



**DIRECTION DES ETUDES ET DES SERVICES
ACADEMIQUES**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE D'INGENIEUR
DE L'EQUIPEMENT RURAL**

Présenté par :
KABRE Kouliga

Thème :

**TROPICALISATION DE L'OUTIL
D'INFORMATION ENERGIE +**

MEMBRES DU JURY

- | | |
|------------------------|-----------|
| 1. Yézouma COULIBALY | Président |
| 2. Ahmed Ousmane BAGRE | Encadreur |
| 3. Mohamed OULD TALEB | Encadreur |
| 4. Francis SEMPORE | Membre |

**UTER Génie
Energétique et
Industriel (G E I)**

DEDICACE

Ce mémoire, qui est le fruit d'un parcours a été rendu possible grâce à l'appui de mes proches sur qui j'ai pu compter.

Je dédie spécialement ce travail à la mémoire
De mon père : KABRE Kouma
Et de ma mère : SAMNE Gompiga
Qui ont guidé mes premiers pas.

Je dédie aussi ce mémoire :
A mes frères et sœurs
A BENI Fiohanko Nadège
A tous ceux qui m'ont apporté leur soutien

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pu être une réalité sans le concours et le support de plusieurs personnes.

Je trouve l'occasion ici d'apporter toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude à ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de mémoire. Je remercie particulièrement :

- Mes encadreurs M. BAGRE Ahmed Ousmane et M. OULD TALEB Mohamed pour leur entière disponibilité.
- M. COULIBALY Yézouma pour sa disponibilité à répondre à mes multiples questions.
- M. SEMPORE Francis pour sa disponibilité à mes préoccupations et à mes questions.
- Tout le corps enseignant du Groupe EIER-ETSHER pour la qualité de la formation reçue durant les trois années.

Mes remerciements vont aussi à tous mes camarades de la 35^{ème} promo pour leur soutien et les bons moments passés ensemble.

Je tiens aussi à remercier :

- M. OUEDRAOGO Abdoulaye enseignant à l'UFR/SEA pour son soutien
- tous ceux ou celles qui de près ou de loin m'ont apporté leur soutien à l'accomplissement de ce travail.

Je voudrais que tous trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

AVANT PROPOS

Dans la formation des élèves-ingénieurs de l'Ecole Inter Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural, le mémoire de fin d'études occupe une place prépondérante. Ainsi après de nombreux projets réalisés en groupes leur permettant l'insertion professionnelle, le mémoire permet d'apprécier leurs capacités individuelles et leur esprit d'initiative.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude de ce thème intitulé « La tropicalisation de l'outil d'information énergie + réalisé dans le cadre d'un programme responsable énergie »

RESUME

AUTEUR : KABRE Kouliga

Professeur responsable encadreur : BAGRE Ahmed Ousmane et OULD TALEB Mohamed

THEME

Tropicalisation de l'outil information énergie +

RESUME

La consommation énergétique des bâtiments tertiaires au Burkina Faso est en grande partie due à la climatisation ensuite suivent l'éclairage et les autres équipements.

Ces installations dimensionnées avec des outils propres aux pays du nord sont à la base d'une importante consommation énergétique et d'un inconfort pour les usagers.

C'est dans ce cadre, qu'à partir des audits énergétiques effectués par le Groupe EIER/ETSHER, nous avons travaillé sur le thème tropicalisation précisément sur la climatisation, l'éclairage et l'eau chaude sanitaire, de l'outil d'information énergie+ élaboré en région Wallonne (Belgique).

La tropicalisation a permis de mettre à la disposition des concepteurs et gestionnaires des bâtiments tertiaires des ratios des choix technologiques appropriées pour l'éclairage et la climatisation. Au niveau de l'eau chaude sanitaire, elle a permis de mettre en place un dimensionnement propre à nos réalités.

Nous souhaitons que ce travail soit le début pour une tropicalisation entière de l'outil d'information énergie+ car la tropicalisation dans sa globalité jettera les bases d'une réglementation de l'énergétique du bâtiment, mais en amont on devra œuvrer à élaborer les audits dans l'optique de leur utilisation future comme documents de base de la tropicalisation de l'outil d'information énergie+.

SOMMAIRE

DEDICACE.....	2
REMERCIEMENTS.....	3
AVANT PROPOS.....	4
RESUME	5
SOMMAIRE.....	6
LISTE DES TABLEAUX.....	9
LISTE DES FIGURES.....	10
PARTIE 1 : GENERALITES	11
1. INTRODUCTION	11
2. OBJECTIF DE L'ETUDE.....	11
3. METHODOLOGIE.....	12
3.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE.....	12
3.2. TRAITEMENT DES DONNEES.....	12
4. PRESENTATION DE L'OUTIL D'INFORMATION ENERGIE+.....	13
PARTIE 2 : ETUDE PRELIMINAIRE	14
1. CHOIX DES THEMES A TROPICALISER.....	14
2. ETAT DES LIEUX DES AUDITS.....	14
3. DEFINITION ET DETERMINATION DES RATIOS DE CONSOMMATION D'ENERGIE ..	15
PARTIE 3 : ETUDES DES THEMES	19
1. ECLAIRAGE	19
1.1. QUELQUES DEFINITIONS.....	19
1.1.1. FLUX LUMINEUX.....	19
1.1.2. INTENSITE LUMINEUSE.....	19
1.1.3. ECLAIREMENT LUMINEUX.....	19
1.1.4. EFFICACITE LUMINEUSE.....	19
1.1.5. LUMINANCE.....	19
1.1.6. TEMPERATURE DE COULEUR.....	19
1.2. NORME D'ECLAIRAGE CAS DE L'AFRIQUE TROPICALE.....	20
1.2.1. ECLAIREMENT SUFFISANT.....	20
1.2.2. ECLAIREMENT UNIFORME.....	21
1.2.3. RENDU DES COULEURS SUFFISANT.....	21
1.2.4. EFFET D'EBLOUISSEMENT.....	21
1.2.5. EFFET D'OMBRE.....	22
1.2.6. EFFET DE REFLEXION.....	22
1.3. TRAITEMENT DU RATIO D'ECLAIRAGE.....	22
1.5. RECOMMANDATIONS POUR UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE (URE)..	24

1.5.1. CHOIX DU SYSTEME D'ECLAIRAGE.....	24
1.5.2. CHOIX DES COMPOSANTS.....	26
1.5.2.1. LAMPES.....	26
1.5.2.2. BALLASTS.....	27
1.5.2.3. LUMINAIRES.....	28
1.5.3. COULEUR PAROIS.....	28
1.6. TEMPS DE RETOUR DE L'INVESTISSEMENT.....	29
2. CLIMATISATION.....	31
2.1. PARAMETRES DU CONFORT THERMIQUE EN AFRIQUE TROPICALE.....	31
2.1.2. TEMPERATURE AMBIANTE.....	31
2.1.3. MOUVEMENTS D'AIR.....	31
2.1.4. HUMIDITE DE L'AIR.....	32
2.1.5. ZONE DE SEJOUR.....	34
2.2. TRAITEMENT DONNEES DE CLIMATISATION ET CHOIX DES SYSTEMES.....	35
2.2.1. TRAITEMENT DES DONNEES.....	35
2.2.1.1. ETAT DES LIEUX : CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS TERTIAIRES.....	35
2.2.1.2. EVALUATION DU BILAN THERMIQUE DE CLIMATISATION.....	38
2.2.2. CHOIX DES SYSTEMES DE CLIMATISATION.....	40
2.2.2.1. PRESENTATION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE CLIMATISATION.....	40
2.2.2.2. CHOIX ENTRE CLIMATISEURS INDIVIDUELS ET CENTRALE DE CLIMATISATION.....	41
2.2.2.3. CHOIX DU TYPE DE CLIMATISATION.....	41
2.2.2.3.1. CLIMATISEURS INDIVIDUELS.....	41
2.2.2.3.2. ARMOIRE DE CLIMATISATION.....	44
2.2.2.3.3. CHOIX DE LA CLIMATISATION CENTRALISEE.....	46
2.2.2.3.3.1. INSTALLATIONS DE CLIMATISATION TOUT AIR.....	46
2.2.2.3.3.1.1. INSTALLATION TOUT AIR A UN SEUL CONDUIT A DEBIT D'AIR CONSTANT.....	46
2.2.2.3.4. INSTALLATIONS DE CLIMATISATION AIR-EAU.....	47
2.2.2.3.5. INSTALLATIONS DEBIT REFRIGERANT VARIABLE.....	48
2.2.3. RECOMMANDATIONS POUR URE.....	49
2.2.3.1. CLIMATISATION INDIVIDUELLE.....	49
2.2.3.2. CLIMATISATION CENTRALE.....	50
3. EAU CHAUDE SANITAIRE.....	51
3.1. INTRODUCTION.....	51
3.2. GISEMENT SOLAIRE.....	51

3.3. PRINCIPAUX COMPOSANTS DU SYSTEME ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	52
3.3.1. COMPOSANTS DU SYSTEME	52
3.3.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	53
3.4. ETUDES PRELIMINAIRES	54
3.4.1. CHOIX DU MODE DE PRODUCTION.....	54
3.4.2. EVALUATION DES BESOINS EN EAU CHAUDE SANITAIRE	54
3.4.3. UNIFORMISATION DES TEMPERATURES DE L'EAU CHAUDE PUISEE.....	55
3.4.4. CHOIX DE LA TEMPERATURE MAXIMUM DU STOCK D'EAU CHAUDE	56
3.4.5. STRATIFICATION ET COEFFICIENT D'EFFICACITE DU BALLON DE STOCKAGE	56
3.5. DIMENSIONNEMENTS DES COMPOSANTS : CAS DU SECTEUR TERTIAIRE	57
3.5.1. BALLON DE STOCKAGE.....	57
3.5.2. ECHANGEUR THERMIQUE	57
3.5.3. SURFACE DE CAPTATION	58
3.5.4. ABSORBEUR ET FLUIDE CALOPORTEUR	58
3.5.5. DIMENSIONNEMENT DES CONDUITES	59
3.5.6. DIMENSIONNEMENT DE LA POMPE ET ACCESSOIRES	61
3.5.7. INCLINAISON DES CAPTEURS	61
3.6. RECOMMANDATIONS POUR UNE UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE ...	62
3.7. ETUDE ECONOMIQUE.....	63
3.7.1. INVESTISSEMENT	63
3.7.2. COUT D'EXPLOITATION	63
3.7.3. COUTS DE MAINTENANCE	64
3.7.4. TEMPS DE RETOUR	64
4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE ..	64
5. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	65
CONCLUSION	68
BIBLIOGRAPHIE.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: <i>liste des édifices audités</i>	15
Tableau 2 : <i>liste de données</i>	15
Tableau 3 : <i>liste de ratios</i>	16
Tableau 4 : <i>données de calcul de ratios</i>	17
Tableau 5: <i>résultats des ratios</i>	18
Tableau 6 : <i>niveaux d'éclairage</i>	20
Tableau 7: <i>valeurs du facteur UGR</i>	22
Tableau 8: <i>valeurs du ratio Rec</i>	22
Tableau 9: <i>systèmes d'éclairage</i>	25
Tableau 10: <i>caractéristiques des lampes</i>	26
Tableau 11: <i>coefficient de réflexion des parois</i>	29
Tableau 12: <i>situation en fonction de la vitesse</i>	32
Tableau 13 : <i>coût et confort des systèmes de climatisation</i>	49
Tableau 14 : <i>domaines d'application des systèmes de climatisation</i>	49
Tableau 15 : <i>consommations moyennes journalières d'eau chaude</i>	55
Tableau 16 : <i>consommations moyennes journalières pour les personnes</i>	55
Tableau 17 : <i>valeur absorptivité des différents matériaux et peintures</i>	59
Tableau 18 : <i>limite des diamètres en fonction de l'épaisseur</i>	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1: accessoires électriques	27	
Figure 2: ballasts électromagnétiques	27	
Figure 3: ballast électronique.....	28	
Figure 4: exemple 1 de luminaire	Figure 5: exemple 2 de luminaire.....	28
Figure 6: Zones de confort thermique sur le diagramme de Carrier.....	33	
Figure 7: Climat de la ville de Ouagadougou mois par mois sur diagramme de Carrier.....	33	
Figure 8: délimitation de la zone de séjour	34	
Figure 9: taux de consommation énergétique de la climatisation.....	35	
Figure 10: consommation énergétique annuelle par mètre carré de surface totale plancher (kWh/m ² /an).....	36	
Figure 11: consommation énergétique annuelle par mètre carré de surface climatisée (kWh/m ² /an).....	36	
Figure 12: coût énergétique moyen (Fcfa).....	37	
Figure 13: charge thermique par surface climatisée	39	
Figure 14: charge thermique par surface totale plancher.....	39	
Figure 15: comparaison niveau sonore de split et de window	42	
Figure 16: split.....	43	
Figure 17: distribution d'air dans le local –	Figure 18: distribution d'air dans le local.....	43
Figure 19: homogénéité de la distribution de l'air traité.....	44	
Figure 20: type d'armoires de climatisation.....	45	
Figure 21: centrale à débit d'air constant.....	46	
Figure 22: centrale air-eau	Figure 23: ventilo-convecteur	47
Figure 24: débit réfrigérant variable	48	
Figure 25: Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère	52	
Figure 26: éléments principaux d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire.....	53	
Figure 27: pertes thermiques (W/m)	62	
Figure 28: coût financier occasionné par les pertes thermiques	63	

PARTIE 1 : GENERALITES

1. INTRODUCTION

L'énergie est un élément transverse à tous ou presque, elle est un facteur indispensable et le gage de tout développement. L'homme, dans sa quête de cette source, a fait appel à l'énergie humaine, l'énergie animale, l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie solaire et l'énergie fossile principalement le charbon et le pétrole. Cette dernière source constitue de nos jours la première ressource énergétique, mais son épuisement futur et son coût font de la maîtrise de l'énergie une nécessité dans les édifices socio-économiques et culturels.

