

Guide du bâtiment durable en régions tropicales

Tome 2:
Efficacité énergétique des bâtiments existants en régions tropicales

ORGANISATION
INTERNATIONALE DE
la francophonie

 INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE
POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE
IFDD



Guide du bâtiment durable en régions tropicales

Tome 2 :
Efficacité énergétique des bâtiments existants en régions tropicales

ORGANISATION
INTERNATIONALE DE
la francophonie



INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE
POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE
IFDD

Comité de rédaction et comité éditorial



Direction de la publication

Jean-Pierre Ndoutoum, Directeur de l'IFDD

Direction de la rédaction

Stéphane Pouffary, ENERGIES 2050

Rédaction

Stéphane Pouffary, ENERGIES 2050

Guillaume Delaboulaye, ENERGIES 2050

Équipe de l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD)

responsable de l'édition

Mamadou Kone, Spécialiste de programme,

Politique de l'énergie – Maîtrise et accès à l'énergie – Villes durables

Louis-Noël Jail, Chargé de communication, responsable du Service Information et Documentation

Marilyne Laurendeau, Assistante de communication

Mise en pages et révision linguistique

Marquis Interscript

Illustrations

ENERGIES 2050

Photos de couverture

ENERGIES 2050

Travaux d'isolation d'un toit par l'extérieur: Source: www.solvari.be (consultation novembre 2014).

Éolienne de toit: Source: <http://www.economiesolidaire.com/2011/06/20/eolienne-de-toit/> (consultation novembre 2014).

Ce document a été préparé par ENERGIES 2050 pour le compte de l'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD) et ne représente pas nécessairement le point de vue de l'une ou l'autre de ces organisations.

ISBN version imprimée: 978-2-89481-214-3

ISBN version électronique: 978-2-89481-216-7

Vous pouvez consulter ce Guide en ligne à: <http://www.ifdd.francophonie.org/ressources/ressources-pub.php?id=8>



Avec le soutien de : **RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE**

© Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), 2016

56, rue Saint-Pierre, 3^e étage, Québec (Québec) Canada G1K 4A1

Téléphone: 418 692-5727

Télécopie: 418 692-5644

ifdd@francophonie.org - www.ifdd.francophonie.org

Cette publication a été imprimée sur du papier contenant 100 % de fibres postconsommation, procédé sans chlore à partir de biogaz recyclé.

IMPRIMÉ AU CANADA

Date: juillet 2016



Guide du bâtiment durable en régions tropicales

Tome 2 :
Efficacité énergétique des bâtiments existants en régions tropicales



Préface

Notre monde est confronté aux limites de son modèle de développement, comme en témoignent les crises répétées auxquelles nous devons faire face, qu'elles soient d'ordre environnemental, énergétique, social ou économique. Ces crises sont exacerbées par les conséquences des changements climatiques dont l'origine anthropique ne fait aujourd'hui plus guère de doute. Nos modes de consommation et de production ainsi que nos modèles énergétiques, fortement dépendants des énergies fossiles, en sont les principales causes; l'organisation actuelle de nos sociétés engendre des déséquilibres à tous les niveaux qui ne peuvent être soutenables sur le long terme.

Face à ces défis multiples qui ne peuvent plus être ignorés, nous n'avons d'autre choix que de réussir une transition vers des sociétés plus respectueuses de l'homme et de son environnement. Chacun a compris que le temps n'est plus au plaidoyer mais à l'action concrète pour un changement profond et radical de nos modes de fonctionnement. L'année 2015 constitue, dans ce cadre, une année particulièrement charnière avec :

- l'adoption des Objectifs du Développement Durable en septembre par les Nations Unies, qui prennent la suite des Objectifs du Millénaire pour le Développement pour l'après-2015;
- la Conférence des Parties de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques à Paris en novembre-décembre (CdP21), devant aboutir à un nouvel accord international permettant de limiter les impacts liés aux dérèglements du climat.

L'environnement construit (bâtiments et villes), au cœur des enjeux et des défis que rencontrent nos sociétés, est au nœud des changements souhaités. Les villes abritent aujourd'hui plus de 50 % de la population mondiale, consomment les deux tiers de l'énergie produite au plan mondial et contribuent pour autant aux émissions de gaz à effet de serre. Cette énergie est en grande partie utilisée pour les besoins de mobilité et de confort dans les bâtiments (bureaux et logements). Le secteur du bâtiment et de la construction représente à lui seul 40 % de l'énergie totale consommée et environ 35 % des émissions de gaz à effet de serre. À cela s'ajoutent également des impacts considérables sur la consommation de ressources ou encore la génération de déchets.

Ces tendances devraient se maintenir, voire se renforcer. En effet, en 2050, 75 % de la population mondiale vivra dans les villes.

Les choix de développement qui seront faits aujourd'hui à ce niveau, leur organisation spatiale et la façon de les mettre en œuvre détermineront les quantités et la qualité de l'énergie à fournir pour relever les énormes défis de l'accès aux services de base qui se poseront à cet horizon dans les villes, qu'elles soient petites, moyennes ou grandes. L'espace urbain rassemble en effet des systèmes intégrés, organisés selon des schémas complexes et de nature très variée selon que l'on considère les infrastructures, les équipements et les activités génératrices de biens ou de services, ou encore la satisfaction des besoins essentiels d'une population concentrée géographiquement. Il s'agit d'assurer l'accès à l'eau, à l'énergie, à un réseau de transport adapté, à des logements de qualité, à l'alimentation, à la santé, à l'éducation, à la sécurité, à un réseau d'assainissement des eaux usées et de gestion des déchets, à un environnement sain, à un nombre suffisant d'emplois sains et décents, à l'équité sociale ainsi qu'à des notions plus personnelles telles que le bien-être ou le bonheur.

Ces systèmes sont interdépendants et cela est particulièrement visible dès lors qu'il s'agit des réseaux de transport, de gestion des eaux, de la distribution énergétique ou encore des réseaux de communication, et c'est pourquoi il est important de souligner la nécessité d'une approche holistique de la ville tant dans l'analyse des défis qu'elle rencontre que des réponses à apporter.

Ces réponses, de nature variée, sont déterminantes quant au contenu et à la direction à donner à la transition énergétique.

Les professionnels de l'aménagement urbain et de la gestion urbaine, de la construction et du bâtiment sont les principaux artisans des choix à opérer et des réponses à apporter pour que les villes jouent pleinement leur rôle dans cette transition.

Avec de forts effets de blocage dans le futur si rien n'est fait aujourd'hui et face aux nouveaux enjeux climatiques, l'urgence à agir dans le domaine du bâti est réelle. De plus, cet impératif à l'action immédiate est renforcé par une croissance exponentielle des besoins en constructions, sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Cette croissance peut s'expliquer par des facteurs démographiques, avec une population qui dépassera les 9 milliards d'individus en 2050, mais également par un processus d'urbanisation massif, particulièrement dans les zones tropicales d'Afrique et d'Asie. Selon ONU Habitat, les villes africaines accueilleront, en moyenne, 40 000 personnes supplémentaires par jour d'ici 2025. Ces chiffres permettront à chacun d'imaginer l'ampleur des défis au regard d'une situation qu'aucune société n'a expérimentée en un si court laps de temps.

Les conséquences de ce processus se font d'ores et déjà ressentir dans un grand nombre de pays : multiplication des logements informels insalubres, manque d'accès aux services de base et à l'énergie, gaspillages liés à des conceptions inadaptées des bâtiments, etc., auxquels viennent s'ajouter des problèmes de sécurité et d'intégration sociale. Dans certaines parties d'Afrique subsaharienne, le parc de bâtiments pourrait être multiplié par 4, voire 5 d'ici 2050, alors que cette région, la moins électrifiée au monde, fait déjà face à de sérieux problèmes d'approvisionnement en services et en matières premières.

Si la situation est critique, il convient cependant de ne pas céder à la fatalité. Des solutions existent et les opportunités ayant déjà fait leurs preuves dans l'environnement construit sont considérables. Le GIEC estimait ainsi qu'au niveau mondial, des réductions de 25 à 30 % de la demande énergétique pourraient être atteintes à coûts réduits, voire négatifs, et que les économies totales pourraient aller jusqu'à 90 % pour les nouveaux bâtiments¹. Une intégration des énergies renouvelables dans la conception, couplée à une architecture adaptée et efficace sur le plan énergétique, pourrait ainsi permettre d'atténuer une partie des contraintes auxquelles nous sommes tous collectivement confrontés.

La publication du *Guide du bâtiment durable en régions tropicales* s'inscrit dans ce contexte. Ce Guide répond également au manque de littérature intégrée existant dans ce domaine pour les zones tropicales, où les méthodes de conception sont trop souvent calquées sur celles des zones tempérées. Il a également pour objectif d'apporter aux professionnels du secteur et aux décideurs des éléments techniques pour la conception des nouveaux bâtiments (tome 1) et pour la rénovation de l'existant (tome 2).

Publié en français, ce Guide s'inscrit dans le cadre des Initiatives francophones pour la promotion des villes durables en Afrique portées par l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) à travers son organe subsidiaire, l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD) et par ses partenaires.

L'espace francophone porte en lui une identité culturelle et historique propice à la réalisation d'actions concertées, et rassemble un nombre important de pays aux contextes différents mais qui sont généralement confrontés à des défis communs et significatifs.

En particulier, ce Guide est une réalisation concrète de l'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables (IFVD) cofondée par l'IFDD et l'association ENERGIES 2050 en 2011. En ce sens, il se veut également une opportunité pour chacun de questionner ses pratiques professionnelles et de s'inscrire dans des dynamiques de développement et d'aménagements résilients, sobres en ressources naturelles et en carbone, porteuses d'un mieux-vivre partagé et générateur d'activités économiques répondant aux critères du développement soutenable.

L'objectif de l'IFVD est de pouvoir apporter des réponses concrètes aux situations critiques auxquelles sont confrontées les villes, qu'elles soient de petite ou de grande taille, et qu'elles se trouvent dans des pays en développement, en transition ou industrialisés. Il s'agit également de tenir compte de la situation de l'habitat précaire, de l'absence d'efficacité énergétique, des difficultés d'approvisionnement, des changements climatiques, etc., tout en prenant en compte la faible contribution des pays en

1. Lucon O. et al, IPCC 2014. *Buildings, Chapter 9 of the Working Group III contribution to the 5th Assessment report « Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change »* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, disponible via <http://mitigation2014.org/>

développement aux émissions de gaz à effet de serre et leur fragilisation accentuée au regard des conséquences des changements climatiques.

Le **Guide du bâtiment durable en régions tropicales** répond ainsi à plusieurs axes stratégiques de cette initiative, notamment sa volonté de mutualiser les connaissances, de s'accorder sur un langage commun avec une indispensable compréhension méthodologique et des indicateurs partagés, ou encore de renforcer la capacité d'agir des acteurs de la ville. Il fait suite à un premier rapport, publié par l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie (ancêtre de l'IFDD) en 2006, intitulé *Efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical*.

En considérant le bâtiment comme un système intégré à un environnement local spécifique et en prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie, cet ouvrage apporte des éléments de réponse clairs qui doivent permettre à l'ensemble des parties prenantes de se réappropriier la question du bâti en milieu tropical.

Le temps n'est plus au plaidoyer mais à l'action, il convient collectivement de démultiplier les opportunités d'actions et de témoigner des possibles. Les deux tomes du **Guide du bâtiment durable en régions tropicales** s'inscrivent résolument dans cette dynamique.

L'IFDD et ENERGIES 2050 – Septembre 2015

Présentation de l'ouvrage

Le *Guide du bâtiment durable en régions tropicales* a pour objectif d'apporter des éléments de réponse aux problématiques environnementales, économiques et sociales, conséquences d'une urbanisation massive et de pratiques de conception et de construction de bâtiments peu adaptées aux régions tropicales. Il entend servir de référence aux professionnels du secteur de la construction et, plus généralement, de l'environnement construit ainsi qu'aux institutions publiques intervenant dans les régions concernées. Plus largement, il a vocation à donner des clefs de lecture aux enseignants, aux chercheurs et aux étudiants. Il se veut également une invitation à chacun de questionner ses pratiques professionnelles et de s'inscrire dans des dynamiques de développement et d'aménagements résilients, sobres en ressources naturelles et en carbone, porteuses d'un mieux-vivre partagé et générateur d'activités économiques répondant aux critères du développement soutenable.

Ce Guide s'articule en deux tomes complémentaires :

Le premier tome est consacré à l'intégration des objectifs de durabilité dans **la conception des nouveaux bâtiments** en régions tropicales. Il traite notamment des stratégies passives de ventilation et d'éclairage ainsi que de la conception des systèmes d'air conditionné. Il se compose de sept chapitres :

Chapitre 1 : Climat et diagrammes bioclimatiques

Chapitre 2 : Stratégies passives dans le bâtiment, bases et concepts

Chapitre 3 : Ventilation et systèmes de refroidissement naturels

Chapitre 4 : Éclairage naturel et intégration avec éclairage artificiel

Chapitre 5 : Systèmes d'air conditionné et climatisation

Chapitre 6 : Énergies renouvelables

Chapitre 7 : Gestion de l'eau.

La climatisation étant l'une des sources majeures de consommation énergétique en régions tropicales, plusieurs chapitres seront axés principalement sur les méthodes visant à limiter la chaleur à l'intérieur du bâtiment et à assurer le confort thermique de ses occupants : prise en compte du microclimat local et intégration avec objectifs de confort (chapitres 1 et 2), conception de systèmes de ventilation et de refroidissement naturels (chapitre 3), éclairage et équipements efficaces (chapitre 4) et, enfin, conception des systèmes de climatisation (chapitre 5).

Le second tome est complémentaire du premier et se concentre sur l'efficacité énergétique des **bâtiments existants** en régions tropicales.

Il est axé autour de quatre thématiques principales sachant que les chapitres 2 et 3 sont consacrés à la réduction des charges en climatisation :

Chapitre 1 : Établir un diagnostic des performances du bâtiment

Chapitre 2 : Isolation thermique du bâtiment

Chapitre 3 : Systèmes d'air conditionné et climatisation

Chapitre 4 : Éclairage, eau et énergies renouvelables.

Il convient de noter que, pour faciliter la lecture du présent document, les références bibliographiques et les sources des illustrations ont été ajoutées à la fin de chaque chapitre.

L'ensemble de l'iconographie a été créé ou adapté spécifiquement pour les besoins de ce Guide afin d'accompagner le lecteur tout au long des deux tomes.

Table des matières

Préface v

Présentation de l'ouvrage ix

Introduction : Enjeux économiques, sociaux et environnementaux du bâtiment durable 1

Éléments de contexte 1

Les tropiques: une zone d'action prioritaire 2

Introduction au concept de bâtiment vert et de bâtiment durable 4

Des avantages économiques et sociaux 6

 Un enjeu économique de taille 6

 Une réduction des coûts 6

 Effets sur l'emploi 6

 Sécurité énergétique 7

 Santé, qualité de vie et productivité 7

 Soutien à l'économie locale 7

Des barrières structurelles à dépasser 8

Références 9

TOME 2: EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS EXISTANTS EN RÉGIONS TROPICALES

Chapitre 1 : Établir un diagnostic des performances du bâtiment 13

1.1 Analyse des données 13

 1.1.1 Collecte des données 13

 1.1.2 Étalonnage (*benchmarking*) 14

 1.1.3 Analyse de degré jour 15

 1.1.4 Analyse des profils journaliers 17

1.2 Analyse de la structure du bâtiment 17

 1.2.1 Course du soleil et exposition du bâtiment aux radiations 18

 1.2.2 Analyse des échanges thermiques 20

 1.2.3 Analyse du bâtiment au regard des stratégies passives de ventilation et éclairage 21

1.3 Inspection du site 21

Références 23

P o i n t s d e r e p è r e

Chapitre 2: Isolation thermique du bâtiment	25
2.1 Rappel des principes thermiques de l'isolation.	25
2.1.1 Évaluation des charges frigorifiques externes.	25
2.1.2 Principes de conductivité thermique.	28
2.2 Isolation des toits	31
2.2.1 Isolation des toits inclinés.	31
2.2.1.1 Isolation par l'intérieur	31
2.2.1.2 Isolation par l'extérieur	33
2.2.1.3 Isolation des combles.	34
2.2.1.4 Bardage et comble ventilé	34
2.2.2 Isolation des toits plats	35
2.2.2.1 Toiture chaude	36
2.2.2.2 Toiture inversée.	36
2.2.2.3 Toiture combinée	36
2.2.2.4 Isolation des toits plats par l'intérieur	37
2.2.2.5 Isolation à l'intérieur de la structure	37
2.2.2.6 Ajout de protection et coefficients de réflexion	38
2.3 Murs extérieurs	39
2.3.1 Isolation des murs par l'intérieur.	39
2.3.2 Isolation des murs par l'extérieur	40
2.3.2.1 Enduit isolant	40
2.3.2.2 Panneaux isolants revêtus d'un enduit	40
2.3.2.3 Autres systèmes disponibles.	42
2.3.3 Isolation par remplissage d'un mur creux	43
2.3.4 Isolation d'une structure en bois	44
2.3.5 Protections additionnelles.	44
2.4 Fenêtres et ouvertures	44
2.4.1 Ajout de protection contre les radiations.	44
2.4.2 Changement des vitrages	45
2.4.3 Films protecteurs	46
Références.	48
Chapitre 3: Systèmes d'air conditionné et climatisation	51
3.1 Rappels des principaux types de climatisation et composants.	51
3.2 Stratégie d'efficacité énergétique: étapes et procédures.	53
3.2.1 Zonage thermique	53
3.2.2 Conseils additionnels: choix des locaux à climatiser, étanchéité et apports de chaleur internes	54
3.2.2.1 Choix des locaux à climatiser.	54
3.2.2.2 Étanchéité des locaux	55
3.2.2.3 Limiter les apports de chaleur internes.	55

3.2.3	Bilan thermique	55
3.2.4	Équilibrage du réseau	55
3.3	Efficacité des équipements.	57
3.3.1	Changement des installations	57
3.3.2	Isolation thermique des canalisations et tuyauteries.	58
3.3.3	Installation de pompes à haute efficacité énergétique	59
3.3.4	Placement des unités extérieures	60
3.3.5	Accroître les performances des climatiseurs individuels	60
3.3.6	Installer un système de récupération de chaleur.	62
3.4	Régulation, maintenance et entretien	62
3.4.1	Contrôler le temps d'utilisation	62
3.4.2	Régulation du système	63
3.4.3	Entretien	65
3.5	Analyse des bénéfices.	67
	Références	69
Chapitre 4 : Éclairage, eau et énergies renouvelables		71
4.1	Gestion de l'éclairage.	71
4.1.1	Améliorer l'entrée de lumière naturelle	72
4.1.2	Efficacité énergétique	74
4.1.3	Améliorer les méthodes de contrôle	75
4.2	Appareils électriques et chauffe-eau	78
4.2.1	Efficacité énergétique des appareils	78
4.2.2	Chauffage de l'eau	79
4.3	Gestion de l'eau.	80
4.3.1	Réserver la consommation d'eau potable uniquement à des fins alimentaires	80
4.3.2	Technologies permettant une gestion efficace des ressources en eau.	81
4.3.3	Systèmes de récupération des eaux de pluie.	83
4.3.4	Améliorer le drainage des eaux de pluie.	83
4.4	Énergies renouvelables.	84
4.4.1	Chauffe-eau solaire	84
4.4.2	Production d'électricité : photovoltaïque et éolienne	85
4.4.2.1	Photovoltaïque	85
4.4.2.2	Énergie éolienne	87
4.4.2.3	Biomasse	87
	Références	90
Conclusion du 2^e tome		93

Introduction

Enjeux économiques, sociaux et environnementaux du bâtiment durable

Si le bâtiment durable fait l'objet d'une littérature abondante et peut s'appuyer sur des réglementations, des programmes de certifications spécifiques ou encore des mesures de soutien facilitant son intégration dans un certain nombre de pays, la situation dans les pays situés dans les zones tropicales, et plus particulièrement dans les pays en développement et émergents, reste plus problématique. L'urbanisation massive et souvent informelle, couplée à des pratiques de conception et de construction peu adaptées à ces régions¹, a conduit à de nombreux déséquilibres aussi bien environnementaux (inefficacité énergétique des bâtiments, gaspillage de ressources...) qu'économiques et sociaux (multiplication des bidonvilles, accroissement des inégalités urbaines). Ces impacts sur fond de crise climatique et de besoins en termes de développement apparaissent insoutenables que ce soit au regard des objectifs du développement durable que de l'utilisation efficace des ressources naturelles ou de la qualité de vie des habitants.

Le *Guide du bâtiment durable en régions tropicales* a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques et de servir de référence aux professionnels du secteur de la construction et plus généralement de l'environnement construit ainsi qu'aux institutions politiques des régions tropicales. Il s'inscrit comme une suite du rapport *Efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical* publié par l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie (IEPF, 2006), en s'attachant à élargir les problématiques traitées et à intégrer l'ensemble des perspectives énergétiques et environnementales.



Photo: Burundi. Crédit : ENERGIES 2050.

Éléments de contexte

Le bâtiment est au cœur de l'organisation économique et sociale de nos sociétés et il représente une source majeure de possibles impacts environnementaux, sociaux et économiques. Dans son cinquième volet sur les politiques d'atténuation du changement climatique, le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a estimé que le bâtiment était à l'origine de 32% de la demande énergétique mondiale, dont

1. Joo-Hwa Bay, Boon Lay Ong, 2006, p. 22.

24% pour le seul secteur domestique et de 51% de la demande en électricité². Le secteur dans son ensemble consommerait annuellement plus de 3 milliards de tonnes de matières premières et 12% de l'eau potable, tandis que la construction, la rénovation et la démolition généreraient plus de 40% des déchets solides dans les pays développés³.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur du bâtiment étaient estimées en 2010 à 9,18 GtCO₂e, soit environ un cinquième du total mondial, tous secteurs confondus. Sous l'effet combiné de la croissance démographique et d'une urbanisation massive, ces émissions pourraient potentiellement doubler, voire tripler d'ici 2050⁴. La population mondiale serait alors d'environ 9 milliards d'habitants avec un taux de citoyens passant de 53% aujourd'hui à plus de 80%⁵. Ces chiffres traduisent une empreinte carbone et une contribution significative au changement climatique d'origine anthropique.

Les tropiques: une zone d'action prioritaire

Les zones tropicales, où se trouve une grande majorité des pays en développement et des pays émergents, concentreront une part significative de ces évolutions avec, entre autres, un doublement de la population urbaine sur l'ensemble des pays concernés, qui passera de 2 à 4 milliards d'ici 2030⁶. L'Amérique Centrale et les Caraïbes, une grande moitié du nord de l'Amérique du Sud, la majeure partie de l'Afrique subsaharienne et du sous-continent indien ainsi que l'ensemble du Sud-Est asiatique figure en zones tropicales.

S'il est difficile de généraliser la situation compte tenu des disparités régionales et intrarégionales, il est cependant possible d'affirmer que l'ensemble des zones concernées seront particulièrement vulnérables au regard des conséquences d'une mauvaise gestion de l'urbanisation, sachant que les conséquences des réchauffements climatiques viendront exacerber des situations déjà fragiles :

- L'Asie rassemble déjà 12 des 21 villes de plus de 10 millions d'habitants et présente les taux de croissance urbaine les plus élevés au monde. Sa population pourrait atteindre 2,6 milliards d'ici 2030 (contre 1,76 milliard en 2010⁷).
- En Afrique, UN Habitat prévoit un doublement de la population et un taux d'urbanisation supérieur à 50% d'ici 2040, avec un nombre d'habitations domestiques urbaines pouvant tripler de 400 millions à 1,26 milliard d'ici 2050⁸. Les défis sont

2. Lucon O. et al., IPCC, 2014.

3. Chiffres UNEP-SBCI 2010 et Roodman et Lenssen 1995, tirés de UNEP-SBCI 2012, p. 2.

4. Lucon O. et al. IPCC, 2014, p. 11.

5. UNEP-SBCI, 2012.

6. UNEP-SBCI, 2012.

7. UN Habitat 2012a, p. 1.

8. Laros M. et al., 2014, p. 23.

d'autant plus significatifs que 75 % des bâtiments qui seront présents à cette date en Afrique de l'Est n'ont pas encore été construits avec 80 % pour l'Afrique subsaharienne, contre seulement 30 % en Europe⁹.

- L'Amérique Centrale, les Caraïbes et l'Amérique du Sud, qui présentent déjà des taux de populations urbaines parmi les plus élevés au monde, avec 80 % sur l'ensemble de la zone, verraient cette proportion avoisiner les 90 % d'ici 2050¹⁰.

Anticiper ces besoins en nouvelles infrastructures et répondre à la demande en ressources qui y sera inévitablement associée est un enjeu majeur pour des pays qui sont déjà confrontés à d'importantes difficultés, que ce soit en termes d'accès à l'énergie ou à des ressources naturelles essentielles. Les questions énergétiques sont centrales et les délestages peuvent être fréquents¹¹ sans parler de la nécessité de fournir à chacun un accès à une énergie de qualité, abordable et durable. Certaines villes présentent des taux de consommation annuels d'eau équivalents à plus de 80 % de leurs ressources, ce qui est bien au-delà des 40 % fixés par l'UNESCO comme seuil de durabilité¹².

La construction de nouveaux bâtiments à haute qualité environnementale et à haute performance énergétique en milieu tropical est donc un enjeu majeur aujourd'hui et sur le court, moyen et long terme. Les choix d'aujourd'hui impacteront les décennies à venir.

Cette réalité est aussi vraie pour la réhabilitation des bâtiments et des infrastructures existantes. Cela est d'autant plus important qu'il s'agit d'un secteur créateur de bénéfices potentiels, également conséquents, qui vont au-delà des questions énergétiques et qui sont la qualité sanitaire du bâtiment, ou encore les économies générées sur la durée de vie du bâtiment.

L'application de standards inadaptés, souvent inspirés des normes occidentales qui ont été développées dans d'autres environnements socio-environnementaux climatiques¹³, s'est traduite par un usage intensif de la climatisation pour pallier les températures et les taux d'humidité élevés, ainsi que par une usure prématurée des matériaux. Dans un audit de 42 bâtiments non domestiques à Yaoundé et à Douala



Photo: Togo. Crédit : ENERGIES 2050.

9. Kitio V., 2013, p. 7.

10. UN Habitat, 2012b, p. 19.

11. M. Laros et al., 2014, p. 170 et UN Habitat, 2012a, p. 88.

12. UN Habitat 2012a, p. 11.

13. Joo-Hwa Bay, Boon Lay Ong, 2006, p. 22.

au Cameroun, Kemajou et coll.¹⁴ ont ainsi pu observer certaines incohérences des constructions en milieu tropical : architecture moderne disposant de larges baies vitrées, peu isolantes, non protégées, et orientation du bâtiment favorisant les gains de chaleur.

De manière plus globale, l'inadéquation des politiques de la ville et la rapide urbanisation des pays en développement (PED) des zones tropicales ont créé de nombreuses disparités sociales, notamment avec la prolifération de bidonvilles et d'habitats informels où s'entassent les plus pauvres, généralement à la périphérie des villes. Huit cents millions de personnes au total manqueraient ainsi d'accès à une habitation décente, particulièrement en PED où un tiers de la population serait concernée¹⁵.

En Asie, plus de 40 % des ménages vivraient ainsi dans des conditions insalubres, avec une surexposition aux problèmes environnementaux et de santé, un manque d'accès aux services de base (eau potable, électricité, soins de santé...) et une dépendance aux énergies polluantes néfastes pour la santé telles que le charbon ou le gasoil¹⁶. 50 % des habitations informelles en Afrique dépendraient également de ces énergies, notamment pour cuisiner¹⁷, alors que 1,3 milliard de personnes n'ont pas accès à l'électricité dans le monde¹⁸. La pénurie de logements concernerait par ailleurs plus de 50 % des ménages dans certains pays tels que le Nicaragua ou le Honduras¹⁹.

Rationaliser dès à présent le secteur de l'environnement construit en s'appuyant sur des pratiques durables permettrait, sans aucun doute, de soulager un nombre significatif de contraintes. Une planification territoriale adaptée complétée par des bâtiments performants constitue un enjeu essentiel sachant que toute erreur faite aujourd'hui aura des conséquences sur des décennies compte tenu de la durée de vie d'un bâtiment ou d'un aménagement urbain.

