières nécessitent l'emploi de mortier-colle, les secondes un cimentage traditionnel.

Les briques pleines ou perforées ainsi que des plaquettes à coller ou accrocher mécaniquement peuvent être utilisées pour les murs de parement extérieurs. Leurs propriétés sont variables suivant les modèles ainsi que leur mise en œuvre, leur résistance mécanique, leur niveau d'isolation thermique²² et acoustique, leur perméabilité à l'eau et à l'air. Il importe dès lors de disposer des spécifications techniques des fabricants.

Les briques alvéolaires industrielles disposent de nombreuses qualités : isolation thermique et phonique accrue, forte inertie, excellente résistance mécanique. Elles sont fabriquées à base d'argile à forte teneur en carbonate de calcium, sans solvants ni liants. Ces briques ne contiennent pas de composés organiques volatils. Les alvéoles verticales offrent une plus forte inertie. Ces briques font en outre preuve de porosité calculée ; des bulles internes se forment à la cuisson et améliorent les performances thermiques des briques. Elles sont extrêmement résistantes, il suffit ainsi de 4 poteaux de briques aux angles d'une maison pour supporter la charpente. Le reste des murs peut ensuite être réalisé selon la volonté du maître d'ouvrage.

La mise en œuvre de ces briques demande un savoir-faire et un matériel spécifiques différents de la maçonnerie classique²³.

Le bois tropical

Le bois est un matériau de construction naturel et renouvelable qui présente une faible empreinte carbone²⁴, à la fois dans sa transformation et son utilisation. En plus d'offrir de nombreuses solutions techniques, il peut être réutilisé pour certaines applications et peut aussi être facilement recyclé. Il occupe donc par nature une place importante dans une construction dite durable et ce, d'autant plus s'il est issu d'une gestion forestière responsable, c'est-à-dire 'respectueuse des hommes et de l'environnement'.

Penser qu'éviter d'utiliser du bois tropical permet de sauver les forêts tropicales peut être contreproductif. Son utilisation, lorsqu'il est certifié FSC²⁵, par exemple, permet au contraire de donner une réelle valeur à la forêt, de stimuler sa gestion de façon durable et donc la conservation de l'écosystème tout en offrant de nombreux avantages socio-économiques aux communautés locales.

L'emploi du bois tropical comme parement extérieur convient particulièrement en milieu équatorial où la masse thermique du mur n'est pas un élément déterminant, à la différence de la protection solaire et la ventilation naturelle.

²² Le niveau d'isolation des briques varient entre 0,5 et 1 m².K/W.

²³ Le premier rang de briques est posé de façon traditionnelle, sur un lit de mortier et mis à niveau à l'aide d'un maillet en caoutchouc. L'assemblage des briques entre elles se fait par un joint mince (1 mm) réalisé avec un mortier-colle spécial. Les briques des rangs suivant sont ensuite assemblées à joint décalé. La finesse des joints va réduire considérablement les ponts thermiques.

²⁴ Un arbre mature séquestre en moyenne 7 tonnes de CO₂, alors que sa valorisation en matériau de construction, transport compris, induit peu de gaz à effets de serre. Le bilan CO₂ est donc globalement positif.

²⁵ Le Forest Stewardship Council (FSC®) est une organisation internationale à but non lucratif qui a été créée en 1993 par des ONGs et des professionnels du bois. Le label FSC concerne aujourd'hui une cinquantaine de millions d'hectares* dans le monde.

C'est ce qu'a démontré une étude comparative²⁶ sur les qualités thermiques du bois face à d'autres matériaux de construction, comme la terre crue ou le parpaing de ciment. L'avantage du bois est qu'il offre une température radiante moyenne intérieure se rapprochant de la température extérieure la nuit, à condition que la ventilation naturelle soit promue. La stratégie consiste donc :

- **En climat équatorial** à rechercher des conditions d'ambiance intérieure proches de celles de l'extérieur en optant pour une protection solaire, une inertie légère des parois et une ventilation permanente. **L'emploi du bois est dès lors recommandé;**
- **En climat tropical**, où les pointes de températures élevées rendent les conditions extérieures inconfortables, à créer un micro climat intérieur, thermiquement plus confortable, découplé des conditions extérieures une protection solaire poussée, une forte inertie thermique et une bonne ventilation nocturne. **L'emploi du bois en parement extérieur n'est alors pas souhaitable.**

Ainsi, les constructions en bois sont propres à l'habitat traditionnel dans la plupart des pays équatoriaux aussi bien en milieu rural qu'urbain. Les structures sont généralement relevées du sol pour éviter leur pourrissement et favoriser la ventilation sous le plancher alors que la toiture est largement débordante afin de protéger les murs tant du soleil que de la pluie. Ce type d'architecture nécessite une ventilation naturelle permanente via des claustras, dont le grand inconvénient est acoustique.

S'inspirant de cette typologie, des constructions contemporaines optent pour des constructions légères à ossatures et parements tant intérieurs qu'extérieurs en bois. Les essences de bois sont choisies en fonction de leurs propriétés mécaniques et physiques (densité, module d'élasticité en flexion, contrainte de rupture...) ainsi que leur durabilité. Les espèces locales sont privilégiées en veillant à ne pas se limiter dans le choix des essences afin de ne pas mettre trop de pression sur certaines d'entre-elles.

Il est essentiel que le séchage du bois plein soit correctement assuré. D'autres types de matériaux pourront être également utilisés, tel que le contreplaqué bakélisé ou l'aggloméré de bois, pourvus qu'ils soient, comme le bois plein, correctement traités contre l'humidité, les champignons et les termites.

En dépit de leurs qualités thermiques, écologiques et esthétiques indéniables, l'image négative des constructions en bois dans certains pays perdure face aux risques liés aux incendies ou aux termites. Compte-tenus des moyens de protection actuels et de ses qualités intrinsèques, des campagnes de sensibilisation sont nécessaires pour changer les mentalités.

Le bambou

Le bambou est une alternative bon marché, durable, légère et robuste au bois dur tropical. Il est utilisé depuis des siècles en Asie et se répand à travers le monde comme matériau de

²⁶ A. Kemajou et L. Mba, « Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude, application au cas des régions climatiques camerounaises », revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°2 (2011) 239 – 248

construction. Ses propriétés sont similaires à celles du bois et ses techniques de construction s'en inspirent. Sa durabilité est cependant moindre et largement dépendante de l'espèce et du traitement donné.

La culture du bambou a peu d'impact sur l'environnement quand il est utilisé localement. Sa productivité élevée en fait un substitut idéal au bois de construction classique car il croît et se récolte beaucoup plus vite. Ainsi, une tige de bambou peut être utilisée comme matériau de construction au terme d'une croissance de 4 ans seulement. En réduisant les besoins en bois classique, il contribue à freiner la déforestation et participe à la régénération de forêts et de sols dégradés. Il permet également de réduire l'érosion du sol et fournit à la fois de la nourriture et un habitat pour la vie sauvage.



Figure 43: exemples de structures en bambou

Source : http://www.ecocentric.fr/blog/index/billet/5698_green-village-bambou-bali

Le bambou peut être utilisé sans avoir recours à des techniques ou outils compliqués. Il est léger et résiste bien aux vents, tremblements de terre et ouragans. Il est particulièrement intéressant dans les régions équatoriales et subtropicales et peut être utilisé dans différents types de terrains.

L'investissement initial est faible, ce qui en fait un matériau de choix pour les foyers et communauté à faible revenus.

Toutefois, en dépit de ses qualités, l'utilisation du bambou n'est pas non plus sans danger. Il est sujet à la biodégradation (pourriture et moisissures) et aux attaques d'insectes et est vulnérable au feu, s'il n'est pas traité. De plus, il n'est pas toujours aisé de sécuriser les joints entre éléments constructifs.