En Afrique, on estime à 60% la consommation d'énergie par la climatisation, 20% à 30% pour l'éclairage et 10% à 20% pour le reste. Réduire la consommation d'énergie nécessite un regard dans la conception des édifices, dans le dimensionnement et la gestion des appareils de climatisation d'éclairage de bureautique et autres équipements consommateurs d'énergie dans le bâtiment.

Energie+ est un outil d'information réalisé dans le cadre du Programme 'Responsable énergie' soutenu par la région Wallonne (Belgique).

Cet outil qui est sous format numérique (CDROM) a été élaboré par le Département Architecture et Climat de l'Université de LOUVAIN en Belgique.

L'outil développé pour la région Wallonne avec les conditions du climat tempéré, trouve une utilisation en Afrique tropicale dans les domaines de la formation de la recherche des études et du dimensionnement d'où l'idée de la tropicalisation de cet outil pour l'adapter aux pays tropicaux d'Afrique.

Cette thématique est d'une grande importance en ce moment ou partout dans le monde l'énergie, nécessaire à toute activité humaine et indispensable à la satisfaction des besoins de bases et à un minimum de développement, constitue un souci majeur avec la flambée du cours de pétrole, la principale source d'énergie utilisée. Ceci impose une gestion rationnelle de cette ressource aux différents pays surtout à ceux d'Afrique tropicale aux moyens limités.

2. OBJECTIF DE L'ETUDE

La tropicalisation de l'outil d'information énergie + vise à :

- ✓ Mettre à la disposition des gestionnaires et autres acteurs des bâtiments tertiaires d'Afrique tropicale des ratios de dimensionnement à même de permettre la maîtrise des dépenses énergétiques ;
- ✓ Optimiser les consommations d'énergie dans les bâtiments tertiaires ;
- ✓ Améliorer le confort thermique ;
- ✓ Réduire le coût de l'énergie par une utilisation rationnelle de l'énergie.

3. METHODOLOGIE

Pour atteindre nos objectifs précédemment énoncés, il a été adopté la procédure suivante :

3.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Cette phase de recherche documentaire a consisté à la collecte d'informations de documents en rapport avec la thématique traitée. Elle a permis de réunir des rapports, des mémoires traitant d'audit énergétique des bâtiments tertiaires et autres affectés à tierces activités. Notons qu'il a été collecté une dizaine de mémoire d'étude et de rapport ayant comme sujet l'audit énergétique. Nous avons également consulté des sites Internet faisant cas du sujet.

Outre cela, il est noté l'apport des informations recueillies auprès de mes encadreurs et des enseignants de l'Unité Thématique et de Recherche en Génie Energétique Industriel (GEI).

3.2. TRAITEMENT DES DONNEES

Faisant suite à la recherche documentaire, dans cette phase nous allons :

- Ressortir et calculer les différents ratios de consommation énergétique et ou d'indication de puissance électrique installée, d'énergie consommée ou tout autre ratio permettant une évaluation comparative liée à l'énergie consommée d'un bâtiment à l'autre ;
- Etudier l'outil Energie+ pour son appropriation. Cette étude permettra d'établir les thèmes à retenir dans le contexte défini, celui du Burkina Faso et développer les thèmes ainsi retenus.

4. PRESENTATION DE L'OUTIL D'INFORMATION ENERGIE+

Energie+ traite de la conception et de la rénovation de l'énergétique des bâtiments tertiaires. Dans sa conception plusieurs thèmes ont suscité le regard des réalisateurs de cet outil. Ce sont :

- ✚ L'éclairage ;
- ✚ La ventilation ;
- ✚ La climatisation ;
- ✚ Le chauffage ;
- ✚ L'eau chaude sanitaire ;
- ✚ La bureautique ;
- ✚ Les cuisines collectives,
- ✚ La conception énergétique des façades et toitures ;
- ✚ Le volet réseau électrique du bâtiment ;
- ✚ La cogénération ;
- ✚ La gestion énergétique du bâtiment.

Ces thèmes sont pour la majorité d'une structuration qui se résume à la présentation des outils de base nécessaire à son appropriation, à la mise en disposition des feuilles de calcul pour une efficacité et rapidité dans l'exécution du dimensionnement, à la présentation des options technologiques, et enfin à l'application d'une étude de cas. L'outil est conçu avec les réalités climatiques et socio-économiques des pays tempérés, en conséquence il ne s'adapte pas bien au climat tropical et aux conditions socio-économiques et culturelles de l'Afrique tropicale en particulier aux pays sahéliens comme le Burkina Faso. En dépit de ce contraste climatique l'outil reste, dans certaines thématiques avec quelques modifications, transposable à nos réalités tropicales.

Pour la présente étude, seront retenus les postes de grande consommation d'énergie.

Nous ferons abstractions des autres thèmes pour d'une part des raisons d'incompatibilité avec nos conditions climatiques et d'autre part des raisons de temps.

PARTIE 2 : ETUDE PRELIMINAIRE

1. CHOIX DES THEMES A TROPICALISER

En Afrique la consommation énergétique des bâtiments repose sur la climatisation, l'éclairage, le bureautique et autres postes de consommation. Le Burkina Faso pays africain n'échappe pas à cette règle.

La bonne marche des activités qui y sont menées et la rentabilité des acteurs demandent un confort thermique et visuel. Le travail ne peut donc s'effectuer dans les normes que si l'on dispose d'un éclairage et aussi si l'individu se trouve dans une ambiance lui permettant d'avoir toutes prédispositions de travail.

L'éclairage et la climatisation sont indispensables aux activités du secteur tertiaire mais aussi des autres secteurs économiques de nos pays, et comme ce sont des postes potentiels de consommation énergétique l'on se doit d'étudier ces postes dans l'optique de mieux gérer leur consommation. C'est dans ce cadre que nous avons choisi de traiter les thèmes d'éclairage et de climatisation. A ces deux thèmes nous avons adjoint la production de l'eau chaude sanitaire par les capteurs solaires, car convaincu que dans un pays sahélien comme le Burkina Faso au fort ensoleillement, il est préférable avec le coût des sources d'énergie de satisfaire les besoins en eau chaude sanitaire à l'aide de l'énergie solaire gratuite et non polluante.

En définitif nous retenons pour notre présente étude la climatisation, l'éclairage et l'eau chaude sanitaire.

2. ETAT DES LIEUX DES AUDITS

L'objet de cette étape est de constituer des ratios énergétiques de référence pour l'exploitation des systèmes de consommation d'énergie dans le bâtiment.

Nous avons, pour se faire, constitué une base de données des audits énergétiques effectués au niveau du Groupe EIER/ETSHER. Ce travail nous a permis de rassembler une dizaine de rapport et mémoire traitant de la thématique audit énergétique du bâtiment. Ces bâtiments abritent entre autres des institutions économique et financière, des institutions publiques et privées. Compte tenu du nombre restreint des audits, la répartition par type d'activité, quand bien même envisagée au départ, a été finalement écartée. Etant donné que les bâtiments sont, pour la plupart, affectés au secteur tertiaire, nous traiterons du secteur tertiaire sans faire cas de l'activité menée. Le tableau qui suit donne la liste des édifices audités.

N°	AUDIT
1	Groupe EIER/ETSHER
2	Hôtel silmandé
3	CNSS
4	CGP
5	CBC
6	BOA (Ouaga)
7	BOA (Bobo)
8	ONATEL
9	Assemblée Nationale

Tableau 1: liste des édifices audités

3. DEFINITION ET DETERMINATION DES RATIOS DE CONSOMMATION D'ENERGIE

Pour caractériser la consommation énergétique des bâtiments ci-dessus cités, il a été procédé à la définition et à la détermination de ratios traduisant la consommation d'énergie, les puissances installées et le coût énergétique dans les édifices. Les données de bases et les caractéristiques dimensionnelles des bâtiments ainsi que les ratios définis sont assignés dans les tableaux qui suivent.

Données	Unité
coût annuel de la consommation électrique (C_t)	kWh
puissance totale souscrite (P)	kW
puissance frigorifique totale de l'édifice (P_0)	kW
Puissance électrique totale installée en climatisation (P_{cl})	kW
puissance électrique totale installée en éclairage ($P_{écl}$)	kW
puissance électrique totale des autres équipements ($P_{éq}$)	kW
Puissance électrique totale installée ($P_{él}$)	kW
consommation électrique annuelle ($C_{sél}$)	kWh
consommation électrique annuelle évaluée en éclairage ($C_{sécl}$)	kWh
consommation électrique annuelle évaluée en climatisation (C_{scl})	kWh
Nombre d'occupants (pers)	pers
surface totale (plancher) de l'édifice (S_1)	m ²
surface totale (plancher) climatisée de l'édifice (S_0)	m ²

Tableau 2 : liste de données

Ratios	Unité
consommation électrique annuelle/surface climatisée (R0)	kWh/m ² /an
consommation électrique annuelle/surface totale plancher (R1)	kWh/m ² /an
consommation électrique annuelle/nombre de personnes (R2)	kWh/pers/an
consommation électrique annuelle évaluée en climatisation/surface totale climatisée (R3)	kWh/m ² /an
consommation électrique annuelle évaluée en climatisation/surface totale plancher (R4)	kWh/m ² /an
consommation énergétique annuelle évaluée en éclairage/surface totale plancher (R5)	kWh/m ² /an
puissance électrique totale installée en éclairage/ surface totale plancher (Rec)	W/m ²
puissance électrique totale installée en climatisation/ surface totale (plancher) climatisée de l'édifice (R6)	W/m ²
Puissance électrique totale installée en climatisation/ surface totale (plancher) de l'édifice (R7)	W/m ²
puissance électrique totale installée/ surface totale (plancher) de l'édifice (R8)	W/m ²
puissance frigorifique totale de l'édifice/ surface totale climatisée de l'édifice (Rct)	W/m ²
puissance frigorifique totale de l'édifice/ surface totale plancher de l'édifice (R*ct)	W/m ²
coût annuel de la consommation électrique/ nombre de personnes occupant l'édifice (R9)	Fcfa/pers
coût moyen du kWh (Cmoy)	Fcfa
coût moyen du kWh/ surface totale (plancher) de l'édifice (Csp)	Fcfa/m ²

Tableau 3 : liste de ratios

Avec ces données et les ratios définis ci-dessus, nous avons obtenu les résultats ci-dessous présentés dans les tableaux qui suivent :