Introduction au concept de bâtiment vert et de bâtiment durable

L'objectif premier d'un bâtiment vert est de mettre en œuvre des stratégies intégrées permettant de limiter l'impact environnemental du bâtiment, notamment par une meilleure efficacité énergétique et une meilleure utilisation des ressources naturelles, tout en contribuant à un plus grand confort intérieur. Ces stratégies peuvent être qualifiées de passives dès lors qu'elles utilisent les spécificités du climat ou du terrain (pour l'éclairage ou la ventilation naturelle, par exemple) ou actives à travers l'utilisation de technologies avancées utilisant des énergies renouvelables décentralisées ou des appareils électriques

14. Kemajou A., Mba L., Pako Mbou G., 2012.

15. Lucon O. et al., IPCC 2014, p. 11, tiré de UN Habitat 2010.

16. UN Habitat, 2012a, d'après Banque Asiatique de Développement (ADB), 2010.

17. M. Laros et al., 2014, p. 34.

18. Lucon O. et al., IPCC 2014, p. 4-17, tiré de IEA, 2012 et Pachaury et al., 2012.

19. UN Habitat, 2012b, Chapitre 3.

plus économes en énergie²⁰. Une bonne conception cherchera cependant une synergie et une complémentarité de ces deux approches, avec différents éléments à prendre en considération sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment : orientation et architecture, utilisation de matériaux durables locaux, gestion optimale des déchets, intégration dans l'environnement, volume et protection des fenêtres, ventilation, architecture permettant l'utilisation d'énergies renouvelables, isolation, etc.

Selon le GIEC, le bâtiment présente les opportunités les plus intéressantes en termes d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, avec des réductions de 25 à 30 % de la demande énergétique avec des aménagements réalisables à coûts réduits, voire négatifs, et des économies totales pouvant aller jusqu'à 90 % dans les nouveaux bâtiments (comparé aux standards classiques) et 75 % pour les infrastructures existantes²¹. À noter que la notion de « coûts négatifs » signifie que certains investissements sont rentables immédiatement par opposition à des investissements qui généralement demandent plusieurs années avant d'être rentables.

En milieu tropical, des applications concrètes ont déjà démontré ce potentiel. À titre d'exemple, le Low Energy Office, un bâtiment administratif en Malaisie, a ainsi atteint des économies de plus de 50 % avec de mesures peu coûteuses telles qu'une meilleure orientation des fenêtres équipées de mécanismes d'ombrage automatiques, ainsi qu'une isolation accrue du toit²². Au Cameroun, sur les 42 bâtiments audités par Kemajou et coll.²³, des économies d'énergie de 30 seraient réalisables avec un retour sur investissement inférieur à deux ans en agissant sur la demande d'air conditionné.

Les bâtiments verts pourraient, par ailleurs, permettre une réduction dans la production de déchets de 70 % et dans la consommation d'eau de 40 %²⁴ par rapport aux standards de 2010. Combinées à des changements comportementaux, les synergies entre stratégies actives et passives pourraient ainsi contribuer à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre du bâtiment à leur niveau actuel en 2050, soit une réduction annuelle de l'ordre de 9 à 18 GtCO₂e comparé aux projections de base du GIEC²⁵.



Photo : Singapour. Crédit : ENERGIES 2050.

20. UNEP-SBCI 2012.

21. Lucon O. et al., IPCC 2014.

22. Chiffres Asia Business Council disponibles dans UN Habitat 2012a, p. 32.

23. Kemajou A., Mba L., Pako Mbou G., 2012.

24. McGraw Hill Construction, 2008.

25. Lucon O. et al., IPCC 2014, p. 59.

Des avantages économiques et sociaux

Le bâtiment durable reprend les objectifs initiaux du bâtiment vert en incluant également des perspectives plus globales, notamment économiques et sociales.

Un enjeu économique de taille

Poussé par la rapide urbanisation des pays en développement et des pays émergents, le secteur du bâtiment représente un enjeu économique majeur. On évalue que 4 700 milliards de dollars US seront nécessaires pour financer les nouvelles infrastructures liées au développement urbain annoncé en Asie et 1 600 milliards supplémentaires pour la réhabilitation de celles déjà existantes²⁶. Pour certaines nations d'Amérique Centrale et dans les Caraïbes, le secteur de la construction peut représenter jusqu'à 13 % du Produit Intérieur Brut²⁷. Une bonne ou une mauvaise gestion de ce secteur aura donc d'importantes répercussions sur le développement économique de ces pays et sur leurs politiques de développement durable.

Une réduction des coûts

Un des avantages non négligeables de la construction durable est une baisse des coûts sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Selon McGraw Hill construction, les coûts de construction des bâtiments verts seraient ainsi réduits de 8 à 9 % pour un accroissement de la valeur du bâtiment de 7,5 %²⁸. En dépensant moins dans l'énergie et l'entretien, les résidents réaliseront des économies significatives qui pourront être réinvesties dans d'autres dépenses. Il s'agit d'un point particulièrement important pour les logements sociaux et qui permettrait de diminuer les problèmes de pauvreté énergétique en diminuant le coût de fonctionnement d'un logement.

Pour finir, en adaptant la structure du bâtiment aux futurs impacts du changement climatique (par exemple, aux risques d'inondations ou aux augmentations des températures), il est également possible d'accroître sa résilience et d'économiser sur les futurs coûts de réhabilitation ou de réparation des dégâts causés.

Effets sur l'emploi

Selon l'UNEP ou encore l'Office International du Travail, le secteur de la construction représente déjà 5 à 10, % de l'emploi et 10, % du Produit Intérieur Brut au niveau mondial²⁹. Même s'il est difficile de calculer l'effet net du bâtiment durable dans ce domaine, UN Habitat estime que chaque million de dollars US investit dans les constructions vertes ou dans la réhabilitation en Asie créerait de 10 à 14 emplois directs,

26. UN Habitat 2012a, p. 28.

27. UN Habitat, 2012b, p. 47, chiffres Cepalstat.

28. McGraw Hill Construction, via UNEP-SBCI 2012.

29. Chiffres UNEP/OIT cités dans UNEP-SBCI 2012.

ainsi que de 3 à 4 emplois indirects³⁰. Par ailleurs, selon la Confédération Syndicale Internationale, une croissance des emplois verts, qui pourraient atteindre 100 millions dans le monde dans les 20 prochaines années, pourrait contribuer à diminuer la pauvreté et à accroître le bien-être social³¹.

Sécurité énergétique

La mise en place de programmes basés sur une urbanisation durable peut contribuer à réduire la contrainte énergétique des pays émergents ou en développement, souvent largement en fonction des énergies fossiles importées. Parmi les possibles bénéfices figurent un meilleur fonctionnement du réseau électrique grâce au développement des énergies décentralisées et à la réduction de la demande et des charges maximales, une plus grande diversité dans les sources d'énergies disponibles et une utilisation accrue des ressources domestiques³².

Santé, qualité de vie et productivité

La meilleure qualité de l'air intérieur et le confort accru ont également un impact significatif sur les dépenses de santé, la qualité de vie et, d'une manière générale, la productivité des personnes. Cela concerne notamment les problèmes respiratoires ou les problématiques de stress auxquels sont particulièrement sensibles les populations les plus démunies. Les gains de productivité dans les bâtiments verts pourraient ainsi être de l'ordre de 1 à 9% et la santé des résidents serait également améliorée par un meilleur accès aux énergies propres³³.

Soutien à l'économie locale

D'une manière générale, le bâtiment durable peut également permettre un plus grand soutien aux économies locales (utilisation de matériaux locaux, utilisation des compétences locales adaptées à l'environnement, etc.), une diminution des tensions sociales et une meilleure prise en considération de l'économie informelle, qui représente souvent un pan non négligeable de l'économie et de l'emploi³⁴ dans les pays en développement situés en milieu tropical. Le bâtiment



Sainte Lucie. Crédit: ENERGIES 2050.

30. UN Habitat 2012a, p. 28.

31. Chiffres disponibles via UNEP-SBCI 2012 et Keivani et al., 2010.

32. Lucon O. et al., IPCC 2014, Chapitre 9.

33. Lucon O. et al., IPCC 2014, Chapitre 9.

34. UNEP-SBCI 2012; UN Habitat 2012a, et UN Habitat 2012b.

peut également s'intégrer dans des plans d'urbanisation durables qui stimuleront davantage les investissements dans les infrastructures et les transports publics, et favoriseront l'intégration sociale. Enfin, le logement social durable peut permettre une meilleure prise en compte de la pauvreté dans les politiques urbaines, et limiter l'expansion des bidonvilles et des habitats insalubres informels. C'est notamment un des objectifs du programme SUSHI (Sustainable Social Housing Initiative)³⁵ du Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

Des barrières structurelles à dépasser

Si les opportunités offertes par le bâtiment durable en zones tropicales sont majeures, de nombreuses barrières pourraient limiter l'efficacité des politiques mises en place. Le GIEC a identifié certaines de ces barrières, notamment le manque d'accès à l'information et le manque de connaissance des enjeux, le manque de capital et les coûts de transactions élevés, une régulation inexistante ou inappliquée, les aspects culturels, les barrières comportementales, la protection de la propriété intellectuelle sur les matériaux et les technologies innovantes ou encore la nécessité d'une coopération élargie entre tous les acteurs du bâtiment dans un secteur généralement très fragmenté³⁶.

Dans les tropiques, le manque de fonds et de technologies nécessaires à la mise en œuvre de bâtiments verts, associé à un fort taux d'actualisation, c'est-à-dire une forte préférence pour le présent liée, par exemple, à l'inflation anticipée ou réelle qui dévalue la valeur perçue des économies réalisées dans le futur, et à un manque d'information et de qualifications, rend parfois difficile l'application des principes du bâtiment durable, y compris ceux qui seraient rentables à très court ou à moyen terme²⁶. Un changement comportemental et du paradigme actuel régissant le secteur de la construction est nécessaire. Watson (2009)³⁷ cite dans son étude des principes généraux tels que :

- La réhabilitation des habitations informelles plutôt que la construction de gratte-ciel ou de bâtiments « modernes » ;
- La mise en valeur des marchés traditionnels plutôt que la construction de centres commerciaux particulièrement énergivores ;
- Des programmes visant véritablement la lutte contre la pauvreté plutôt que son exclusion hors des centres urbains pour préserver l'image de la ville.

De manière plus globale, les politiques d'urbanisation devront donc accorder une plus grande attention aux populations démunies et à la préservation du secteur économique informel.

L'urbanisation et la croissance démographique massives caractérisant les zones tropicales, ainsi que l'inadéquation des politiques urbaines actuelles et les difficultés

35. <http://www.unep.org/sustainablesocialhousing/> (consultation novembre 2014).

36. Lucon O. et al., IPCC 2014, Chapitre 9.

37. Watson, 2009, cité dans UN Habitat 2012a.

également rencontrées par les pays en développement de ces zones en matière d'approvisionnement énergétique et en ressources font du bâtiment en zone tropicale un enjeu majeur de la lutte contre les conséquences des changements climatiques et de la promotion d'un développement soutenable.

Le *Guide du bâtiment durable en régions tropicales* s'inscrit dans une dynamique de changement et de vocation à apporter un soutien et une source d'information à l'attention des différents acteurs de la construction, qu'ils soient privés ou publics.

Si les tendances actuelles ne poussent pas à l'optimisme et ont conduit, au-delà d'impacts environnementaux lourds, à la prolifération des habitats informels et des bidonvilles ainsi qu'à un accroissement des inégalités, le bâtiment représente le secteur le plus prometteur en termes d'opportunités d'atténuation du changement climatique, de développement économique et de réduction des tensions sociales. Il offre également une précieuse contribution dans la prise en compte des enjeux de l'adaptation aux conséquences des changements climatiques tout en augmentant la résilience de l'environnement construit. Une bonne planification, anticipant les besoins considérables à venir, permettra de ne pas avoir à « compenser » demain et sur plusieurs décennies, les impacts néfastes d'infrastructures inadaptées.

Références

- Banque asiatique de Développement (ADB), 2010.** *Access to justice for the urban poor: toward inclusive cities*, disponible via: <http://www.adb.org/documents/reports/access-to-justice/access-to-justice.pdf>
- IEA, 2012.** *CO₂ emissions from fossil fuel combustion*. Beyond 2020 online database. Agence Internationale de l'Énergie, disponible via: <http://data.iea.org>
- IEA, 2013.** *Services de données en ligne de l'Agence Internationale de l'Énergie*, disponible via <http://www.iea.org/statistics/>
- Joo-Hwa Bay, Boon Lay Ong, 2006.** *Tropical Sustainable Architecture, Social and Environmental Dimensions*, publié par Elsevier Ltd., Oxford, Royaume-Uni, disponible via http://www.academia.edu/4549289/22283161_Tropical_Sustainable_Architecture
- Kemajou A., Mba L., Pako Mbou G., 2012,** *Energy Efficiency in Air-Conditioned Building in the Tropical Humid Climate*, Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning, Advanced Teachers Training College for Technical Education, Université de Douala, Douala, Cameroun, disponible via http://www.arpapress.com/Volumes/Vol11Issue2/IJRRAS_11_2_07.pdf
- Keivani R., Tah J.H.M., Kurul E., Abanda H., 2010.** *Green jobs creation through sustainable refurbishment in the developing countries*, ILO Publications, International Labour Office, Geneva, Switzerland, disponible via http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/--ed_dialogue/--sector/documents/publication/wcms_160787.pdf

Kitio V., 2013. *Promoting Energy Efficiency in Buildings in East Africa*, UNEP SBCI Symposium, 25-26 November 2013, Paris, Global Action towards Resource Efficiency and Climate Mitigation in the Building Sector, disponible via <http://www.unep.org/sbcipdfs/PromotingEEBEastAfrica.pdf>

Laros M. et al., 2014. *UN Habitat, The State of African Cities, Re-imagining sustainable urban transitions, Chapter 1 (overview)*, United Nations Settlements Programme, Nairobi, Kenya, disponible via <http://unhabitat.org/the-state-of-african-cities-2014/>

Luçon O. et al, IPCC 2014. *Buildings, Chapter 9 of the Working Group III contribution to the 5th Assessment report « Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change »* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis, disponible via <http://mitigation2014.org/>

McGraw Hill Construction, 2008. *Global Green Building Trends : Market Growth and Perspectives from Around the World*, McGraw Hill Construction, SmartMarket Report [Auteurs : Bernstein, H.M. et Bowerbank, A.].

Pachauri S., A. Brew, Hammond, D.F. Barnes, S. Gitonga, V. Modi, G. Prasad, A. Rath, H. Zerriffi, et J. Sathaye, 2012. *Chapter 19: Energy Access for Development – IIASA*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Autriche.

Roodman, D. et Lenssen, N., 1995. *Worldwatch Paper 124: A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns Are Transforming Construction*. Worldwatch Institute.

UNEP-SBCI, 2010. *Draft briefing on the sustainable building index*. United Nations Environment Programme, Sustainable Buildings and Climate Initiative, Paris, disponible via http://www.unep.org/sbcipdfs/SYM2010-UNEP-SBCI_SB_Index_Briefing.pdf

UNEP-SBCI, 2012. *Conception et Construction des bâtiments, à l'avant-garde de l'utilisation efficiente des ressources et du développement durable*, programme des Nations Unies pour l'Environnement Division Technologie, Industrie et Économie.

UN Habitat, 2010. *State of the World's Cities 2010/2011*. UN-HABITAT, 224 p.

UN Habitat, 2012a. *Sustainable Urbanization in Asia, a sourcebook for local governments*, United Nations Settlements Programme, Nairobi, Kenya, disponible via <http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3345>

UN Habitat, 2012b. *State of Latin America and Caribbean Cities 2012, towards a new urban transition*, United Nations Settlements Programme, Nairobi, Kenya, disponible via <http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=3386>

UNIDO, REEP, 2007. *Module 18: Energy Efficiency in Buildings, Sustainable Energy Regulations and Policy Making for Africa*, disponible via https://www.unido.org/fileadmin/media/documents/pdf/EEU_Training_Package/Module18.pdf

UNSHP, 2010. *The Challenge of Slums, Global report on Human settlements 2010*, Earthscan publications, London, Sterling, VA.

Watson, V., 2009. *The planned city sweeps the poor away: urban planning and the 21st century urbanisation*. *Progress in Planning*, 72, 151-193.

Site internet

Programme SUSHI (Sustainable Social Housing Initiative) du Programme des Nations Unies pour l'Environnement : <http://www.unep.org/sustainable-social-housing/>

Chapitre 1

Établir un diagnostic des performances du bâtiment

L'amélioration de l'efficacité énergétique d'un bâtiment dans le cadre d'une réhabilitation passe tout d'abord par une analyse poussée de sa structure et de sa consommation, dont nous présentons les principes fondamentaux ci-dessous. L'objectif est ici d'identifier les principaux gisements d'économies potentielles.

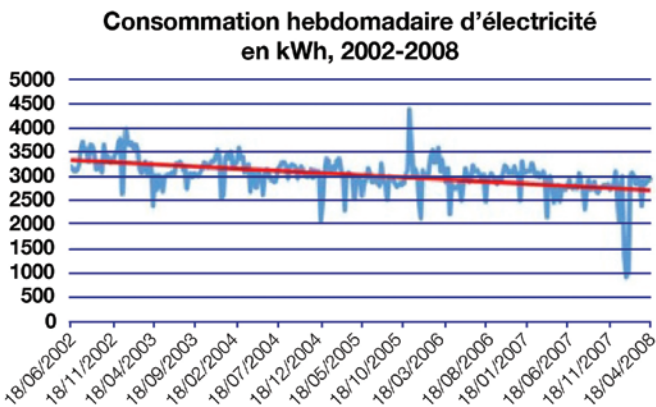
1.1 Analyse des données

1.1.1 Collecte des données

Le processus d'évaluation des performances énergétiques du bâtiment nécessite la collecte de différentes données, notamment :

- Données de consommation d'électricité, de gaz, d'eau ainsi que toutes autres sources de production énergétique du bâtiment, de préférence sur les 2 ou 3 années précédentes. Elles constitueront une base d'analyse et donneront des indications sur le type d'énergies utilisées, les tendances et les principales sources de consommation ;

Illustration 1.1 : Présentation type de la consommation énergétique hebdomadaire d'un bâtiment, ici une bibliothèque, en kWh



Source: ENERGIES 2050, d'après les données de consommation énergétique d'une bibliothèque au Royaume-Uni.

- Informations sur les opérations quotidiennes effectuées dans le bâtiment, avec taux d'occupation et activités dans chaque local ;
- liste complète des équipements utilisés (ordinateurs, chauffe-eau, appareils électriques, systèmes d'air conditionné, etc.) et de leurs méthodes de contrôle (climatisation et éclairage, en particulier) ;
- données sur la structure du bâtiment, incluant les plans d'architecte ainsi que les matériaux utilisés dans la construction.

1.1.2 Étalonage (*benchmarking*)

La consommation énergétique et en eau du bâtiment peut être comparée à des standards pour des infrastructures similaires. Les types de données pouvant faire l'objet d'un étalonage sont notamment :

- la consommation d'électricité, d'eau ou de gaz, divisée par la surface au sol du bâtiment ;
- la consommation d'eau, divisée par le nombre d'occupants.

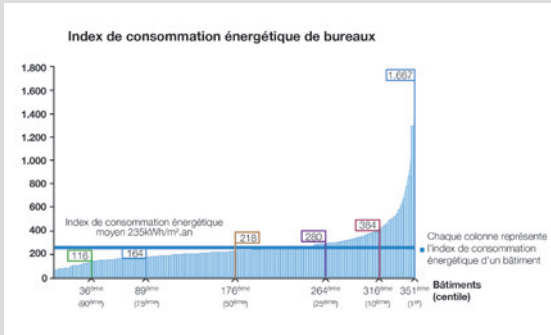
Encadré 1.1 : Exemple de données pour étalonage

Des exemples de données types de consommation peuvent être trouvés ci-dessous pour la Côte d'Ivoire (données 2006) et Singapour. Notons que ces chiffres peuvent évoluer dans le temps et en fonction de la région et du type de bâtiment.

Tableau 1.1 : Étalonage de la consommation énergétique des bâtiments en Côte d'Ivoire, en kWh/m²/an^a

Type d'activité	Indice de consommation	
	Situation médiocre	Référence (objectif du code)
Grand immeuble de bureau	> 275	160
Petit immeuble de bureau	> 250	150
Grand hôtel	> 300	180
Hôpital	> 400	250
Centre commercial	> 300	200
Appartement (dans grand immeuble)	> 200	130

a. IEPF, 2006

Illustration 1.2: Index consommation énergétique des immeubles de bureaux, Singapour^b

Nous pouvons ainsi constater ici que 10% des bâtiments de bureaux à Singapour ont une consommation énergétique inférieure à 116 kWh/m²/an, et que la même proportion a une consommation supérieure à 384 kWh/m²/an. La référence du code ivoirien 2006 pour des bureaux est de 150 à 160 kWh/m²/an en fonction de la taille, avec une valeur de 250 à 275 kWh/m²/an à ne pas dépasser.

b. ENERGIES 2050, d'après le Building Construction Authority de Singapour, 2014

Des standards locaux, voire régionaux (pays aux conditions similaires, sur le plan climatique mais aussi économique) sont généralement disponibles¹ pour les principaux types de bâtiments, avec des valeurs de référence correspondant aux meilleures pratiques ou encore à des performances moyennes (encadré 1.1 ci-dessus). L'objectif final de l'étalement sera donc de situer le bâtiment sur une échelle de performance et de définir en fonction de cela les objectifs à atteindre en termes de réduction de la consommation.

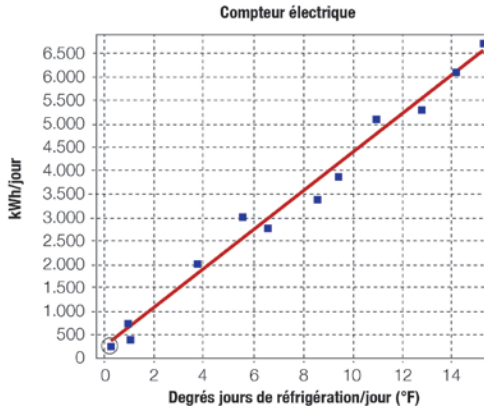
1.1.3 Analyse de degré jour

En région tropicale, il est courant que l'air conditionné (pour les bâtiments équipés) soit à l'origine d'une majeure partie de la consommation énergétique totale du bâtiment. Dans ce cas, les degrés-jours de réfrigération² sont utilisés pour apprécier, en fonction des relevés de températures extérieures, les charges en climatisation nécessaires pour maintenir l'ambiance à une température de référence donnée (différente selon les régions). À titre d'exemple, si la température moyenne sur une journée est de 24 °C et que la température de référence est de 20 °C, on aura alors un total de 4 degrés-jours de réfrigération pour cette journée.

1. Via réglementations thermiques notamment, ou encore études/audits indépendants.
2. Des données sur les degrés-jours sont disponibles sur le site <http://www.degreedays.net/> (consultation novembre 2014).

À charges internes égales (équipements, occupation) et si la consommation en air conditionné est gérée de manière efficace, variant uniquement en fonction des températures extérieures, la relation entre consommation et degrés-jours devrait donc être linéaire, telle qu'illustrée ci-dessous.

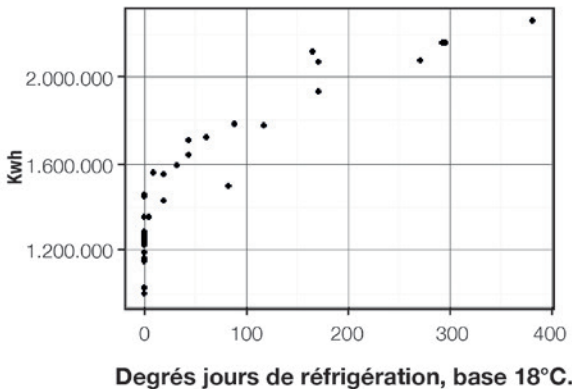
Illustration 1.3: Relation linéaire entre degrés-jours et consommation électrique: cas de base



Source: ENERGIES 2050, d'après www.abraxasenergy.com (consultation novembre 2014).

Une relation non linéaire (consommation indépendante des températures) indiquerait, au contraire, de possibles défaillances dans le système réfrigérant et dans le contrôle de l'ambiance interne. Il sera dans ce cas nécessaire d'identifier l'origine potentielle de ces variations (possiblement mauvaise régulation, perméabilité de la structure, gains de chaleurs internes importants, etc.) et de prendre en fonction des résultats les mesures qui s'imposent.

Illustration 1.4: Relation non linéaire entre degrés-jours (température de référence 18 °C) et consommation électrique

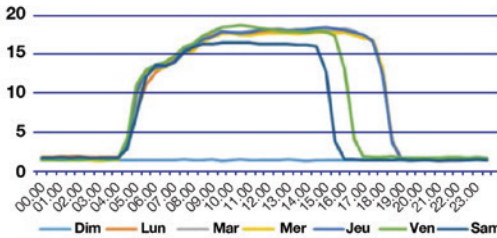


Source: ENERGIES 2050, d'après www.energystewards.net (consultation novembre 2014).

1.1.4 Analyse des profils journaliers

Lorsque des données de consommation horaires ou par demi-heure sont disponibles, il peut également être utile d'établir des profils journaliers sur une période donnée, généralement un ou plusieurs mois. Ces profils permettent d'identifier rapidement d'éventuelles inconsistances et des gaspillages récurrents, par exemple lorsque le bâtiment est censé être inoccupé.

Illustration 1.5: Profil journalier de consommation en kW par demi-heure d'une bibliothèque



Source: ENERGIES 2050, d'après données de consommation d'une bibliothèque au Royaume-Uni.

L'illustration ci-dessus est tirée de l'analyse de la consommation en électricité (sur un mois) d'une bibliothèque non climatisée. La consommation d'électricité augmente dès 4 h du matin et varie peu durant la journée, ce qui pourrait indiquer un défaut de contrôle des appareils électriques ou encore une mauvaise gestion de l'éclairage artificiel (peu de variations en fonction des taux d'occupation ou de l'éclairage naturel).

L'intégration de l'ensemble des données collectées et analysées doit permettre d'établir un plan d'action ayant pour priorité la sobriété énergétique, avec une réduction des gaspillages et un meilleur contrôle des consommations. Ces mesures sont en outre généralement peu coûteuses à mettre en œuvre (formation des occupants, installation d'outils de contrôles, etc.) et peuvent apporter des bénéfices substantiels.

1.2 Analyse de la structure du bâtiment

Nous avons déjà pu évoquer dans le premier tome les principes d'échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement. Afin d'analyser ces échanges pour un bâtiment existant, il est nécessaire de rassembler un certain nombre de données, notamment :

- détails sur l'orientation du bâtiment et son environnement ;
- dimensions, plans d'architectes et éventuellement plan de masse ;
- détails sur la structure du bâtiment et les matériaux utilisés ;
- détails sur le microclimat local ;
- description du système de ventilation.

1.2.1 Course du soleil et exposition du bâtiment aux radiations

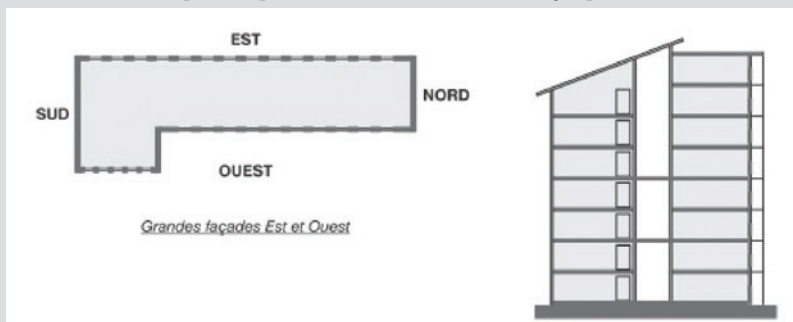
Une première étape consiste à évaluer l'exposition de l'enveloppe du bâtiment aux radiations solaires, en fonction de son orientation et du climat local. Nous avons déjà pu voir, par exemple, qu'en raison de la trajectoire du soleil, une orientation des bâtiments sur un axe Nord-Sud était préférable en climat tropical (chapitre 2, tome 1).

Cette évaluation doit permettre par ailleurs de déterminer les principales sources d'apports thermiques et de définir ainsi un ensemble d'actions prioritaires tel qu'une meilleure isolation des parois ou le remplacement de certains vitrages par d'autres plus performants.

Encadré 1.2: Exemple de disposition à haute consommation énergétique

L'illustration suivante montre une disposition à haute consommation énergétique en zone tropicale, avec un bâtiment orienté Est-Ouest disposant de larges baies vitrées favorisant les apports thermiques.

Illustration 1.6: Exemple de disposition à haute consommation énergétique^c



Une analyse de bâtiments commerciaux à Douala et Yaoundé au Cameroun tendrait à démontrer la récurrence de ce type de conception, inconsistante avec un climat tropical chaud.^d

c. IEPF, 2006

d. Kemajou et al., 2012.