Sans traitement particulier, le bambou a une durée de vie souvent limitée à 5 ans. Avec un traitement adéquat et une bonne protection à l'humidité dans la mise en œuvre, sa durée de vie peut être portée à 15 ans minimum. Grâce aux structures remarquables qu'il permet et le caractère exotique qu'il induit, il est beaucoup utilisé dans la construction d'hôtels et de restaurants, notamment en Asie.

Le bambou manufacturé pourrait être un moyen de l'utiliser à plus grande échelle mais l'offre n'est pas encore très large. Il existe cependant déjà différents types de panneaux composites faits de bambou utilisés pour les structures non-porteuses. On pense notamment aux panneaux multicouches pour les meubles et les planchers; certains produits pouvant même être de meilleure qualité que le bois traditionnel pour certains usages, comme la fabrication de meubles et de cloisons.

Les matériaux de recyclage

On peut aussi mentionner le résultat d'expériences de recherche/développement visant au recyclage de déchets comme matériaux de construction. **Elles mettent ainsi en application le concept de « cradle to cradle²⁷ » qui prône le développement d'une économie circulaire évitant de puiser dans les ressources naturelles en donnant une deuxième vie aux matériaux manufacturés.** Ainsi plusieurs initiatives ont conduit au développement de matériaux de construction à partir de déchets recyclés.

On citera comme exemple des pavés routiers faits de déchets plastiques. Ceux-ci sont fondus et mélangés à du sable fin. Il en résulte une sorte de goudron qui sera versé à chaud dans un moule pour former un pavé.

Mais on a également vu des murs de remblais constitués de bouteilles de PVC compressées, ou de pneus de voitures remplis de terre. Si ces techniques sont prometteuses – un immeuble de bureaux a ainsi été construit en 2017 dans la périphérie bruxelloise avec 80% de matériaux recyclés – elles sont encore à un stade expérimental.

2.2.5 La durabilité des ouvrages

Assurer la longévité des bâtiments tout en limitant les besoins en entretien et maintenance est un autre objectif de l'architecture durable. Accroître la durée de vie des ouvrages réduit d'autant la nécessité de reconstruction, et donc l'emploi de nouvelles ressources. Mais pour étendre la durée de vie d'un bâtiment il faut aussi qu'il continue à répondre aux besoins, parfois changeants, de ses utilisateurs. Il se doit dès lors d'être **flexible et souple dans son utilisation**, permettant des adaptations dans son organisation fonctionnelle.

Pour répondre à la dimension technique de la durabilité le concepteur de projet doit **promouvoir l'usage de matériaux robustes nécessitant peu d'entretien et développer des techniques fiables à l'épreuve du temps, des intempéries et des usagers.** On pensera ainsi, par exemple, à l'emploi de granito, poli ou non, pour les sols plutôt que des carreaux de céramique de qualité médiocre, ou d'enduit tyrolien pour les murs extérieurs plutôt que de la peinture. Dans les régions où les termites sont présentes et le taux d'humidité modéré, il sera pertinent de faire appel à des huisseries de bonne facture en métal plutôt qu'en bois. Toute forme de métal est par contre à proscrire en bord de mer, le sel et les embruns étant particulièrement corrosifs.

²⁷ Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things, W. McDonough, M. Braungart, North Point Press, 2002
Ecoconstruction et efficacité énergétique – Juin 2017

Quels que soient les matériaux choisis, il conviendra de sélectionner ceux qui répondent aux normes les plus strictes. On songe aux produits satisfaisant aux spécifications européennes harmonisées disposant du marquage CE. Ils répondent non seulement à une multitude d'exigences techniques concernant leur application, mais aussi à certaines prescriptions en matière de santé publique, d'hygiène et de protection tant des utilisateurs que de l'environnement. La directive européenne sur les produits de construction (DPC) intègre en effet 7 exigences fondamentales, à savoir : (i) la résistance mécanique et la stabilité, (ii) la sécurité incendie, (iii) l'hygiène, la santé et l'environnement, (iv) la sécurité d'utilisation et l'accessibilité, (v) la protection contre le bruit, (vi) les économies d'énergies et l'isolation thermique et (vii) l'utilisation durable des ressources naturelles. L'emploi de matériaux répondant à ces normes aura un impact indéniable sur le coût de construction, mais qui sera largement amorti durant la durée de vie du bâtiment.

Une attention particulière doit également être accordée à la mise en œuvre de ces matériaux. On n'insistera donc jamais assez sur l'importance d'un suivi de chantier objectif, intègre et rapproché, garant d'une meilleure qualité des ouvrages et donc de leur durabilité.

PARTIE 3 : LES ENERGIES RENOUVELABLES

Certaines régions reculées ne sont toujours pas raccordées au réseau électrique et dans celles qui le sont, les coupures restent souvent monnaie courante. Les gestionnaires de bâtiments sont dès lors contraints de les équiper d'un générateur. Les frais d'utilisation et d'entretien sont importants alors que des alternatives plus écologiques existent.

Les systèmes de production d'énergie renouvelable sont nombreux, notre intention ici est simplement de lister les techniques suffisamment mûres techniquement pour être recommandées, comme le solaire thermique, le photovoltaïque ou l'éolien. Nous évoquerons également la biomasse, une alternative intéressante au bois de chauffe.

3.1 L'énergie solaire

La puissance du rayonnement solaire touchant la surface de la terre est de l'ordre de 1.000 W/m². Mais cette énergie n'est pas disponible de façon égale en tout point de la planète. En plus de l'influence de l'atmosphère, elle dépend des facteurs météorologiques et géographiques. Ce rayonnement sera donc intense à certains endroits et moindre à d'autres.

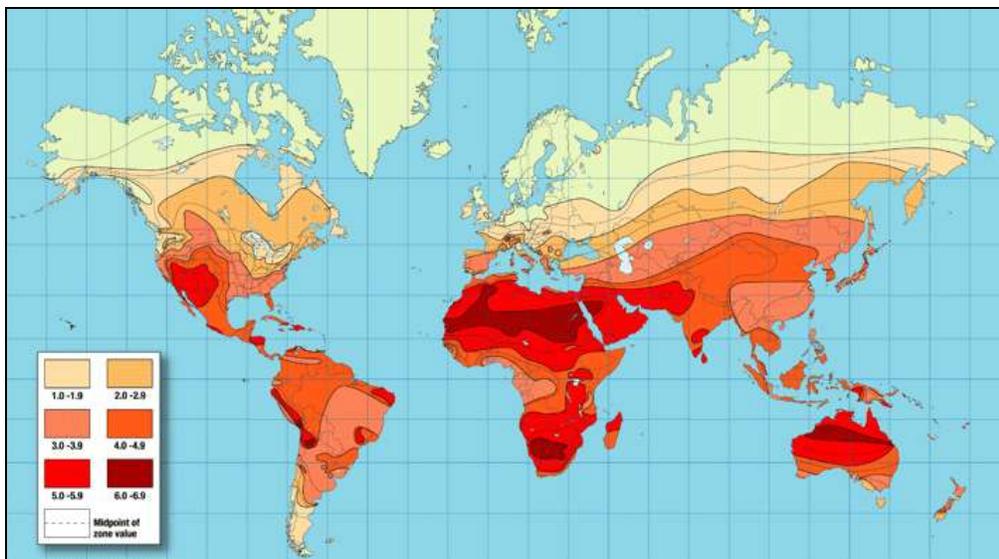


Figure 44 : Le niveau d'ensoleillement moyen dans le monde

Source : <http://www.idcook.com/fr/content/24-carte-irradiation-solaire>

Comme illustré dans la Figure 44, **le potentiel d'exploitation de l'énergie solaire dans les pays d'intervention de la CTB est important. Il le sera d'autant plus que le coût moyen du kilowatt/heure est élevé et que l'expertise locale en matière d'énergie solaire est disponible tant pour la conception que pour l'installation d'équipements solaires.**

3.1.1 Production d'eau chaude solaire

La technologie du chauffe-eau solaire est bien maîtrisée dans beaucoup de pays du sud. Le rayonnement solaire est capté et transformé en chaleur (énergie thermique), celle-ci est ensuite transmise jusqu'à l'endroit désiré. Différentes applications sont possibles : panneaux solaires chauffants pour la production d'eau chaude, fours, séchoirs ou grandes centrales de production d'électricité à partir du solaire thermique.