STRUCTURE	Ct (FCFA)	P (kW)	P.cl (kW)	Po (kW)	P.écl (kW)	P.éq (kW)	P.él (kW)	Cs.él (kWh/an)	Cs.écl (kWh/an)	Cs.cl (kWh/an)	S1 (m2)	S0 (m2)	PERS
ETSHER 2006	22169096,00	50,00	-	-	-	-	-	233 855	-	-	3698,73	1345,57	-
EIER 2006	58641488,00	180,00	-	-	-	-	-	594 204	-	-	5056,90	1641,60	-
CDI 2006	7418746,00	25,00	-	-	-	-	-	61 714	-	-	719,46	710,50	-
Hôtel Silmandé 2004	338829077	500	296,9	-	162,217	-	-	3591760	1256543	2190974	5947,11	5711,7	180
Hôtel Silmandé 2003	320126291	500	296,9	-	162,217	-	-	3547794	1256543	2164154	5947,11	5711,7	180
CNSS (2002)	78035084	135	638	532	34,77	178,855	851,625	655757	128876	1011970	5503,91	3244,42	157
CGP	103436070	300	-	479,82	12,908	-	-	689802	-	-	3599,08	2462,51	166
Assemblée .NB	76917701	350	261,325	397	39,165	61,358	361,848	607769	96093	353311	3829,41	3176	-
Assemblée .AB	6949108	60	141,78	210,4	13,59	15,21	170,58	43705	28267,2	181739	2218	1620	-
CBC	24962136	90	163		21,327	37,026	221,353	315018	38305,9	204750	1888,73	1777,76	-
ONATEL	110076024	473	-		-	-	-	553150	-	-	5487	4444	-
CNSS (2004)	90478234	880	604,785	358,811	48,0708	244,687	897,543	798125	80086	576635	7181,06	4100,34	157
BOA OUAGA	44493846	85	150,82	202	17,074	126,205	294,099	399231	51436	351124	1766,2	1609,56	330
BOA BOBO	7970627	30	39,11	94,05	15,694	6,37	61,174	71588	27984	43412,2	620,085	568,29	313

Tableau 4 : données de calcul de ratios

Mémoire de fin d'études : tropicalisation d'énergie +

STRUCTURE	R0 (kWh/m2)	R1 (kWh/m2)	R2 (kWh/pers)	ROM	R3 (kWh/m2)	R4 (kWh/m2)	R5 (kWh/m2)	Rec (W/m2)	R6 (W/m2)	R7 (W/m2)	R8 (FCFA/pers)	R9 (W/m2)	Rct (W/m2)	R*ct (W/m2)	Cmoy (FCFA)	Csp
ETSHER 2006	174	63	1322	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95	0,03
EIER 2006	362	118	2613	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99	0,02
CDI 2006	87	86	2057	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	120	0,17
Hôtel Silmandé 2004	629	604	19954	0,62	384	368	211	27	52	50	1882384	-	-	-	100	0,02
Hôtel Silmandé 2003	621	597	19710	0,38	379	364	211	27	52	50	1778479	-	-	-	100	0,02
CNSS (2002)	202	119	4177	0,40	312	184	23	6	197	116	497039	0,0967	163	97	119	0,02
CGP	280	192	4155	-	-	-	-	4	-	-	623109	0,1333	194	133	112	0,03
Assemblée .NB	191	159	-	0,30	111	92	25	10	82	68	-	0,1037	125	104	131	0,03
Assemblée .AB	27	20	-	0,40	112	82	13	6	88	64	-	0,0949	130	95	159	0,07
CBC	177	167	-	-	115	108	20	11	92	86	-	-	-	-	124	0,07
ONATEL	124	101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	144	0,03
CNSS (2004)	195	111	5084	0,50	141	80	11	7	147	84	576294	0,0500	87	50	113	0,02
BOA OUAGA	248	226	1210	0,12	218	199	29	10	94	85	134830	0,1144	125	114	111	0,06
BOA BOBO	126	115	229	0,11	76	70	45	25	69	63	25465	0,1517	165	152	111	0,18

(-) pas de valeur

Tableau 5: résultats des ratios

PARTIE 3 : ETUDES DES THEMES

1. ECLAIRAGE

Le bien être physique et psychique dépend des conditions de vision d'où le besoin d'un bon éclairage qu'il soit artificiel, naturel ou mixte.

1.1. QUELQUES DEFINITIONS

1.1.1. FLUX LUMINEUX

C'est la quantité d'énergie émise par une source sous forme de rayonnement visible dans toutes les directions par unité de temps.

Symbole : F

Unité : Lumen (lm)

1.1.2. INTENSITE LUMINEUSE

Cette grandeur définit l'importance du flux lumineux émis dans une direction donnée par une source ponctuelle.

Symbole : I

Unité : Candela (cd)

1.1.3. ECLAIREMENT LUMINEUX

C'est le quotient du flux lumineux reçu par un élément d'une surface par l'aire de cet élément. Il caractérise la quantité de lumière reçue par unité de surface.

Symbole : E

Unité : Lux (lx), $1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen} / \text{m}^2$

1.1.4. EFFICACITE LUMINEUSE

C'est le rapport du flux lumineux émis par la puissance électrique. Elle ne prend pas en compte le ballast.

$E = \text{Flux lumineux} / \text{Puissance électrique sans ballast}$

1.1.5. LUMINANCE

Cette grandeur détermine l'aspect lumineux d'une surface éclairée ou d'une source, dans une direction donnée et dont dépend la sensation visuelle de luminosité.

Symbole : L

Unité : cd / m^2

1.1.6. TEMPERATURE DE COULEUR

La température de couleur caractérise la couleur apparente de la lumière émise par une source.

Elle est exprimée en degré KELVIN. Cette notion renseigne sur l'ambiance d'un espace éclairé et permet de classer les lampes en :

- " *teinte chaude* " $TK < 3300 \text{ }^\circ \text{K}$ (lumière chaude)

- " *intermédiaire* " TK entre 3300 ° et 5000 ° K (lumière blanche, neutre)
- " *teinte froide* " TK > 5000 ° K (lumière très blanche, bleutée)

Plus la température des couleurs est élevée, plus le niveau d'éclairage est élevé.

1.2. NORME D'ECLAIRAGE CAS DE L'AFRIQUE TROPICALE

L'éclairage doit créer un environnement visuel confortable et sain qui facilite le déroulement des activités des occupants. D'une manière générale, l'éclairage garantit un confort visuel correct s'il respecte 6 critères :

- Eclairage suffisant ;
- Eclairage uniforme ;
- Rendu des couleurs suffisant ;
- Absence d'éblouissement ;
- Absence d'ombre ;
- Absence de réflexion.

1.2.1. ECLAIREMENT SUFFISANT

Pour faciliter la vision des objets et l'exécution des activités un éclairage minimal se doit être respecté.

Dans le tableau ci-dessous sont assignés les valeurs de l'éclairage moyen sur le plan de travail en fonction de l'activité :

Eclairage moyen recommandé sur le plan du travail (en lux) (à 75 cm du sol : plan utile de travail)	
Type de local	Eclairage moyen recommandé
Bureaux-travaux généraux	500
Bureaux-lecture et écriture continue	750
Tables de dessin	1000
Salles de réunion	500
Bibliothèque et lecture	500
Bibliothèque-étagères	300
Couloirs et escaliers	150
Sanitaires	150
Archives	200

Tableau 6 : niveaux d'éclairage
[Source : Outil d'information énergie+ version 4]

Notons qu'en Afrique dans la majeure partie des cas ces niveaux d'éclairage ne sont pas respectés, ils sont en dessous de ces valeurs ci-dessus présentés.

1.2.2. ECLAIREMENT UNIFORME

L'uniformité de l'éclairage est nécessaire pour éviter d'incessantes et fatigantes adaptations des yeux et pour garantir un niveau d'éclairage suffisant quelque soit l'endroit où l'on dispose le poste de travail. Elle est caractérisée par le rapport de l'éclairage minimum à l'éclairage moyen.

Dans la zone de travail, l'uniformité est acceptable si :

$$E_{\min}/E_{\text{moy}} \geq 0,7$$

Dans la zone environnante, l'uniformité est acceptable si :

$$E_{\min}/E_{\text{moy}} \geq 0,5$$

1.2.3. RENDU DES COULEURS SUFFISANT

L'indice de rendu des couleurs indique les aptitudes de la lumière émise par la source à restituer l'aspect coloré de l'objet éclairé. La Commission Internationale de l'Éclairage (C.I.E.) a défini un indice général de rendu des couleurs IRC ou Ra, évalué sur une échelle de 1 à 100. Il est recommandé d'utiliser des lampes dont l'indice de rendu des couleurs (IRC) est supérieur à 80 dans les lieux de travail où l'activité est continue. Un indice inférieur à 60 ne pouvant convenir qu'à des activités ne nécessitant aucune exigence de rendu des couleurs.

1.2.4. EFFET D'ÉBLOUISSEMENT

L'éblouissement est provoqué par des contrastes de luminance trop forts dans l'environnement visuel immédiat, ou par des sources lumineuses intenses plus éloignées. On distingue deux types d'éblouissement :

✚ L'éblouissement direct, provoqué par les luminaires et les surfaces lumineuses

✚ L'éblouissement indirect, provoqué par réflexion des sources de lumière sur des objets ou des surfaces.

L'UGR (Unified Glaring Rate) a défini un facteur appelé facteur d'UGR qui donne une idée de l'éblouissement d'inconfort dans le champ visuel de l'observateur. Ce facteur UGR varie de 10 à 30. Plus la valeur du facteur est élevée, plus la probabilité d'éblouissement d'inconfort est importante.

Le tableau qui suit donne les valeurs du facteur d'UGR en fonction de l'activité ou du type de local.

type	Valeur UGR
Salle d'archives, escaliers, ascenseur	25
Espace d'accueil	22
Activités normales de bureau	19
Dessins techniques, postes de travail CAD	16

Tableau 7: valeurs du facteur UGR

[Source : Outil d'information énergie+ version 4]

C'est le fabricant qui doit fournir le facteur UGR du luminaire. Mais le concepteur doit lui aussi le recalculer afin de tenir compte de la répartition des luminaires dans le local.

1.2.5. EFFET D'OMBRE

En fonction de sa direction, la lumière peut provoquer l'apparition d'ombres marquées qui risquent de perturber le travail effectué. C'est le cas lorsque la lumière provient du côté droit pour les droitiers et du côté gauche pour les gauchers et lorsque la lumière est dirigée dans le dos de l'opérateur. Il est donc indispensable d'éviter ces cas afin de réduire l'effet d'ombre.

1.2.6. EFFET DE REFLEXION

C'est la réflexion des sources de lumière par des surfaces brillantes se trouvant à l'intérieur ou en périphérie du champ de vision. Elle amoindrit la perception visuelle et peut être une cause importante d'inconfort et de fatigue visuelle (l'exemple de l'écran des ordinateurs).

Tous ces critères sont les mêmes quelque soit le climat et se doivent être réunis pour la réalisation de tâches courantes dans les bâtiments tertiaires.

1.3. TRAITEMENT DU RATIO D'ECLAIRAGE

Dans cette phase, l'idée est de proposer une valeur ou une plage de valeurs du ratio défini par : puissance d'éclairage installé par la surface du plancher, pour les bâtiments tertiaires du Burkina Faso. Ce ratio nous l'avons noté R_{ec} (W/m²).

Nous sommes partis de la détermination dudit ratio, le tableau de résultats donnant le ratio des différents bâtiments audités est présenté ci-dessous :

Ratio des bâtiments tertiaires audités : R_{ec} (W/m ²)								
27	6	4	10	6	11	7	10	25

Tableau 8: valeurs du ratio R_{ec}

Il ressort de ce tableau que dans les bâtiments tertiaires la puissance installée par unité de surface varie de façon sensible. De forte et faible valeur sont constatées 27W/m² et 4W/m², ces valeurs extrêmes s'écartent de la norme laquelle est de 12,5W/m² pour garantir un confort visuel.

Dans les bâtiments où le ratio d'éclairage varie entre 10 et 11W/m², les paramètres du confort visuel en particulier l'éclairage est jugé acceptable. En effet les mesures du niveau d'éclairage au luxmètre ont révélé, dans la plupart de ces bâtiments concernés, les valeurs moyennes suivantes :

- ✓ Bureaux : le niveau d'éclairage se situe entre 150 et 400 lux contre une valeur normative de 500 lux ;
- ✓ Couloir : le niveau d'éclairage se situe entre 40 et 90 lux contre une valeur normative de 150 lux ;
- ✓ Toilettes : le niveau d'éclairage se situe entre 60 et 200 lux contre une valeur normative de 150 lux ;
- ✓ Halls : le niveau d'éclairage se situe entre 100 et 300 lux contre une valeur normative de 300 lux.

Comme les effets d'un ratio de l'ordre de 10 à 11W/m² n'engendrent pas d'inconfort pouvant entraver la bonne exécution des activités, nous proposons une plage de 10W/m² à 12,5W/m².