Tableau 1.2: Caractéristiques de bâtiments commerciaux à Douala et Yaoundé (ROM= pourcentage de la surface vitrée par rapport à la surface de la paroi extérieure)^e

Ville	Bâtiment	Orientation	Couleur des murs	Type de toit	Protection solaire	Type de vitrage	ROM
Yaoundé	Hôpital CHE	E/O	Claire	Tuiles	—	Double et Nacco	35%
	Banque SCB-CL	E/O	Marron	Tuiles non isolées	Rideau intérieur	Simple	45%
	Hôtel Sofitel	E/O	Marron	Tuiles isolées	Store intérieur	Teinté	30%
	Public (MINREX)	E/O	Beige	Tuiles, feuilles de métal	Médiocre	Nacco	25%
	17 bât. publics et privés du tertiaire	80% E/O	80% Marron, 20% beige	Tuiles, feuilles de métal	40% rideau intérieur	30% simple, 20% Nacco	50 à 70%
Douala	Hôpital Général	E/O	Beige	Tuiles	—	Nacco	40%
	BICIC	E/O	Marron	Tuiles non isolées	Rideau intérieur	Teinté	80%
	Hôtel Sawa	E/O	Marron	Tuiles isolées	Brise-soleil	Simple	30%
	Public (ONCPB)	E/O	Beige	Tuiles, feuilles de métal	—	Simple et Nacco	70%
	17 bât. publics et privés du tertiaire	80% E/O	Beige et Marron	80% tuiles non isolées, 20% isolées	30% rideau intérieur	60% simple, 40% Nacco	40 à 70%

Pour l'ensemble des 42 bâtiments audités dans le cadre de cette étude, 60 à 72% de la demande énergétique était dédiée à l'air conditionné. La consommation moyenne variait de 302 kWh/m²/an pour ceux de moins de trois étages à 450 kWh/m²/an pour les autres, des valeurs largement supérieures à la référence locale fixée à 160 kWh/m²/an. En partant de ces simples observations, il est ainsi possible d'identifier certaines mesures pouvant avoir des répercussions importantes sur la consommation : protection solaire, isolation des toits et parois, ou encore remplacement des vitrages.

e. ENERGIES 2050, d'après Kemajou et al., 2012.

1.2.2 Analyse des échanges thermiques

L'analyse de la conductivité thermique des parois est une autre étape importante du diagnostic énergétique du bâtiment. Pour rappel, la conductivité thermique (propension à transmettre de la chaleur) d'une paroi dépendra des caractéristiques des matériaux qui la composent, incluant les finitions, isolants ou surfaces vitrées, pondérés en fonction de leurs épaisseurs et de leurs tailles.

Comparer la conductivité thermique de chaque façade soit à des standards, soit entre elles, permet de déterminer les parties les plus vulnérables aux échanges de chaleur. Les parois Est et Ouest ainsi que les toits devront généralement être particulièrement bien protégés afin de réduire les charges frigorifiques en bâtiment climatisé en régions tropicales.

Tableau 1.3: Exemple de coefficients de transmission thermique de parois types

Type de paroi	Coefficient de transmission thermique (en W/m ² K)
Fenêtre avec simple vitrage	6
Fenêtre avec double vitrage traditionnel	3
Fenêtre avec double vitrage HR	1,5
Porte en bois	2,5
Porte en aluminium isolé	1,5
Mur plein de 29 cm	2,2
Mur plein de 39 cm	1,8
Mur creux non isolé	1,7
Mur creux isolé	0,45
Mur plein bardé non isolé	1,8
Mur plein bardé isolé	0,5
Mur de pierre non isolé de 30 cm	3,9
Mur de pierre non isolé de 40 cm	3,5
Mur de pierre non isolé de 50 cm	3,2
Mur de pierre non isolé de 60 cm	2,9
Mur de béton cellulaire de 25 cm (collé)	0,7
Mur de béton cellulaire de 30 cm (collé)	0,6
Mur de béton cellulaire de 35 cm (collé)	0,5
Toiture plate en béton non isolée	2,8
Toiture plate en béton isolée	0,45
Toiture inclinée isolée (6 cm de laine)	0,6
Toiture inclinée isolée (8 cm de laine)	0,45

Tableau 1.3: Exemple de coefficients de transmission thermique de parois types (suite)

Type de paroi	Coefficient de transmission thermique (en W/m ² K)
Toiture inclinée isolée (10 cm de laine)	0,37
Plancher en bois de combles inoccupés non isolé	1,7
Plancher en bois de combles inoccupés isolé	0,4
Plancher en béton de combles inoccupés non isolé	2,6
Plancher en béton de combles inoccupés isolé	0,4
Plancher sur cave en béton non isolé	2
Plancher sur sol en béton non isolé	3,2
Plancher sur cave en béton isolé	0,7
Plancher sur sol en béton isolé	0,9

Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

1.2.3 Analyse du bâtiment au regard des stratégies passives de ventilation et éclairage

L'évaluation du bâtiment et de son environnement devra également se faire en fonction des standards pour la mise en place d'un éclairage et d'une ventilation naturels (voir chapitres 3 et 4 du premier tome). Des économies potentielles pourraient être obtenues à faible coût, par exemple, via l'installation d'étagères lumineuses, l'application de surfaces intérieures claires ou plus simplement via l'ouverture de fenêtres habituellement closes afin de favoriser la ventilation des locaux.

1.3 Inspection du site

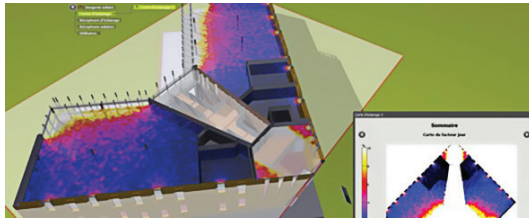
L'inspection du site peut permettre d'identifier des sources additionnelles d'économies en consommation d'énergie et d'eau. Cela peut notamment concerner :

- la recherche de failles potentielles dans les infrastructures et les différents systèmes : fuites dans le réseau de distribution d'eau, défauts dans l'enveloppe du bâtiment, mauvais fonctionnement des systèmes de climatisation, installation non hermétique des fenêtres, condensation, etc. ;
- l'inspection et le recensement de tous les appareils électriques incluant lumières, ordinateurs, chauffe-eau ou machines, accompagnés d'une vérification des systèmes de contrôle et du respect des procédures de maintenance ;
- si applicable, inspection des installations d'énergies renouvelables et analyse de leurs rendements ;

- déterminer les possibles obstructions au système de ventilation du bâtiment et tester l'étanchéité à l'air des locaux (test de la porte soufflante³) pour repérer de possibles fuites et infiltrations;
- identifier les possibles obstructions à la lumière naturelle (mauvais agencement du mobilier, par exemple).

L'inspection du bâtiment peut également s'accompagner de mesures des températures dans chaque local sur une période représentative. Cela peut, par exemple, permettre de repérer des zones avec de mauvais réglages des systèmes de climatisation (en fonction de l'utilisation des locaux et des températures de confort recherchées), mais également d'établir un profil thermique global à utiliser pour contrôler l'équilibrage des systèmes.

Illustration 1.7: Exemple de profil thermique d'un bâtiment



Source: HPC-SA/RayCreatis, Archiwizard, via www.cleantechrepublic.com (consultation novembre 2014).

De manière similaire, il peut également être utile de mesurer le niveau d'éclairage dans chaque pièce afin de détecter des défaillances des systèmes de contrôle, des zones d'inconfort visuel et d'éblouissement, une mauvaise intégration entre éclairage naturel et artificiel ou, encore, des gaspillages avec des niveaux d'éclairagements trop élevés.

La stratégie d'amélioration des performances du bâtiment devra donc se baser sur l'ensemble des résultats de ces analyses. Chacune des mesures identifiées pourra faire l'objet d'une évaluation en coûts et bénéfices et être intégrée dans un plan d'action précis tenant compte des possibles interactions entre ces mesures : l'isolation des parois réduira, par exemple, les bénéfices estimés de la pose d'un double vitrage.

En milieu tropical, il est courant que l'air conditionné et l'éclairage soient les principaux pôles de consommation énergétique. Les mesures possibles, qui seront abordées dans les prochains chapitres, comprennent notamment :

- amélioration de la structure du bâtiment : isolation, protection des parois pour réduire les charges frigorifiques ;
- amélioration du système d'air conditionné ;
- amélioration de l'éclairage et de l'efficacité énergétique des appareils.

3. Ce test vise à déceler les défauts d'étanchéité de l'enveloppe en mettant sous pression le bâtiment à l'aide d'une soufflerie installée sur la porte d'entrée. Pour plus de détails voir notamment <http://www.constructionmaisonrt2012.fr/comprendre-la-rt2012/infiltrometrie-rt2012> (consultation novembre 2014)

Références

- Building Construction Authority of Singapore, 2014.** *Building Energy Benchmarking Report 2014*, BCA, Singapour, p. 32, disponible via http://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/BCA_BEER_Abridged_FA.pdf
- Kemajou A., Mba L. et Pako Mbou G., 2007.** *Energy efficiency in air-conditioned buildings of the tropical humid climate*, Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning, Université de Douala, Cameroun, disponible via http://www.arpapress.com/Volumes/Vol11Issue2/IJRRAS_11_2_07.pdf
- Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2006.** *Efficacité Énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 2: Exploitation des installations existantes*, IEPF, Québec, Canada disponible via <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME2.PDF>

Sites internet (dernière consultation en novembre 2014) et Sources additionnelles des illustrations

- Abraxas energy:** <http://www.abraxasenergy.com/articles/intro-weather-normalization/>
- Université Catholique de Louvain (Cellule de Recherche en Architecture et Climat) - énergie + :** <http://www.energieplus-lesite.be>
- Construction RT2012:** <http://www.constructionmaisonrt2012.fr/comprendre-la-rt2012/infiltrometrie-rt2012>
- Données sur les degrés jours:** <http://www.degreedays.net/>
- Energy Stewards:** <http://www.energystewards.net/blog/>
- HPC-SA/RayCreatis, Archiwizard:** <http://www.cleantechrepublic.com/2011/09/09/la-maquette-numerique-pour-un-batiment-performant-des-sa-conception/>

Chapitre 2

Isolation thermique du bâtiment

Nous allons présenter ci-dessous les principales méthodes d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment (toits, murs et fenêtres). L'objectif d'une isolation accrue est, en zone tropicale et pour des bâtiments climatisés, de réduire les apports de chaleur et permettre ainsi une meilleure régulation de l'ambiance intérieure à moindre coût.

2.1 Rappel des principes thermiques de l'isolation

2.1.1 Évaluation des charges frigorifiques externes

Nous avons déjà pu voir précédemment que les charges frigorifiques externes (apports de chaleur par conduction et radiation) pouvaient être calculées en utilisant les équations suivantes¹ :

Apport de chaleur par conduction - à travers les parois extérieures (murs, toit, plafond, plancher et vitrages)

$$(1) Q_R = U \cdot S \cdot \Delta\theta$$

Où

- Q_R = apport de chaleur par transmission à travers les parois extérieures (W) ;
- U = coefficient de transmission thermique de la paroi ou du vitrage considéré ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)² ;
- S = surface de la paroi ou de la fenêtre considérée (m^2) ; et
- $\Delta\theta$ = différence de température entre les deux faces (extérieures/intérieures) de la paroi considérée (K), aux heures les plus chaudes.

1. IEPF, 2006a, p. 12-14.

2. Notons ici que la valeur U a remplacé le coefficient k donné dans le premier tome pour cette même équation, ceci afin de différencier la conductivité thermique de la paroi de celles (k) des matériaux qui la composent (voir encadré 2.1 ci-dessous).

Tableau 2.1 : Exemples de coefficients de conductivité thermique (k) des matériaux en W/m.K°

Matériaux	Conductivités thermiques [W/m.k]
Cendre sèche	0,29
Charbon de bois	0,041 – 0,065
Coton	0,06
Cuir	0,174
Écorce d'arbre	0,066
Laine de bois (panneau)	0,09
Laine de mouton	0,038 – 0,049
Laine de roche	0,052 – 0,074
Paille comprimée	0,12
Papier	0,14
Plume	0,037
Roseau	0,05
Sciure de bois	0,06 – 0,07
Soie naturelle	0,052
Amiante de ciment	0,4
Béton de pouzzolane naturel	0,25 – 0,6
Géobéton	0,7 – 0,8
Béton armé	1,5 – 2,04
Bitume	0,16
Contreplaqué	0,14
Enduit à la chaux ou au plâtre lissé	0,87
Enduit au ciment	0,87
Copeaux de bois	0,081
Béton	0,9 – 1,7
Pierre calcaire	1,05 – 2,2
Terre cuite	1,15
Mur brique pleine	0,85
Mur brique creuse	0,4
Parpaing plein	1,1
Parpaing creux	0,67

Tableau 2.1 : Exemples de coefficients de conductivité thermique (k) des matériaux en W/m.K° (suite)

Matériaux	Conductivités thermiques [W/m.k]
Enduit mortier	1,15
Enduit plâtre	0,45
Bois naturel	0,12 – 0,044
Polystyrène expansé	0,036 – 0,044
Laine de verre	0,04
Carrelage	1,15
Gravillons	1,5
Pierre lourde	3,5
Feuille de bitume	0,23
Terre pressée	1,15
Tôle	70

Source: IEPF, 2006a, p. 7.

Apport de chaleur par radiations à travers les parois

La quantité de chaleur traversant le mur Q_M (W) :

$$(2) Q_M = \alpha \cdot F \cdot S \cdot R_M$$

Où,

- α = coefficient d'absorption de la paroi recevant le rayonnement (fonction de la couleur et nature du mur, sans dimension) ;
- S = surface de la paroi en m^2 ;
- F = facteur de rayonnement solaire (part absorbée par la surface et transmise vers l'intérieur du local) ; et
- R_M = rayonnement solaire sur la surface du mur en W/m^2 (basé sur données météorologiques, voir chapitre 5, 1^{er} tome), qui dépend :
 - De la latitude sous laquelle le local se trouve ;
 - De l'orientation du mur ;
 - De l'heure à laquelle le calcul sera effectué.

Apport de chaleur par rayonnement solaire sur les vitrages

La quantité de chaleur traversant le vitrage Q_V (W) :

$$(3) Q_V = \alpha \cdot g \cdot S \cdot R_V$$

Où,

- α = coefficient d'absorption du vitrage ;
- g = facteur de réduction qui varie en fonction du mode de protection de la fenêtre contre le rayonnement solaire (extérieure, intérieure, vitre teintée, etc.) ;
- S = surface vitrée (m^2) ; et
- R_V = intensité du rayonnement solaire sur les vitrages (W/m^2).

2.1.2 Principes de conductivité thermique

La conductivité thermique d'une paroi dépend des caractéristiques et de l'épaisseur des différents éléments qui la composent. Cette conductivité est définie par sa valeur U en Watt par mètre carré par degré Kelvin, ou W/m^2K . Plus la valeur U est élevée, plus les transferts thermiques entre intérieur et extérieur seront importants.

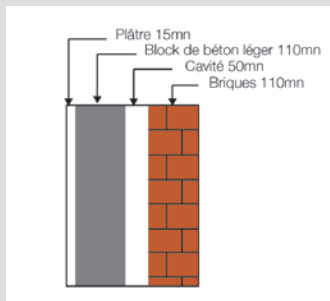
Cette valeur est égale à l'inverse des résistances additionnées des composants de la paroi et des surfaces extérieures et intérieures (résistances superficielles), avec $U = 1/\Sigma R$. La résistance d'un matériel (R , en m^2K/W) dépendra de sa conductivité thermique propre (k , en W/mK) et de son épaisseur (l , en m), avec $R=l/k$.

L'ajout d'isolant accroîtra la résistance de la paroi et donc diminuera sa conductivité thermique.

Encadré 2.1 : Exemple de calcul d'une valeur U et effet de l'isolation

Prenons l'exemple de la paroi illustrée ci-dessous :

Illustration 2.1 : Mur à creu



Source: ENERGIES 2050, d'après l'Université De Montfort, 2011

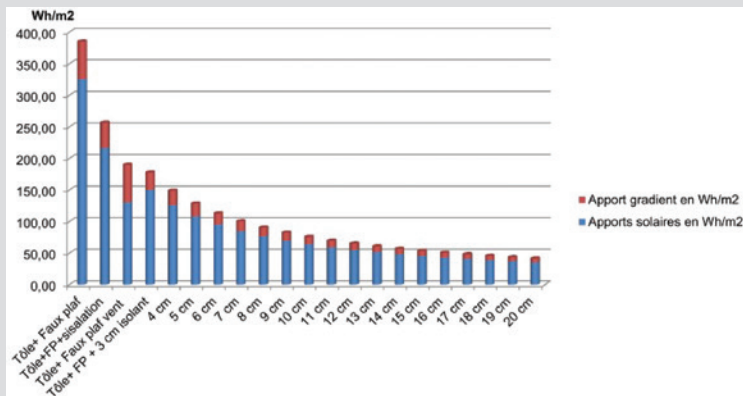
Les valeurs k , l et R des matériaux sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2.2: Calculs des résistances des matériaux (valeurs k et R basées sur CIBSE, 2006)

Matériau	Conductivité k (W/mK)	l (m)	R (m^2K/W)
Plâtre	0,16	0,015	0,09
Bloc de béton léger	0,24	0,11	0,46
Cavité		0,05	0,11
Brique	0,84	0,11	0,13
Échange superficiel (convection)	Surface intérieure		0,13
	Surface extérieure		0,04
ΣR			0,96

On aura donc ici une valeur de conductivité thermique U du mur égale à $1/0,96 = 1,04$ W/m^2K . Il est alors aisé de constater que, mécaniquement, l'ajout d'isolation amènera une résistance accrue de la paroi (ΣR) et donc une baisse de sa conductivité. En remplissant, par exemple, la cavité avec de la laine minérale dont la valeur $k = 0,036$, on aurait ainsi une résistance accrue de $1,28$ m^2K/W ($R_{im} = 1,39$ moins la résistance de la cavité $0,11$), soit 2.24 m^2K/W , et une nouvelle valeur U de la paroi à $0,45$ W/m^2K . La conductivité est ainsi diminuée de plus de 55%. Cet ajout de résistance sera d'autant plus élevé que l'épaisseur de l'isolation est élevée, comme illustré ci-dessous.

Illustration 2.2: Effet de l'isolation d'une toiture en tôle avec faux- plafond



Source: Solener, 2014.

Tableau 2.3: Caractéristiques thermiques des principaux matériaux d'isolation

Produit d'isolation / Performance thermique	Coefficients de conductivité thermique k (W/mK)
Laine de verre	0,030 à 0,040
Laine de roche	0,034 à 0,040
Laine de chanvre	0,041 à 0,044
Polystyrène	0,030 à 0,038
XP	0,029 à 0,035
Plume de canard	0,040 à 0,042
Polyuréthane	0,021 à 0,028
Fibre de bois	0,038 à 0,060
Laine de mouton	0,039 à 0,042
Laine de lin	0,037 à 0,041
Ouate de cellulose	0,038 à 0,040
Laine de coton	0,039 à 0,042
Textiles recyclés	0,039 à 0,042
Verre cellulaire	0,042 à 0,050

Source: Site « Tout sur l'isolation » (consultation novembre 2014).

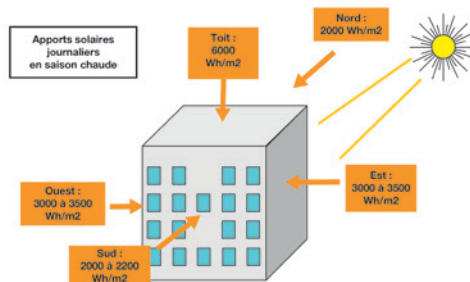
Les transferts thermiques par conduction et convection pour l'ensemble du bâtiment dépendront de la taille des parois (toits, fenêtres, portes, sols et murs) et de leurs valeurs U, et pourront être calculés selon l'équation suivante :

$$(4) Q = \sum S_i U_i (T_e - T_i)$$

Où

- Q correspond aux apports de chaleur totaux (W) ;
- S_i est la surface totale de la paroi i (m^2) ;
- U_i est la valeur U de la paroi i ($W/m^2.K$) ;
- $T_e - T_i$ correspond à la différence de températures entre Extérieur et Intérieur (K).

Illustration 2.3: Exemple de répartition d'apports de chaleur (parois opaques) en climat tropical humide



Source: Solener, 2014.

Le choix du type d'isolation dépendra donc globalement :

- des valeurs U de chaque paroi et de leur exposition aux radiations. Les valeurs U seront à comparer également aux standards locaux (généralement disponibles dans les réglementations thermiques) ;
- de la disposition des locaux et des charges frigorifiques associées ;
- du coût et des bénéfices estimés de l'isolation.

2.2 Isolation des toits

Les toits constituent l'une des parties du bâtiment les plus exposées aux radiations, particulièrement en régions tropicales avec une trajectoire du soleil haute tout au long de l'année. Cette partie de l'enveloppe est également plus difficile à protéger, ne bénéficiant généralement pas des mêmes possibilités d'obstructions aux rayonnements solaires que les murs ou fenêtres. Un ajout d'isolation peut donc s'avérer bénéfique en bâtiment avec climatisation artificielle³ et des méthodes qui différeront selon la structure, la forme et l'inclinaison du toit.

2.2.1 Isolation des toits inclinés

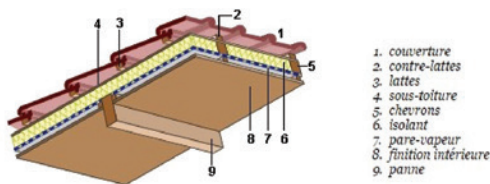
Trois méthodes permettent de mieux isoler des bâtiments à toit incliné (généralement avec bardage/couverture en tôle, tuile, ardoise ou, encore, terre cuite) : l'isolation par l'intérieur, par l'extérieur et l'isolation des combles.

2.2.1.1 Isolation par l'intérieur

Dans le cadre d'une isolation par l'intérieur, le matériau isolant peut être placé entre ou/et sous les chevrons (ou fermettes), comme illustré ci-dessous.

Illustration 2.4: Isolation entre chevrons et fermettes

Isolation entre chevrons



Source: Solener, 2014.

3. Beaucoup moins en climatisation naturelle, où les transferts thermiques doivent être privilégiés afin d'évacuer la chaleur.

L'isolation est ici placée entre les chevrons (5) et le pare-vapeur (7) et peut prendre plusieurs formes :

- panneaux de laine minérale semi-rigides appliqués directement contre la sous-toiture ou, à défaut de sous-toiture, à distance des éléments de couverture ;
- matelas souples de laines minérales revêtus d'un pare-vapeur pour les toitures de formes simples et ayant une distance constante entre chevrons ;
- plaques rigides de mousse synthétique ou verre cellulaire.⁴

Illustration 2.5: Isolation sous chevrons

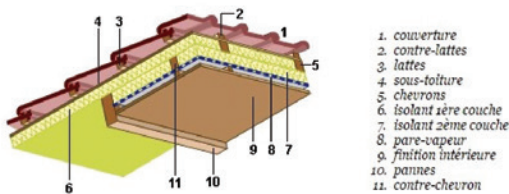


Source: www.chagnol.fr (consultation novembre 2014).

Le principe d'isolation est le même que précédemment mais l'isolant est placé sous les chevrons, entre les pannes.

Il est possible de combiner ces deux systèmes et d'obtenir ainsi une double isolation (attention dans ce cas, il faut vérifier la charge en poids supportable par la structure).

Illustration 2.6: Double isolation sous et entre chevrons



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

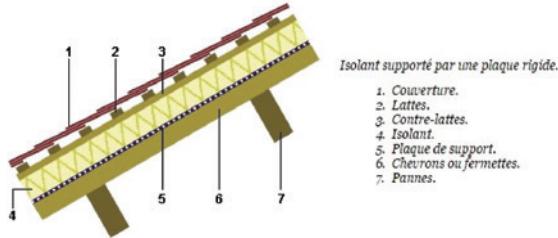
L'isolation des toits par l'intérieur présente l'avantage d'être assez simple à réaliser, même si la surface des combles peut s'en trouver réduite. Elle réduit les apports de chaleur et permet ainsi une plus grande maîtrise des températures intérieures et des infiltrations d'air. Si les combles ne sont pas occupés sur une base régulière, une isolation directement au niveau du sol (des combles) sera néanmoins préférable (voir partie 2.2.1.3).

⁴. Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014)

2.2.1.2 Isolation par l'extérieur

L'isolation par l'extérieur consiste en la pose de panneaux (mousse synthétique, verre cellulaire) avec joints étanches directement sur les chevrons, ou en combinaison avec une plaque de support.

Illustration 2.7: Isolation par l'extérieur



Source: Université catholique de Louvain, site Energie +.

Illustration 2.8: Travaux d'isolation d'un toit par l'extérieur



Source: www.solvari.be (consultation novembre 2014).

Les panneaux isolants assurent ainsi plusieurs fonctions de sous-toiture, d'isolant et d'écran étanche à l'air. Ce système présente de très bonnes performances, notamment par la suppression des ponts thermiques⁵, tout en n'impactant pas le volume des espaces intérieurs.

Dans le cadre d'une réhabilitation du bâtiment, ce type d'isolation impose néanmoins une charge de travail importante, nécessitant un bon accès au toit (souvent via un échafaudage) et le retrait, si nécessaire, du bardage, généralement remplacé lors de l'opération. Il peut ainsi en résulter des coûts importants.

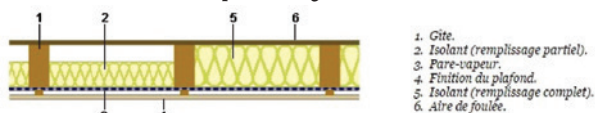
5. Les ponts thermiques sont des points de jonction dans la construction présentant des variations de résistance thermique, où la barrière isolante est rompue.

2.2.1.3 Isolation des combles

Si les combles ne sont ni occupés ni utilisés, ils n'ont donc pas besoin d'être protégés contre les transferts thermiques ; il peut alors s'avérer judicieux de les isoler au niveau du sol pour protéger les espaces de vie en dessous. La surface à isoler est ainsi inférieure à celle au niveau des toits, l'application est relativement plus aisée et les infiltrations d'air, souvent nombreuses dans cette partie du bâtiment, n'ont plus besoin d'être traitées.

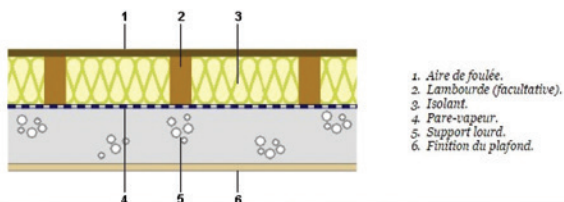
Des rouleaux de laine minérale ou fibre de verre sont, dans ce cas, directement placés sur le sol, avec une méthodologie différente suivant le type de plancher :

Illustration 2.9: Isolation des combles sur plancher léger



Source: Université Catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Illustration 2.10: Isolation sur plancher lourd



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

2.2.1.4 Bardage et comble ventilé

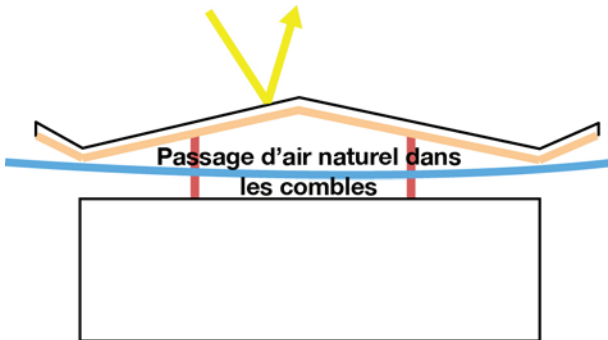
Le bardage (revêtement tel que tuile, ardoise ou tôle) ventilé peut être une alternative intéressante à l'isolation. Cela permet d'avoir un effet comparable (en fonction de la teinte du bardage et de la hauteur séparant les ouvertures) à 2 à 3 cm d'isolant, tout en bénéficiant de la faible conductivité du bardage, qui laisse s'échapper une partie de la chaleur intérieure. Cet effet est particulièrement recherché en bâtiment naturellement climatisé ou en climatisation artificielle si la température de consigne est plutôt haute (autour de 25 °C ou plus).⁶

La ventilation des combles sous toiture peut également permettre de réduire les apports de manière significative grâce à la circulation de l'air (en bleu dans l'illustration). Cette solution pourra néanmoins s'avérer difficile à mettre en œuvre dans le cadre d'une réhabilitation, notamment si elle nécessite des modifications sur la structure du bâtiment.

P o i n t s d e r e p è r e

6. Solener, ADEME, 2014.

Illustration 2.11 : Double toiture avec combles ventilés

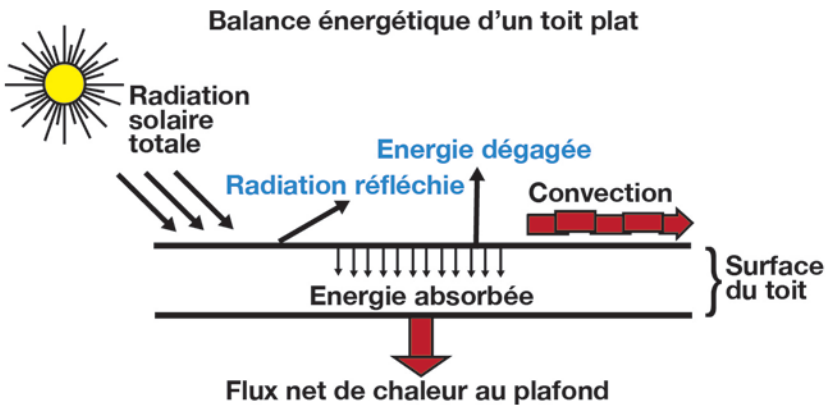


Source: ENERGIES 2050, d'après Solener, 2014.