L'absorbeur est l'élément clé: il doit pouvoir capter le plus possible du rayonnement solaire, le convertir en chaleur et veiller à ce que la plus faible portion possible soit réfléchi. Il existe plusieurs types de capteurs dont le choix se fait en fonction des conditions climatiques et de la température souhaitée de l'eau chaude. On citera :

- **Les capteurs plans à liquide** sont composés d'un boîtier à surface vitrée dont l'arrière est protégé par un panneau isolant. Un matériau absorbant est placé entre l'isolant et la surface vitrée. Un maximum d'énergie est ainsi capté pour un minimum de pertes thermiques. Ces capteurs sont coûteux et difficilement manipulables ;
- **Les capteurs plans à liquide sans vitrage** sont des capteurs solaires à usage saisonnier. Bien qu'ils captent efficacement l'énergie solaire, ils engendrent beaucoup de pertes thermiques lorsque leur température augmente. Ils sont recouverts d'un plastique polymère noir, formé de multiples canaux à travers lesquels l'eau circule. On utilise les capteurs solaires sans vitrage lorsque l'application fonctionne de façon saisonnière dans les pays chauds durant la période douce ou quand des températures peu élevées sont nécessaires, comme dans le cas du chauffage pour piscine. Leur principal avantage est leur coût d'investissement particulièrement bas ;
- **Les capteurs à tubes sous vide** sont parmi les technologies les plus performantes et les plus sophistiquées, mais aussi les plus coûteuses. Ce type de capteur est constitué d'une série de tubes alignés parallèlement dans lesquels on a créé le vide. À l'intérieur de ces tubes est disposé une plaque sombre, l'absorbeur, traversée sur toute sa longueur par un conduit (le caloduc ou évaporateur) qui renferme un liquide. Lors de l'exposition aux rayons solaires, l'absorbeur transforme l'énergie solaire en chaleur récupérée par l'évaporateur. Le liquide enfermé devient gazeux en absorbant la chaleur. Il s'évapore ensuite en remontant le tube jusqu'à un condenseur situé à la partie supérieure du tube. Il cède alors sa chaleur à un fluide caloporteur qui transmet les calories à un échangeur thermique placé dans le réservoir de stockage. Ce procédé de captage offre légèreté et résistance, une durée de vie d'environ 20 ans et une excellente performance même sous rayonnement faible. On utilise cette technique essentiellement dans les pays froids ;
- **Le chauffe-eau monobloc** est une technologie simple et efficace qui ne supporte pas le gel. Il est donc essentiellement utilisé dans les pays chauds. Il fonctionne par thermosiphon et son installation est simple. Son réservoir isotherme permet de conserver toute la nuit les calories accumulées en journée. Le système ne requiert pas

de pompe de circulation, tirant profit des différences de gravité. Une inclinaison à 30° est préconisée sous les latitudes tropicales. Il requiert une maintenance limitée pour un retour sur investissement d'une année seulement. Pour une capacité de 80L la surface requise est de 800X1800mm.

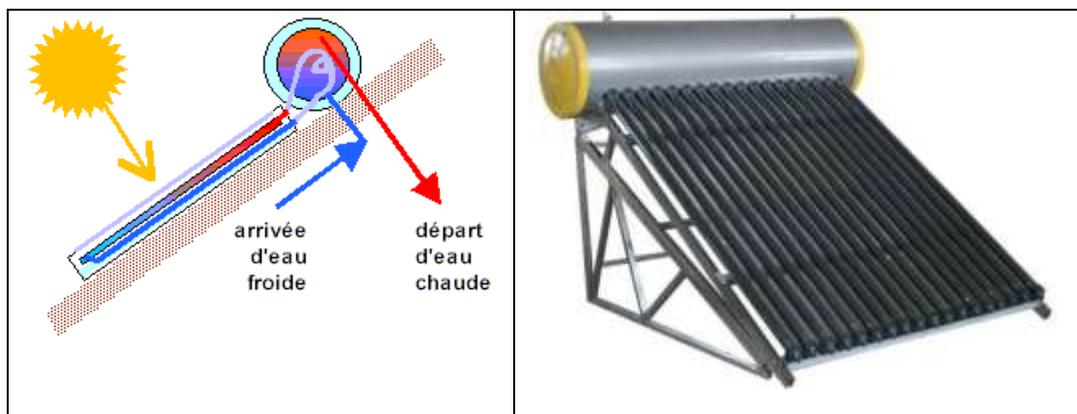


Figure 45: Principe du chauffe-eau solaire monobloc

Source : <http://outilssolaires.com>

La technologie thermique solaire peut également servir à la climatisation. La chaleur récupérée par le capteur est utilisée comme énergie pour produire de l'air froid. L'un des grands avantages de ce procédé est que le besoin de fraîcheur se produit justement lorsque le soleil brille le plus intensément ce qui rend le stockage du froid inutile. Deux systèmes sont habituellement utilisés pour le refroidissement solaire :

- **Le circuit ouvert** combine normalement la déshumidification de l'air et le rafraîchissement par évaporation utilisé dans les systèmes de ventilation destinés à purifier l'air. Dans un tel système, l'air expulsé humidifié et l'air fourni servent tous les deux de refroidissant. L'air fourni est directement rejeté dans les locaux à climatiser via un système de récupération de chaleur ;
- **Le circuit fermé** dans lequel les refroidisseurs thermiques ressemblent beaucoup plus aux systèmes frigorifiques à compression courants. Les refroidisseurs fournissent de l'eau froide à des températures situées entre 6 et 20 °C. Ils peuvent par conséquent être utilisés autant pour la climatisation centrale que pour des systèmes de refroidissement à traitement décentralisé.

3.1.2 Les panneaux photovoltaïques

Tous les panneaux photovoltaïques (PV) comprennent deux sortes de semi-conducteurs, l'un avec des électrons positifs et l'autre avec des électrons négatifs via des cellules solaires qui sont reliées en série. Comme le principe du transistor, la lumière (photon) entrant sur la structure du semi-conducteur soulève des électrons libres à la matière semi-conductrice, créant un courant électrique continu qui va circuler entre les deux couches de contact. Le dessus du

panneau est revêtu d'une couche antireflet afin que la lumière soit absorbée par les couches semi-conductrices du panneau.

Lorsque les PV sont interconnectés entre eux et fixés sur un support, on obtient un système photovoltaïque fonctionnant comme une seule unité de production d'électricité. La puissance du champ est révélée en Watt crête (Wc).

Trois types de modules photovoltaïques sont produits aujourd'hui : le silicium monocristallin, le silicium poly-cristallin et les technologies en ruban et couches minces.

L'utilisation de PV est une bonne alternative pour la production locale d'électricité dans les pays où l'ensoleillement est bon et l'électricité chère. On peut ainsi utiliser l'électricité produite à partir du PV soit comme puissance autonome pour des utilisations isolées, soit comme une exploitation raccordée au réseau. Dans le cas de systèmes en site isolé, le rendement énergétique est adapté pour couvrir les besoins énergétiques essentiels. Le cas échéant, il est stocké dans des accumulateurs ou complété par une source énergétique supplémentaire (système hybride), de type générateur diesel. Dans le cas de systèmes raccordés au réseau, le réseau public assume le stockage électrique.

Un système avec batteries est à envisager dans les zones non connectées au réseau électrique ou si celui-ci est défectueux et irrégulier. Il est composé de PV, d'un convertisseur de courant et de batteries. Il conviendra de choisir des batteries ne nécessitant pas d'entretien et d'une durée de vie de l'ordre de 7 ans minimum (les batteries représentent de l'ordre de 20 à 30% de l'investissement). L'énergie électrique est stockée dans les batteries sous forme de courant continu à faible tension. Pour pouvoir alimenter directement des appareils fonctionnant avec du courant alternatif (110V/220V), un onduleur est nécessaire pour convertir le courant. L'onduleur aura une durée de vie de l'ordre de 10 ans.