Avec cette plage de valeurs, 10 à 12,5W/m², des puissances d'éclairage installées par unité de surface les niveaux d'éclairage permettent de mener les tâches affectées à ces bâtiments tertiaires au Burkina Faso. Nous pouvons donc retenir l'intervalle 10 à 12,5W/m² comme des valeurs de dimensionnement dans notre pays.

Toutefois au niveau des bureaux, des guichets de banques et autres lieux où l'activité menée nécessite un effort de vision compte tenu de l'importance du poste il faudra veiller à réduire autant que possible l'écart entre la valeur normale et celle réellement constatée.

Ayant fixé la valeur du ratio de la puissance d'éclairage par unité de surface du plancher, la puissance totale à installer est donnée par la relation :

$$P_{ec} = R_{ec} * S$$

Avec R_{ec} : le ratio d'éclairage en W/m²

S : La surface du plancher à éclairer en m²

P_{ec} : La puissance totale à installer en Watt (W).

Connaissant la puissance totale à installer, il reste à identifier le type de lampe et déterminer le nombre de lampes à installer par la relation :

$$\text{Nombre de lampes} = \frac{P_{ec}}{P_{unit}}$$

Avec P_{unit} : la puissance de chaque lampe (Watt). Notons que la relation n'est valable que si l'on choisit d'installer le même type de lampe.

1.5. RECOMMANDATIONS POUR UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE (URE)

Pour assurer une utilisation rationnelle de l'énergie le concepteur ou le gestionnaire des bâtiments tertiaires, doit veiller à un choix optimum du système d'éclairage, des composants à savoir les ballasts et les lampes, des luminaires, de l'emplacement des installations et de la couleur des parois réfléchissantes que constituent les murs les plafonds et autres objets. Afin d'aider les décideurs à la prise de décisions corroborantes à une URE, il est évoqué dans la suite les éléments permettant les différentes options.

1.5.1. CHOIX DU SYSTEME D'ECLAIRAGE

Le système d'éclairage mise en place influe économiquement et qualitativement sur le fonctionnement des équipements d'éclairage. Il existe différents types de systèmes d'éclairage : l'éclairage direct, l'éclairage indirect, l'éclairage mixte, et l'éclairage à deux composants.

✓ L'éclairage mixte consiste à projeter directement la lumière du luminaire vers la surface du sol ;

✓ L'éclairage indirect consiste à utiliser les murs ou le plafond comme réflecteur de la lumière vers le sol ;

✓ L'éclairage mixte est la combinaison des deux types précédents, toutefois la partie indirecte reste la plus dominante ;

✓ L'éclairage à deux composantes consiste à l'utilisation d'une première composante assurant un éclairage général direct ou indirect de faible éclairement et une deuxième composante assurant l'appoint directement sur la place de travail.

Chacun de ces systèmes comporte des avantages et inconvénients que nous allons confronter dans l'optique de tirer le système s'adaptant à nos conditions.

Type de système	Avantages	Inconvénients
Direct	La lumière n'est pas réfléchi avant d'atteindre la tâche à éclairer. Le rendement est donc meilleur que celui d'un système comprenant une partie indirecte	Il existe un risque d'éblouissement et de contraste entre des zones sombres (par exemple le plafond) et des zones lumineuses.
Indirect	La diffusion de la lumière par le plafond et une répartition uniforme des luminances offrent une bonne protection contre l'éblouissement	la lumière est réfléchi avant d'atteindre la tâche à éclairer, ce mode d'éclairage a un moins bon rendement et demande, à niveau d'éclairage égal, une puissance installée supérieure à celle du système direct.
Mixte	Les avantages de ce mode d'éclairage sont identiques à ceux de l'éclairage indirect : répartition uniforme et absence d'éblouissement. De plus, la partie directe crée des ombres avantageuses et permet de réduire la luminance du plafond.	rendement très sensible aux coefficients de réflexion des parois. il est cependant moins marqué puisqu'une partie de l'éclairage est dirigé directement vers le plan de travail.
Deux composantes	Ce système est énergétiquement le plus intéressant : il associe un faible niveau d'éclairage général et des luminaires ponctuels, en fonction des besoins.	L'inconvénient de l'éclairage ponctuel est qu'il peut générer des contrastes, des ombres marquées ainsi que des réflexions gênantes.

Tableau 9: systèmes d'éclairage

En tenant compte de ces avantages et inconvénients de ces systèmes d'éclairage nous préconisons l'option d'un système direct ou celui à deux composantes ; car le système indirect ou mixte nécessite des luminaires adaptés lesquels ne sont pas courants dans nos pays, de plus le contraste de luminance, principal inconvénient de ces deux types de système d'éclairage pourrait être juguler par compensation provenant de l'utilisation de la lumière solaire.

1.5.2. CHOIX DES COMPOSANTS

1.5.2.1. LAMPES

Les familles de lampes couramment rencontrées dans les bâtiments tertiaires sont :

- ✓ Les lampes à incandescences ;
- ✓ Les lampes fluorescentes ;
- ✓ Les lampes à quartz et halogène.

Pour choisir une lampe, les paramètres suivants sont prises en considération :

- ✓ Le coût ;
- ✓ L'efficacité lumineuse ;
- ✓ La durée de vie ;
- ✓ L'IRC ;
- ✓ La température de couleur.

Dans le tableau qui suit, sont assignées les plages de valeurs des caractéristiques des lampes les plus utilisées dans les bâtiments tertiaires.

Types de lampe	Puissance (W)	Flux Lumineux (lm)	Efficacité Lumineuse (sans ballast) (lm/W)	IRC	T° de Couleur (Kelvin)	Durée de vie utile (heure)	Durée de vie Moyenne (heure)
Incandescente normale	25 à 500	220 à 8400	9 à 17	100	2 700		1 000
Incandescente halogène (tension du réseau)	40 à 2000	500 à 50 000	13 à 25	100	3 000		2 000
Tube fluorescent	14 à 80	1 100 à 6 150	64 à 104	60 à 90	2 700 à 6 500	8 000 à 16 000	14 000 à 18 000
Fluo-Compacte	5 à 55	200 à 4 800	39 à 87	80	2 700 à 4 000	10 000	8 000 à 13 000
Halogénures métalliques	35 à 2 000	3 400 à 189 000	68 à 96	65 à 85	3 000 à 4 600	6 000 à 10 000	10 000 à 18 000

Tableau 10: caractéristiques des lampes

[Source : Outil d'information énergie+ version 4]

A la lumière de ce tableau les lampes fluorescentes et fluo compactes offrent un IRC acceptable pour l'exécution des tâches, une bonne efficacité lumineuse et une durée de vie longue. De plus, comparativement aux autres catégories de lampes, nous avons des puissances nettement faibles ce qui réduit le coût énergétique et donc la sortie de devises du

pays. Ainsi le dévolu sur ces lampes permettrait de faire des économies d'énergie et par conséquence une réduction des montants des factures d'électricité. Notons qu'avec les tubes fluorescents on peut améliorer l'économie d'énergie en optant pour des tubes à section réduite qui ont une bonne efficacité. Mais on doit auparavant s'assurer que le temps de retour l'investissement de la substitution des lampes par les lampes fluorescentes à section réduite, est acceptable.

Exemple de lampes à section réduite :

Tube de diamètre 38 mm a une efficacité lumineuse = 40 à 65 lm/W.

Tube de diamètre 26 mm a une efficacité lumineuse = 80 à 95 lm/W.

1.5.2.2. BALLASTS

Il existe deux familles de ballasts, les ballasts électromagnétiques et les ballasts électroniques.

✓ Le ballast électromagnétique (appelé aussi "inductif" ou "conventionnel") est essentiellement constitué d'un bobinage. Il doit être associé à un starter pour provoquer l'allumage des lampes fluorescentes et occasionne des pertes.

L'utilisation de ballasts électromagnétiques induit un facteur de puissance relativement bas ($\cos = 0,5$), ce qui se traduit par des pénalités de la part de la SONABEL.

Pour relever le facteur de puissance, le ballast est associé à un condensateur afin de compenser le $\cos\phi$.

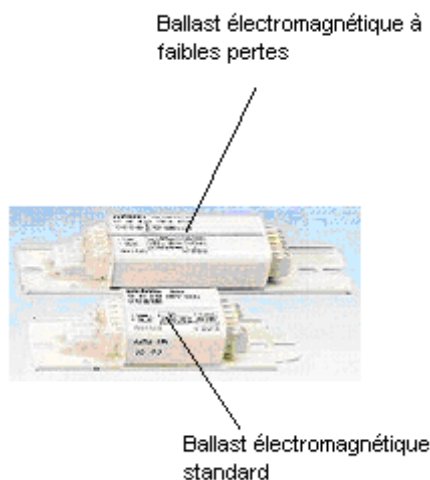


Figure 2: ballasts électromagnétiques

Ce sont ces ballasts qui sont utilisés dans notre pays malgré les accessoires électriques qu'ils nécessitent et aussi les pertes d'énergie qu'ils entraînent.

✓ Le ballast électronique remplace l'ensemble starter, ballast conventionnel et condensateur de compensation du $\cos\phi$.

les avantages du ballast électronique sont :

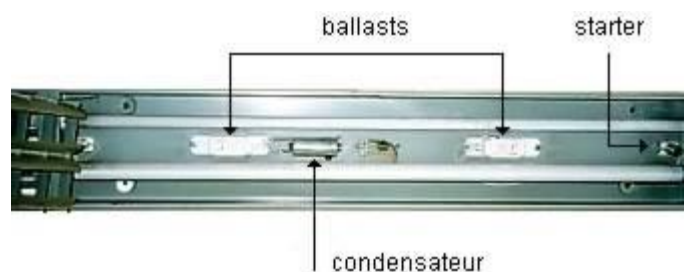


Figure 1: accessoires électriques

- une consommation plus faible qu'un ballast conventionnel.
- Une augmentation de l'efficacité lumineuse et la durée de vie des lampes fluorescentes (jusqu'à 16 000 h).
- Son facteur de puissance est proche de 1.
- Une diminution du niveau de bruit.



Figure 3: ballast électronique

Compte tenu des avantages qu'offrent les ballasts électroniques, il est préférable d'opter pour ces ballasts ou dans une moindre mesure d'utiliser les ballasts électromagnétiques à faibles pertes.

1.5.2.3. LUMINAIRES

Ils servent à renvoyer le maximum de lumière des lampes vers le sol. Le rendement de luminaire est un des critères principal de choix des luminaires.

Il est définit par :

$$\eta = \frac{\text{Flux lumineux émis par le luminaire}}{\text{Flux lumineux de la lampe}}$$

Il varie entre 35% et 90% et est d'autant plus bas que le luminaire comporte des éléments devant la lampe.

Le choix se portera sur les luminaires ayant un bon rendement lumineux.

$$\eta = 0,84$$



Figure 4: exemple 1 de luminaire

$$\eta = 0,69$$



Figure 5: exemple 2 de luminaire

1.5.3. COULEUR PAROIS

Les couleurs claires sont recommandées dans le but d'obtenir un bon coefficient de réflexion des murs, du sol ou du plafond. Les coefficients de réflexion par défaut préconisés sont assignés dans le tableau qui suit :

Coefficients de réflexion par défaut	
Plafond	0,70
Mur	0,50
Sols	0,30

Tableau 11: coefficient de réflexion des parois
[Source : Outil d'information énergie+ version 4]

En plus de cela, les gestionnaires doivent veiller :

- A la sensibilisation des occupants de sorte que ceux-ci éteignent les lampes avant de quitter les bureaux. On peut faire des petites affiches avec l'information suivante « *Veillez éteindre la lumière avant de quitter votre bureau* »
- A limiter l'éclairage en fonction de l'éclairage naturel
- A limiter la durée de fonctionnement de l'éclairage extérieur
- Au nettoyage des lampes et des luminaires

1.6. TEMPS DE RETOUR DE L'INVESTISSEMENT

L'adoption des mesures d'utilisation rationnelle de l'énergie demande un investissement supplémentaires car dans bien des cas, les équipements d'éclairage précédemment cités pour l'URE, ne sont acquis qu'après un effort financier conséquent. Cet effort d'investissement financier peut être à priori la cause d'un rejet de ces mesures. Afin de mieux juger et faire des options viables et rentables, une étude économique s'avère nécessaire.