2.2.2 Isolation des toits plats

D'autres méthodes d'isolation sont applicables pour les bâtiments à toit plat (pente autour de 5 % ou moins).

Illustration 2.12 : Balance énergétique d'un toit plat



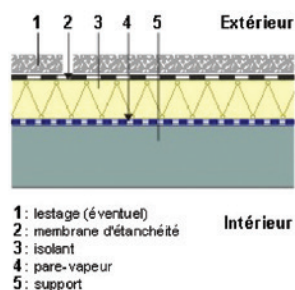
Source: ENERGIES 2050, d'après l'Institut National des Sciences du Bâtiment (États-Unis) (consultation du site novembre 2014).

2.2.2.1 Toiture chaude

Dans un système de toiture chaude, l'isolant est placé au-dessus du support de toit et sous une membrane d'étanchéité qui le protège. Un écran pare-vapeur peut également être ajouté entre l'isolant et le support du toit. Des plaques de liège expansé ou en fibres de bois résistantes à la compression sont généralement utilisées pour l'isolation. Ce système est répandu et permet une isolation accrue au travers d'une installation assez simple.

Aucune lame d'air ne doit cependant apparaître entre les couches et la pente du toit doit être au minimum de 2mm/m⁷.

Illustration 2.13: Toiture chaude



1 : lestage (éventuel)
 2 : membrane d'étanchéité
 3 : isolant
 4 : pare-vapeur
 5 : support

Source : Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

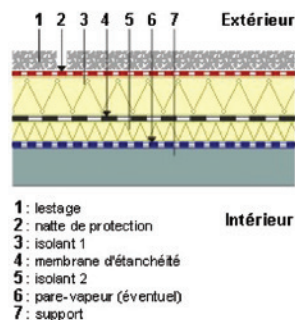
2.2.2.2 Toiture inversée

En toiture inversée, l'isolant est cette fois placé sur une étanchéité directement posée sur le support, servant dans le même temps de pare-vapeur. Cette technique permet de prolonger la durée de vie de la membrane d'étanchéité, moins exposée aux aléas climatiques, et de la réutiliser en cas de réhabilitation avec un autre isolant. Le risque de condensation est ici moins élevé qu'avec une toiture chaude et la pose est plus simple car elle nécessite moins de couches. En revanche, l'installation est plus chère et l'isolant peut s'humidifier en absorbant les eaux de pluies, ce qui peut contribuer à diminuer ses performances. La pente minimale requise du toit est ici de 3mm/m.⁸

2.2.2.3 Toiture combinée

Ce type d'isolation combine les deux techniques précédentes, avec deux couches d'isolants entre lesquelles est interposée une membrane d'étanchéité. Un écran pare-vapeur peut également être posé entre le support et la partie inférieure de l'isolation.

Illustration 2.14: Toiture combinée



1 : lestage
 2 : natte de protection
 3 : isolant 1
 4 : membrane d'étanchéité
 5 : isolant 2
 6 : pare-vapeur (éventuel)
 7 : support

Source : Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

P o i n t s
d e
r e p e r e

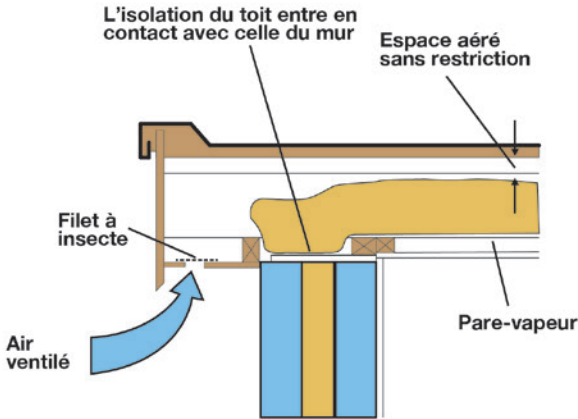
7. www.batirecover.com (consultation novembre 2014).

8. www.batirecover.com (consultation novembre 2014).

2.2.2.4 Isolation des toits plats par l'intérieur

Il est possible d'isoler un toit plat par l'intérieur dans le cas où une isolation externe présenterait trop de difficultés. L'isolant est posé au-dessus d'un pare-vapeur et éventuellement d'un faux-plafond.

Illustration 2.15: Isolation interne d'un toit plat avec intégration au-dessus d'un faux plafond



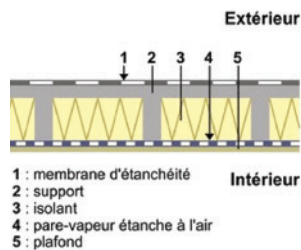
Source: ENERGIES 2050, d'après BRE group (consultation du site novembre 2014).

Ces systèmes présentent néanmoins des risques de condensation élevés pouvant conduire à des moisissures, pourritures et à une inefficacité de l'isolation. Ils réduisent également la hauteur des locaux et leur installation nécessite le retrait des équipements installés au plafond (condenseur de climatisation, luminaires, etc.) avant de les réinstaller, une fois l'opération terminée.

2.2.2.5 Isolation à l'intérieur de la structure

L'isolant est ici placé entre les éléments de la structure du toit, tel qu'illustré ci-dessous.

Illustration 2.16: Isolation à l'intérieur de la structure



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

À l'image de l'isolation intérieure, ce système est généralement à éviter car il présente des risques élevés en termes de condensation mais également de création de ponts thermiques au niveau des supports.

2.2.2.6 Ajout de protection et coefficients de réflexion

La réflexion des radiations solaires (ou la baisse du coefficient d'absorption) peut être accrue en changeant la couleur et le type de surface du toit. Les coefficients d'absorption de différents matériaux sont généralement indiqués dans les catalogues fabricants. Quelques exemples sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.4: Coefficients d'absorption α pour murs et toits

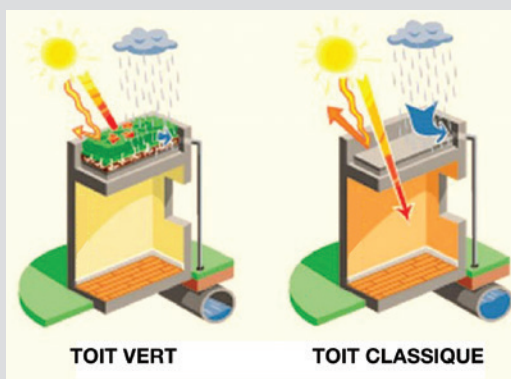
	Couleur et nature de la surface	α
Surfaces très claires	Pierre blanche - surface blanche, claire ou crème - ciment très clair	0,4
Foncées	Fibrociment - bois non peint - pierre brune - brique rouge - ciment foncé - staff rouge, vert, gris	0,7
Très foncées	Toitures en ardoises foncées - cartons bitumés très sombres	0,9
Verres (fenêtres ou lanterneaux)	Vitrage simple	1
	Double	0,9
	Triple	0,8

Source: IEPF, 2006a, p. 5.

Encadré 2.2: Les toits végétalisés

Un toit vert peut être une méthode économique et efficace de réduction des apports thermiques, les végétaux créant une protection naturelle en absorbant une partie des radiations solaires et des eaux de pluie. Cette solution sera donc particulièrement conseillée en climat tropical humide. Les radiations rejetées dans l'atmosphère sont également limitées (illustration ci-dessous).

Illustration 2.17: Illustration schématique des effets d'un toit vert



Source: ENERGIES 2050, d'après www.designweneed.com (consultation novembre 2014).

2.3 Murs extérieurs

Les murs extérieurs peuvent également être un vecteur important d'apport de chaleur et de charges frigorifiques, particulièrement s'ils sont directement exposés aux radiations solaires. La résistance thermique des murs peut néanmoins être améliorée en utilisant l'une ou plusieurs des méthodes suivantes :

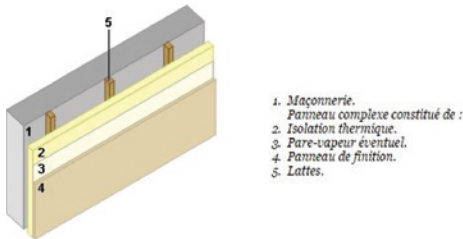
- accroître leurs coefficients de réflexion (couleurs claires) ;
- diminuer leurs valeurs U ;
- protéger les parois contre les radiations via des techniques d'ombrage.

Une attention particulière devra être apportée aux façades Est et Ouest en régions tropicales. Des méthodes de protection simples (peinture blanche, végétation, sur-plomb) peuvent en revanche s'avérer suffisantes pour les murs orientés Nord et Sud.

2.3.1 Isolation des murs par l'intérieur

Les techniques d'isolation des murs par l'intérieur sont nombreuses, avec en particulier des systèmes à plâtre et à contre-cloison maçonnée.

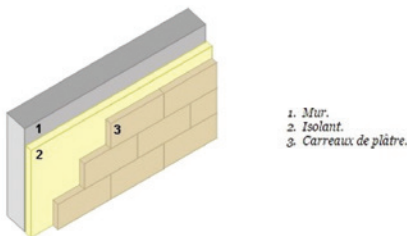
Illustration 2.18: Panneaux isolants posés sur lattage



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

L'isolant (généralement sous forme de panneaux) est appliqué directement sur l'intérieur du mur, soit en étant collé, soit posé sur lattage.

Illustration 2.19: Isolation derrière contre-cloison maçonnée



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Dans une isolation à contre-cloison maçonnée, une paroi supplémentaire (terre cuite, béton, plâtre) est ajoutée au-dessus de l'isolant (polystyrène, laine de verre), renforçant ainsi l'efficacité du système et remplissant également une fonction d'esthétisme.

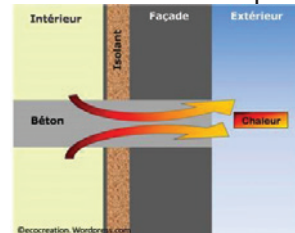
Si l'installation est relativement aisée, ce type d'isolation présente le désavantage de réduire le volume des locaux ainsi que d'accroître les risques de condensation et de ponts thermiques.

Ces ponts thermiques sont provoqués par une rupture de l'isolation et peuvent conduire à des apports de chaleur et donc des charges frigorifiques plus importantes qu'avec une isolation similaire appliquée à l'extérieur.

2.3.2 Isolation des murs par l'extérieur

Les SITEs (Système d'Isolation Thermique par l'Extérieur - ou ETICS en anglais) restent parmi les solutions les plus adaptées et efficaces pour isoler un bâtiment en réhabilitation. Différents systèmes d'isolation extérieure existent.

Illustration 2.20: Pont thermique



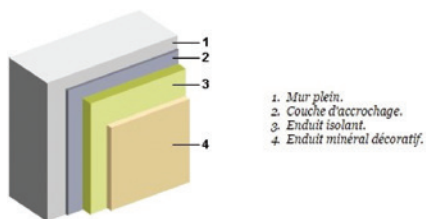
Source: Eocreation, WordPress.com (consultation novembre 2014).

2.3.2.1 Enduit isolant

L'isolant, composé d'un mortier de granulés (polystyrène expansé, perlite) et d'un liant (par exemple, ciment)⁹, est ici directement placé sur la partie extérieure du mur à l'aide d'une couche d'accrochage.

Les performances de l'enduit restent néanmoins inférieures à des isolants classiques et une couche assez épaisse est donc nécessaire afin d'obtenir de bons résultats.

Illustration 2.21: Enduit isolant



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

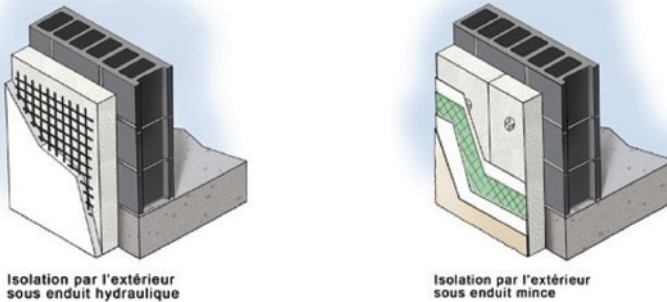
2.3.2.2 Panneaux isolants revêtus d'un enduit

Système le plus courant, il est composé d'un panneau d'isolation (polystyrène expansé, laine de roche, fibre de bois) collé ou fixé aux murs et recouvert d'un enduit de finition qui assure sa protection et remplit également des fonctions esthétiques. Le mode de fixation de l'isolant se fera en fonction de l'état du support (calée-chevillée ou mécanique).¹⁰

9. Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

10. Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

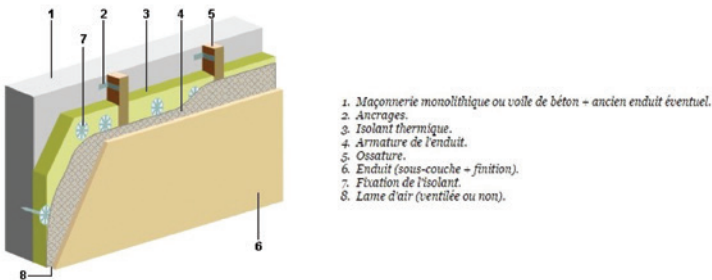
Illustration 2.22: Panneaux isolants sous enduit



Source: www.batirama.com (consultation novembre 2014).

Ce système peut également être accompagné d'une structure au sein de laquelle est disposé l'isolant, servant également de support à l'armature de l'enduit.

Illustration 2.23: Panneaux avec structure de support

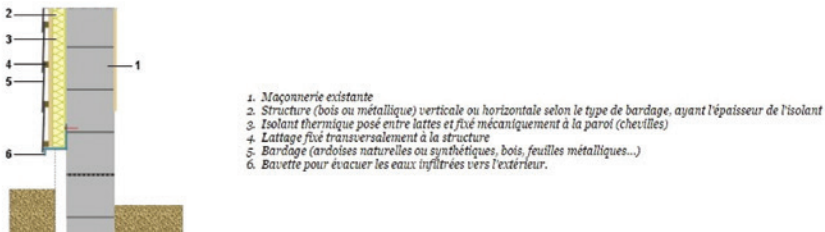


1. Maçonnerie monolithique ou voile de béton - ancien enduit éventuel.
2. Ancrages.
3. Isolant thermique.
4. Armature de l'enduit.
5. Osature.
6. Enduit (sous-couche - finition).
7. Fixation de l'isolant.
8. Lame d'air (ventilée ou non).

Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

L'enduit peut par ailleurs être remplacé par un bardage (avec une lame de ventilation pour accroître l'efficacité) fait, par exemple, d'ardoise, de revêtement en bois ou de lames métalliques.

Illustration 2.24: Isolation avec bardage



1. Maçonnerie existante
2. Structure (bois ou métallique) verticale ou horizontale selon le type de bardage, ayant l'épaisseur de l'isolant
3. Isolant thermique posé entre lattes et fixé mécaniquement à la paroi (chevilles)
4. Lattage fixé transversalement à la structure
5. Bardage (ardoises naturelles ou synthétiques, bois, feuilles métalliques...)
6. Bavette pour évacuer les eaux infiltrées vers l'extérieur.

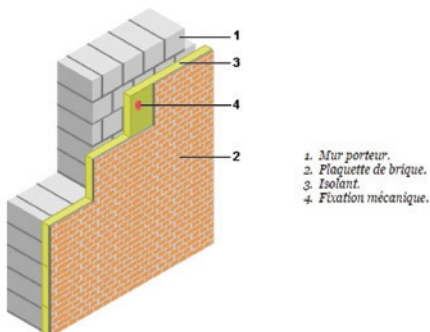
Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

2.3.2.3 Autres systèmes disponibles

- **Isolants préfabriqués :**

Les panneaux sont préfabriqués et composés d'une âme isolante et d'un revêtement. Ils sont ensuite fixés sur le mur de façon mécanique.

Illustration 2.25: Éléments isolants préfabriqués

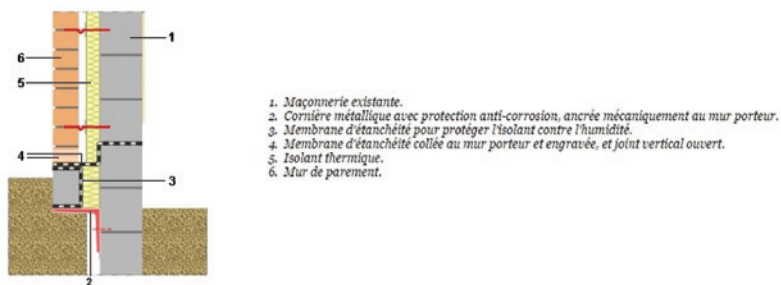


Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

- **Isolation avec mur de pavement :**

L'isolation peut enfin s'accompagner d'un mur de pavement (au-dessus de l'isolant), avec une cavité séparant les deux éléments créant ainsi un mur creux superficiel.

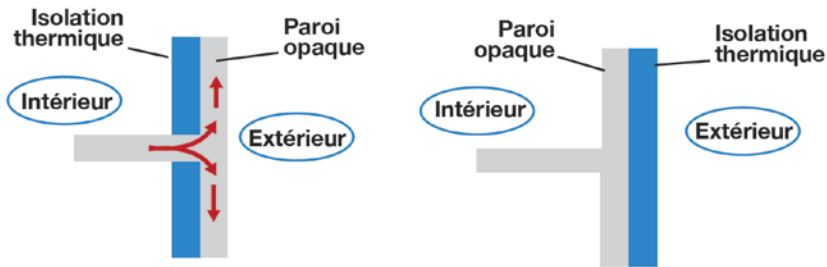
Illustration 2.26: Isolation avec mur de pavement



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Comparée à l'isolation interne, l'isolation par l'extérieur limite les problèmes liés à la condensation et aux ponts thermiques (illustration 2.27), mais présente un risque de dégradation de l'esthétique du bâtiment.

Illustration 2.27 : Absence de ponts thermiques avec isolation extérieure (droite), comparée à l'isolation intérieure (gauche)



Source: ENERGIES 2050, d'après www.energiepositive.info/fr (consultation novembre 2014).

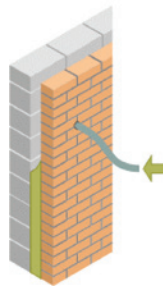
2.3.3 Isolation par remplissage d'un mur creux

Si la structure a été bâtie avec des murs creux (voir exemple en début de chapitre), une bonne méthode d'isolation consiste à remplir partiellement ou totalement la cavité avec du matériau isolant. Deux méthodes sont assez répandues : l'isolation par injection et l'isolation par insufflation.

- **Isolation par injection**

Cette méthode consiste à injecter à l'aide d'un pistolet une mousse d'isolant (urée-formaldéhyde – UF, polyuréthane –PUR, ou perles de polystyrène expansé) dans la cavité au travers de petits orifices percés sur la partie externe du mur. La mousse se gélifie rapidement et les orifices sont ensuite refermés.

Illustration 2.28 : Isolation par injection



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

- **Isolation par insufflation**

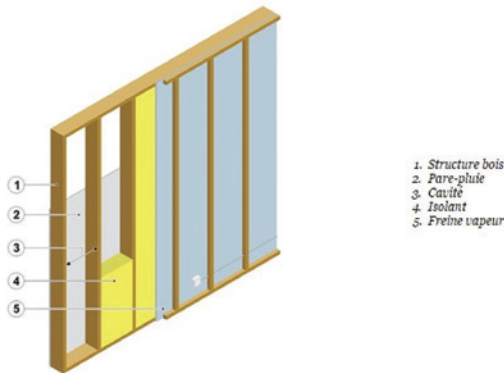
Alternativement, le matériau isolant en vrac est insufflé au travers des coulisses du mur creux, par le haut depuis les combles ou via des orifices percés dans la paroi.

Ce type d'isolation présente l'avantage de ne pas nécessiter de gros travaux et de n'avoir aucun impact sur l'esthétique ou le volume des espaces intérieurs du bâtiment.

2.3.4 Isolation d'une structure en bois

Dans une maison en bois, l'ossature peut finalement être utilisée comme support à l'isolation.

Illustration 2.29: Panneaux d'isolation dans une structure en bois



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

2.3.5 Protections additionnelles

Sur un principe similaire à celui des toits, peindre les murs avec une surface claire et réfléchissante peut permettre une réduction des apports thermiques par radiations. L'utilisation de protections naturelles (mur végétal) peut également apporter des résultats similaires. Le choix de la végétation et la conception du système devront dans ce cas être pensés en fonction des conditions climatiques, des ressources locales (en eau notamment) et également des objectifs de ventilation et d'éclairage naturels.

2.4 Fenêtres et ouvertures

P
o
i
n
t
s
d
e
r
e
p
è
r
e

De tous les matériaux constituant les parois, les vitrages présentent généralement les plus forts coefficients de conductivité et peuvent donc être à l'origine d'apports de chaleurs élevés. Trois méthodes générales permettent de réduire ces échanges thermiques : systèmes d'atténuation des radiations, vitrages plus performants et films de protection. Tout comme les murs, les surfaces vitrées exposées Est et Ouest devront faire l'objet d'une attention particulière, avec une valeur de conductivité maximum (k) de $3 \text{ W/m}^2\text{K}$.¹¹

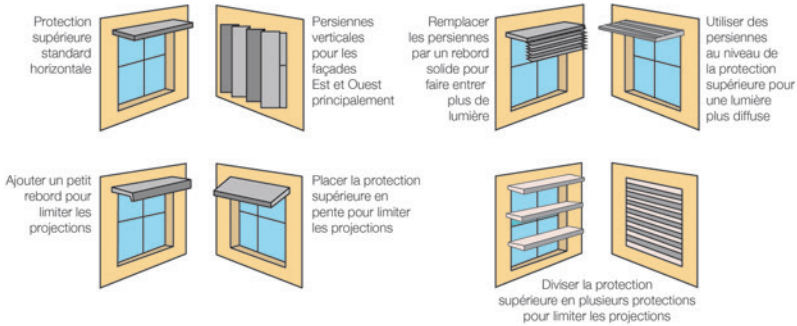
2.4.1 Ajout de protection contre les radiations

L'installation de mécanismes d'ombrage est un moyen effectif et peu coûteux de protéger les fenêtres contre les radiations solaires mais également de réduire les risques

11. IEPF, 2006b, p. 16.

d'inconfort visuel. Ces protections, présentées dans la partie éclairage du Guide (chapitre 4, premier tome), peuvent être externes (volet, plateau réfléchissant, végétation, surplomb) ou internes (rideaux, store).

Illustration 2.30: Méthodes d'ombrage externes



Source: ENERGIES 2050, d'après Chang S. et Krueger B., 2008.

Pour rappel :

- les surplombs seront peu utiles pour les vitrages exposés Est et Ouest ;
- les protections extérieures sont généralement les plus efficaces ;
- l'utilisation de protections doit être modérée en fonction des objectifs de ventilation et d'éclairage naturels ainsi que des coûts et bénéfices escomptés tout au long du cycle de vie du bâtiment ;
- la végétation peut également être un moyen efficace de protéger les vitrages.

Tableau 2.5: Facteurs de réduction des apports de chaleur en fonction du type de protection

Fenêtres protégées	Couleurs	g
Stores extérieurs en toile	Écru	0,28
Stores extérieurs en toile	Aluminium	0,22
Stores intérieurs entièrement baissés	Aluminium	0,45
Stores intérieurs à moitié baissés	Blanc ou crème	0,63
Persiennes entièrement baissées à l'intérieur des fenêtres	Aluminium	0,58
Persiennes entièrement baissées à l'extérieur des fenêtres	Aluminium	0,22

Source: IEPE, 2006a, p. 15.

2.4.2 Changement des vitrages

Changer le vitrage peut permettre de réduire considérablement les apports de chaleur aussi bien par conduction que par radiations, via :

- l'utilisation de matériaux à plus faible conductivité thermique (valeurs U moins élevées) ;
- une baisse de l'émissivité des matériaux et hausse des coefficients de réflexion ;
- double ou triple vitrage, avec un espace rempli d'air ou de gaz noble, type argon entre les vitres.

Tableau 2.6: Valeurs U indicatives selon le type de vitrage

Type de vitrage (clair)	Valeurs U indicatives (W/m ² K)		
Épaisseur	6 mm	12 mm	> 16 mm
Vitrage simple	4,8	—	—
Double vitrage (remplissage air)	3,1	2,8	2,7
<i>Émissivité = 0,2</i>	2,7	2,3	2,1
<i>Émissivité = 0,05</i>	2,6	2,0	1,8
Double vitrage (remplissage argon)	2,9	2,7	2,6
<i>Émissivité = 0,2</i>	2,5	2,1	2,0
<i>Émissivité = 0,05</i>	2,3	1,8	1,7
Triple vitrage (remplissage air)	2,4	2,1	2,0
<i>Émissivité = 0,2</i>	2,1	1,7	1,6
<i>Émissivité = 0,05</i>	1,9	1,5	1,4
Triple vitrage (remplissage argon)	2,2	2,0	1,9
<i>Émissivité = 0,2</i>	1,9	1,6	1,5
<i>Émissivité = 0,05</i>	1,7	1,4	1,3

Source: CIBSE, 2006.

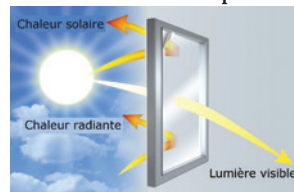
L'impact sur la luminosité naturelle devra ici être considéré. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 4 du premier tome, un double vitrage performant peut permettre de laisser passer 70 % de la lumière visible, contre seulement 37 % des infrarouges.

2.4.3 Films protecteurs

Utiliser des films protecteurs peut être une solution économique et simple pour réduire les apports thermiques et limiter les risques d'éblouissement, en particulier lorsque le vitrage est déjà de bonne qualité.

Au final, le choix du mode de protection des fenêtres devra se faire en fonction de l'impact évalué sur les charges frigorifiques mais également des effets sur le confort visuel des occupants. Les bâtiments disposant de l'air conditionné devront

Illustration 2.31 : Principes de fonctionnement d'un film protecteur



Source: www.filmint.co.nz/ (consultation novembre 2014).

généralement opter pour un changement des vitrages (double ou triple) combiné à un système de protection contre les radiations directes, afin de limiter les échanges thermiques avec l'extérieur. Les autres pourront éventuellement se contenter d'une simple protection contre les radiations solaires, notamment sur les façades exposées Nord et Sud.

Nous avons pu voir dans ce chapitre qu'il existait différentes méthodes pouvant permettre d'accroître l'isolation du bâtiment et de diminuer ainsi les charges frigorifiques totales. Le choix du type d'isolation dépendra notamment :

- de l'identification des principales sources de transfert thermiques dans le bâtiment ;
- du coût et de la faisabilité de chacune des méthodes présentées ci-dessus.

Nous pouvons néanmoins ajouter, pour finir, que d'autres méthodes peuvent permettre de réduire les charges en climatisation. Celles-ci incluent notamment :

- une réorganisation des locaux du bâtiment (voir la partie « zonage » du 1^{er} tome de ce Guide : chapitre 2) en fonction de leur utilisation et de leur exposition aux radiations solaires ;
- si la climatisation et l'air conditionné ne concernent qu'une partie du bâtiment, une bonne isolation des espaces climatisés du reste du bâtiment est nécessaire (isolation des partitions) ;
- isolation éventuelle au niveau des sols ;
- l'étanchement des menuiseries des portes et fenêtres (y compris installation, par exemple, de portes électriques) ;
- le traitement des infiltrations d'air repérées lors du diagnostic.

Illustration 2.32: Produits de traitement des infiltrations d'air



Jonction
panne-membrane



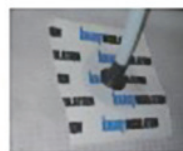
Bande adhésive



Joint trois usages



Membrane étanchéité



Passe câble

Source: Sidler O., 2012, p. 6.

Références

- Chang S. et Krueger B., 2008.** *Proposed Energy Efficiency Modifications to the planned ESE/CSE Building*, disponible via <http://ese.wustl.edu/ContentFiles/Research/UndergraduateResearch/CompletedProjects/WebPages/sp08/StephanieChangBenKrueger/seniordesignfinal2.htm>
- CIBSE, 2006.** *CIBSE Guide Volume A: Design data*, CIBSE, Londres.
- Université de Montfort, 2011.** *Energy in Buildings*, MSc Climate Change and Sustainable Development, Leicester, Royaume-Uni.
- Espace environnement, 2013.** *Rénover pour consommer moins, Guide pratique, Fiche 3: isoler la toiture inclinée*, Service public de Wallonie, disponible via <http://www.wallonie.be/sites/wallonie/files/publications/fiche3.pdf>
- Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2006a.** *Efficacité Énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 1: conception des nouveaux bâtiments*, IEPF, Québec, Canada disponible via <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF>
- Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2006b.** *Efficacité Énergétique de la climatisation en région tropicale, tome 2: Exploitation des installations existantes*, IEPF, Québec, Canada disponible via <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME2.PDF>
- Sidler O., 2012.** *L'étanchéité à l'air des bâtiments*, Enertech, disponible via file:///G:/doc%20ordi%2001092014/ener2050/GUIDE%202/Fiche_EtancheiteT16_24octobre.pdf
- Solener, 2014.** *L'architecture bioclimatique en climat tropical humide: Conception thermique*, Module pour l'Initiative pour la Promotion des Villes Durables en Afrique, Octobre 2014, Lomé, Togo.
- Solener, ADEME, 2014.** *Guide climatisation tertiaire en Guyane*, ADEME Guyane (version d'octobre 2013).