Quand le système est relié au réseau, ce dernier sert de stockage. Le système peut couvrir une partie seulement des besoins énergétiques. Ce type de système est à promouvoir dans les pays disposant d'une politique de « feed-in tariffs ²⁸», qui permet le paiement de l'énergie introduite dans le réseau, et/ou accepte l'installation de compteurs bidirectionnels. L'électricité produite sera ainsi déduite de la quantité totale consommée.

Le positionnement des panneaux doit être étudié soigneusement de manière à ce que l'ensoleillement soit maximum, la sécurité garantie (risques de vol) et le nettoyage facile. Il importe que la poussière et le sable soient régulièrement enlevés des panneaux, sous peine d'affecter durablement leur performance. L'étude et l'installation de ces systèmes doivent être réalisées par des professionnels.

Comme toute énergie renouvelable, le rendement de ce type d'installation doit être calculé en tenant à la fois compte de l'investissement initial, de la consommation des 20 prochaines années (soit la durée de vie moyenne des PV), du coût prévisible de l'électricité sur cette période, et du renouvellement de l'onduleur et des batteries. On table en moyenne en Europe

²⁸ Voir la brochure *Developpement a matter of energy, promoting renewable solutions*, CTB, 2012
Ecoconstruction et efficacité énergétique – Juin 2017

sur un retour sur investissement de 6 à 8 ans. Dans cette projection il y aura lieu de tenir compte de la perte de rentabilité du système, le rendement des PV étant de l'ordre de 90% au bout de 10 ans et de 85% après 20 ans.

Une fois le type d'installation de PV choisi, il conviendra d'intégrer cette installation de manière harmonieuse dans le projet architectural. Le système peut en effet avoir un double avantage : non seulement produire de l'électricité mais aussi projeter de l'ombre sur le toit du bâtiment ou sur les parkings.

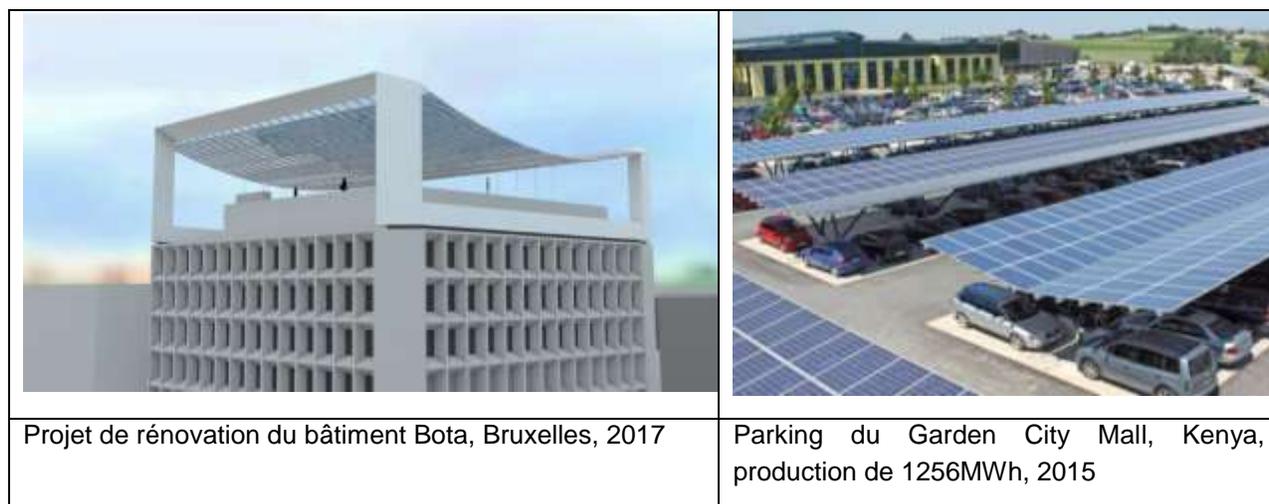


Figure 46: Exemples de projets solaires intégrés

Source : APERE, 2017

3.2 L'éolien

Le vent est une autre expression de l'énergie solaire; le différentiel de chaleur généré sur la planète crée des différences de pression qui entraînent des flux d'air : le vent. La puissance que représente le flux d'air est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et de la surface couverte par le flux. Mais l'énergie produite par le vent ne peut être valorisée en tout point du globe. La connexion au réseau électrique, l'exposition aux vents, les dégagements nécessaires tant pour valoriser pleinement le vent que pour éviter les nuisances sont des facteurs qui déterminent l'implantation d'éoliennes. Celles qui sont placées en mer disposent de vents généralement plus puissants et plus stables que sur terre.

Une localisation sur les sites les mieux exposés est cruciale. Augmenter la hauteur expose la turbine à des vitesses de vents plus importantes et plus stables. Augmenter le diamètre de la turbine accroît la surface sur laquelle l'énergie du vent est extraite. En toute logique, une évolution vers des turbines toujours plus grandes et plus hautes s'observe ; elle s'est stabilisée aujourd'hui à 150m de haut environ. Cette évolution est limitée par la pression du vent sur les pales, les régulations locales ainsi que les contraintes matérielles et logistiques.

Des réglementations définissent l'espace tampon minimal entre le site d'implantation des éoliennes et les quartiers résidentiels afin de préserver ces derniers du bruit généré par les

pales et l'effet stroboscopique (de l'ordre de 500m en Belgique). Elles interdisent également leur implantation dans les zones de migration des oiseaux tout en veillant à minimiser leur effet sur le paysage.

Un des gros désavantages de l'énergie éolienne est l'intermittence du vent. Pour y remédier il est nécessaire de disposer de sources d'énergie alternatives, ou de systèmes de stockage.



Figure 47: Exemple d'installation hybride au Sénégal

Source : ASER, Sénégal, 2015

Des systèmes de petites turbines se sont développés ces dernières années pour répondre aux besoins des bâtiments. Certes, ils sont moins rentables que leurs grandes sœurs mais ils peuvent constituer **une source énergétique alternative** intéressante dans les zones non connectées au réseau mais largement exposées au vent.

Des études ont été menées sur le gisement éolien dans la région du Sahel, par exemple, où on constate une grande variabilité des sites ; des études complémentaires au niveau local sont donc nécessaires.

3.3 La bio-méthanisation

Le **biogaz est une source d'énergie sûre, gratuite et renouvelable**. Il s'agit pourtant d'une technologie encore largement sous-exploitée.

En l'absence d'oxygène, certains microbes naturels permettent de dégrader les matières organiques afin de produire du biogaz, composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone. Les proportions varient en fonction des matières fermentées mais en général, le biogaz contient entre 50 et 70% de méthane. Plus ce taux sera élevé, plus le gaz sera énergétique. La méthanisation se produit spontanément dans certains endroits comme les marais, les rizières ou les décharges mais on peut également la provoquer artificiellement.

La matière organique nécessaire à la production de biogaz est largement disponible sous différentes formes, citons notamment les excréments humains ou animaux, les débris végétaux ou encore les déchets alimentaires.

L'installation de traitement de la matière organique est appelé digesteur anaérobie ou méthaniseur. Il est généralement composé d'une aire de réception, d'une zone de prétraitement pour éliminer les éléments contaminants, tels que papiers ou plastiques, de broyeurs et d'une série de réservoirs pour la création du biogaz dans des conditions contrôlées.

Le temps de rétention moyen de la matière dans le digesteur est de l'ordre de 60 à 80 jours. La production journalière de biogaz dépend de la nature et de la qualité du substrat disponible et de la température du milieu de culture. Entre 20 et 30°C, la production est stable et satisfaisante.