Pour cela il important de déterminer le temps de retour de l'investissement, le ratio financier qui détermine le rendement du capital investi. Son calcul est un point de passage classique de tout projet d'investissement et un projet d'éclairage n'a aucune raison d'y échapper.

Pour déterminer le temps de retour il faut réunir les données suivantes :

- Le montant total de l'investissement noté I_0 (FCFA) ;
- Le temps de fonctionnement annuel des lampes noté t_f (heures/an) ;
- Le gain de puissance électrique noté G_{PE} (W). Il est donné par :

$$G_{PE} = \text{puissance totale des lampes sans URE} - \text{puissance totale des lampes avec URE}$$

- Le gain d'énergie annuel généré par le gain de puissance électrique, noté E (kWh/an).

Il est donné par la relation : $E = G_{PE} * t_f$

- Le montant (M en FCFA) de l'économie réalisée est donnée par :

$$M = E * \text{prix moyen du kWh}$$

Enfin le temps de retour (t_r) de l'investissement est obtenu par :

$$t_r = \frac{I_0}{M - \text{frais d'entretien}} \text{ (ans)}$$

Notons par soucis de simplification, nous avons fait fi de l'actualisation laquelle relève un peu le temps de retour.

Avec le temps de retour nous pouvons juger de l'opportunité de substituer les lampes.

2. CLIMATISATION

La climatisation est le maintien de la température et du taux d'humidité d'un lieu au moyen d'un ensemble d'équipements. Elle suppose la maîtrise simultanée de paramètres concourant au confort.

2.1. PARAMETRES DU CONFORT THERMIQUE EN AFRIQUE TROPICALE

Le confort thermique est défini comme la situation où l'individu ne ressent une ambiance ni trop chaude ni trop froide ni trop sèche et ni trop humide. Les paramètres déterminant ce confort thermique sont : le métabolisme, l'habillement, le genre, la température de l'air, la température des surfaces environnantes, les mouvements d'air, l'humidité de l'air.

2.1.2. TEMPERATURE AMBIANTE

La sensation du confort thermique dépend entre autres de la température sèche de l'air et aussi de la température rayonnante des parois environnantes ; un milieu présente une sensation d'inconfort dans le cas où les parois environnantes sont à des températures trop élevées et cela même si les autres conditions du confort thermique sont réunies. Ainsi pour tenir compte de l'influence de la température des parois il a été défini une température ambiante résultante de la température de l'air et celle des surfaces environnantes. C'est la moyenne arithmétique de ces deux températures :

$$T_R = \frac{T_A + T_P}{2}$$

Avec T_A : température de l'air ambiant

T_P : moyenne arithmétique des températures des parois environnantes

De façon générale il est admis qu'une différence de 3°C seulement entre la température des parois et l'air conditionné confère à l'individu une impression d'inconfort.

De plus lorsque l'écart entre la température extérieure et la température du local climatisé est très élevée, il se produit un phénomène le choc thermique : les personnes se trouvant à l'extérieur ont une sensation de frissons quand elles franchissent le seuil du local climatisé. Pour remédier à cela on doit veiller à ce que l'écart entre température du local et celle de l'extérieur ne soit pas trop élevé.

2.1.3. MOUVEMENTS D'AIR

La vitesse de l'air joue un rôle important dans la sensation de confort ressenti par les individus. A température et humidité égale, c'est la vitesse de l'air qui régule les flux de chaleur entre le corps et le milieu ambiant. L'effet de la vitesse de l'air n'est sensible au niveau de l'individu qu'à partir de 0,2 m/s.

Le tableau suivant donne les différentes situations suscitées par la vitesse de l'air.

Vitesse (m/s)	Situation
0,2	début sensation du vent par les individus
1,5	situation moyenne conseillée dans les locaux
5	début de l'inconfort absolu

Tableau 12: situation en fonction de la vitesse

[Source : efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, Tome1]

La vitesse de l'air ne doit pas excéder 0,2 m/s dans les locaux.

2.1.4. HUMIDITE DE L'AIR

L'humidité relative qui est le rapport de la pression de vapeur d'eau de l'air à la pression de vapeur saturante est un paramètre non moins important dans la sensation du bien être en climatisation. Lorsque elle est élevée on ressent un temps lourd humide et suffocante, et basse on a un air sec. Il faut donc pour un confort, trouver le juste milieu auquel l'ambiance est confortable. Dans la documentation des plages de confort existent, mais sont la plupart des cas en rapport avec les pays tempérés. Pour l'Afrique tropicale des études ont révélés les plages de confort thermique qui suivent :

$20^{\circ}\text{C} < \text{Température} < 27^{\circ}\text{C}$

$20\% < \text{Humidité} < 80\%$

En Côte d'Ivoire dans la zone tropicale sèche, d'après une étude du PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie), la température sèche de confort est située entre 26°C et 27°C et l'humidité relative située entre 50% et 55%. Le Burkina Faso étant un pays frontalier avec la zone sèche de ce pays nous pouvons envisager maintenir ces plages de valeur de ces deux paramètres au Burkina Faso. Mais dans les audits la température sèche de confort, après enquête auprès des occupants, est de 24°C ou 25°C . C'est pourquoi une température de consigne flottante entre 24° et 27° , régulée en fonction de la température extérieure est conseillée.

Les figures ci-dessous présentées donnent les limites de la zone de confort thermique.

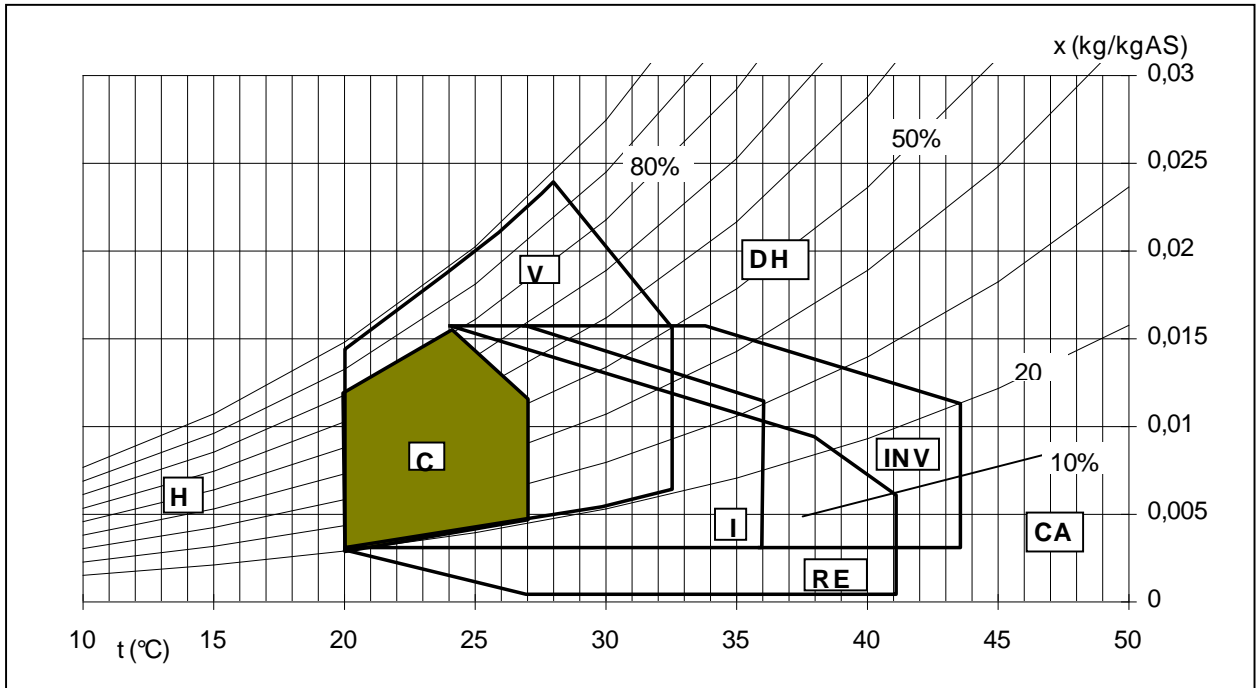


Figure 6: Zones de confort thermique sur le diagramme de Carrier

[Source : Sud Sciences & technologies N°2 Juillet 1998]

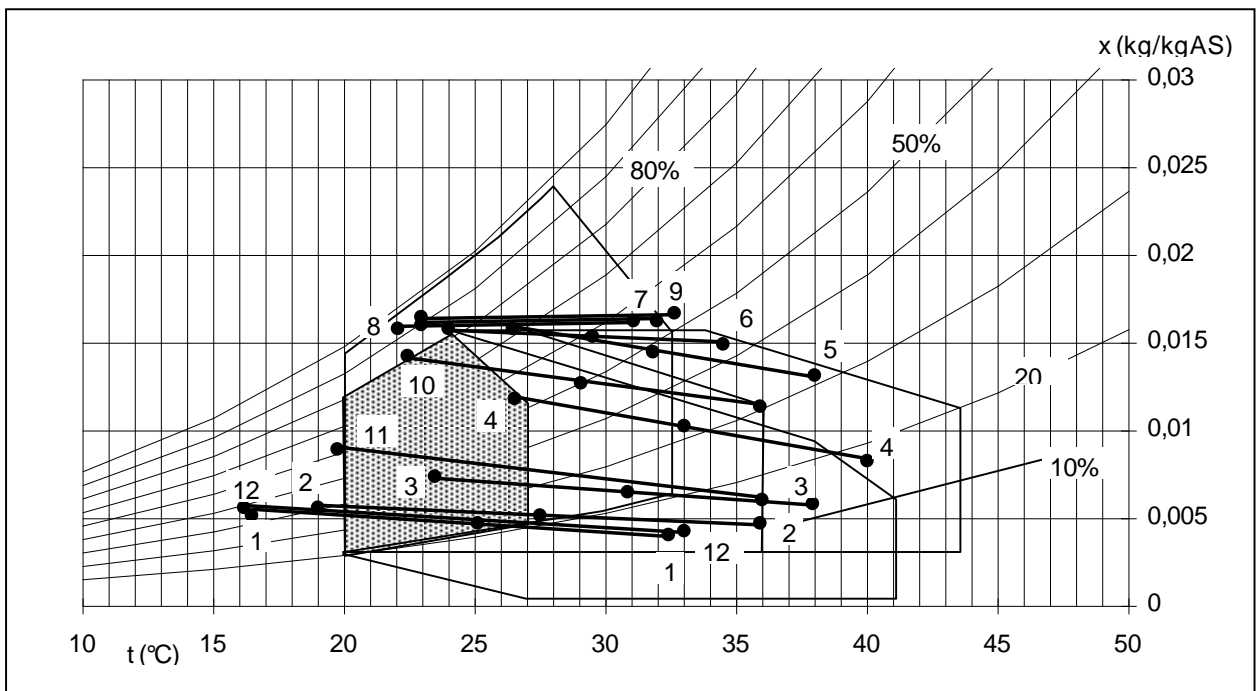


Figure 7: Climat de la ville de Ouagadougou mois par mois sur diagramme de Carrier

[Source : Sud Sciences & technologies N°2 Juillet 1998]

- La figure 6 présente cette zone de confort (C) sur le diagramme de Carrier. Hors de la zone de confort ainsi définie, le confort thermique n'est possible qu'en utilisant des moyens artificiels tels que le chauffage (H), la ventilation (V), l'humidification de l'air (RE), les habitations à forte inertie thermique (I), la combinaison forte inertie et ventilation nocturne (INV) et enfin la climatisation active (CA). En générale, la méthode la plus efficace est la climatisation active qui permet de créer artificiellement une ambiance confortable à partir de toute ambiance inconfortable.
- La figure 7 présente le climat de la ville de Ouagadougou sur le diagramme de Carrier. Les segments numérotés de 1 à 12 représentent les mois de l'année. Chaque mois présente une température moyenne au centre du segment ainsi que les maximum et minimum du mois. La figure permet ainsi de se rendre compte des besoins de climatisation de la ville mois par mois. On constate que les mois d'avril et mai sont les plus difficiles.

2.1.5. ZONE DE SEJOUR

Précédemment nous avons répertorié les différentes grandeurs d'influence qui joue un rôle dans la sensation du confort thermique. Il a été donné aussi la valeur ou les plages de valeurs de ces grandeurs conférant une sensation de confort, mais la vitesse de l'air, l'humidité, la température de confort ne peuvent être maintenus dans les limites de confort dans un local, en effet la vitesse de soufflage, la température de l'air soufflé sont différentes de ces valeurs à la sortie du terminal des climatiseurs. Il est donc nécessaire de définir une zone de séjour à l'intérieur de laquelle la sensation de confort thermique devra être ressentie par la majorité d'individus. En dehors de cette zone, les conditions propres à permettre la sensation de confort thermique peuvent ne pas être réunies et aussi ne peuvent être exigées. La figure qui suit donne la délimitation de la zone de séjour dans une pièce.