Sites internet (dernière consultation en novembre 2014) et Sources additionnelles des illustrations

- Batirama:** <http://www.batirama.com/article/2109-isolation-thermique-par-l-exterieur-en-renovation.html>
- Batirecover:** http://www.batirecover.com/articles/toiture-chaude-toiture-froide-ou-inversee-definition_3446.htm
- BRE group:** <http://www.bre.co.uk/page.jsp?id=3084>
- Chagnol.fr:** www.chagnol.fr
- Design we need:** <http://www.designweneed.com/enviromental-advantages-of-green-rooftops/>
- Ecocreation, Wordpress.com, via:** www.mon-projet-immo.net/les-ponts-thermiques-563
- Energie Positive:** <http://www.energiepositive.info/fr/reduire-besoin/reduire-ponts-thermiques.html>
- Énergies Renouvelables et Environnement:** <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2012-g01/ponts-thermiques>
- Filmtint Nouvelle-Zélande:** <http://www.filmtint.co.nz/>
- Institut National des Sciences du Bâtiment, États-Unis (National Institute of Building Sciences, Whole Building Design):** <http://www.wbdg.org/resources/coolmetalroofing.php>

Tout sur l'isolation: <http://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Comparer-les-isolants/La-performance-d-un-isolant>

Solvari.be: <http://www.solvari.be/fr/isolation/isolation-du-toit/techniques-isolation-de-toiture>

Unidexe Energy: <http://unidexe-energie-id2890.relaispro.com/>

Chapitre 3

Systèmes d'air conditionné et climatisation

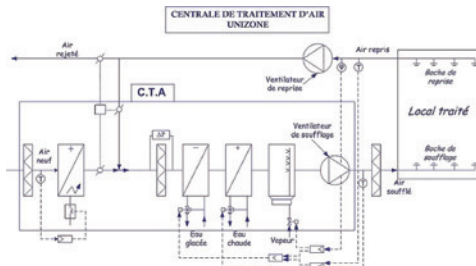
L'air conditionné et la climatisation représentent en régions tropicales une des principales sources de consommation énergétique. À titre d'exemple, ils étaient à l'origine de 50 à 65 % de la demande d'électricité des bâtiments commerciaux en Thaïlande en 2010¹, des chiffres rejoignant ceux de bâtiments similaires audités au Cameroun (60 à 72%)². Si la priorité reste de réduire les charges frigorifiques via une meilleure isolation de l'enveloppe du bâtiment, des modifications apportées au système d'air conditionné et à son fonctionnement peuvent également permettre d'améliorer son efficacité et réduire de manière significative la facture énergétique.

3.1 Rappels des principaux types de climatisation et composants

Nous avons déjà eu l'opportunité de présenter les différents types de climatisation et leurs principes de fonctionnement dans le premier tome de ce Guide (voir chapitre 5). Pour rappel, on distingue globalement quatre catégories de systèmes :

- **Les systèmes centralisés en tout-air** : l'air est d'abord traité dans une centrale avant d'être soufflé dans le local via un réseau de canalisations ou gaines. Ces systèmes peuvent se décliner à débit constant, variable, à simple ou plusieurs gaines et en multizones.

Illustration 3.1 : Principes de fonctionnement d'un système tout-air

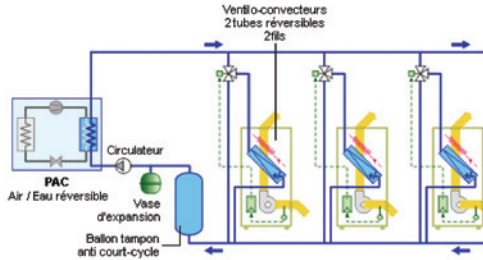


Source: www.thermique-du-batiment.wikibis.com (consultation novembre 2014).

1. Asawutmangkul, A., 2011.
2. Kemajou A. et al., 2012.

- **Les systèmes centralisés air/eau** : l'eau est utilisée pour assurer les fonctions thermiques et l'air pulsé sert au renouvellement d'air hygiénique. Ces systèmes comprennent notamment les ventilo-convecteurs et les éjecto-convecteurs.

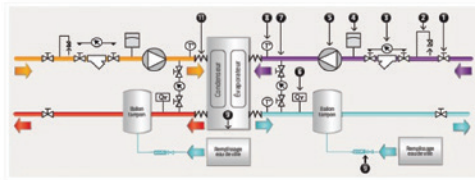
Illustration 3.2: Systèmes à ventilo-convecteur 2 tubes réversibles-2 fils



Source: Université catholique de Louvain, Energie + (consultation novembre 2014).

- **Les systèmes centralisés tout-eau** avec circuits hydrauliques, 2 à 4 tuyaux.

Illustration 3.3: Climatisation avec circuit hydraulique



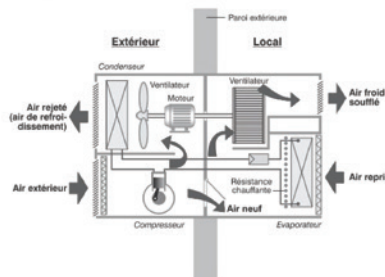
Légende :

- | | | | |
|----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|
| 1. Vanne d'isolement | 4. Vase d'expansion | 7. Manomètre différentiel | 10. Vanne 3 voies |
| 2. Purgeur d'air | 5. Pompe | 8. Thermomètre | 1. Flexible |
| 3. Filtre | 6. Contrôleur de débit | 9. Disjoncteur | |

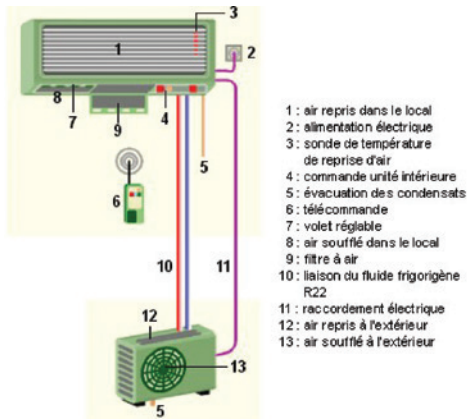
Source: <http://conseils.xpair.com> (consultation novembre 2014).

- **Les climatiseurs individuels (de local)** ou à réfrigération directe, où l'unité de climatisation est placée directement dans l'espace à traiter (système *splits* ou, encore, armoire de climatisation).

Illustration 3.4: Fonctionnement d'un climatiseur de fenêtre



Source: IEPF, 2006b p. 25.

Illustration 3.5: Fonctionnement d'un *split*

Source : energie.wallonie.be (consultation novembre 2014).

L'amélioration des performances du système d'air conditionné dans le cadre d'une réhabilitation du bâtiment devra inclure, d'une part, un processus d'évaluation de l'état du système, et d'autre part, des besoins réels pour assurer le confort des occupants. Le surdimensionnement des capacités installées est un défaut régulièrement constaté qui amène généralement de mauvaises utilisations et/ou un gaspillage énergétique³. Ce problème risque par ailleurs d'être amplifié par la mise en œuvre des mesures présentées dans le chapitre précédent, qui réduiront les charges et nécessiteront potentiellement une réorganisation des installations.

3.2 Stratégie d'efficacité énergétique : étapes et procédures

3.2.1 Zonage thermique

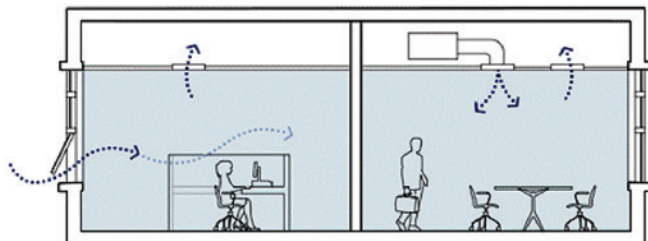
Une réorganisation des locaux peut, dans un premier temps, engendrer d'importantes économies à faibles coûts. Le zonage thermique consiste notamment à réserver les zones les moins exposées aux apports de chaleur (ou les plus aérées) à des utilisations demandant des températures modérées (chambres, salles de travail, etc.). À l'inverse, des locaux pouvant supporter des températures plus élevées, par exemple, ceux dédiés au séchage ou lavage de linge, pourront être placés du côté le plus exposé aux radiations solaires (voir chapitre 2 du premier tome). Les charges frigorifiques se trouveraient ainsi réduites, en limitant les apports de chaleur dans les zones nécessitant un confort optimal.

D'autre part, le zonage doit également permettre le regroupement des locaux en fonction de leurs charges frigorifiques, réduisant ainsi les échanges thermiques entre locaux climatisés et non climatisés et les risques d'inconfort liés aux gradients de

3. IEPF, Fiche technique prisme n° 2, p. 2.

températures et d'humidité à l'intérieur du bâtiment. Cette stratégie pourra enfin être combinée avec la ventilation naturelle de certains locaux (voir partie ventilation naturelle du premier tome de ce Guide pour plus de détails, chapitre 3).

Illustration 3.6: Système de ventilation mixte dans des bureaux



Source: Center for the Built Environment (États-Unis) (consultation du site novembre 2014).

3.2.2 Conseils additionnels: choix des locaux à climatiser, étanchéité et apports de chaleur internes

3.2.2.1 Choix des locaux à climatiser

Si la climatisation des locaux n'est que partielle, plusieurs principes généraux pourront permettre de réduire les charges frigorifiques, notamment :

- Éviter la climatisation de zones avec un fort taux d'ouverture des portes donnant sur l'extérieur (entrée d'air chaud). Règle générale, il est conseillé que le débit d'air d'une pièce traitée ne dépasse pas les 20 m³ par heure⁴ ;
- le ratio de surface vitrée d'une paroi en local climatisé ne doit pas, si possible, dépasser les 33 %, particulièrement en façade Est et Ouest. Sinon, une protection accrue des vitrages sera essentielle⁵ ;
- les zones climatisées doivent être séparées hermétiquement des zones non climatisées pour éviter les échanges thermiques entre les différentes parties du bâtiment. Le zonage thermique peut rendre la réalisation de cet objectif plus aisée ;
- il convient d'éviter la climatisation d'espaces trop importants, soit en privilégiant la ventilation naturelle, soit en segmentant l'espace.

4. IEPF, 2006b, p. 25.

5. IEPF, 2006b, p. 24.

3.2.2.2 Étanchéité des locaux

Il est par ailleurs important de renforcer l'étanchéité des locaux climatisés, en s'assurant en particulier :

- du traitement des portes, fenêtres et persiennes qui se ferment mal ou fonctionnent mal ;
- de l'étanchement des menuiseries des portes et fenêtres ;
- de l'isolation des conduits de transport de l'air qui passent généralement par des zones surchauffées, type cuisine ou extérieur.

3.2.2.3 Limiter les apports de chaleur internes

Il est enfin possible de limiter les apports de chaleur internes par une bonne gestion de l'éclairage et des appareils électriques. Les lampes à incandescence peuvent être remplacées par des lampes fluorescentes à ballasts électroniques ajoutées à des équipements de contrôle. Leur efficacité doit être supérieure à 50 lumens par Watt et l'intensité inférieure à 500 Lux en moyenne⁶. L'installation de brasseurs d'air et ventilateurs de plafond peut permettre d'augmenter la température de consigne d'un ou plusieurs degrés (voir chapitre 3 du premier tome).

3.2.3 Bilan thermique

Recalculer les charges frigorifiques en incluant l'isolation et la réorganisation du bâtiment peut permettre de réduire le dimensionnement des installations et de réaliser ainsi des économies conséquentes. Une méthodologie simple de bilan thermique avait été reprise dans le premier tome de ce Guide (chapitre 5)⁷ ; elle permet d'évaluer les besoins de chaque local en fonction de son utilisation, des taux d'occupation, de son orientation et de l'exposition aux radiations solaires, et de déterminer en fonction des résultats si des changements sont nécessaires.

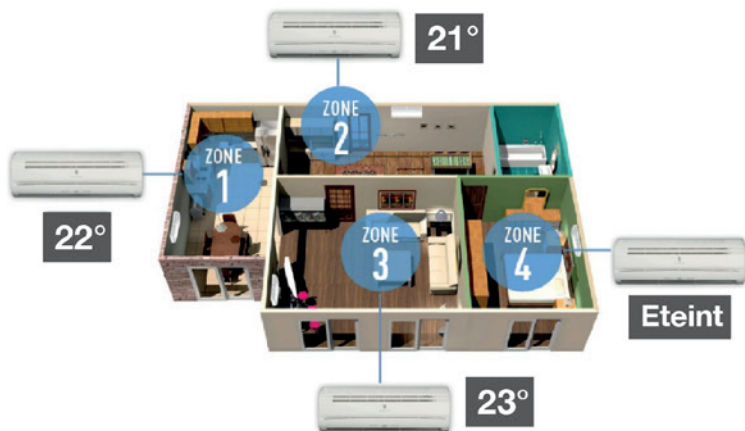
3.2.4 Équilibrage du réseau

Un conditionnement différencié des locaux selon leurs besoins est parfois nécessaire. Cela ne présente pas de problèmes particuliers avec des climatiseurs individuels, ceux-ci pouvant être réglés individuellement.

6. IEPF, 2006b, p. 17.

7. IEPF, 2006a, p. 3-32.

Illustration 3.7: Adaptation de la température de consigne en fonction des pièces du bâtiment, climatiseur de local



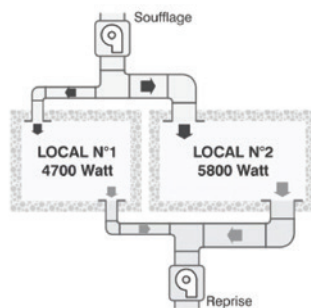
Source: ENERGIES 2050, d'après www.friedrich.com (consultation novembre 2014).

Dans le cadre d'un système centralisé, un rééquilibrage des réseaux peut être nécessaire, notamment lorsque le débit d'air est fixe et que la capacité des conduits est identique, mais cette procédure peut s'avérer très coûteuse. Une alternative consiste à équiper les ventilateurs de moteurs à vitesses variables pilotés par la pression de refoulement⁸ et de gérer ainsi des locaux à régulations différentes⁹.

Lorsque le système est équilibré, un contrôle assidu des températures intérieures, des débits d'eau et d'air dans chaque local permettra de détecter de potentielles défaillances et de mieux réguler le système.

Il convient cependant de vérifier que le déséquilibre thermique entre les différents locaux n'affecte pas le confort des occupants (différences de températures trop élevées entre les locaux) et n'amène pas un gaspillage d'énergie (locaux non isolés entre eux) ou un mauvais fonctionnement des outils de régulation.

Illustration 3.8: Installation centralisée équilibrée



Source: IEPF, 2006b, p. 59.

8. La pression de refoulement est « la plus haute pression atteinte par le fluide frigorigène lors du cycle frigorigène » (Site Xpair), en bars.

9. IEPF, Fiche technique prisme n° 2, p. 2.

3.3 Efficacité des équipements

3.3.1 Changement des installations

Le changement des installations est une solution radicale qui s'imposera principalement si :

- l'analyse thermique du bâtiment a révélé l'inadéquation des capacités existantes aux besoins réels des occupants et que des mesures d'adaptation s'avèrent trop coûteuses ;
- les installations sont anciennes et obsolètes d'un point de vue efficacité et rendements ;
- les conditions de viabilités financière et environnementale (bilan carbone, gestion des déchets, etc.) sont remplies.

Dans ce cas, le remplacement devra notamment tenir compte :

- **Du type d'installation recommandé** : les espaces avec faibles charges frigorifiques pourront se contenter d'un système tout-air, les immeubles ou supermarchés d'un air-eau tandis que les climatiseurs de local seront adaptés pour les restaurants, boutiques ou résidences¹⁰ (voir premier tome pour plus de détails sur le choix d'un système, chapitre 5) ;
- **Du coefficient de performance** (ratio énergie frigorifique produite/énergie électrique consommée) des installations, à comparer aux meilleures performances des appareils disponibles.

L'efficacité énergétique des climatisations s'est en effet considérablement améliorée ces dernières années et il est probable qu'un remplacement devienne rentable à court ou moyen terme, y compris du point de vue environnemental (emprunte carbone de l'opération et énergie grise de l'installation compensées par les économies réalisées en consommation d'énergie).

Tableau 3.1 : Coefficients de performances recommandés (2006)

Type d'équipement	COP minimum recommandé [kWt/kWe]
Climatiseurs de fenêtre	2,8
Split systèmes :	
• Jusqu'à 4 kWt	2,8
• Supérieur à 4 kWt	3,0
Conditionneurs d'air monobloc :	
À refroidissement par air	
• Jusqu'à 10 kWt	2,5
• Supérieur à 10 kWt	2,9
À refroidissement par eau	3,5

Source : IEPF, 2006b, p. 130

10. IEPF, 2006b.

Tableau 3.1 : Coefficients de performances recommandés (2006) (suite)

Type d'équipement	COP minimum recommandé [kWt/kWe]
Groupes de production d'eau glacée à pistons:	
À refroidissement par air	
• Jusqu'à 100 kWt	3,0
• Supérieur à 100 kWt	3,0
À refroidissement par eau	
• Jusqu'à 10 kWt	3,7
• Supérieur à 10 kWt	4,0
Groupes de production d'eau glacée à vis:	
À refroidissement par air	
	4,5
À refroidissement par eau	
• Jusqu'à 800 kWt	4,6
• Supérieur à 800 kWt	5,0
Groupes de production d'eau glacée centrifuges:	
À refroidissement par air	
• Jusqu'à 800 kWt	3,8
• Supérieur à 800 kWt	3,8
À refroidissement par eau	
• Jusqu'à 800 kWt	4,5
• Supérieur à 800 kWt	4,7

Source: IEPE; 2006b, p. 130

3.3.2 Isolation thermique des canalisations et tuyauteries

Le réseau de distribution d'eau et les conduits d'air sont sources d'échanges thermiques qui peuvent être atténués par une meilleure isolation des canalisations¹¹ (attention cependant aux risques de condensation pour les circuits d'eau glacée). Des outils d'analyses à infrarouges peuvent être utilisés pour contrôler la thermie de ces réseaux lorsque ceux-ci sont cachés dans les parois, les sols ou dans des espaces non accessibles. Un contrôle du réseau permettra par ailleurs de repérer d'éventuelles défaillances (par exemple, fuites).

Illustration 3.9: Isolation des tuyaux



Source: www.maisonbrico.com (consultation novembre 2014).

11. Attention cependant au risque de condensation pour les réseaux d'eau glacée, l'ajout d'un pare-vapeur peut dans ce cas être nécessaire.

Tableau 3.2: Conseils d'isolation

Partie à isoler	Techniques conseillées
Conduites frigorifiques d'aspiration	Épaisseur d'armaflex normalisée
Tuyauteries d'eau glacée	Coquilles de polystyrène / Mousse de polyuréthane injectée in situ, avec écran pare-vapeur en bitume + protection en aluminium
Réseau de gaine	Tôle d'acier galvanisée, calorifuge en laine de verre simple protégée par un pare-vapeur.

Source: IEPF, Fiche technique prisme n° 2, p. 2.

3.3.3 Installation de pompes à haute efficacité énergétique

Le remplacement des pompes du climatiseur par un matériel plus efficace peut amener des réductions conséquentes de la consommation énergétique. Il est également possible de contrôler la vitesse du moteur électrique avec un entraînement à fréquence variable ou un convertisseur de fréquence.

Illustration 3.10: Fonctionnement d'un convertisseur de fréquence

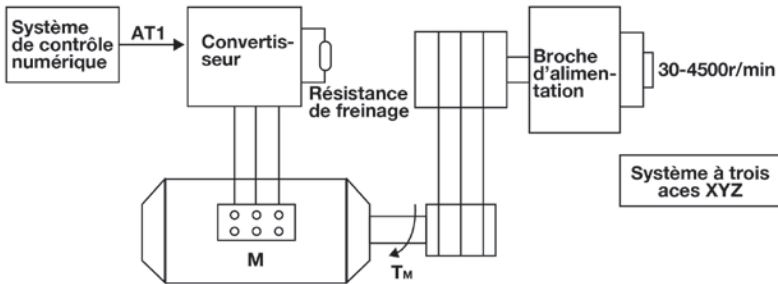


Schéma du système électrique

Source: www.acdrive-china.com (consultation novembre 2014).

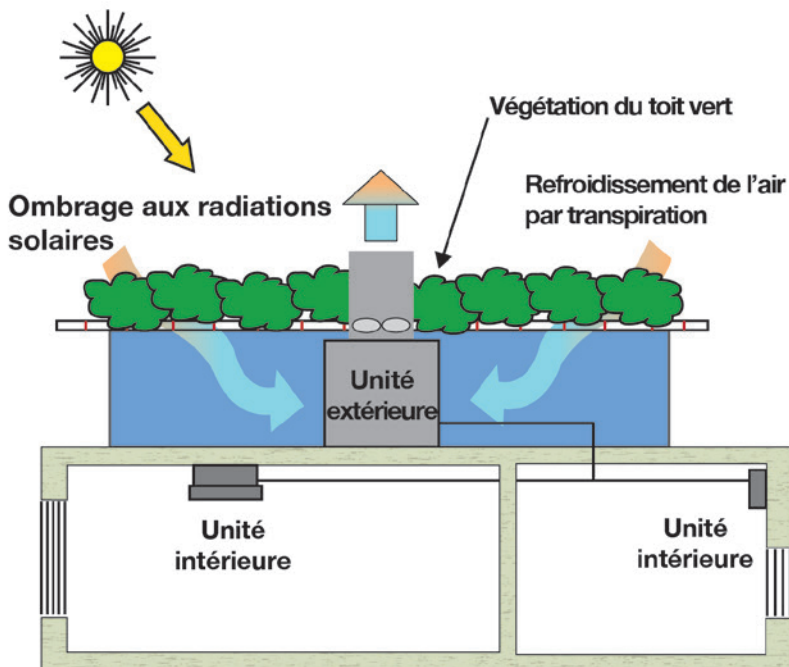
Ces appareils permettent de réguler la vitesse de rotation fournie au moteur de la pompe en fonction de la charge, évitant notamment que la pompe fonctionne à plein régime même lorsque cela n'est pas nécessaire. Cela pourrait permettre de diminuer sa consommation d'énergie de 15 à 70 %¹².

12. www.c-nergie.com (consultation novembre 2014).

3.3.4 Placement des unités extérieures

Il sera également important d'éviter l'exposition des condenseurs aux rayonnements solaires, aux vents et aux pluies en les plaçant à l'ombre, sur des surfaces gazonnées, en hauteur ou sous un auvent, afin de faciliter l'évacuation de chaleur. La végétation et les toits verts peuvent être utilisés à cet effet.

Illustration 3.11 : Unité extérieure protégée par toit vert



Source: ENERGIES 2050, d'après Wang F et Yoshida H., 2012, p. 2.

P o i n t s
d e
r e p è r e

3.3.5 Accroître les performances des climatiseurs individuels

Les climatiseurs individuels ont l'avantage de présenter une certaine flexibilité et de pouvoir être remplacés facilement lorsque cela s'avère nécessaire (usure élevée du bloc, inadéquation aux besoins ou coefficients de performance trop bas). Des modèles plus performants ont ainsi récemment été introduits: double compresseur, centrifuge à vitesse variable ou encore systèmes utilisant des réfrigérants avec un impact réduit sur l'environnement.

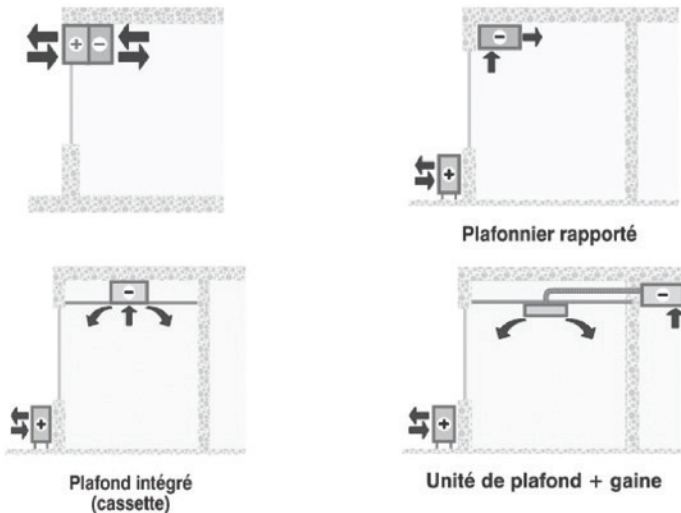
Le choix du climatiseur devra également s'effectuer en fonction de la puissance recherchée, qui dépendra des charges thermiques totales estimées (voir chapitre 5, premier tome). Le tableau suivant donne des indications sur les différentes puissances des systèmes de climatisation individuelle.

Tableau 3.3: Puissance des climatiseurs individuels

Type de climatiseur	Puissance en kW	
Monoblocs	2 à 4	
Climatiseurs de fenêtre	2 à 7	
Consoles	2 à 7	
Splits systems ou multi-split	2 à 15	
Armoires de climatisation	Monobloc	7 à 120
	Roof top	7 à 350
	Condensation par eau	7 à 140

Source: IEPE, 2006b, p. 24-25.

Au-delà de la puissance, la configuration d'installation des climatiseurs individuels joue également un rôle dans leurs performances et leurs capacités à délivrer le confort thermique désiré. Plus d'informations sur ce point sont disponibles dans le premier tome de ce Guide, partie climatisation (chapitre 5).

Illustration 3.12: Différentes configurations des climatiseurs

Source: IEPE, 2006b.

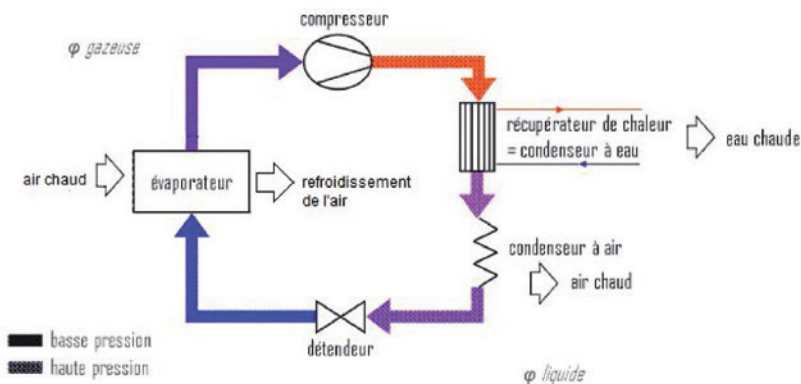
Il est important de rappeler que lorsque le système actuellement en place est récent, il n'est généralement ni économique ni cohérent d'un point de vue environnemental de le remplacer. Dans ce cas, une conversion pour opérer avec des fluides sans CFCs¹³ peut représenter une avancée, même si cela peut réduire la capacité générale du système.

13. Chlorofluorocarbones, gaz fluorés faisant partie des gaz à effet de serre.

3.3.6 Installer un système de récupération de chaleur

Installer un récupérateur de chaleur au niveau des compresseurs, notamment pour la production d'eau chaude, peut permettre non seulement de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage de l'eau mais également de réduire les charges frigorifiques.

Illustration 3.13: Principes de fonctionnement d'un groupe frigorifique avec récupérateur de chaleur



Source : www.nr-pro.fr (consultation novembre 2014).

Une récupération des frigories sur l'air extrait peut par ailleurs permettre de pré-refroidir l'air neuf entrant, un résultat également obtenu en installant des systèmes de refroidissement adiabatique ou par évaporation (voir premier tome pour plus de détails, chapitre 3).

3.4 Régulation, maintenance et entretien

Une fois le système installé, une bonne gestion des installations peut amener une réduction significative de la facture énergétique. Cela passe notamment par de meilleures méthodes de contrôle, de régulation et d'entretien.

P o i n t s
d e
r e p è r e

3.4.1 Contrôler le temps d'utilisation

Il est important d'adapter l'utilisation du système d'air conditionné à l'occupation prévisionnelle des locaux en évitant, par exemple, que le système reste en fonction la nuit et les week-ends dans des bureaux. Cette adaptation peut, selon certaines estimations, amener des réductions de l'ordre de 15 à 30 %¹⁴ sur la consommation totale du système. Dans ce cas, les installations doivent être redémarrées de 1 à 3 heures (suivant la puissance) avant l'arrivée des occupants et les volets d'air frais peuvent être fermés une demi-heure avant leur départ.