La simplicité de la production du biogaz et de la fabrication de l'installation sont des facteurs d'appropriation importants. En effet, des outils et matériaux simples suffisent à l'installation complète d'une unité de production.

Dans la cuisine, le biogaz peut remplacer le bois ou le charbon, ce qui permet aux occupants de respirer un air plus sain et de limiter la déforestation²⁹.

Contrairement à l'éolien ou au solaire, ce système de production est indépendant de facteurs climatiques variables. Notons enfin que la méthanisation produit également un résidu que l'on appelle « digestat », qu'il est possible de valoriser comme fertilisant dans l'agriculture.



Une des écoles professionnelles appuyée par la CTB en Ouganda a été dotée d'une installation de production de biogaz utilisé en cuisine, permettant de réduire l'utilisation de charbon de bois. Des activités de sensibilisation ont également été faites afin de valoriser les bienfaits du biogaz et de permettre à l'école d'utiliser et de maintenir correctement l'installation.

Figure 48: Système de biogaz dans l'école professionnelle de Kaliro, Ouganda

Source : Projet TTE, BTC-Ouganda, 2015

²⁹ Des recherches financées par l'Organisation Mondiale de la Santé ont démontré que 1.6 millions de personnes mourraient chaque année des effets néfastes de la fumée du bois de feu.

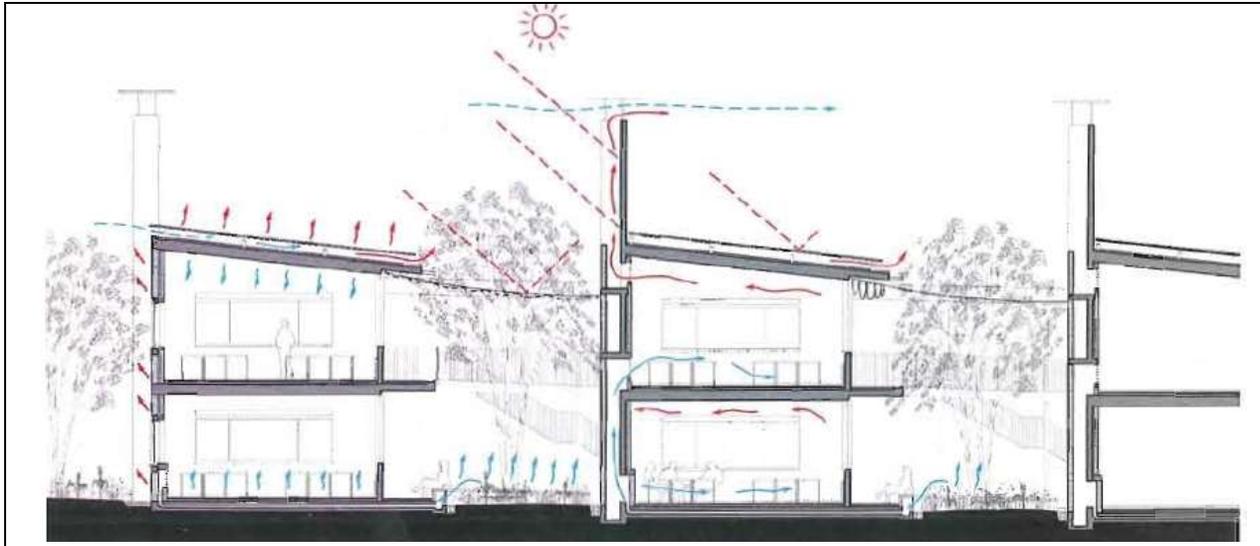
PARTIE 4 : EXEMPLES DE PROJETS INTEGRES

4.1 La ventilation naturelle comme axe structurant de la conception du Lycée Français de Damas



L'école Française de Damas, en Syrie, conçue par les Ateliers Lion en 2008, est une bonne illustration de l'usage qu'il peut être fait des techniques traditionnelles pour limiter les consommations dues au refroidissement et au chauffage. D'une superficie de 10.000m², elle abrite plus de 900 élèves. Différentes techniques ont été associées pour créer un microclimat optimal de manière passive:

- Les arbres existants sur le site ont été préservés ;
- Les constructions sont bâties autour de petits jardins au sein desquels les arbres plantés forment de véritables canopées protectrices. Des toiles sont parfois tendues pour apporter de l'ombre;
- Les plantations sont arrosées via un système de récupération des eaux pluviales ;
- Des galeries couvertes relient les différents bâtiments ainsi que des espaces sous pilotis;
- L'air frais produit dans les patios est capté et introduit dans les salles de classes adjacentes ;
- Les murs à double peau sont séparés par un vide de 5cm, évitant ainsi que la chaleur accumulée par le mur extérieur soient transmises à l'intérieur. Les calories accumulées en journée par la paroi intérieure qui dispose d'une bonne inertie thermique, sont évacuées la nuit par le système d'évacuation ;
- Pour éviter la surchauffe, les toitures en béton sont constamment ventilées par un vide d'air de 25cm de large ;
- La ventilation naturelle est favorisée par l'emploi de cheminées solaires.



Coupe longitudinale exposant le principe de toiture ventilée, d'arrivée d'air frais par le patio et de reprise de l'air chaud par la cheminée solaire.



Patio couvert avec partie du bâtiment sous pilotis favorisant la ventilation entre les bâtiments.

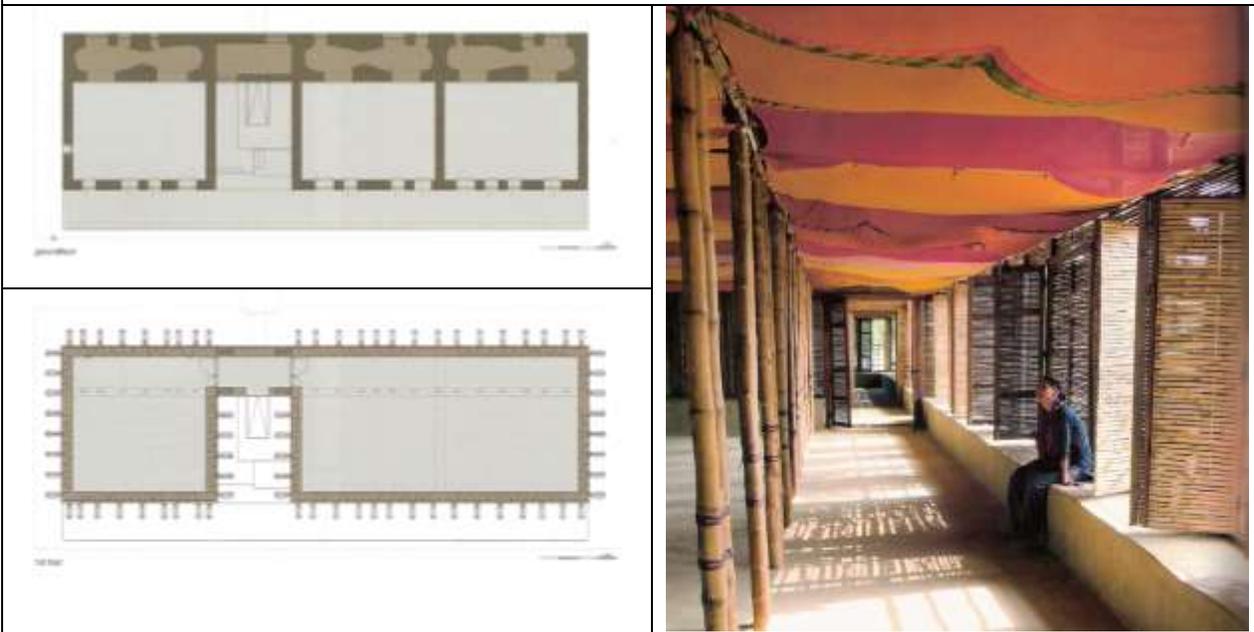
4.2 Double stratégie de l'école de Rudrapur, Bangladesh