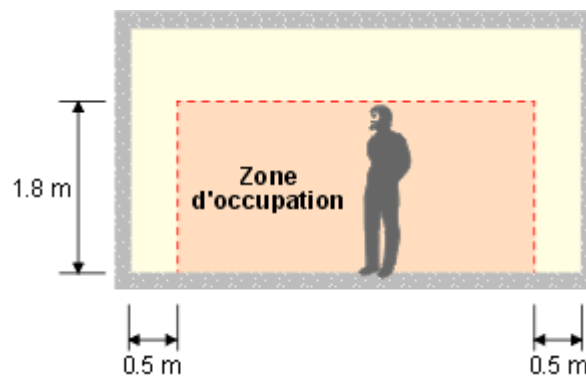


Figure 8: délimitation de la zone de séjour

2.2. TRAITEMENT DONNEES DE CLIMATISATION ET CHOIX DES SYSTEMES

2.2.1. TRAITEMENT DES DONNEES

2.2.1.1. ETAT DES LIEUX : CONSOMMATION ENERGETIQUE DES BATIMENTS TERTIAIRES

La consommation énergétique des bâtiments tertiaires audités est en majorité représentée par celle des appareils de climatisation. Le pourcentage par rapport à la consommation électrique totale varie entre 48% et 66%, notre pays n'est donc pas une exception dans l'Afrique subsaharienne où le taux varie de 50% à 70% d'après le PRISME.

La figure qui suit donne le pourcentage de la consommation du poste de climatisation pour différents bâtiments tertiaires.

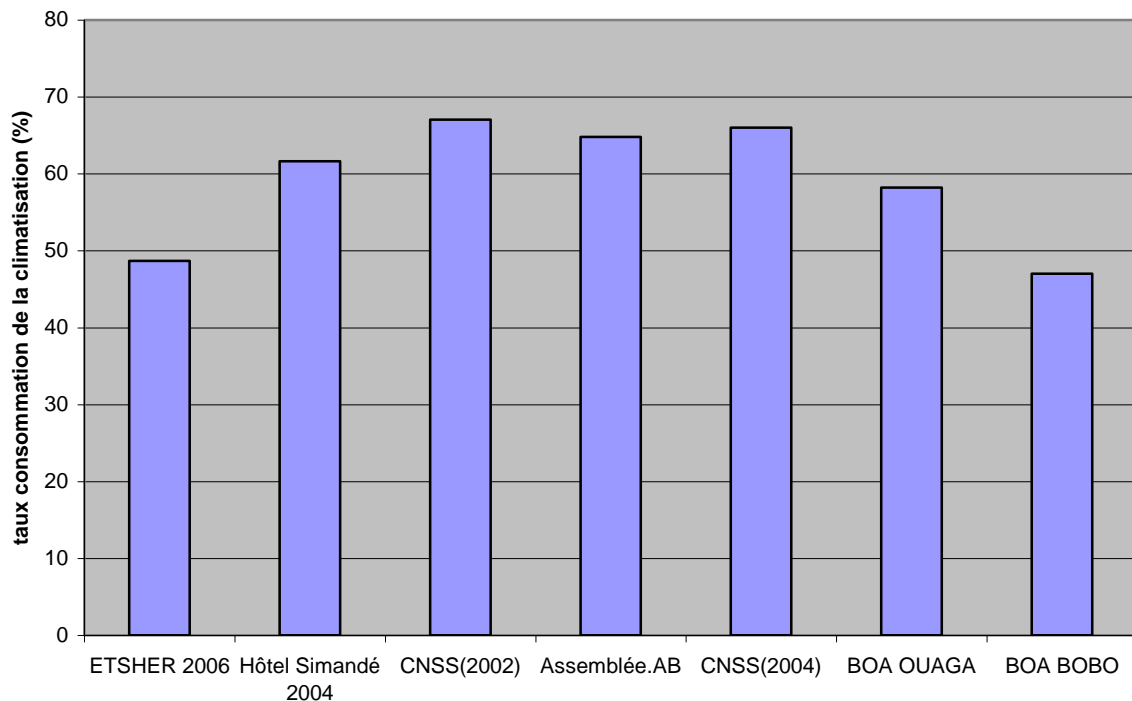


Figure 9: *taux de consommation énergétique de la climatisation*

Outre cela, la consommation énergétique par mètre carré de surface est élevée dans la majorité des cas, en témoigne la figure suivante qui traduit la consommation énergétique par mètre carré de surface climatisée (la représentation graphique du ratio R_0 et R_1 ci-dessus définis) :

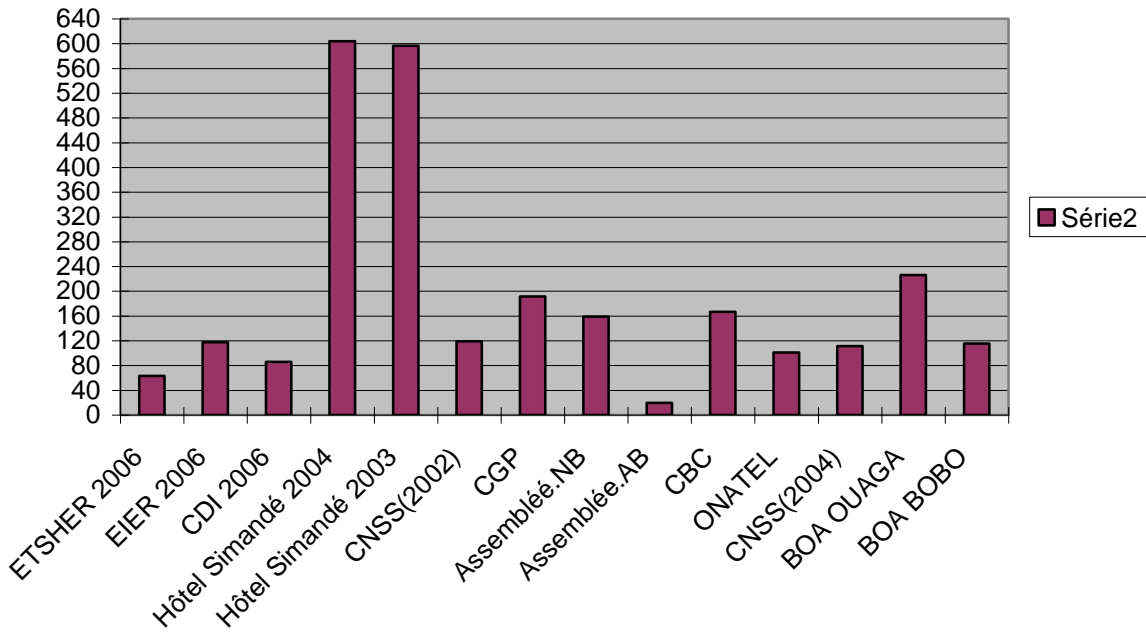


Figure 10: consommation énergétique annuelle par mètre carré de surface totale plancher (kWh/m²/an)

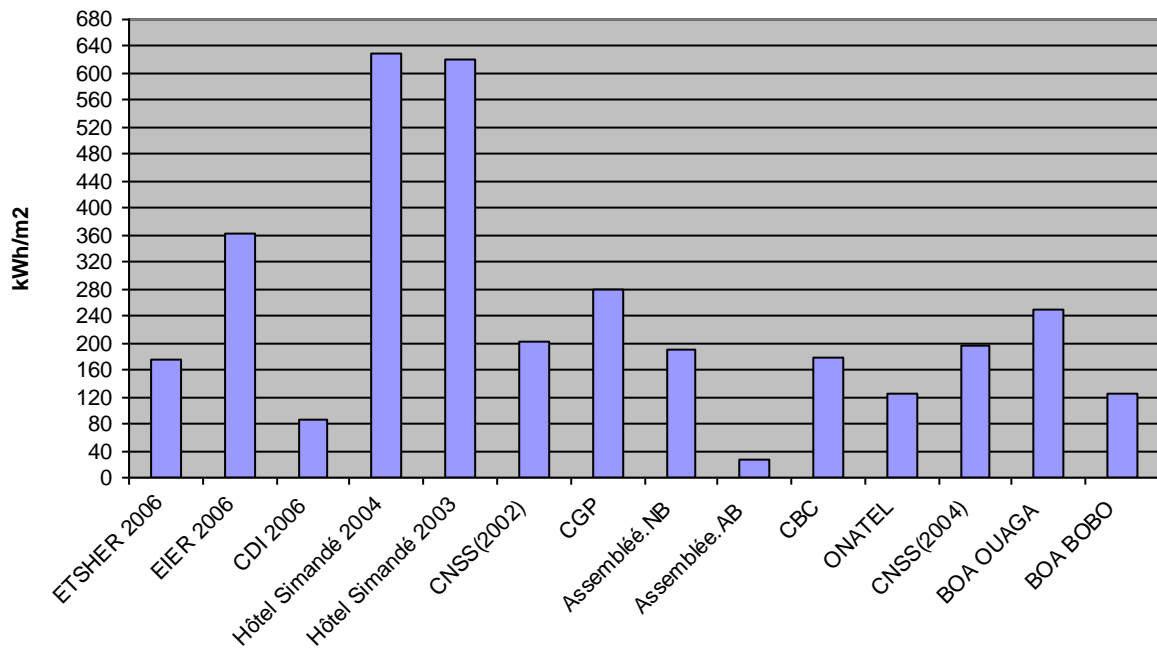


Figure 11: consommation énergétique annuelle par mètre carré de surface climatisée (kWh/m²/an)

D'après ce graphe le ratio R_0 est pour la plupart des cas, supérieur à la plage de valeurs fixée par la norme européenne figurant dans énergie+ et valable pour les pays tempérés, il est aussi supérieur à la norme définie par l'Etat ivoirien, Etat frontalier du Burkina Faso. Il en découle

que la consommation énergétique des appareils de climatisation dans les bâtiments audités est excessive et cela en tenant compte du tableau qui suit.

Type d'activité	Plage du R ₀ (kWh/m ² /an)	Appréciation	Référence
Grand immeuble de bureaux	>275	médiocre	160
Petit immeuble de bureaux	>250	médiocre	150
Grand hôtel	>300	médiocre	180
Hôpital	>400	médiocre	250
Centre commercial	>300	médiocre	200

Tableau 13 : *Indice de consommation des bâtiments climatisés en Côte d'Ivoire (kWh/m²/an)*
 [Source : système de ventilation et de climatisation, fiche technique du PRISME n°2]

La climatisation se place ainsi au premier rang de la consommation énergétique, la première source de dépense énergétique des bâtiments à vocation tertiaire dans notre pays et plus que jamais il est primordial de se pencher sur ce poste dans le but de réduire sa consommation au vue du coût moyen du kWh d'énergie de la société nationale d'électricité dans les bâtiments tertiaires audités. Dans la figure qui suit donne le coût moyen par bâtiment audité :

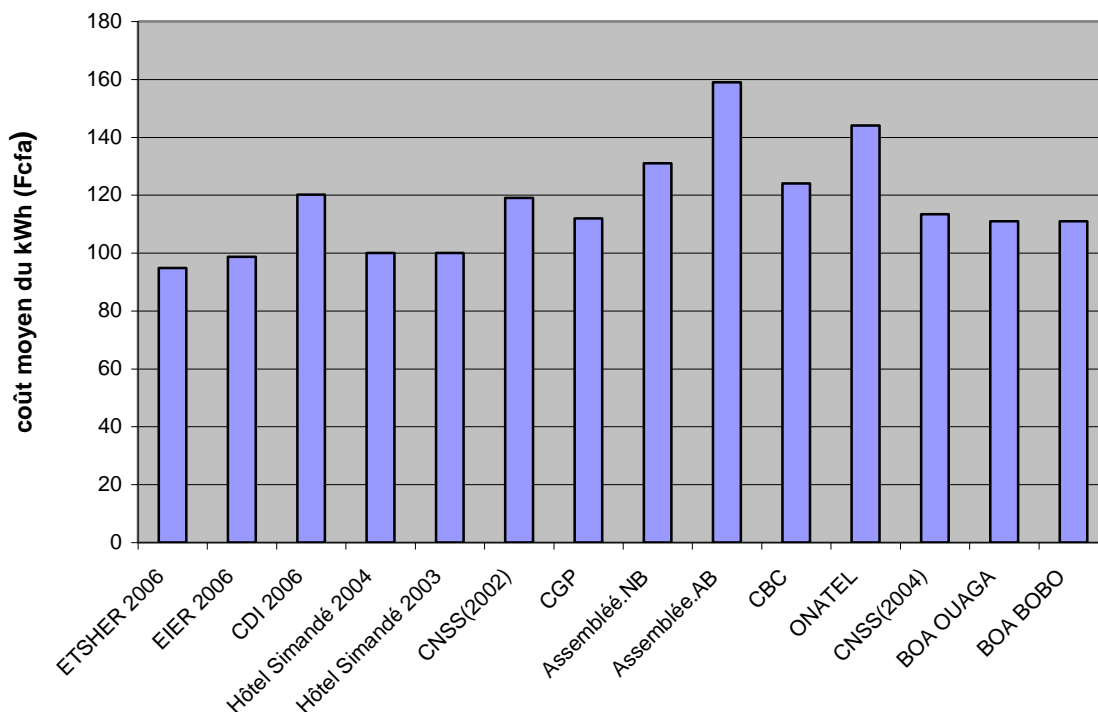


Figure 12: *coût énergétique moyen (Fcfa)*

D'après cette figure le coût moyen du kWh tourne autour de 100 Fcfa.