14. IEPF, 2006b, p. 75.

Cette pratique est notamment conseillée lorsque des périodes d'inoccupation occurrent pendant la journée : à ces horaires-là, le tarif des fournisseurs d'électricité est en général le plus élevé et les gains économiques potentiels sont donc considérables.¹⁵

Plusieurs outils peuvent aider à réduire le temps d'utilisation des climatiseurs :

- installation de **minuteries** régulant leur temps de fonctionnement, pouvant parfois être placées directement sur l'alimentation électrique des climatiseurs individuels ;
- Installation de **compteurs énergétiques visibles** par les occupants afin de les sensibiliser à la consommation liée à l'utilisation des climatiseurs ;
- placement d'un **compteur horaire** sur le compresseur : cela donne une information visuelle aux occupants et peut les alerter en cas d'heures d'opérations supérieures à celles requises au vu des taux d'occupation des locaux. Il peut également servir d'outil pour l'entretien périodique des compresseurs.
- Pour les climatiseurs centralisés, installation de **compteurs permettant d'étudier la fréquence d'utilisation** des pompes ou des compresseurs.

Illustration 3.14 : Minuterie sur prise électrique



Source: <http://maison-ecologique.ecologie-shop.com/programmable-economie-programmateur-hebdomadaire-digital.html> (consultation novembre 2014).

Illustration 3.15 : Compteur horaire encastrable pour compresseur



Source: www.underwater.fr (consultation novembre 2014).

Dans le cas où le fonctionnement du système doit être continu, il sera alors préférable en période inoccupée de le faire passer en mode recirculation de l'air et de limiter l'usage des ventilateurs.

3.4.2 Régulation du système

Une meilleure régulation des températures (températures de consigne, de l'eau glacée pour les systèmes à eau, températures d'évaporation ou, encore, de condensation) peut également permettre de réduire la consommation énergétique.

Les températures de consigne peuvent être ajustées en fonction de la température extérieure, via une loi de compensation, ou en fonction des besoins terminaux, une solution s'appliquant mieux aux bâtiments dont les locaux présentent des besoins très différents.

Pour les climatiseurs de local mais également pour la plupart des systèmes centralisés, il convient néanmoins d'adapter en partie la température de consigne aux températures extérieures, si possible avec une différence maximum de 6 °C, allant jusqu'à 12 °C en cas de fortes chaleurs.

15. IEPF, 2006b.

Tableau 3.4: Adaptation de la température de consigne aux températures extérieures

Température extérieure	31 °C	35 °C	40 °C
Température intérieure	25 °C	26 °C	28 °C
Écart	6 °C	9 °C	12 °C

Source: IEPF, 2006b, p. 74.

La température de consigne devra par ailleurs être réglée au niveau maximum assurant le confort thermique des occupants et pourra être ajustée jusqu'à 4 °C à la hausse en cas de présence d'un ventilateur de toit. En période inoccupée, et si le système reste en fonctionnement, il sera possible d'augmenter la température de consigne de 25 à 28 °C, par exemple.¹⁶

Concernant la température de l'eau glacée servant au refroidissement dans un système air eau ou toute-eau, celle-ci peut être accrue à un niveau situé entre 6 et 9 °C dans les climats tropicaux humides¹⁷. Un accroissement de 3 °C de cette température peut ainsi amener des économies d'énergies à hauteur de 10 %¹⁸.

Par ailleurs, il est conseillé:

- d'utiliser un seul thermostat pour commander en séquence les volets d'air neuf et la batterie de refroidissement¹⁹;
- de relocaliser les appareils de contrôle afin d'obtenir les meilleures performances possibles. Le thermostat doit par exemple être placé dans un endroit représentatif des températures des locaux, loin des zones d'apports thermiques et des zones de soufflage;
- de réduire les débits en cherchant à satisfaire aux conditions moyennes de climatisation et non critiques;
- de choisir un système de régulation à 2 étages: un pour la température du local climatisé, un autre pour le contrôle du fonctionnement des équipements centraux de froid;
- de calibrer les appareils et d'effectuer une vérification régulière des appareils de contrôle;
- d'installer des systèmes de contrôle par zone et non pour l'ensemble du bâtiment.

P
o
i
n
t
s
d
e
r
e
p
è
r
e

16. IEPF, Fiche technique prisme n° 2 (sans date).

17. IEPF, Fiche technique prisme n° 2 (sans date).

18. IEPF, 2006b, p. 74.

19. IEPF, Fiche technique prisme n° 2 (sans date).

Encadré 3.1 : Mise en place d'une Gestion Technique du Bâtiment (GTB)

Une GTB est un système informatique centralisé qui permet de superviser l'ensemble des équipements techniques installés dans le bâtiment et d'en assurer notamment la gestion et le contrôle. Dans le cadre des climatisations, la mise en place d'une GTB, avec un cahier des charges détaillé et un suivi assuré par du personnel qualifié, pourra permettre de réaliser d'importantes économies. Ces économies s'appliqueront également aux appareils électriques ou encore à l'éclairage^a.

a. ADEME, EDF, 1998.

3.4.3 Entretien

Un bon entretien des échangeurs est nécessaire non seulement pour maintenir l'efficacité du système (problèmes de corrosion, condensation, pannes récurrentes, etc.) mais également pour limiter le développement d'effets négatifs pour le confort et la santé des occupants. La légionellose, causée notamment par le développement de bactéries (légionelles) dans les tours aéroréfrigérantes, chargées du refroidissement de l'eau chaude dans les systèmes de climatisation, est un exemple des risques encourus, au même titre que les maladies respiratoires.

Un bon entretien des filtres sera dans ce cadre une priorité: ceux-ci doivent être nettoyés tous les uns à trois mois, en fonction de « l'agressivité » de l'ambiance²⁰. L'air neuf introduit dans les systèmes est en effet chargé d'impuretés et de poussières qu'il faut filtrer afin de préserver le confort des occupants ainsi que le bon fonctionnement du système et des équipements. Une planification d'entretien adapté prévoyant le nettoyage-soufflage ou remplacement des filtres est donc indispensable.

Illustration 3.16: Changement des filtres sur climatiseur individuel split



Source: www.climatisationmaison.com (consultation novembre 2014).

20. IEPF, 2006b, p. 58.

D'autres procédures incluent notamment le dépoussiérage du condenseur, le nettoyage des unités extérieures et intérieures, le contrôle de l'étanchéité du cuir d'air, du positionnement volet d'air neuf et de l'évacuation des condensats et nettoyage du bac, le serrage des vis et des écrous, le contrôle du thermostat, des fuites et du niveau d'huile. Même si les recommandations d'entretien et les instructions à suivre sont généralement fournies dans les manuels des fabricants, il est fortement conseillé aux maîtres d'ouvrages de souscrire à des contrats d'entretien et de maintenance complets, qui allongeront la durée de vie des équipements et limiteront les gaspillages énergétiques.

Encadré 3.2: Contrat de maintenance avec clause énergie

L'objectif d'un contrat de maintenance est de maintenir les performances des installations et limiter les pannes, avec le respect des procédures d'entretien. Le confort des occupants est amélioré alors que les coûts, la consommation d'énergie et donc les émissions de gaz à effet de serre s'en trouvent réduits. Ces contrats peuvent également être couplés avec une clause « énergie » qui prévoit le partage des économies ou excès de consommation d'énergie, par rapport à une valeur de base prédéfinie, entre le maître d'ouvrage et l'organisation chargée de l'entretien. Toutes les parties sont ainsi incitées à économiser sur l'énergie consommée.

Le tableau ci-dessous donne des indications sur les conséquences potentielles d'un mauvais entretien d'un condenseur: en s'encrassant, les échanges d'air avec l'extérieur sont perturbés et la température de condensation augmente. La puissance frigorifique diminue donc parallèlement à une hausse de la consommation énergétique, affectant doublement le Coefficient de Performance de l'installation.

Tableau 3.5: Dégradation des performances d'un compresseur en fonction de la température de condensation

	SITUATION A	SITUATION B
Fluide frigorigène	R22	R22
Température d'évaporation	-10°	-10°
Température de condensation	35°	45°
Sous-refroidissement	5°	5°
Température gaz aspirés	0°	0°
Puissance frigorifique	101,5 kW	88,04 kW
Consommation électrique	33,2 kW	36,75 kW
Intensité à 400 V	70 A	75 A
COP	3,06	2,4

Source: IEPF, 2006b, p. 8.1

3.5 Analyse des bénéfiques

L'analyse des bénéfiques potentiels des différentes mesures proposées ci-dessus dépendra de la situation du bâtiment et de sa demande en air conditionné. À titre d'exemple, dans le cadre de l'étude réalisée sur 42 bâtiments commerciaux à Douala et Yaoundé (Cameroun)²¹, des économies potentielles de l'ordre de 30 % sont estimées via un ensemble de mesures incluant :

- minuteurs programmables ;
- régulation des températures ;
- suppression de l'air conditionné dans les pièces telles que les ascenseurs ;
- arrêt des systèmes de production de chaleur dans les espaces climatisés ;
- réduction du taux de renouvellement d'air ;
- nettoyage des filtres ;
- amélioration du facteur de puissance.

Encadré 3.3 : Problèmes techniques courants et solutions (IEPF, fiche technique Prisme n° 2)

N°	Problèmes	Solutions techniques
1	Surdimensionnement des systèmes de CVCA	<ul style="list-style-type: none"> • Adapter les méthodes de calculs de bilans thermiques aux conditions climatiques locales ; • Respecter les consignes définies dans le cahier des charges ; choisir la puissance du climatiseur égale ou légèrement supérieure à celle obtenue par le dimensionnement.
2	Normes de confort thermique et équipements inadaptés aux conditions climatiques locales	<ul style="list-style-type: none"> • En plus de la température extérieure et intérieure, tenir compte des critères suivants pour sélectionner un système : <ul style="list-style-type: none"> — En climat tropical humide : puissance frigorifique (charge calorifique totale) et puissance de déshumidification (chaleur latente totale) ; utiliser des condenseurs à air ; — En climat tropical sec : puissance calorifique totale ; utiliser des tours de refroidissement.
3	Méconnaissance des critères de sélection	<ul style="list-style-type: none"> • Se référer aux catalogues du constructeur pour sectionner les systèmes ; • Préférer les installations de climatisation avec option « production d'eau chaude sanitaire » (hôtels, restaurants).
4	Systèmes inadaptés aux applications	<ul style="list-style-type: none"> • Système tout-air (le plus fonctionnel) : bâtiments à faible charge frigorifique ; • Système air/eau (le plus économique) : immeubles à bureaux, hôtels, appartements, hôpitaux et supermarchés ; • Système tout-eau : hôtels, appartements, hôpitaux, écoles et boutiques ; • Système à réfrigération directe : salons de beauté, restaurants, boutiques, résidences.

21. Kemajou A. et al., 2012

N°	Problèmes	Solutions techniques
5	Absence de code d'efficacité énergétique	<ul style="list-style-type: none"> Adapter et utiliser les codes d'efficacité énergétique existants en zone tropicale (code jamaïcain, ivoirien et ASHRAE).
6	Condensateurs des climatiseurs exposés à un rayonnement solaire direct	<ul style="list-style-type: none"> Installer les systèmes de climatisation à l'ombre, sur des surfaces gazonnées, ou les placer en hauteur; les protéger par un auvent de l'impact direct du soleil sans gêner l'évacuation de la chaleur.
7	Inadaptation des besoins de renouvellement d'air aux besoins d'air élevé	<ul style="list-style-type: none"> Dans les halls d'entrée climatisés: supprimer les apports d'air neuf; créer une légère suppression qui s'opposera à l'entrée d'air extérieur; Dans les locaux publics d'un immeuble: moduler la quantité d'air neuf par l'intermédiaire d'un vérin commandé par une minute; Optimiser l'admission d'air neuf en fonction du profil d'occupation.
8	Isolation insuffisante des tuyauteries de transport des fluides et des conduits d'air	<ul style="list-style-type: none"> Isoler les conduites frigorifiques d'aspiration avec une épaisseur d'armaflex normalisée. Isoler les tuyauteries d'eau glacée par des coquilles de polystyrène ou par la mousse de polyuréthane (injectée in situ) revêtue de bitume comme un écran pare-vapeur et protégée par une tôle en aluminium; En climat tropical humide, le réseau de gaine sera en tôle d'acier.
9	Dispositifs de chauffage dans les saisons de climatisation	<ul style="list-style-type: none"> Inutiles en climatisation de confort en climat tropical moyennant quelques aménagements.
10	Système de régulation médiocre	<ul style="list-style-type: none"> Choisir un système de régulation à deux étages: 1) contrôle du fonctionnement des équipements centraux de production de froid; 2) contrôle de la température de la pièce climatisée; Vérifier périodiquement le système de régulation, calibrer les appareils, vérifier le degré d'autorité; Placer le thermostat dans un endroit représentatif de la température moyenne (éloigné des sources chaudes ou froides).
11	Absence d'une programmation des systèmes de CVCA	<ul style="list-style-type: none"> Équiper le(s) ventilateur(s) avec un moteur à vitesse variable piloté par la pression de refoulement, pour une centrale de climatisation traitant l'air de plusieurs locaux avec des programmations différentes (halls d'entrée, bureaux, magasins, restaurants, etc.); Arrêter le système de climatisation pendant la nuit. Programmer le démarrage des systèmes de CVCA afin d'éviter les pointes d'intensité. Moduler la température d'eau glacée de 6° à 9°; Utiliser un seul thermostat pour commander en séquence les volets d'air neuf et les batteries de refroidissement; Utiliser les pompes à débit variable pilotées soit par la température de retour d'eau glacée, soit par la pression.
12	Pas de récupération des frigories entre l'air extrait et l'admission d'air neuf	<ul style="list-style-type: none"> Récupérer les frigories sur l'air extrait pour prérefroidir l'air neuf entrant.
13	Pas de récupération sur les compresseurs pour la production d'eau chaude	<ul style="list-style-type: none"> Produire de l'eau chaude sanitaire à partir de la chaleur dégagée par le compresseur au moyen d'un échangeur de chaleur.

Références

ADEME, EDF, 1998. *Climatiser dans les DOM, Guide pratique pour le tertiaire.* Série de sept livrets réalisés par Solener.

Asawutmangkul, A., 2011. *Best Practices - Room Air Conditioners Standards and Labeling: Thailand,* Bureau of Energy Efficiency Promotion, Thailand, APEC, Energy Efficiency Air Conditioners and Transformers Workshop, Seoul.

Horta Nogueira Luiz A., 2013. *Package of Measures to Promote Efficient Air-Conditioning,* ADEME et World Energy Council, «Project on energy efficiency policies», disponible via http://www.wec-policies.enerdata.eu/Documents/cases-studies/Measures_to_promote_efficient_air_conditioning.pdf

Institut de l'énergie et de l'Environnement de la Francophonie, s.d. *Fiche technique prisme n° 2, les systèmes de ventilation et climatisation,* disponible via <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/climatisation.pdf>

Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2006a. *Efficacité énergétique de la climatisation en régions tropicales, tome 1: conception des nouveaux bâtiments,* IEPF, Québec, Canada, disponible via <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME1.PDF>

Institut de l'énergie et de l'Environnement de la Francophonie, 2006b. *Efficacité énergétique de la climatisation en régions tropicales, tome 2: Exploitation des installations existantes,* IEPF, Québec, Canada, disponible via <http://www.ifdd.francophonie.org/docs/prisme/eeTOME2.PDF>

Kemajou A., Mba L. et Pako Mbou G., 2007. *Energy efficiency in air-conditioned buildings of the tropical humid climate,* Laboratory of Refrigeration and Air Conditioning, Université de Douala, Cameroun, disponible via http://www.arparess.com/Volumes/Vol11Issue2/IJRRAS_11_2_07.pdf

Wang F. et Yoshida H., 2012. *Improving Air-Conditioners' Energy Efficiency Using Green Roof Plants, Energy Efficiency - A Bridge to Low Carbon Economy,* Dr. Zoran Morvaj (Ed.), ISBN: 978-953-51-0340-0, InTech, disponible via www.intechopen.com/books/energy-efficiency-a-bridge-to-low-carbon-economy/improve-energy-efficiency-of-air-conditioner-using-green-roof

Sites internet (dernière consultation en novembre 2014)

et Sources additionnelles des illustrations

Acdrive China : <http://www.acdrive-china.com/>

c-nergie : <http://www.c-nergie.com>

Cellule de Recherche en Architecture et Climat de l'Université Catholique de Louvain, Département de l'énergie et du Développement durable de Wallonie, Site Energie + : <http://www.energieplus-lesite.be>

Centre pour l'Environnement Bâti (États-Unis) - Center for the built environment : <http://www.cbe.berkeley.edu/>

- Climatisation maison :** <http://www.climatisationmaison.com/Filtre-climatisation.html>
- Portail de l'énergie en Wallonie :** <http://energie.wallonie.be/fr/index.html?IDC=6018>
- Friedrich :** <http://www.friedrich.com/products/commercial/ductless-split-systems/wall-mounted>
- Maison bricolage :** <http://www.maisonbrico.com/conseils-bricolage/isolation-tuyauteries-par-manchons-adhesifs,333.html>
- Maison écologique :** <http://maison-ecologique.ecologie-shop.com/programmable-econome-programmateur-hebdomadaire-digital.html>
- NR Pro :** <http://www.nr-pro.fr/economie-d-energie/recuperateur-chaaleur-groupe-froid-et-certificat-d-economie-d-energie-CEE>
- Portail expert de la consommation énergétique :** <http://conseils.xpair.com>
- Thermique du bâtiment wikibis (icefreeze) :** <http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/climatisation.php>
- Underwater :** <http://www.underwater.fr/FicheProduit.asp?NumProduit=423>

Chapitre 4

Éclairage, eau et énergies renouvelables

Si la réduction des charges en air conditionné reste une priorité du bâtiment durable en régions tropicales, d'autres domaines présentent également des opportunités sensibles de réduction en consommation d'énergie et ressources. Ces domaines peuvent être divisés en trois catégories :

- éclairage artificiel, appareils électriques et chauffe-eau ;
- gestion de l'eau ; et
- utilisation des énergies renouvelables.

Nous nous concentrerons ici sur les spécificités de chaque domaine dans le cadre d'une réhabilitation. Plus d'explications peuvent être trouvées dans les chapitres Éclairage (chapitre 4), Énergies renouvelables (chapitre 6) et Gestion de l'eau (chapitre 7) du premier tome de ce Guide.

4.1 Gestion de l'éclairage

Il existe un certain nombre de méthodes et stratégies pouvant être utilisées pour réduire la consommation d'électricité liée à l'éclairage. Celles-ci incluent notamment :

- favoriser l'entrée de lumière naturelle dans le bâtiment ;
- limiter les gaspillages via un meilleur contrôle ; et
- utiliser des ampoules à haute efficacité énergétique.

Le choix de la stratégie à adopter dépendra d'un diagnostic précis des installations et de la qualité de l'éclairage dans le bâtiment. Cet état des lieux comprendra entre autres un inventaire des ampoules, luminaires et méthodes de contrôle existantes, un audit de consommation, mais également un ensemble de mesures et vérifications permettant de détecter :

- des locaux aux niveaux d'éclairage inadaptés par rapport à l'utilisation qui en est faite ;
- des zones à variations lumineuses trop élevées, créant des risques d'inconfort visuel et éblouissements (voir tableau ci-dessous) ;
- d'éventuels gaspillages provenant d'une mauvaise intégration de l'éclairage naturel et d'un manque de contrôle ;
- des obstructions à la lumière du jour (par exemple, meuble devant une fenêtre).

Tableau 4.1 : Exemples de niveaux d'éclairement à maintenir et valeurs d'éblouissement à ne pas dépasser, bâtiments non domestiques (normes européennes)

Type d'activité	Luminance conseillée	Luminance des zones environnantes
Écriture	500 lux	300 lux
Dessin industriel	750 lux	500 lux
Salle de réunion	500 lux	300 lux
Réception	300 lux	200 lux
Archives	200 lux	200 lux
Classement	300 lux	200 lux

Source: Sonepar, fiche Blueway n° 3 (consultation novembre 2014)

En fonction des résultats, il conviendra de prendre une ou plusieurs des mesures présentées ci-dessous.

4.1.1 Améliorer l'entrée de lumière naturelle

Différents leviers vont permettre d'améliorer l'éclairage naturel d'un bâtiment existant :

- **Le type de vitrage utilisé** qui permet de réguler l'entrée de lumière dans le bâtiment ;

Tableau 4.2: Exemple de coefficients de correction en fonction du type de matériel

Matériel	Facteur de correction
Vitre transparente – 6 mm	0,8
Vitre teintée en gris – 6 mm	0,39
Vitre teintée en vert – 6 mm	0,66
Vitre à fort coefficient de réflexion – 6 mm	0,18
Double vitrage, vitres transparentes – 6 + 6 mm	0,65
Double vitrage, vitre réfléchissante et vitre transparente – 6 + 6 mm	0,26
Double vitrage, vitre fortement réfléchissante et vitre transparente – 6 + 6 mm	0,15

Source: Université De Montfort, 2011

- **Les étagères à lumière** (plateau recouvert d'un film réfléchissant, type aluminium) qui peuvent amener, sous certaines conditions, une meilleure répartition lumineuse mais peuvent diminuer également la luminance naturelle totale reçue par le local (voir chapitre 4 du premier tome) ;

Illustration 4.1 : Étagère à lumière



Source: www.tubeliteinc.com (consultation novembre 2014).

- **Les finitions des espaces intérieurs**: une surface claire présentera des coefficients de réflexion plus élevés, avec pour résultat une meilleure distribution et qualité d'éclairage au sein des locaux ;

Tableau 4.3 : Facteur de réflexion (p , en proportion du rayonnement visible) des couleurs

Couleur	Réflectance	Couleur	Réflectance
Blanc très clair, plâtre	$p = 0,8$	Briques (selon couleurs)	$p = 0,3$ à $0,5$
Blanc (général)	$p = 0,7$ à $0,8$	Gris (selon clarté)	$p = 0,2$ à $0,4$
Couleurs très claires	$p = 0,7$	Couleurs vives	$p = 0,3$
Jaune ou vert clair	$p = 0,5$	Chêne	$p = 0,2$
Béton	$p = 0,4$	Acajou, couleurs foncées, vitrages	$p = 0,1$

Source: Site Xpair, portail de la performance énergétique (consultation novembre 2014).

- **Le type de protections contre les radiations**, qui peuvent être modulées en fonction des besoins : stores, auvents, rideaux, surplombs, etc. ;

Illustration 4.2: Variation des coefficients de transmission lumineuse d'un store vénitien de 16 mm



Source: Université catholique de Louvain, Énergie + (consultation novembre 2014).

- **Le déplacement de blocages** éventuels à l'entrée de lumière naturelle (exemples : meubles, armoires).

4.1.2 Efficacité énergétique

En complément de ces mesures, l'efficacité énergétique de l'éclairage artificiel du bâtiment peut être améliorée, notamment en changeant les ampoules utilisées ou les luminaires.

Tableau 4.4: Efficacité énergétique des différentes ampoules et principes de fonctionnement

Ampoules	Efficacité énergétique
Ampoules fluocompactes et fluorescentes	Utilisent environ 80 % d'énergie en moins que les ampoules à incandescence, avec une durée de vie 6 à 10 fois supérieure
LED	Économies en énergie même si l'efficacité varie en fonction des modèles et matériaux
Ampoules halogènes (économiques)	20 à 50 % d'énergie économisée comparée aux ampoules halogènes traditionnelles
Halogènes (conventionnelles)	Rendement lumineux et durée de vie multipliés par deux par rapport aux ampoules à incandescence
Ampoules à incandescence	Énergivores, taux de transformation de l'énergie en lumière visible inférieur à 5 %, durée de vie courte (1000 h environ)

Source: chiffres ADEME parue sur mamaisoneconomique.com (consultation novembre 2014).

À luminosité égale et comparées aux ampoules à incandescence, les ampoules fluorescentes peuvent ainsi permettre de réduire la consommation d'énergie de 80 %, les halogènes montrant des performances intermédiaires.

L'efficacité énergétique des ampoules fluorescentes dépendra également du type de ballast utilisé. Le ballast est l'élément permettant de fournir la haute tension d'amorçage nécessaire à l'allumage du tube et permet de limiter le courant utilisé une fois le tube allumé.

Tableau 4.5: Coûts et efficacité lumineuse des différents types d'ampoules à incandescence (T5, T8 et T12) en fonction du ballast

Système	Watts	Lumens par Watt	Rendement lumineux (flux initial)	Coût d'utilisation/an (5\$/kW; 0,05\$/kWh à 4 000 h/an)	kWh/m ²	Coût d'utilisation/m ²
Lampe T-12 ES (écoénergétique) et ballast électromagnétique standard	81	54	4 370	25,92\$	66,17	5,29\$
Lampe T-12 ES et ballast électromagnétique ES	74	59	4 370	23,68\$	60,45	4,84\$
Lampe T-8 et ballast FFB	51	89	4 543	16,32\$	40,07	3,21\$
Lampe T-8 et ballast FBO	59	90	5 310	18,88\$	39,66	3,17\$

Tableau 4.5: Coûts et efficacité lumineuse des différents types d'ampoules à incandescence (T5, T8 et T12) en fonction du ballast (*suite*)

Système	Watts	Lumens par Watt	Rendement lumineux (flux initial)	Coût d'utilisation/an (5\$/kW; 0,05\$/kWh à 4 000 h/an)	kWh/m ²	Coût d'utilisation/m ²
Lampe T-8 et ballast FBE	78	91	7 080	24,96\$	39,33	3,15 \$
Lampe T-8 HR et ballast FFB	48	96	4 602	15,36\$	37,24	2,98 \$
Lampe T-8 HR et ballast FBO	55	96	5 280	17,60\$	37,19	2,98 \$
Lampe T-8 HR et ballast FBE	72	98	7 125	23,04\$	36,08	2,89 \$
Lampe T-5 et ballast FBO	62	94	5 800	19,84\$	38,16	3,05 \$
Lampe T-5 flux élevé et ballast FBO	120	83	10 000	38,40\$	42,84	3,43 \$

Source: Ressources Naturelles Canada, Retscreen (consultation du site novembre 2014).

4.1.3 Améliorer les méthodes de contrôle

Également complémentaires des stratégies présentées ci-dessus, les méthodes de contrôle constituent un troisième levier de réduction de la consommation en éclairage artificiel. Ces méthodes sont variées et inclues notamment :

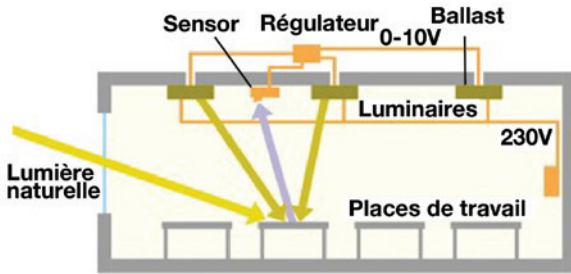
- **Les détecteurs de présence ou de mouvements**: la lumière s'éteint automatiquement lorsque les locaux sont inoccupés. Ces détecteurs peuvent faire l'objet d'un montage électrique complexe (systèmes les plus aboutis) mais peuvent être également directement vissés (douilles) au niveau du luminaire;
- **Une graduation manuelle** permettant de régler l'éclairage en fonction de l'activité;
- **Les détecteurs de lumière du jour** (détecteurs photoélectriques), qui permettent de réguler l'éclairage en fonction du niveau d'éclairement naturel (ou artificiel avec un interrupteur crépusculaire) de la pièce;

Illustration 4.3: Douille détectrice de mouvement et présence



Source: www.1001innovations.com (consultation novembre 2014).

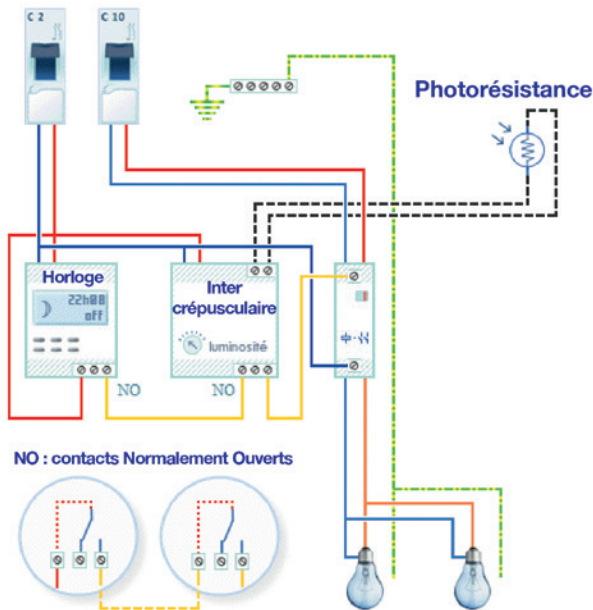
Illustration 4.4: Principes de fonctionnement d'un détecteur photoélectrique



Source: Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

- **Une gestion centralisée avec horloge programmée** en fonction du taux d'occupation des locaux;

Illustration 4.5: Schéma de branchement électrique avec interrupteur crépusculaire (allumage en fonction de la luminosité de la pièce) et horloge programmée



Source: www.entraidelec.com (consultation novembre 2014).