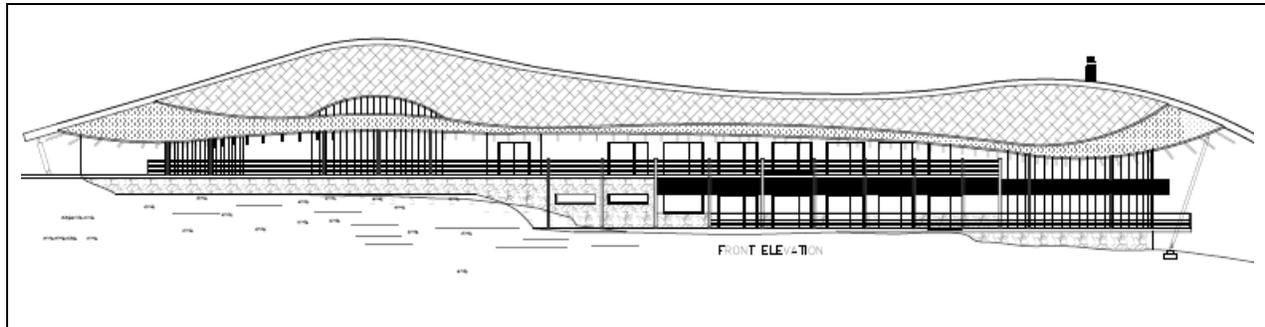
L'école primaire de Rudrapur au Bangladesh a été conçue par les architectes A. Heringer et E. Rosway en 2006 pour le compte d'une ONG. Elle utilise essentiellement deux techniques passives ; d'une part, la masse thermique de la terre crue pour le rez-de-chaussée et, d'autre part, la ventilation naturelle au travers d'une structure légère en bambou pour l'étage.

Les trois classes du rez disposent de « grottes » latérales comme espace de jeux, qui d'un point de vue thermique constituent un bouclier idéal contre la chaleur. Les autres murs sont également composés d'adobe mélangé à de la paille de riz enduits de chaux. De petites ouvertures y sont pratiquées.

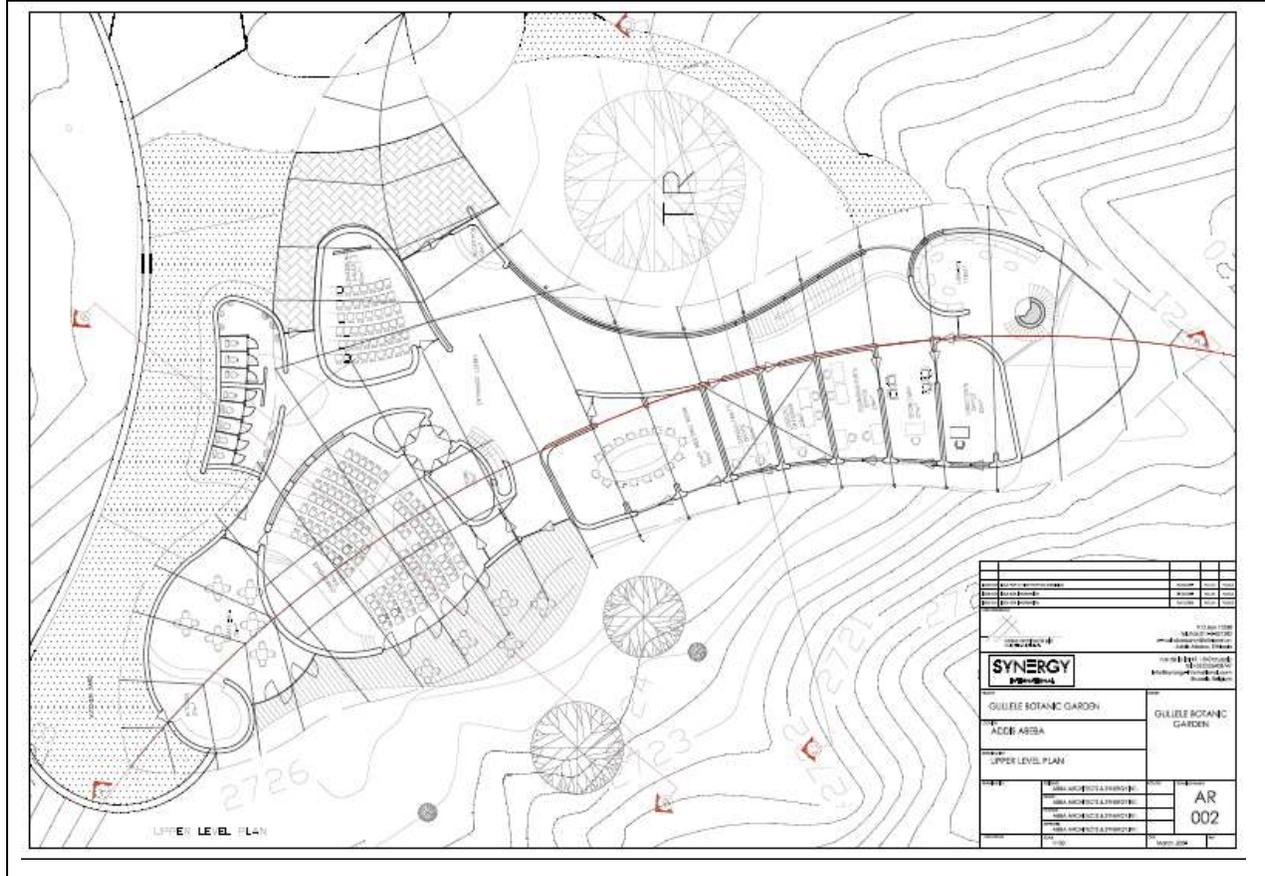
Le deuxième étage est un espace multifonctionnel utilisé pour la période des moussons, époque où la masse thermique du rez-de-chaussée n'est pas particulièrement efficace contre l'air chaud et humide. Les parois sont en structures légères de bambou. La ventilation naturelle est privilégiée par de grandes ouvertures situées sur les quatre parois.



4.3 L'emploi de matériaux appropriés pour le Jardin Botanique de Gulele, Addis Abeba, Ethiopie



Le bâtiment d'accueil de l'administration du Jardin Botanique de Gulele, à Addis Abeba en Ethiopie, a été réalisé en 2015 par le bureau d'architecture Synergy International. Le bâtiment s'inspire dans ses formes et sa conception de l'architecture vernaculaire africaine, avec des murs épais en adobe et de grandes toitures débordantes. La structure de la toiture est composée de poutres de lamellé-collé en eucalyptus ; une essence invasive abondante introduite au siècle dernier dans la région.



4.4 Puits canadiens et cheminées solaires pour une école à Wadi Al Mughair en Palestine (CTB)

Dans les écoles Palestiniennes, les salles de classe sont souvent thermiquement inconfortables. Celles-ci sont glaciales en hiver et suffocantes en été, au point que les écoles doivent parfois même fermer.

L'école Dr. Hafez Abdelnabi Al-Natsheh à Wadi Al Mughair, dans la périphérie d'Hébron, a été construite en 2014 par le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur, avec un soutien technique et financier de la CTB. Elle présente plusieurs innovations architecturales destinées à résoudre ces problèmes de manière écologique:

- Etude des gains solaires par les fenêtres et conception de brise-soleil amovibles ;
- Ventilation passive grâce à l'utilisation de cheminées solaires et de puits canadiens ;
- Murs trombes ;
- Amélioration de l'étanchéité à l'air.

Orientation / brise soleil

La plupart des salles de classe sont orientées au nord. Cela les protège des rayonnements solaires, de la surchauffe induite et de l'éblouissement. Pour les quelques salles de classe orientées au sud, des protections solaires amovibles en aluminium sont fixées dans l'embrasure des fenêtres. Ces écrans sont enlevés en hiver pour maximiser les gains solaires.