Ce poste, responsable de la sortie de devises par sa consommation énergétique, doit son caractère énergétivore à :

- sa conception ;
- son exploitation ;
- son entretien si celui-ci existe ;
- la conception du bâtiment.

Dans la suite nous allons nous appesantir sur :

- l'évaluation de charge thermique desdits bâtiments ;
- le choix du ou des systèmes appropriés à nos réalités ;
- les différents éléments permettant l'utilisation rationnelle de l'énergie en climatisation.

Cela afin de mettre à la disposition des concepteurs et gestionnaires des bâtiments des éléments en même de faciliter et d'optimiser leur tâche.

2.2.1.2. EVALUATION DU BILAN THERMIQUE DE CLIMATISATION

Le but est de mettre à la disposition des concepteurs un outil simple permettant d'estimer la charge thermique des bâtiments tertiaires.

Le bilan thermique est l'estimation de la quantité de chaleur à évacuer afin de maintenir le confort thermique précédemment défini.

Il permet de déterminer la puissance frigorifique de l'installation de climatisation laquelle assurera le confort dans la zone de séjour délimitée plus haut.

Plusieurs méthodes d'évaluation du bilan thermique existent. Cependant les méthodes suivantes ont été rencontrées dans les audits bâtiments tertiaires que nous avons collectés :

- La méthode de CARRIER ;
- La méthode de York ;
- L'évaluation du bilan thermique intégrant la méthode de Libert.

Ce sont les résultats obtenus avec la dernière méthode citée que nous avons utilisée, car elle prend en compte les conditions atmosphériques ce qui lui confère des résultats acceptables par rapport aux autres méthodes.

Pour atteindre l'objectif fixé, il a été procédé comme suit :

D'abord nous avons collectés les données que sont la surface totale de plancher, la surface totale climatisée et la charge thermique évaluée avec la méthode choisie.

Ensuite, il a été calculé les ratios suivants :

$$R_{ct} = \frac{\text{Charge thermique}}{\text{Surface totale climatisée}} \quad R_{ct}^* = \frac{\text{Charge thermique}}{\text{Surface totale du plancher}}$$

Avec les valeurs des deux ratios et les superficies des bâtiments, nous avons procédé au tracé des deux graphes que sont R_{ct} en fonction de la surface totale climatisée et R^*_{ct} en fonction de la surface totale du plancher.

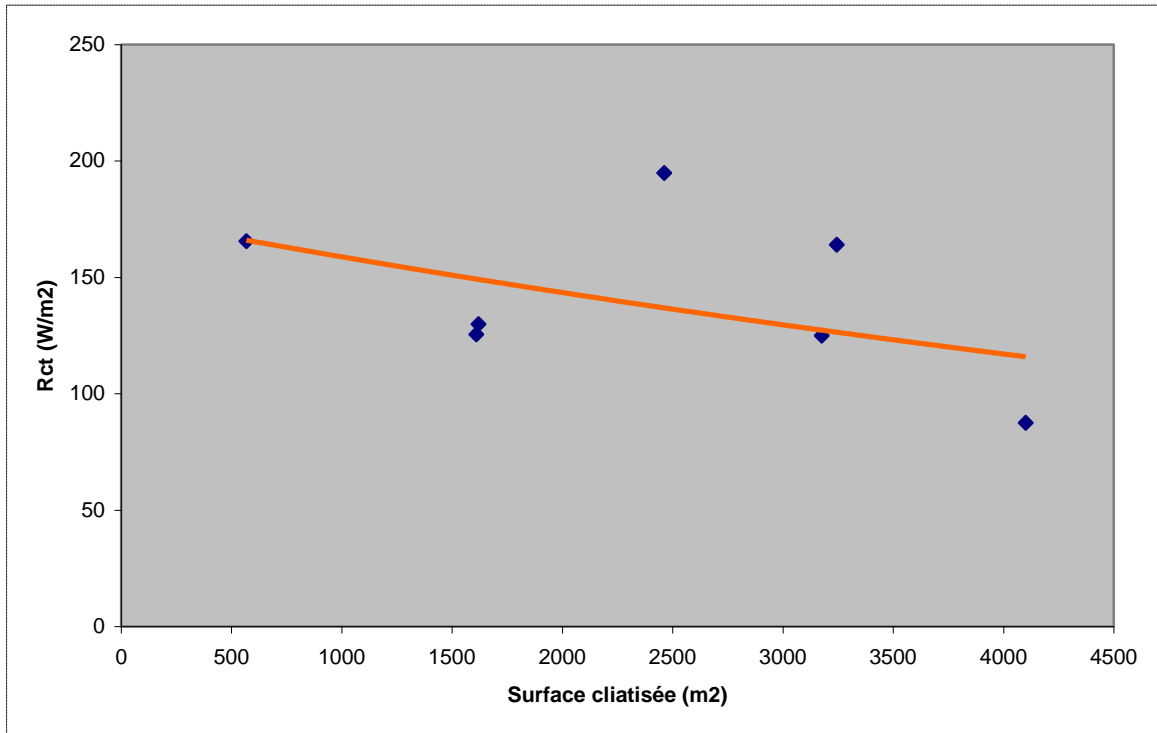


Figure 13: charge thermique par surface climatisée

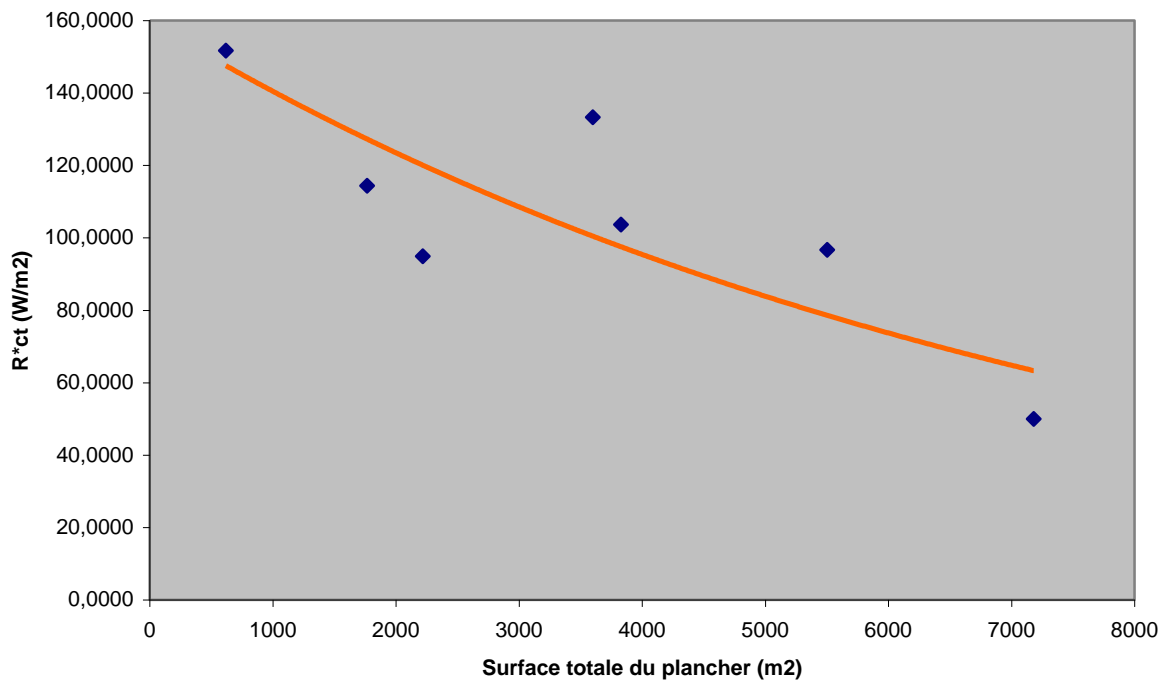


Figure 14: charge thermique par surface totale plancher

Il ressort de ces deux figures deux courbes d'estimation des ratios R_{ct} et R^*_{ct} . En connaissant la superficie totale à climatisée ou la superficie totale du plancher du bâtiment tertiaire que l'on veut aménager, on a par projection le ratio R^*_{ct} ou R_{ct} et la charge thermique est donnée par la relation :

$$\text{Charge thermique} = \text{surface totale climatisée} * R_{ct} \text{ avec la surface en } m^2 \text{ et } R_{ct} \text{ en } W/m^2$$

ou

$$\text{Charge thermique} = \text{surface totale du plancher} * R^*_{ct} \text{ avec la surface en } m^2 \text{ et } R^*_{ct} \text{ en } W/m^2$$

Ainsi nous obtenons la charge thermique du bâtiment (la puissance frigorifique) ce qui nous permet de choisir le système de climatisation à installer.

La puissance électrique des appareils de climatisation à installer dans le bâtiment est obtenue par application de la relation suivante :

$$\text{Puissance de climatisation à installer} = \frac{\text{Charge thermique}}{COP}$$

Avec la puissance de climatisation et la charge thermique en Watt (W) et le COP (coefficient de performance) de l'appareil de climatisation.

2.2.2. CHOIX DES SYSTEMES DE CLIMATISATION

Après avoir évalué la charge thermique à évacuer pour assurer le confort des occupants, nous allons passer au choix du système de climatisation à installer. Il est noté qu'un choix approprié est source d'économie alors qu'un choix inadapté est source de gaspillage ou d'inconfort.

2.2.2.1. PRESENTATION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE CLIMATISATION

Il existe deux grandes familles d'installations de climatisation et de conditionnement d'air :

Les installations tout air : Dans cette catégories d'installation seul l'air est utilisé pour évacuer les calories du local.

On distingue :

- les installations à un seul conduit, les unités de toitures (roof top) et les CTA.
- les installations à détente directe : cette catégorie d'installations regroupe les unités monoblocs de fenêtre, les splits systems et les armoires de climatisation.
- les installations air et eau : dans ces installations l'eau est utilisée comme médium pour l'évacuation des calories. L'air hygiénique est apporté par un réseau distinct aux occupants.

De ces types de climatisation hormis les climatiseurs individuels et les armoires de climatisation, sont des systèmes de climatisation centralisée.

2.2.2.2. CHOIX ENTRE CLIMATISEURS INDIVIDUELS ET CENTRALE DE CLIMATISATION

L'option entre la climatisation individuelle et la climatisation centrale impose une étude comparative de ces deux modes de climatisation.

La climatisation individuelle se compose des petites machines frigorifiques à savoir les Split system et les petits monoblocs (windows).

Ces appareils offrent les avantages suivants : montage facile, maintenance aisée, très bon marché, fonctionnement aisé. Par contre ils sont très bruyants surtout les petits monoblocs. Ils provoquent des courants d'air source d'inconfort et nuisent à l'esthétique du bâtiment.

Le choix d'un système de climatisation individuelle est judicieux lorsque la charge thermique à évacuer est moins importante. De façon générale, pour une puissance frigorifique comprise entre 2,5 kW et 75 kW on optera soit pour les climatiseurs individuels soit les armoires de climatisation.