- **Une minuterie** installée au niveau de l'éclairage ou directement au niveau de l'alimentation électrique, avec ou sans programmeur;
- Le placement des **outils de contrôle, accessibles par les occupants** afin que ceux-ci puissent gérer directement l'éclairage en fonction de leurs besoins;
- Finalement, le **choix de luminaires** adaptés au local et aux besoins.

Tableau 4.6: Indications pour choix des luminaires

Luminaires	Applications	Bureaux	Boutiques	Musées	Restaurants, hôtels, hôpitaux	Circulations	Industrie
Plafonniers (encastres, en saillie)		Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général	Éclairage général
Projecteurs (ou spots)			Éclairage d'accentuation	Éclairage d'accentuation	Éclairage d'accentuation		
Lignes continues		Éclairage général	Éclairage général		Éclairage général		Éclairage général
Suspensions		Éclairage général, architectural	Éclairage général, architectural		Éclairage général, architectural		Éclairage général, architectural
Appliques		Éclairage d'appoint	Éclairage d'appoint	Éclairage d'appoint	Éclairage d'appoint	Éclairage général	
Lampes à poser		Éclairage localisé	Éclairage localisé		Éclairage localisé		
Encastres de sol et muraux				Guidage visuel, balisage	Guidage visuel, balisage	Guidage visuel, balisage	
Systèmes à fibres optiques			Éclairage localisé	Éclairage localisé	Éclairage localisé		

Source: www.territorial.fr (consultation novembre 2014).

À titre d'exemple d'évaluation des bénéfices, le tableau suivant résume les économies potentielles et le coût de certaines de ces mesures selon une étude menée dans une école canadienne. L'évaluation financière variera cependant en fonction des pays et de la situation de base, et devra donc être effectuée au cas par cas.

Tableau 4.7: Exemple de coût et périodes d'amortissement de différentes mesures (Canada)

Mesure	Économie d'énergie annuelle	Coût (\$)	Économie financière (\$/an)	Amortissement (années)
Remplacement ampoules T12 (34 W) avec des ballasts électroniques T8 (32 W)	15-30 %	40-50/amp.	5-10/amp.	4-5
Remplacement ampoules à incandescence par fluorescentes	50-70 %	40-90/amp.	10-20/amp.	2-5
Détecteurs photoélectriques	40-50 %	100/appareil	50/appareil	2
Détecteurs de mouvement dans salles de classe et couloirs	10-15 %	300/appareil	20-50/appareil	5-10

Source: Ressources Naturelles Canada (consultation du site novembre 2014).

4.2 Appareils électriques et chauffe-eau

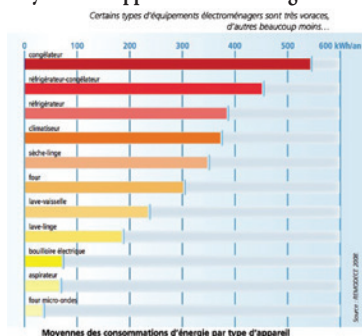
Outre l'air conditionné et l'éclairage, une bonne gestion des appareils électriques et du système de chauffage de l'eau peut permettre de réduire la consommation énergétique du bâtiment.

4.2.1 Efficacité énergétique des appareils

L'efficacité énergétique des appareils électriques peut avoir une influence non négligeable sur la consommation finale d'électricité. Les illustrations suivantes montrent la consommation moyenne des appareils électroménagers et audiovisuels.

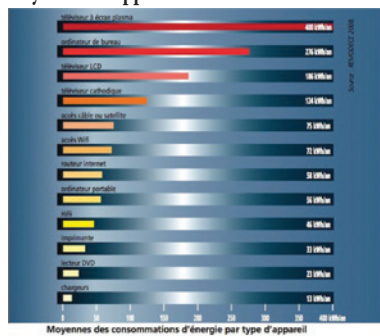
P o i n t s d e r e p e r e

Illustration 4.6: Consommation d'énergie moyenne des appareils électroménagers



Source: De Almeida et al., 2008 (rapport REMODECE), adapté par l'ADEME.

Illustration 4.7: Consommation d'énergie moyenne des appareils audiovisuels



Source: De Almeida et al., 2008 (rapport REMODECE), adapté par l'ADEME.

Les nouveaux modèles étant de plus en plus performants, il conviendra dans certains cas de procéder à un remplacement de l'appareil, en considérant :

- les méthodes de reprise ou collecte de l'appareil usagé ;
- les besoins réels du bâtiment : un surdimensionnement (par exemple, du réfrigérateur ou du lave-linge) pèserait inutilement sur la facture énergétique et la consommation d'eau tout au long de la durée de vie de l'appareil ;
- le cycle de vie de l'appareil : remplacer une machine peu usagée aurait un impact environnemental et économique qui irait à l'encontre des effets recherchés.

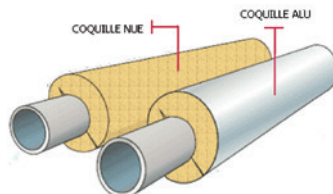
D'autre part, il est conseillé de limiter le temps d'utilisation mais également le temps de veille des appareils, source souvent négligée de consommation d'électricité. Comme pour la lumière artificielle, des minuteurs et horloges sur le réseau électrique peuvent ainsi être installés. La sensibilisation des occupants, via une bonne communication et/ou via la mise en place de compteurs énergétiques visibles, sera également importante. La mise en place d'une Gestion Technique du Bâtiment peut finalement permettre un contrôle intégré et centralisé de toutes les sources de consommation, y compris d'eau (voir chapitre précédent).

4.2.2 Chauffage de l'eau

La consommation d'énergie (électricité, gaz) pour chauffage de l'eau peut être modérée, hors énergies renouvelables, grâce aux mesures suivantes :

- Un meilleur contrôle de la température de chauffage de l'eau afin que celle-ci n'excède pas les températures requises, en installant par exemple un régulateur ;
- Le remplacement du chauffe-eau (si celui-ci est ancien) par une installation plus efficace d'un point de vue énergétique ;
- La vérification de la bonne maintenance et de l'entretien des matériaux du réseau d'eau chaude, ainsi que l'isolation des canalisations afin d'éviter les pertes thermiques.

Illustration 4.9: Isolation des canalisations d'eau chaude



Source : Portail expert de la consommation énergétique (consultation novembre 2014).

Illustration 4.8: Régulateur de température pour chauffe-eau solaire



Source : <http://fr.aliexpress.com/w/wholesale-solar-heater-controller.html>.

4.3 Gestion de l'eau

La gestion de l'eau, en particulier potable, est devenue un enjeu majeur du bâtiment compte tenu de la dégradation quantitative et qualitative des ressources disponibles et d'un volume de gaspillage élevé. Cette gestion peut être améliorée via :

- l'utilisation d'eau potable uniquement à des fins alimentaires ;
- l'utilisation de technologies permettant de réduire les débits d'eau ;
- le recyclage des eaux grises ;
- la récupération des eaux de pluie ;
- l'amélioration des systèmes de drainage.

Ces différents concepts ont déjà été évoqués dans le dernier chapitre du premier tome de ce Guide (chapitre7). Nous en résumons ci-dessous les principaux éléments :

4.3.1 Réserver la consommation d'eau potable uniquement à des fins alimentaires

Idéalement, les bâtiments disposant de l'eau potable au robinet devraient consacrer cette eau uniquement à des fins d'alimentation. Utiliser une eau traitée ou de pluie pour l'hygiène, le nettoyage ou l'arrosage des espaces verts peut amener des économies potentielles pouvant aller jusqu'à plus de 90 % de l'eau potable, en fonction du pays et du mode de consommation.

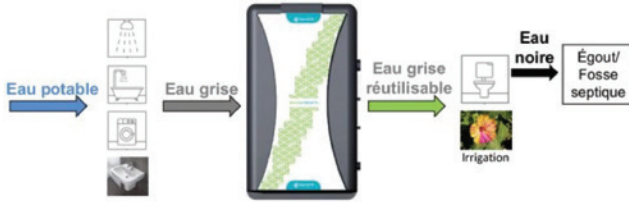
Illustration 4.10: Estimation de la consommation d'eau par an par personne (France)



Source: Secti environnement (consultation novembre 2014).

Cela peut notamment être facilité par un système de plomberies différenciées (eau potable, eau hygiénique), mais il est probable que cette solution s'avère coûteuse à appliquer pour une structure déjà existante. Les systèmes intégrés de récupération et traitement des eaux grises sont dans ce cadre une alternative moins complexe à mettre en œuvre.

Illustration 4.11 : Principe schématique d'un système de recyclage des eaux grises



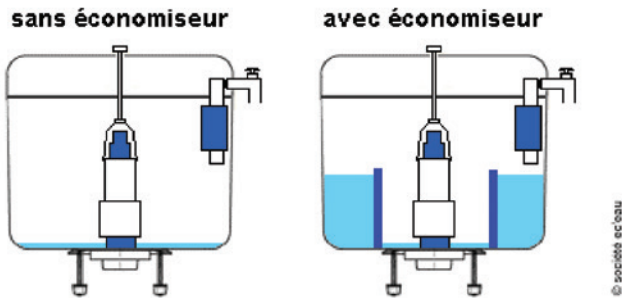
Source: Aquatis World, disponible via www.ecohabitation.com (consultation novembre 2014).

4.3.2 Technologies permettant une gestion efficace des ressources en eau

Différentes technologies sont aujourd'hui disponibles, faciles à installer et permettent de réduire les débits et la consommation d'eau dans le bâtiment. Celles-ci incluent notamment :

- **Les toilettes sèches ou à faible consommation d'eau.** Les systèmes les plus efficaces (hors toilettes sèches) permettent de limiter la consommation d'eau d'une chasse à 3 litres. Les systèmes à double chasse sont également une solution intéressante ne nécessitant pas le remplacement des cuves et permettant d'économiser de 2,2 à 4,4 litres d'eau par chasse d'eau à faible pression. Les économiseurs d'eau remplissent enfin une fonction similaire, avec des plaquettes formant un barrage dans le réservoir et des économies pouvant aller jusqu'à 8 litres par chasse⁷⁴.

Illustration 4.12 : Économiseur d'eau pour WC



Source: www.societe-eceau.fr (consultation novembre 2014).

- **Les réducteurs de pressions** sur les robinets et douches, les mitigeurs, les valves autocontrôlées ou encore les pommeaux de douche efficaces constituent d'autres solutions économiques. Ces derniers peuvent notamment réduire le débit de 30 litres par minute (pommeaux les moins performants) à 8 litres.⁷⁵

74. www.bien-et-bio.com (consultation novembre 2014).

75. Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

Illustration 4.13: Réducteur de pression



Source: www.anjou-connectique.com (consultation novembre 2014).

- **Les mitigeurs avec butée** fonctionnent comme des mitigeurs classiques mais ajoutent une butée délimitant un fonctionnement économique (0 à 6 litres) du fonctionnement « confort » (6 à 12 litres)⁷⁶.

- **Les robinetteries à fermeture automatique** (par exemple, à bouton presseur), ou encore les **robinetteries thermostatiques**, avec un réglage plus rapide de la température de l'eau mitigée, permettent de réduire le temps d'écoulement de façon directe ou indirecte.

Illustration 4.14: Robinetterie thermostatique



Source: www.chauffage-direct.fr (consultation novembre 2014).

Finalement, une bonne prévention et éducation des occupants, un diagnostic complet de la plomberie et des installations d'eau (détection des possibles fuites) ainsi que le remplacement des appareils électriques par des modèles à faible consommation d'eau pourraient apporter des économies additionnelles.

76. Université catholique de Louvain, site Energie + (consultation novembre 2014).

4.3.3 Systèmes de récupération des eaux de pluie

Les systèmes de récupération des eaux de pluie sont nombreux et peuvent permettre une réutilisation de ces eaux notamment pour l'arrosage et le nettoyage. Ces systèmes peuvent être plus ou moins complexes et intégrés ou non au système de canalisation du bâtiment.

Illustration 4.15 : Système de récupération des eaux de pluie intégré

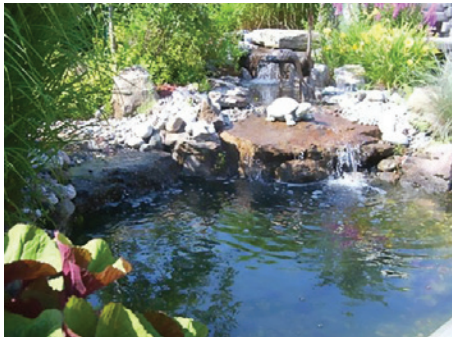


Source: Schmitz-Gunther T., 1999.

4.3.4 Améliorer le drainage des eaux de pluie

L'objectif principal est de ralentir l'évacuation des eaux de pluie afin d'améliorer le processus naturel de filtration des sédiments et nutriments, et de favoriser le rechargement des nappes phréatiques. Cela consiste notamment à renforcer la perméabilité du sol autour du bâtiment, à utiliser la végétation pour absorption, incluant les toits verts, ou à concevoir des tranchées d'infiltration, des noues ou encore un jardin d'eau (voir chapitre 7 pour plus de détails).

Illustration 4.16 : Jardin d'eau



Source: www.paysagelavenir.com (consultation novembre 2014).

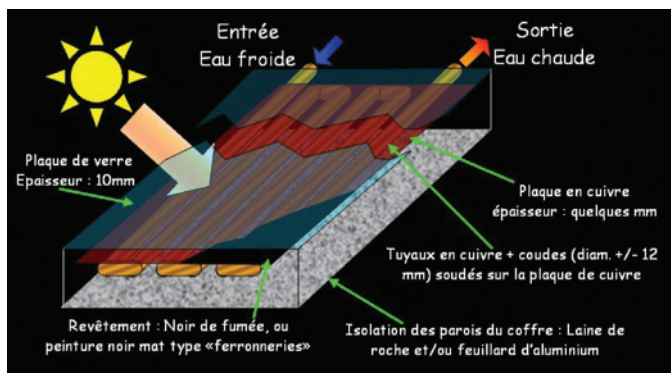
4.4 Énergies renouvelables

Il existe un certain nombre de technologies permettant l'exploitation des énergies renouvelables dans le cadre du bâtiment. Celles-ci incluent notamment le solaire thermique, le photovoltaïque, la climatisation solaire, les éoliennes et la biomasse.

4.4.1 Chauffe-eau solaire

Deux types de technologies permettent la production d'eau chaude à partir de l'énergie solaire : les capteurs plans vitrés et les tubes sous vide. Les premiers seront préférables pour toute utilisation normale (eau chaude à 50-60 °C) tandis que les tubes sous vide, plus chers mais plus efficaces, seront utilisés si une eau très chaude (80 °C) ou un réchauffement élevé est nécessaire, par exemple, pour la climatisation par absorption. Toutes ces technologies ont fait l'objet d'une présentation dans le premier tome de ce Guide (chapitre 6).

Illustration 4.17: Fonctionnement capteurs plan vitré



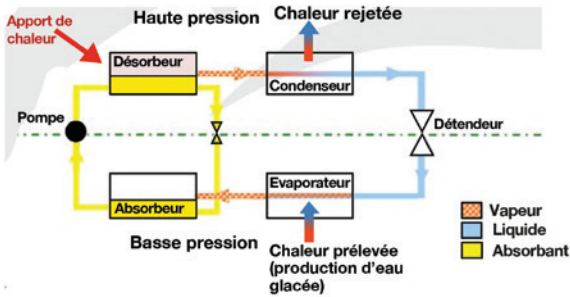
Source: www.lepanneausolaire.net (consultation novembre 2014).

Illustration 4.18: Tubes sous vide et chauffe-eau solaire installé sur toit



Source: www.meaglesun.com (consultation novembre 2014).

Illustration 4.19: Climatisation solaire



Source: www.conso globe.com (consultation novembre 2014) (illustration redessinée par ENERGIES 2050).

La possibilité d'installer du solaire thermique doit être décidée en fonction de l'exposition du bâtiment au soleil et des besoins en eau chaude recalculés en tenant compte des mesures d'économie d'eau évoquées ci-dessus. Pour plus de détails, se référer au chapitre 6 du premier tome.

4.4.2 Production d'électricité: photovoltaïque et éolienne

Les panneaux photovoltaïques et les éoliennes peuvent permettre de produire de l'électricité à partir de l'énergie des radiations solaires d'une part, et de l'énergie cinétique des vents d'autre part. Il conviendra néanmoins d'étudier attentivement:

- les coûts d'installations;
- les besoins réels du bâtiment (la priorité restant de réduire la demande en électricité);
- le rendement estimé de ces technologies, qui dépendra notamment de l'architecture du bâtiment et des conditions climatiques locales.

4.4.2.1 Photovoltaïque

Pour rappel, la production d'électricité par une installation photovoltaïque peut être estimée en utilisant l'équation suivante⁷⁷:

$$(1) E_{\text{elec}} = H_i \cdot S \cdot \eta$$

Où

- E_{elec} = l'électricité produite par le panneau (kWh/an);
- H_i = irradiation globale reçue par les modules sur une surface de 1 m^2 (kWh/m²/an);
- S = surface du champ des modules photovoltaïques en m²;
- η = rendement global des capteurs.

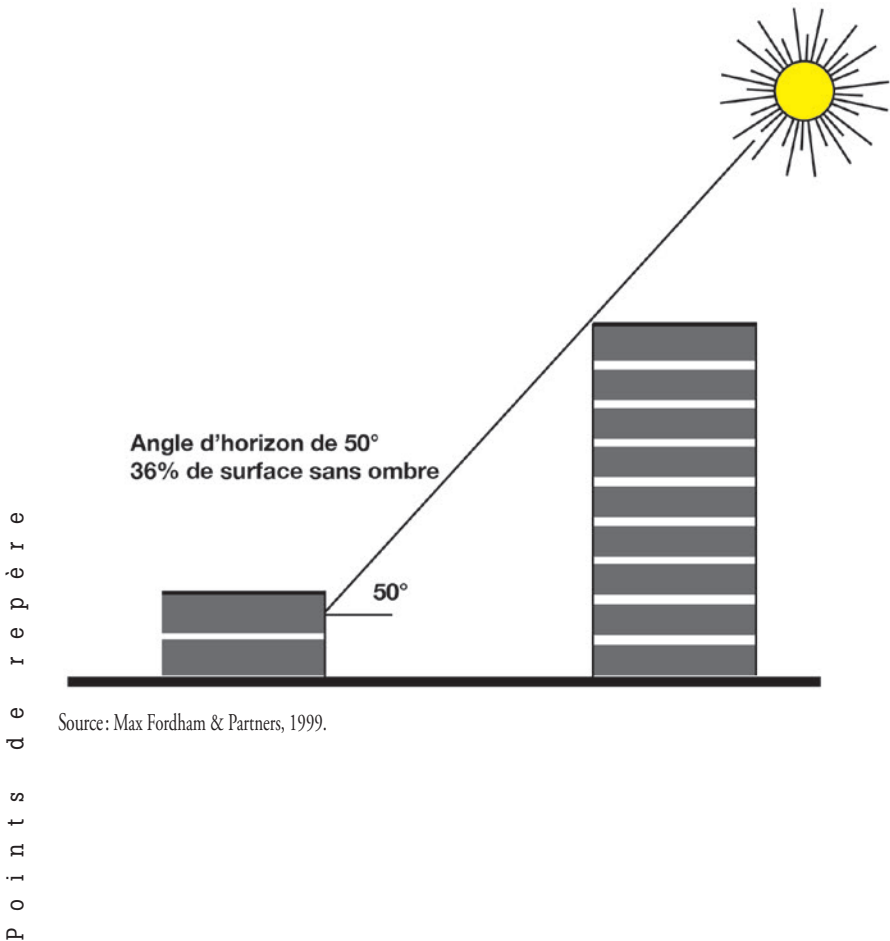
77. www.photovoltaïque.info (consultation novembre 2014).

L'inclinaison des panneaux joue un rôle crucial dans le rendement, en conditionnant le niveau de radiations que les cellules reçoivent. L'angle d'inclinaison idéal est généralement déterminé par la latitude du site : une inclinaison de 0° à 15° est conseillée à mesure que l'on se rapproche de l'équateur.

Les toits (ou un terrain dégagé à plat) semblent donc être les éléments du bâtiment les plus propices pour l'installation d'un système photovoltaïque en régions tropicales. L'installation aux murs ou en matériel d'ombrage pour les fenêtres n'est ici pas adaptée, car les panneaux resteraient à l'ombre une majeure partie du temps.

Il convient également de considérer avant l'installation l'ensemble des masques aux rayonnements directs du soleil (topographie, infrastructures, végétation mais aussi parties du bâtiment) qui pourraient affecter les rendements potentiels, et de s'assurer de la bonne isolation et ventilation du système.

Illustration 4.20 : Réduction de la production de PV suivant les obstructions



Source: Max Fordham & Partners, 1999.

4.4.2.2 Énergie éolienne

La production électrique d'une éolienne peut être définie par l'équation suivante⁷⁸ :

$$(2) P_e = \frac{C_{\text{tot}} \rho A u^3}{2}$$

Où

- P_e = électricité produite par l'éolienne (kWh)
- C_{tot} = coefficient d'efficacité de la structure
- A = taille des pâles (m^2)
- ρ = densité de l'air (kg/m^3)
- u = vitesse du vent (m/s)

Pour rappel, l'efficacité d'une éolienne dépendra de la force et de la direction des vents : une analyse consciencieuse doit donc être faite dans ce domaine et un placement en terrain dégagé (généralement le toit) est conseillé.

Il est également important de tenir compte des turbulences provoquées par le bâtiment lui-même et des vibrations de l'éolienne qui peuvent causer des fatigues prématurées de la structure. Le développement de ce type de technologies est généralement limité par la densité urbaine, les contraintes d'usages élevées, les coûts d'investissements et l'impact sur l'esthétisme du bâtiment.

Illustration 4.21 : Éolienne de toit



Source : <http://www.economiesolidaire.com/2011/06/20/eolienne-de-toit/> (consultation novembre 2014).

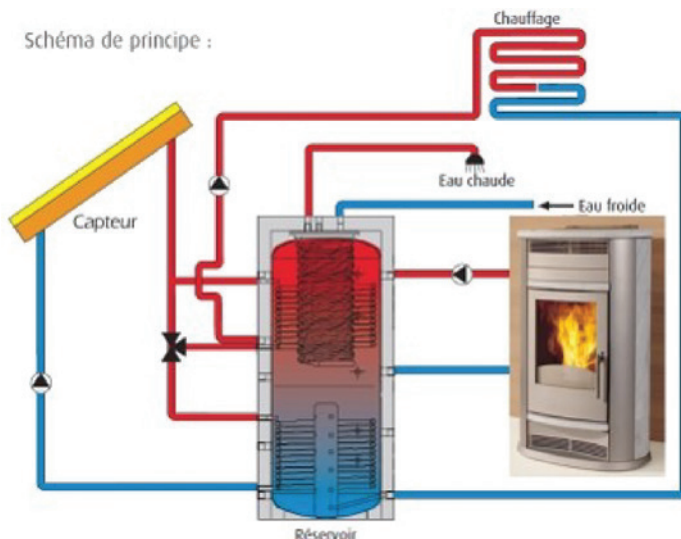
4.4.2.3 Biomasse

La biomasse inclut toutes les matières organiques telles que la végétation (plantes, arbres, herbes), les résidus agricoles ou les déchets organiques. Les technologies permettant de transformer la production d'énergie à partir de biomasse incluent notamment les traitements thermochimiques (combustion, pyrolyse ou, encore, gazéification) et les applications en cuisine (poêles, chauffe-eau, gazéification).

En cas de fortes disponibilités de ressources, il pourra ainsi s'avérer intéressant d'équiper le bâtiment de matériels spécifiques afin d'économiser sur l'usage de gaz ou d'électricité.

78. www.Mathworks.fr (consultation novembre 2014).

Illustration 4.22: Chaudière à bois couplée à chauffage solaire

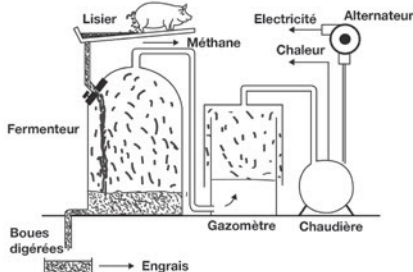


Source: ouest-solutions-thermiques.fr, disponible sur <http://www.climamaison.com/tendance/chauffage-bois-et-chauffage-solaire-reve-ou-realite.htm> (consultation novembre 2014).

Investir dans un biodigester, permettant de transformer la biomasse en gaz (méthane) ou électricité, sera plutôt réservé aux gros bâtiments (ou à un ensemble de plus petites structures). La fermentation de la biomasse en milieu dépourvu d'oxygène (méthanisation) crée du méthane qui est utilisé pour alimenter une chaudière permettant de produire de l'électricité et de la chaleur.

La chaleur peut ainsi être récupérée pour la production d'eau chaude notamment. Cette solution sera particulièrement viable dans les milieux ruraux, où la disponibilité en ressources est généralement plus importante.

Illustration 4.24: Principes de fonctionnement d'un biodigester



Source: La boîte à cerveau via www.greenetvert.fr (consultation novembre 2014).

Illustration 4.23: Thermo poêle à pellets



Source: www.poele-de-masse.be (consultation novembre 2014).

P o i n t s d e r e p e r e

Encadré 4.1 : Un outil d'évaluation des performances des énergies renouvelables: Retscreen

Développé par Ressources Naturelles Canada (téléchargeable gratuitement sur le site <http://www.retscreen.net> - disponible en 36 langues), Retscreen est défini comme un « logiciel de gestion d'énergies propres pour l'analyse de faisabilité de projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que pour l'analyse de la performance énergétique en continu » (Ressources Naturelles Canada).

Dans le cadre des énergies renouvelables, cet outil permet notamment d'estimer :

- la rentabilité financière du projet (période de rentabilité incluant taux d'emprunt, taux d'intérêts et d'inflation, etc.) ;
- son bilan carbone (estimation des émissions de Gaz à Effet de Serre économisées)
- la performance énergétique (évaluation de l'énergie produite – thermique/électrique) du système, en fonction notamment du climat.

Ce logiciel propose ainsi plusieurs méthodes d'évaluation plus ou moins complexes pour un ensemble complet de technologies. Avec des manuels d'instructions détaillés et de nombreuses études de cas, il permet de réaliser rapidement des simulations basiques de performances. Celles-ci seront en outre adaptées au climat local, Retscreen disposant d'une base de données météorologique – données NASA – étendue à un ensemble complet de zones géographiques.

Références

De Almeida A. et coll., 2008. *Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe (REMODECE)*, Programme Européen coordonné par l'Université de Coimbra, Département d'ingénierie électrique, Coimbra, Portugal –adaptation graphique par l'ADEME.

Max Fordham & Partners, 1999. *Photovoltaic in Buildings: A Design Guide*, DTI, Gloucester, Royaume-Uni.

Université de Montfort, 2011. *Energy in Buildings*, MSc Climate Change and Sustainable Development, Leicester, Royaume-Uni.

Schmitz-Gunther T., 1999. *Eco-Logis, la maison à vivre*, Könemann, France.