L'énergie géothermique

En Palestine, la température de l'air varie considérablement d'un jour à l'autre et d'été à l'hiver. Cependant, la température du sol ne change guère. À une profondeur de dix mètres, la température est de 16 °C tout au long de l'année.

Pour profiter de cette énergie, trois tunnels souterrains ont été construits et ont été connectés aux salles de classe au travers de douze conduits verticaux. Ils amènent un air préchauffé en

hiver et pré-refroidi en été. L'air des tunnels est aspiré dans les salles de classe grâce à des cheminées solaires. Ces cheminées accélèrent l'effet de succion par convection naturelle. Ce principe est complété par des écopos orientables qui par effet venturi créent une dépression dans le conduit de cheminée, et renforce l'effet de succion généré par l'apport calorifique de la cheminée solaire.

Chaque classe dispose de deux grilles d'aération qui peuvent être ouvertes et fermées par les enseignants. En été, l'air frais entre dans la classe à travers la grille inférieure. L'air chaud dans la classe est évacué à travers la grille supérieure vers une cheminée solaire. Ce système géothermique réduit les températures de la classe de 6 °C en été. En hiver, inversement, les tunnels servent à préchauffer l'air.



Murs solaires

Une dernière innovation testée dans l'école est l'emploi de murs solaires. Des panneaux métalliques sombres percés de 250 000 trous ont été installés sur la façade Est de l'école. En hiver, les panneaux absorbent l'énergie solaire, chauffent l'air derrière les panneaux avant de l'injecter dans les salles de classe à travers une grille, par convection naturelle. L'air est ensuite extrait par la cheminée solaire.



Analyse et suivi

En tant que projet pilote, l'école est équipée de deux stations météorologiques et d'une quinzaine de capteurs répartis dans tout le bâtiment pour mesurer avec précision les variations de températures générés par les différents systèmes mis en place. Différentes

configurations peuvent ainsi être comparées suivant les équipements et l'orientation des classes. Certaines classes sont connectées soit aux puits canadiens, soit au mur solaire, parfois les deux. Selon l'orientation, certaines sont équipées de brise-soleil. Les données collectées sont automatiquement mises en ligne sur un site Web et sont analysées par une université locale et un consultant international (Transsolar) pour confirmer les hypothèses des simulations.

Sensibilisation

Les enseignants et certains étudiants ont été formés à l'utilisation des différents systèmes suivant les conditions météorologiques afin d'optimiser leur apports. Ils contribuent ainsi à une sensibilisation à l'environnement. Le bâtiment fait ainsi la démonstration qu'il est possible d'améliorer les conditions de confort des usagers sans pour autant porter préjudice à l'environnement et le climat.

4.6 Tour à vent dans un hôpital de district au sud Soudan

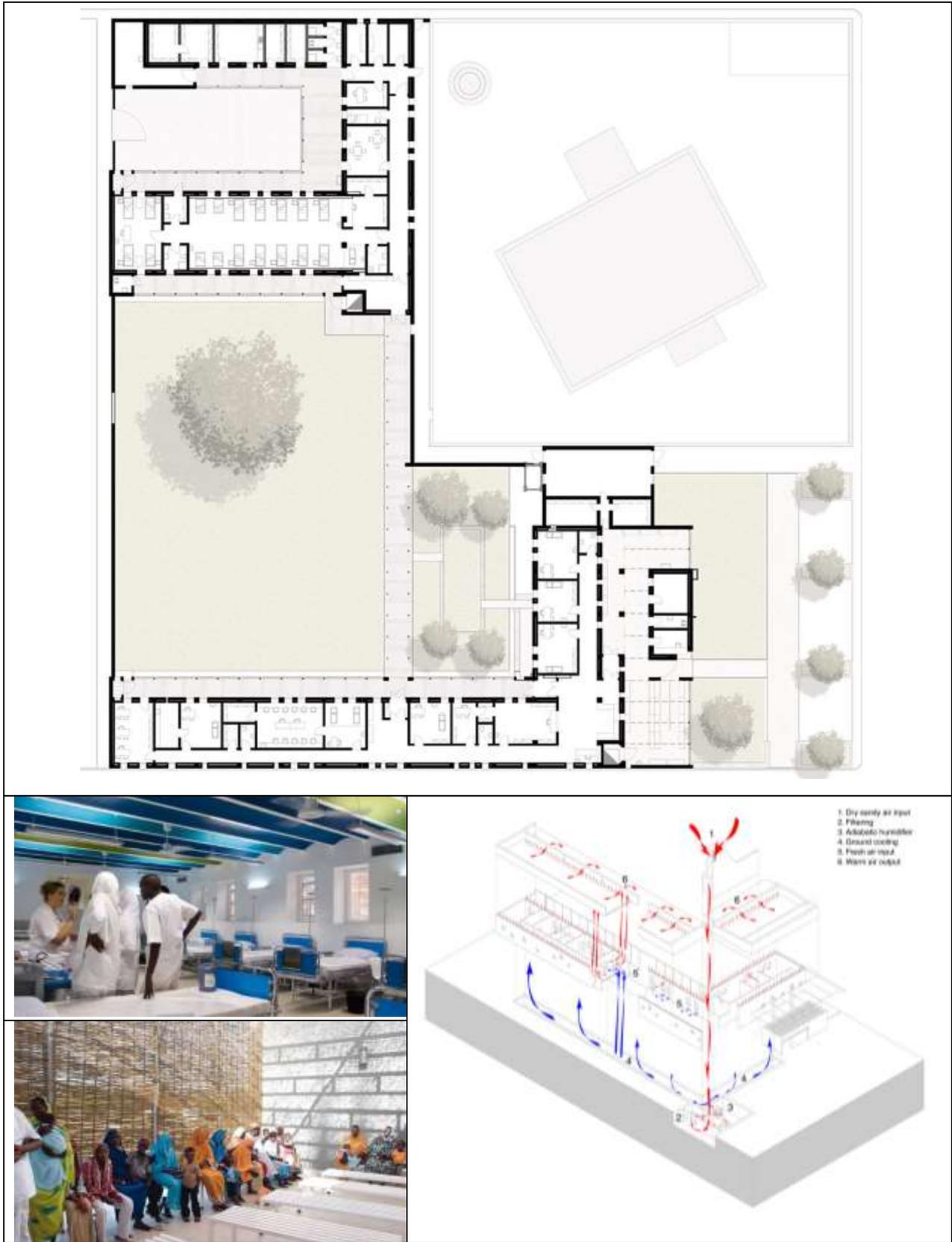


L'hôpital conçu par le bureau italien Tamassociati en 2010 a été édifié à Nyala, capitale du Darfour Sud, au Sud Soudan par l'ONG Emergency. Il intègre, entre autre, une section d'urgence, de pédiatrie et de chirurgie cardiaque.

La volonté du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre était d'offrir à la population un bâtiment beau où chacun se sente valorisé et où le confort serait optimal sans pour autant être dispendieux. Cet accent sur l'esthétique et le confort est perçu comme une marque de respect vis-à-vis d'une population pauvre dévastée par la guerre et les exactions. Il opte aussi pour une simplicité maximale dans une approche de durabilité. Le résultat a abouti à une combinaison de modernité et de tradition. Le bâtiment a ainsi été conçu autour d'une stratégie axée sur la ventilation naturelle en minimisant le transfert de chaleur en provenance de l'extérieur suivant l'emploi d'une série d'éléments :

- L'organisation de l'hôpital autour d'un patio intérieur ;
- Des coursives larges et ombragées protégeant non seulement les personnes mais également les murs des salles ;
- Des murs à forte inertie thermique et de petites ouvertures afin de se prémunir tant du soleil que des vents chauds, secs et porteur de poussières ;
- L'emploi de matériaux locaux, soit la terre cuite et le jonc tissé, et l'usage de techniques de construction simples nécessitant peu de ciment ;
- Une tour à vent avec humidificateur adiabatique.