Sites internet (dernière consultation en novembre 2014) et Sources additionnelles des illustrations

1001 innovations : <http://www.1001innovations.com/nouvelles-de-linnovation/actualites/la-douille-detecteur-de-presence-la-detection-de-presence-sans-montage-electrique.html>

Aliexpress : <http://fr.aliexpress.com/w/wholesale-solar-heater-controller.html>

Anjou connectique : <http://www.anjou-connectique.com/batiment/distribution-eau/reducteur-de-pression.html?dir=desc&limit=all&order=position>

Aquatis World : <http://www.ecohabitation.com/>

Bien et bio : <http://www.bien-et-bio.com/economiseurs-eco-wc.htm>

Cedeo : <http://www.cedeo.fr/sanitaire/mitigeur-evier-eurodisc-monocommande-15x21-bec-coule-orientable-A1863486>

Cellule de Recherche en Architecture et Climat de l'Université Catholique de Louvain, Département de l'Énergie et du Développement durable de Wallonie, Site Energie +, accès : <http://www.energieplus-lesite.be>

Chauffage direct : <http://www.chauffage-direct.fr/7052-mitigeur-thermostatique-mural-douche-serie-premier-sandri-chrom%C3%83%C2%A9-p-2739.html?osCsid=104a67961d362d3a53aa9310ce713b4b>

Consoglobe : <http://www.consoglobe.com/climatisation-solaire-fraicheur-pollution-3274-cg>

Déco plurielles : <http://deco.plurielles.fr/tendance-deco/recuperer-eau-pluie-pour-arroser-jardin-bio-3833027-402.html>

Ecologie shop : <http://www.ecologie-shop.com/prise-programmable-econome-92/programmeur-hebdomadaire-digital-dz-20-brennenstuhl-2029>

Économie solidaire : <http://www.economiesolidaire.com/2011/06/20/eolienne-de-toit/>

Entraidelec : <http://entraidelec.com/schema-34-Allumage-par-interrupteur-crepusculaire.html>

La bote à cerveau : <http://www.greenetvert.fr/2011/09/26/la-bouse-et-le-crottin-les-combustibles-du-futur/33837>

Le Panneau solaire : <http://www.lepanneausolaire.net/realiser-soi-meme-son-chauffe-eau-solaire/>

Ma maison économe : http://www.mamaisoneconome.com/MME/Eclairage_des_locaux.htm

Mathworks : http://www.mathworks.fr/products/symbolic/code-examples.html?file=/products/demos/symbolictlbx/Wind_turbine/Wind_turbine_power.html

Meaglesun : http://www.meaglesun.com/en/product_categories/solar-water-heater/

Paysagelavenir : http://www.paysagelavenir.com/jardin_eau.html

Photovoltaïque info : <http://www.photovoltaique.info/Rendement-d-un-systeme.html>

Poêle biomasse : ouest-solutions-thermiques.fr, disponible sur <http://www.climamaison.com/tendance/chauffage-bois-et-chauffage-solaire-reve-ou-realite.htm>

Portail expert de la consommation énergétique : <http://conseils.xpair.com>

Ressources Naturelles Canada : <http://www.rncan.gc.ca>

Ressources Naturelles Canada, Retcreen : www.retscreen.net/fichier.php/1317/Lampes%20fluorescentes%20et%20de%20ballasts.pdf

Secti environnement : <http://www.collect-o.fr/>

Société eceau : <http://www.societe-ec eau.fr/eco-plaquette-wc.html>

Sonepar : fiche blueway n°3, ECLAIRAGE – Législation et technologie dans le tertiaire et industrie

Territorial.fr : http://www.territorial.fr/PAR_TPL_IDENTIFIANT/4925/TPL_CODE/TPL_OVN_CHAPITRE_FICHE/2690-consultation-guide-de-l-eclairage-public-voirie-et-batiments.htm

Tubelite : <http://www.tubeliteinc.com/category/products/>

Conclusion du 2^e tome

L'organisation de ce Guide s'inscrit dans une démarche de recherche de sobriété énergétique, d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables dans le bâtiment.

Le second tome aborde les mêmes problématiques que dans le premier tome qui était consacré aux stratégies de conception des nouveaux bâtiments en régions tropicales mais, cette fois, il s'intéresse à la réhabilitation.

Ceci étant dit, il peut également être considéré comme un complément du premier tome, notamment sur l'isolation et l'entretien/la régulation des systèmes d'air conditionné.

Si les champs d'action sont plus limités dans le cadre d'une réhabilitation que pour de nouvelles structures, des économies substantielles peuvent néanmoins être atteintes en termes d'économies d'énergies et de ressources. Les actions mises en place devront s'appuyer sur un audit complet de la situation du bâtiment afin d'être en mesure de témoigner et d'argumenter de la performance des solutions retenues et de leur efficacité.

Au-delà des mesures de sobriété énergétique (réduction des gaspillages, éducation des occupants aux bonnes pratiques, etc.), l'isolation de l'enveloppe du bâtiment (toits, fenêtres et murs), particulièrement au niveau des parois les plus exposées, ainsi qu'un redimensionnement des systèmes d'air conditionné accompagné de mesures de régulation et d'entretien, pourront amener des baisses de charges importantes dans les bâtiments climatisés.

D'autres gisements d'économies potentielles devront également être exploités notamment dans les domaines de l'éclairage, des équipements, de la consommation d'eau et, enfin, à travers l'installation d'énergies renouvelables.

Table des illustrations

Illustration 1.1: Présentation type de la consommation énergétique hebdomadaire d'un bâtiment, ici une bibliothèque, en kWh 13

Illustration 1.2: Index consommation énergétique des immeubles de bureaux, Singapour 15

Illustration 1.3: Relation linéaire entre degrés-jours et consommation électrique: cas de base 16

Illustration 1.4: Relation non linéaire entre degrés-jours (température de référence 18 °C) et consommation électrique 16

Illustration 1.5: Profil journalier de consommation en kW par demi-heure d'une bibliothèque. 17

Illustration 1.6: Exemple de disposition à haute consommation énergétique. 18

Illustration 1.7: Exemple de profil thermique d'un bâtiment. 22

Illustration 2.1: Mur à creu. 28

Illustration 2.2: Effet de l'isolation d'une toiture en tôle avec faux-plafond 29

Illustration 2.3: Exemple de répartition d'apports de chaleur (parois opaques) en climat tropical humide 30

Illustration 2.4: Isolation entre chevrons et fermettes 31

Illustration 2.5: Isolation sous chevrons 32

Illustration 2.6: Double isolation sous et entre chevrons 32

Illustration 2.7: Isolation par l'extérieur 33

Illustration 2.8: Travaux d'isolation d'un toit par l'extérieur 33

Illustration 2.9: Isolation des combles sur plancher léger. 34

Illustration 2.10: Isolation sur plancher lourd 34

Illustration 2.11: Double toiture avec combles ventilés 35

Illustration 2.12: Balance énergétique d'un toit plat 35

Illustration 2.13: Toiture chaude. 36

Illustration 2.14: Toiture combinée. 36

Illustration 2.15: Isolation interne d'un toit plat avec intégration au-dessus d'un faux plafond 37

Illustration 2.16: Isolation à l'intérieur de la structure.	37
Illustration 2.17: Illustration schématique des effets d'un toit vert	38
Illustration 2.18: Panneaux isolants posés sur lattage.	39
Illustration 2.19: Isolation derrière contre cloison maçonnée	39
Illustration 2.20: Pont thermique.	40
Illustration 2.21: Enduit isolant.	40
Illustration 2.22: Panneaux isolants sous enduit	41
Illustration 2.23: Panneaux avec structure de support	41
Illustration 2.24: Isolation avec bardage	41
Illustration 2.25: Éléments isolants préfabriqués.	42
Illustration 2.26: Isolation avec mur de pavement.	42
Illustration 2.27: Absence de ponts thermiques avec isolation extérieure (droite), comparée à l'isolation intérieure (gauche)	43
Illustration 2.28: Isolation par injection	43
Illustration 2.29: Panneaux d'isolation dans une structure en bois.	44
Illustration 2.30: Méthodes d'ombrage externes	45
Illustration 2.31: Principes de fonctionnement d'un film protecteur.	46
Illustration 2.32: Produits de traitement des infiltrations d'air	47
Illustration 3.1: Principes de fonctionnement d'un système tout-air	51
Illustration 3.2: Systèmes à ventilo-convecteur 2 tubes réversibles-2 fils	52
Illustration 3.3: Climatisation avec circuit hydraulique.	52
Illustration 3.4: Fonctionnement d'un climatiseur de fenêtre	52
Illustration 3.5: Fonctionnement d'un <i>split</i>	53
Illustration 3.6: Système de ventilation mixte dans des bureaux	54
Illustration 3.7: Adaptation de la température de consigne en fonction des pièces du bâtiment, climatiseur de local	56
Illustration 3.8: Installation centralisée équilibrée	56
Illustration 3.9: Isolation des tuyaux.	58
Illustration 3.10: Fonctionnement d'un convertisseur de fréquence.	59
Illustration 3.11: Unité extérieure protégée par toit vert	60
Illustration 3.12: Différentes configurations des climatiseurs.	61
Illustration 3.13: Principes de fonctionnement d'un groupe frigorifique avec récupérateur de chaleur	62
Illustration 3.14: Minuterie sur prise électrique.	63
Illustration 3.15: Compteur horaire encastrable pour compresseur	63
Illustration 3.16: Changement des filtres sur climatiseur individuel split.	65

Illustration 4.1 : Étagère à lumière	73
Illustration 4.2 : Variation des coefficients de transmission lumineuse d'un store vénitien de 16 mm	73
Illustration 4.3 : Douille détectrice de mouvement et présence	75
Illustration 4.4 : Principes de fonctionnement d'un détecteur photoélectrique	76
Illustration 4.5 : Schéma de branchement électrique avec interrupteur crépusculaire (allumage en fonction de la luminosité de la pièce) et horloge programmée	76
Illustration 4.6 : Consommation d'énergie moyenne des appareils électroménagers	78
Illustration 4.7 : Consommation d'énergie moyenne des appareils audiovisuels	78
Illustration 4.8 : Régulateur de température pour chauffe-eau solaire	79
Illustration 4.9 : Isolation des canalisations d'eau chaude	79
Illustration 4.10 : Estimation de la consommation d'eau par an par personne (France)	80
Illustration 4.11 : Principe schématique d'un système de recyclage des eaux grises	81
Illustration 4.12 : Économiseur d'eau pour WC	81
Illustration 4.13 : Réducteur de pression	82
Illustration 4.14 : Robinetterie thermostatique	82
Illustration 4.15 : Système de récupération des eaux de pluie intégré	83
Illustration 4.16 : Jardin d'eau	83
Illustration 4.17 : Fonctionnement capteurs plan vitré	84
Illustration 4.18 : Tubes sous vide et chauffe-eau solaire installé sur toit	84
Illustration 4.19 : Climatisation solaire	85
Illustration 4.20 : Réduction de la production de PV suivant les obstructions	86
Illustration 4.21 : Éolienne de toit	87
Illustration 4.22 : Chaudière à bois couplée à chauffage solaire	88
Illustration 4.23 : Thermo poêle à pellets	88
Illustration 4.24 : Principes de fonctionnement d'un biodigesteur	88

Table des tableaux

Tableau 1.1 : Étalonnage de la consommation énergétique des bâtiments en Côte d'Ivoire, en kWh/m²/an. 14

Tableau 1.2: Caractéristiques de bâtiments commerciaux à Douala et Yaoundé (ROM= pourcentage de la surface vitrée par rapport à la surface de la paroi extérieure) 19

Tableau 1.3: Exemple de coefficients de transmission thermique de parois types. 20

Tableau 2.1: Exemples de coefficients de conductivité thermique (k) des matériaux en W/m.K° 26

Tableau 2.2: Calculs des résistances des matériaux (valeurs k et R basées sur CIBSE, 2006) 29

Tableau 2.3: Caractéristiques thermiques des principaux matériaux d'isolation 30

Tableau 2.4: Coefficients d'absorption α pour murs et toits 38

Tableau 2.5: Facteurs de réduction des apports de chaleur en fonction du type de protection 45

Tableau 2.6: Valeurs U indicatives selon le type de vitrage. 46

Tableau 3.1: Coefficients de performances recommandés (2006) 57

Tableau 3.2: Conseils d'isolation. 59

Tableau 3.3: Puissance des climatiseurs individuels 61

Tableau 3.4: Adaptation de la température de consigne aux températures extérieures. . . 64

Tableau 3.5: Dégradation des performances d'un compresseur en fonction de la température de condensation 66

Tableau 4.1: Exemples de niveaux d'éclairément à maintenir et valeurs d'éblouissement à ne pas dépasser, bâtiments non domestiques (normes européennes). 72

Tableau 4.2: Exemple de coefficients de correction en fonction du type de matériel . . 72

Tableau 4.3: Facteur de réflexion (p, en proportion du rayonnement visible) des couleurs 73

Tableau 4.4: Efficacité énergétique des différentes ampoules et principes de fonctionnement 74

Tableau 4.5: Coûts et efficacité lumineuse des différents types d'ampoules à incandescence (T5, T8 et T12) en fonction du ballast	74
Tableau 4.6: Indications pour choix des luminaires	77
Tableau 4.7: Exemple de coût et périodes d'amortissement de différentes mesures (Canada)	78

Table des encadrés

Encadré 1.1: Exemple de données pour étalonnage 14

Encadré 1.2: Exemple de disposition à haute consommation énergétique 18

Encadré 2.1: Exemple de calcul d'une valeur U et effet de l'isolation. 28

Encadré 2.2: Les toits végétalisés. 38

Encadré 3.1: Mise en place d'une Gestion Technique du Bâtiment (GTB) 65

Encadré 3.2: Contrat de maintenance avec clause énergie 66

Encadré 3.3: Problèmes techniques courants et solutions
(IEPF, fiche technique Prisme n° 2) 67

Encadré 4.1: Un outil d'évaluation des performances des énergies renouvelables:
Retscreen 89



Initiative de la Francophonie pour des villes durables

L'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables: une approche systémique pour des stratégies urbaines durables

L'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables (IFVD) soutient la mise en œuvre de stratégies urbaines durables en apportant des réponses concrètes et adaptées aux réalités de chaque ville, quelle que soit sa taille, tout en promouvant une approche holistique qui prenne en compte la complexité urbaine et les interrelations entre les différents systèmes qui les composent. En pratique, il s'agit de construire un puzzle dans lequel chaque pièce, tout en étant indépendante et indispensable, n'a d'utilité que lorsqu'elle se trouve connectée aux autres selon une organisation planifiée, optimisée et cohérente.

Genèse de l'initiative

L'IFVD s'inscrit dans la continuité du programme « Ville, Énergie et Environnement » mis en place par l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) entre 2002 et 2011. L'originalité de ce programme tenait en grande partie à sa capacité à prendre en compte la diversité d'une ville tout en ciblant des stratégies d'action sur les deux tomes « facilement » identifiables que sont l'énergie et l'environnement.

En 2011, l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), nouvelle appellation de l'IEPF, et l'association ENERGIÉS 2050 ont décidé de poursuivre l'aventure et ont cofondé l'IFVD pour accompagner les villes et compléter les dynamiques existantes, en s'inscrivant résolument dans une approche systémique.

Une initiative pour mutualiser et démultiplier les moyens d'agir

L'IFVD s'appuie sur les nombreux programmes, projets et initiatives dédiés aux villes et aux différents acteurs impliqués, afin de tirer les enseignements de chacun d'eux et de pouvoir prendre en compte la diversité des contraintes et des réalités, que chacun rencontre dès lors qu'il intervient sur l'environnement construit.

Chaque acteur est confronté aux limites de son territoire de compétence, tout en étant interdépendant des dynamiques que l'ensemble des autres acteurs va mettre en place. Dès lors, l'environnement construit doit s'appréhender comme une partition dans laquelle chaque musicien révèle ses talents de soliste autour d'un objectif commun.

De nombreux partenaires ont déjà rejoint l'IFDD et ENERGIES 2050 dans cette initiative : l'École Africaine des Métiers de l'Architecture et de l'Urbanisme (EAMAU) basée à Lomé ; ONU-HABITAT ; le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) ; le Réseau Habitat et Francophonie ; l'Ordre des Architectes de Côte d'Ivoire ; etc.

D'autres acteurs essentiels ont manifesté un intérêt pour s'associer aux dynamiques portées par l'IFVD : l'Association Internationale des Maires Francophones (AIMF) ; Cités et Gouvernements Locaux Unis (CGLU) ; etc.

Une organisation matricielle pour une initiative au plus proche de la mise en œuvre

L'IFVD a pour ambition de parvenir à des résultats concrets et mesurables. Elle s'articule selon 5 piliers complémentaires :

- fédérer et mutualiser,
- comprendre et partager pour des villes inspirées en devenir,
- mettre en œuvre des programmes d'action à la carte,
- financer la ville inspirée,
- renforcer la capacité d'agir pour des villes participatives et inclusives.

Des premiers résultats concrets

Depuis le lancement de l'IFVD en 2011, plusieurs actions concrètes ont été mises en œuvre sous son couvert, comme en témoignent les exemples ci-dessous :

- Une formation africaine pour les professionnels du secteur de la construction et du bâtiment, de l'aménagement et de la gestion urbaine, en partenariat avec l'EAMAU. La quatrième session régionale s'est déroulée entre octobre 2015 et mars 2016. La cinquième session se déroulera en 2017. Plus de 75 professionnels, venant de 14 États, ont déjà été formés pendant 4 mois aux enjeux de la transition énergétique et ont chacun mis en œuvre un projet concret dans leurs pays respectifs.

Trois sessions nationales ont déjà été organisées également en partenariat avec l'Ordre des architectes et les acteurs nationaux (Burundi, Togo, Côte d'Ivoire).

- Un module de formation à la construction durable dans les filières urbanisme, gestion urbaine et architecture de l'EAMAU avec déjà plus de 300 étudiants formés.

- Une Université d'été francophone sur les villes et les bâtiments face aux enjeux des changements climatiques : une semaine de formation à Nice (France) au mois de juin 2015 intégrée à un cycle de conférences internationales ; 17 participants (Ministères de l'Habitat et de l'Urbanisme ; Ministères de l'Environnement ; Ordre des Architectes ; etc.).

- Élaboration de manuels de référence en 2015 : *Guide du bâtiment durable en régions tropicales* (Publication IFDD) ; État de l'art sur le bâtiment durable et les logements sociaux en Afrique Francophone (Publication PNUE).
- De nombreuses contributions dans des rencontres internationales : Africités (Dakar, 2012) ; Ecocity (Nantes, 2013) ; Forum Urbain Mondial (Medellin, 2014) ; Atelier Régional Efficacité Énergétique dans le Bâtiment en zone tropicale et Ville Durable (Dakar, 2014) ; Forum Global pour l'Habitat Durable/Rio+20+2 (Bogota, 2014) ; Sommet des Solutions (New York, 2014) ; Congrès Mondial d'ICLEI – gouvernements locaux pour le développement durable (Séoul, 2015) ; l'IFVD sera présente à la MedCOP Climat à Tanger, avec notamment une intervention au sein de l'atelier 6 Construction et habitat, valorisation des savoir-faire méditerranéens et à Habitat III à Quito en octobre 2016 ; etc.
- Plusieurs événements ont également permis de rassembler les acteurs concernés à l'occasion de la COP21 ; etc.
- Contributions à plusieurs initiatives internationales : Initiative Bâtiments durables et Climat (PNUE-SBCI) ; Initiative Globale pour des Villes économes en Ressources (GI-REC) ; Programme Bâtiment et Construction durables des Nations Unies (10YFP-SBC) ; etc.
- Un programme de projets pilotes : Maison à Énergie positive à Dakar ; Programmes de rénovation de zones urbaines ; etc.
- Un portail d'information dédiée sur la plateforme francophone Médiaterre (www.mediaterre.org/villes/).

Contacts et pour en savoir plus :

Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD)

56, rue Saint-Pierre, 3^e étage,
Québec (Québec) G1K 4A1 – Canada

ifdd@francophonie.org

ENERGIES 2050

688 Chemin du Plan, 06410 Biot – France

contact@energies2050.org



ENERGIES 2050 est née de la certitude que les trajectoires de développement de nos sociétés n'étaient pas une fatalité. Depuis 2007 en tant que réseau informel et, depuis 2011, en tant qu'organisation non gouvernementale française sans but lucratif travaillant exclusivement dans l'intérêt général, ENERGIES 2050 contribue sans relâche à la transformation de nos sociétés, pour que nos demains soient porteurs d'un avenir plus humain, pluriel et solidaire.

L'association intervient en France et à l'étranger sur les questions associées au développement durable, au changement climatique, aux défis environnementaux et énergétiques. L'association est engagée dans la mise en œuvre de la Grande Transition, qu'il s'agisse de la transition énergétique ou de la mise en mouvement d'une société plus humaine, plurielle et solidaire, porteuse de paix et respectueuse des biens communs de l'humanité. ENERGIES 2050 rassemble, à ce jour, des citoyens, des experts et des partenaires d'une soixantaine de nationalités et met en œuvre des projets dans une vingtaine de pays. L'association désire notamment replacer une approche énergétique en accord avec les principes de l'écodéveloppement au cœur de l'action citoyenne en promouvant la maîtrise de la demande en énergie et les énergies renouvelables.

ENERGIES 2050 organise ses activités selon 5 axes complémentaires :

- Réaliser des projets de mise en œuvre démonstratifs et reproductibles accompagnés d'études techniques et d'actions de recherche pour témoigner des possibles ;
- Organiser ou participer à des rencontres et à des conférences afin de démultiplier les opportunités d'échanges et de débats ;
- Publier les résultats des recherches afin de mutualiser et de partager les savoirs ;
- Éduquer, former et renforcer les capacités pour que chacun puisse comprendre, connaître et agir ;
- Communiquer au plus grand nombre pour informer, mobiliser et fédérer les envies d'agir.

Les thématiques d'intervention d'ENERGIES 2050 sont l'écodéveloppement et le développement durable ; les politiques climatiques, environnementales et énergétiques ; la transition énergétique ; le développement des sources d'énergies renouvelables ; le tourisme responsable et durable ; le bâtiment et le secteur de la construction ; les défis

et les opportunités d'agir des territoires ruraux et urbains; les villes durables; les ressources naturelles et les biens communs de l'humanité; l'économie de l'écologie et de l'environnement; les dynamiques entrepreneuriales responsables et la performance des entreprises; les stratégies de développement bas carbone; le genre; l'éducation à l'environnement; les dynamiques sociales; les changements de comportement et l'action citoyenne; l'économie sociale et solidaire.

Les activités d'ENERGIES 2050 s'inscrivent dans une vision permanente de solidarité et d'équité. ENERGIES 2050 plaide pour une implication de l'ensemble des citoyens du monde dans la mise en place d'un nouveau modèle de développement partagé, à imaginer collectivement.

Les actions et recherches d'ENERGIES 2050 s'inscrivent simultanément au niveau local, point d'ancrage de toute mise en œuvre et laboratoire des actions à élaborer, et au niveau global, car il s'agit de partager et de dupliquer les expériences réussies tout en bénéficiant des leçons tirées des échecs. ENERGIES 2050 met en œuvre des projets dans une vingtaine de pays.

ENERGIES 2050

8 Avenue du Docteur Julien Lefebvre, 06270 Villeneuve-Loubet, France

contact@energies2050.org – www.energies2050.org

+33 (0)6 80 31 91 89



L'Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) et son siège est à Québec.

À l'origine dénommé *Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français (IEPF)*, l'IFDD est né en 1988 peu après le II^e Sommet de la Francophonie, tenu à Québec en 1987. Sa création faisait suite aux crises énergétiques mondiales et à la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, l'Institut inscrit les résolutions du Sommet de la Terre de Rio-1992 comme fil directeur de son action et devient *l'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie*. Et en 2013, à la suite de la Conférence de Rio+20, il prend la dénomination *Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD)*.

Sa mission est de contribuer :

- à la formation et au renforcement des capacités des différentes catégories d'acteurs de développement des pays de l'espace francophone dans les secteurs de l'énergie et de l'environnement pour le développement durable ;
- à l'accompagnement des acteurs de développement dans des initiatives relatives à l'élaboration et à la mise en oeuvre des programmes de développement durable ;
- à la promotion de l'approche développement durable dans l'espace francophone ;
- au développement de partenariats dans les différents secteurs de développement économique et social, notamment l'environnement et l'énergie, pour le développement durable.

L'action de l'IFDD s'inscrit dans le Cadre stratégique de la Francophonie, au sein de la mission D « Développement durable, économie et solidarité » et de l'Objectif stratégique 7 « Contribuer à l'élaboration et à la mise en oeuvre du Programme de développement pour l'après-2015 et des Objectifs du développement durable ».

L'Institut est notamment chef de file des deux programmes suivants de la programmation 2015-2018 de l'OIF, mis en oeuvre en partenariat avec d'autres unités de l'OIF :

- Accroître les capacités des pays ciblés à élaborer et à mettre en oeuvre des stratégies régionales nationales et locales de développement durable, inclusives, participatives et axées sur les résultats, aux niveaux régional, national et local ;
- Renforcer les capacités des acteurs francophones en vue d'une participation active aux négociations et décisions internationales sur l'économie, l'environnement et le développement durable, ainsi que leur mise en oeuvre.

www.ifdd.francophonie.org

L'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) est une institution fondée sur le partage d'une langue, le français, et de valeurs communes. Elle rassemble à ce jour 80 États et gouvernements dont 57 membres et 23 observateurs. Le Rapport sur la langue française dans le monde 2014 établit à 274 millions le nombre de locuteurs de français.

Présente sur les cinq continents, l'OIF mène des actions politiques et de coopération dans les domaines prioritaires suivants : la langue française et la diversité culturelle et linguistique ; la paix, la démocratie et les droits de l'Homme ; l'éducation et la formation ; le développement durable et la solidarité. Dans l'ensemble de ses actions, l'OIF accorde une attention particulière aux jeunes et aux femmes ainsi qu'à l'accès aux technologies de l'information et de la communication.

La Secrétaire générale conduit l'action politique de la Francophonie, dont elle est la porte-parole et la représentante officielle au niveau international. Madame Michaëlle Jean est la Secrétaire générale de la Francophonie depuis janvier 2015.

57 États et gouvernements membres

Albanie • principauté d'Andorre • Arménie • Royaume de Belgique • Bénin • Bulgarie • Burkina Faso • Burundi • Cabo Verde • Cambodge • Cameroun • Canada • Canada-Nouveau-Brunswick • Canada-Québec • République centrafricaine • Chypre • Comores • Congo • République démocratique du Congo • Côte d'Ivoire • Djibouti • Dominique • Égypte • Ex-République yougoslave de Macédoine • France • Gabon • Ghana • Grèce • Guinée • Guinée-Bissau • Guinée équatoriale • Haïti • Laos • Liban • Luxembourg • Madagascar • Mali • Maroc • Maurice • Mauritanie • Moldavie • principauté de Monaco • Niger • Qatar • Roumanie • Rwanda • Sainte-Lucie • Sao Tomé-et-Principe • Sénégal • Seychelles • Suisse • Tchad • Togo • Tunisie • Vanuatu • Vietnam • Fédération Wallonie-Bruxelles

23 observateurs

Autriche • Bosnie-Herzégovine • Costa Rica • Croatie • République dominicaine • Émirats arabes unis • Estonie • Géorgie • Hongrie • Kosovo • Lettonie • Lituanie • Mexique • Monténégro • Mozambique • Pologne • Serbie • Slovaquie • Slovénie • République tchèque • Thaïlande • Ukraine • Uruguay

ORGANISATION INTERNATIONALE DE LA FRANCOPHONIE

19-21, avenue Bosquet, 75007 Paris France

Tél. : +33 (0)1 44 37 33 00

www.francophonie.org

Si le bâtiment durable fait l'objet d'une littérature abondante et peut s'appuyer sur des réglementations, des programmes de certifications spécifiques ou encore des mesures de soutien facilitant son intégration dans un certain nombre de pays, la situation en zones tropicales, particulièrement dans les pays en développement et émergents qui les composent, est souvent plus problématique. L'urbanisation massive et parfois informelle – couplée à des pratiques de conception et de construction peu adaptées à ces régions – a conduit à de nombreux déséquilibres aussi bien environnementaux qu'économiques et sociaux. Ces impacts apparaissent insoutenables que ce soit au regard des objectifs du développement durable que de l'utilisation efficace des ressources naturelles ou de la qualité de vie des habitants.

Le Guide « bâtiment durable en régions tropicales » a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques et de servir de référence aux professionnels du secteur de la construction et, plus généralement, de l'environnement construit ainsi qu'aux institutions publiques intervenant dans les régions concernées. Il s'inscrit comme une suite du rapport « efficacité énergétique de la climatisation en milieu tropical » publié par l'Institut de l'Énergie et de l'Environnement de la Francophonie (2006), en élargissant les problématiques traitées et en intégrant l'ensemble des perspectives énergétiques et environnementales.

Ce Guide s'inscrit dans le cadre des Initiatives francophones pour la promotion des villes durables en Afrique portées par l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF) à travers son organe subsidiaire l'Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD), et par ses partenaires. En particulier, ce Guide est une réalisation concrète de l'Initiative de la Francophonie pour des Villes Durables (IFVD) cofondée par l'IFDD et l'association ENERGIES 2050 en 2011. En ce sens, il se veut également une opportunité pour chacun de questionner ses pratiques professionnelles et de s'inscrire dans des dynamiques de développement et d'aménagements résilients, sobres en ressources naturelles et en carbone, porteuses d'un mieux-vivre partagé et générateur d'activités économiques répondant aux critères du développement soutenable.

Le premier tome est consacré à l'intégration des objectifs de durabilité dans la conception des nouveaux bâtiments, traitant notamment des stratégies passives de ventilation et d'éclairage ainsi que de la conception des systèmes d'air conditionné.

Ce second tome est complémentaire du premier tome et se concentre sur **l'efficacité énergétique des bâtiments existants en régions tropicales**. Il est axé autour de quatre thématiques principales :

Chapitre 1 : Établir un diagnostic des performances du bâtiment

Chapitre 2 : Isolation thermique du bâtiment

Chapitre 3 : Systèmes d'air conditionné et climatisation

Chapitre 4 : Éclairage, eau et énergies renouvelables



INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE (IFDD)

56, RUE SAINT-PIERRE, 3^e ÉTAGE, QUÉBEC (QUÉBEC) G1K 4A1 CANADA

L'IFDD est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie.

www.ifdd.francophonie.org