Le processus constructif est basé sur l'emploi de voucettes en briques de terre cuite posées sur des poutrelles métalliques au-dessus desquels sont disposés des combles ventilés permettant d'absorber la chaleur issue de la toiture.



Le système de ventilation s'articule autour d'une tour à vent qui capte l'air en hauteur. L'air passe ensuite dans des chicanes afin de ralentir sa vitesse et de permettre le dépôt des poussières qu'il véhicule. L'air passe dans des filtres pour enfin être refroidi au contact des parois du sous-sol. L'air frais est distribué dans les différents locaux. L'air chaud vicié est extrait de ces locaux en point haut, passe dans les combles, puis est rejeté à l'extérieur.



CONCLUSIONS

A l'image des réalisations reprises plus haut à titre d'exemples, l'objectif de ce manuel est d'aider le concepteur de projet à développer une stratégie environnementale globale cohérente du bâtiment intégrant les principes de l'écoconstruction, encore appelée architecture bioclimatique. A charge de cette démarche d'intégrer les différentes dimensions exposées dans ce document en les adaptant aux spécificités climatiques et culturelles de la zone d'intervention. Le but est de répondre aux critères de confort de l'occupant suivant quatre dimensions : hygrothermique, visuel, acoustique et de qualité de l'air dans une démarche respectueuse de l'environnement en veillant à la fois à s'adapter aux modifications climatiques et à en réduire les effets.

L'investissement supplémentaire consenti pour intégrer les techniques et approches exposées dans ce guide peut rapidement être amorti via les économies engendrées au niveau de la consommation énergétique. Les systèmes mis en place permettent dans la plupart des cas de se passer de l'air-conditionné tout en offrant un confort thermique acceptable. Ces technologies appropriées nécessitent également un entretien, ni plus ni moins que toute autre composante du bâtiment.

Le tableau ci-joint propose un résumé des approches à favoriser selon que le bâtiment s'inscrit dans un **climat chaud et humide** (tropical ou équatorial) ou dans un **climat chaud et sec**, soit les deux principaux types de climats rencontrés dans les pays partenaires de la coopération belge.

	Zone chaude et humide	Zone chaude et sèche
Choix du site	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne accessibilité, avec accès à l'eau, l'électricité et possibilité de récupération et traitement des eaux usées - Bonne résistance du sol - Zone non inondable - Loin des sources de pollution 	
Implantation	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche de l'ombre dans une zone bien exposée aux vents - Préserver le couvert végétal existant - Implantation d'arbres pour se protéger du soleil et canaliser le vent - Privilégier les vues remarquables 	
Orientation	Axe longitudinal E/O avec fenêtres sur façades nord et sud, pignon ouest protégé du soleil, en s'exposant ou se protégeant des vents dominants suivant les cas	
Mitoyenneté	Habitat dispersé	Habitat regroupé
Forme	Allongée	Compacte
Organisation des espaces	<ul style="list-style-type: none"> - Zones de services utilisées comme espaces tampon face aux nuisances - Espaces nobles disposés du côté des bonnes orientations - Regroupement des pièces d'eau 	

	Zone chaude et humide	Zone chaude et sèche
Typologie	<ul style="list-style-type: none"> - Toitures débordantes - Grandes baies ouvertes avec claustras - Construction sur pilotis 	<ul style="list-style-type: none"> - Toitures à faibles pentes - Petites ouvertures - Constructions partiellement enterrées - Constructions autour de patios ombragés et/ou disposant d'une pièce d'eau
Aménagement intérieur	Terrasses ombragées le long des bâtiments comme zone de transition	<ul style="list-style-type: none"> - Construction autour d'un patio avec végétation et point d'eau - Zones de transition, galeries
Masse thermique et isolation	<ul style="list-style-type: none"> - Faible inertie thermique si peu de différence de température entre le jour et la nuit - Bonne isolation si construction en dur - Double mur ventilé 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte inertie et isolation thermique - Etanchéité à l'air couplée à système de ventilation si différentiel de T° jour/nuit important - Double mur ventilé
Baies	<ul style="list-style-type: none"> - Grandes baies si possible ouvertes avec claustras - Positionnement à hauteur du regard en évitant exposition vers le ciel 	<ul style="list-style-type: none"> - Petites baies avec contrôle des ouvertures - Positionnement en hauteur en privilégiant regard vers le ciel
Protection solaire	<ul style="list-style-type: none"> - Protection contre le soleil diffus - Débord généreux de toitures - Terrasses couvertes - Brise-soleils sur façades sud, est et ouest 	<ul style="list-style-type: none"> - Protection poussée contre les rayons de soleil directs - Volets, brise-soleils...
Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilation transversale - Ventilation de la toiture 	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilation transversale et de la toiture - Humidification de l'air - Rafraichissement nocturne conjointe à l'inertie du bâtiment
Rafraichissement/ Climatisation	<ul style="list-style-type: none"> - Puits provençal si delta de T° entre les saisons est important - Pompe à chaleur sur eau de nappe - Climatisation solaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Puits provençal - Sur-ventilation nocturne - Cheminée solaire - Tour à vent - Echangeur adiabatique - Climatisation radiative ou évaporative (tour à vent avec humidification)
Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux légers (bois, bambou) si delta entre le jour et la nuit faible (climat équatorial) - Si matériaux lourds, privilégier la terre cuite industrielle (climat tropical) - Isolation pour les parties très exposées au soleil, comme l'emploi de murs creux - Protection contre les moisissures 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux massifs (terre crue) - Isolation - Couleurs claires

	Zone chaude et humide	Zone chaude et sèche
Toitures	<ul style="list-style-type: none"> - Paille, tuiles - Toiture à pentes débordantes - Toitures végétalisées - Double toiture ventilée - Collecte d'eau de pluie pour sanitaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Terre - Toiture plates, à faibles pentes, voûtes, coupoles - Toitures végétalisées - Couleurs claires - Collecte d'eau de pluie pour arrosage
Efficience énergétique et du cycle de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Généralisation de l'emploi des lampes LED et d'équipements économes en énergie - Favorisation de l'éclairage naturel - Production d'énergie renouvelable quand nécessaire - Stratégie de préservation du cycle de l'eau : équipements économes en eau, recharge des aquifères, récupération de l'eau de pluie... 	

Tableau 6: Synthèse des actions à entreprendre suivant le type de climat

Il s'agira donc de mettre en œuvre suivant les spécificités climatiques une stratégie cohérente dans la conception du bâtiment qui intègre les éléments repris dans le tableau 6 en fonction des spécificités locales, tout en tenant compte du savoir-faire des concepteurs et des entreprises. Si certaines technologies font appel à des techniques traditionnelles, celles-ci sont souvent oubliées, alors que d'autres plus récentes nécessitent une formation appropriée. Les architectes locaux ne sont pas toujours au fait de l'existence de ces techniques et technologies, ni de la manière de les concevoir et de les intégrer dans leur projet. **L'objectif de ce manuel était d'en faire l'inventaire et la promotion en rappelant qu'une expertise pointue ponctuelle sera sans nécessaire pour en valider les principes, voire concevoir les détails techniques.**

Si le chemin est encore long pour généraliser les différents principes de l'architecture bioclimatique exposés dans ce document dans les projets appuyés par la coopération belge, les expériences positives du Cambodge, de Palestine, de l'Ouganda ou du Burundi démontrent que cette voie n'est pas confidentielle et que des résultats concrets sont déjà visibles, en cohérence avec les objectifs et priorités de la Coopération belge eu Développement.



L'agence belge de développement
appuie et encadre des
programmes de développement
pour le compte de l'État belge et
d'autres donateurs d'ordre.

Rue Haute 147
1000 Bruxelles, Belgique
T + 32 (0)2 505 37 00
info@btcctb.org
www.btcctb.org
@BTC_Belgium

LA COOPÉRATION
BELGE AU DÉVELOPPEMENT **.be**