La climatisation centralisée qu'elle soit à détente directe, tout air ou air eau est envisageable lorsque la puissance frigorifique à fournir est élevée. Elle offre un bon confort thermique et acoustique mais le coût à l'investissement est élevé ainsi que la maintenance.

Au Burkina Faso la climatisation individuelle et la climatisation centrale coexistent le plus souvent dans les bâtiments tertiaires. Les climatiseurs individuels sont utilisés dans les bureaux et les centrales de climatisation sont utilisées à la fois pour les bureaux, les salles de réunion et les halls. En raison du coût réduit et de leur simplicité, les climatiseurs individuels sont dans bien des cas préférés au détriment de la climatisation centralisée et ce en dépit des inconvénients qu'ils suscitent, mais le rôle du projeteur sera de déterminer l'installation appropriée et ce simultanément des points de vue technique et économique.

Il ne serait donc pas judicieux de remplacer une climatisation centrale par un ensemble de climatiseurs individuels offrant la même puissance frigorifique, on doit donc veiller à installer une climatisation centrale quand la charge thermique et l'activité affectée au local l'exigent. De même opter pour une climatisation centrale pour évacuer une faible charge thermique serait source de gaspillage d'énergie.

2.2.2.3. CHOIX DU TYPE DE CLIMATISATION

2.2.2.3.1. CLIMATISEURS INDIVIDUELS

On distingue plusieurs types de climatiseurs : les monoblocs de fenêtre (Window) et les splits systems et les unités de toitures (roof top).

En fonction de la puissance frigorifique du local à climatiser nous pouvons en premier lieu faire une option et ce en consultant les catalogues des constructeurs.

Une fois identifié le type de climatiseurs présentant une puissance frigorifique suffisante pour assurer le confort thermique du local, nous pouvons orienter notre choix sur les appareils de confort acoustique acceptable gage d'un travail intellectuel en toute quiétude. La recherche de la performance acoustique conduit d'emblée à écarter les climatiseurs monoblocs et les climatiseurs de "fenêtres" lesquels présentent souvent de mauvaises caractéristiques acoustiques puisque condenseur et compresseur sont directement en contact avec le local à climatiser et que toutes les vibrations y sont transmises à l'intérieur.

La figure suivante donne une comparaison du niveau sonore entre splits et windows.

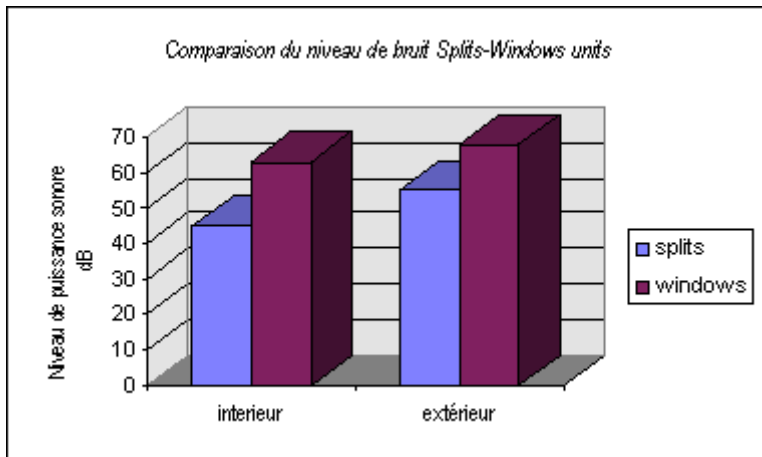


Figure 15: comparaison niveau sonore de split et de window

Ainsi, les splits systems seront préférés aux monoblocs de fenêtre. Cependant dans l'optique de recherche de meilleures performances acoustique et thermique dans la zone de séjour mais aussi d'un fonctionnement économique, on veillera au choix de l'emplacement des unités intérieure et extérieures du split system.

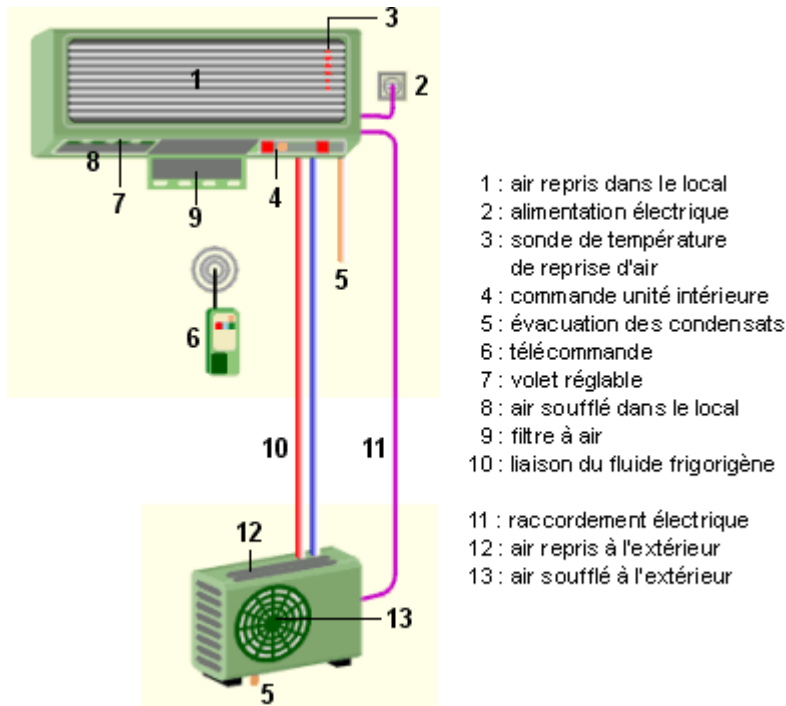


Figure 16: *split*

L'emplacement de l'unité intérieure conditionne fortement le confort des occupants. Le jet d'air doit se localiser en dehors de la zone de d'occupation, il ne doit en aucune condition rentrée en contact avec les occupants. La position la plus favorable est un soufflage horizontal sous plafond qui permet d'éviter la stratification de l'air et les courants d'air inconfortables dans la zone d'occupation. Dans ce cas l'existence de parois de séparation de bureaux ne doit pas constituer un obstacle à la circulation de l'air dans le local.

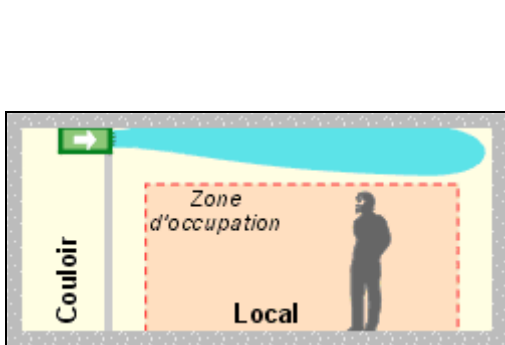


Figure 17: *distribution d'air dans le local – soufflage par grille normale*

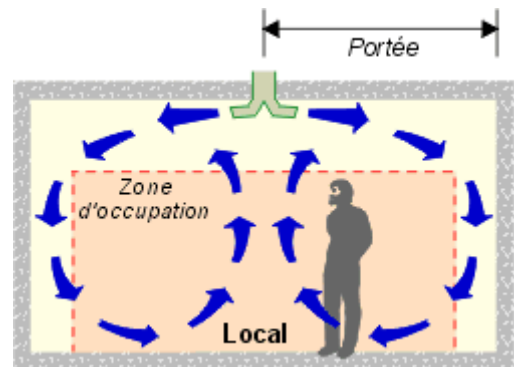


Figure 18: *distribution d'air dans le local soufflage horizontal sous plafond*

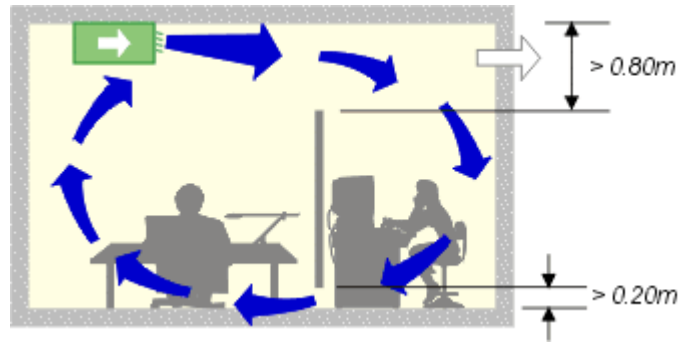


Figure 19: homogénéité de la distribution de l'air traité

L'emplacement de l'unité extérieure (compresseur et condenseur) est d'une incidence sur l'esthétique du bâtiment mais surtout sur l'efficacité énergétique du climatiseur.

L'unité extérieure doit être placée de sorte à :

- ne pas dégrader l'efficacité énergétique : dans un pays sahélien comme le notre il faut préconiser l'emplacement à l'ombre et éviter aussi de le placer face aux vents dominants Est-Ouest ;
- préserver l'esthétique du bâtiment ;
- faciliter l'entretien en la plaçant en des endroits accessibles et n'entravant pas son fonctionnement ;
- éviter les nuisances sonores au voisinage.

Projeteur et maître d'ouvrage doivent donc travailler à ce que ces dispositions soient respectées même si elles nécessitent un investissement supplémentaire ; car à l'exploitation elles auront des retombées bénéfiques tant au niveau du confort qu'au niveau coût d'exploitation. En outre, un choix du thermostat ainsi que de son emplacement donnera au système une efficacité énergétique, et aux occupants le confort souhaité.

Etant dans un pays sahélien connaissant des aléas climatiques, nous opterons pour des condenseurs à air. Ce choix à l'avantage de réaliser une économie d'eau, d'éliminer les problèmes de corrosions et de l'entartrage souvent rencontrés dans les condenseurs à eau.

2.2.2.3.2. ARMOIRE DE CLIMATISATION

Une armoire de climatisation est un caisson de traitement d'air vertical installée dans le local à climatisé. Son installation est envisageable lorsque la puissance frigorifique nécessaire est élevée.

Elle renferme tous les éléments nécessaires d'une installation de climatisation à savoir le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur appelé batterie froide. Elle tient sa dénomination climatisation autonome par le fait que la batterie froide est directement parcourue par le fluide frigorigène. Mais il en existe certaines armoires dont la batterie est

parcourue par l'eau glacée provenant de centrale de climatisation, dans ces cas les armoires ne représentent que les éléments terminaux de la climatisation centrale.

De part la typologie de refroidissement du condenseur, on distingue différentes armoires de climatisation :

- les armoires à condenseur à air intégré ;
- les armoires à condenseur à air séparé ;
- les armoires à condenseur à eau associé à une tour de refroidissement.

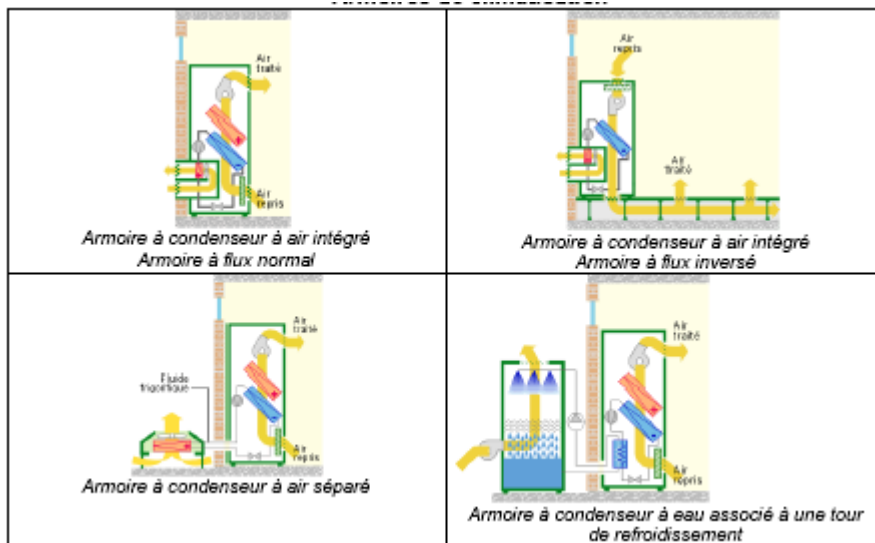


Figure 20: type d'armoires de climatisation

Les armoires de climatisation sont à utiliser dans nos régions pour la climatisation des salles informatiques, des salles contenant des équipements électroniques et des grands espaces tels les bibliothèques. Seulement des inconvénients subsistent :

- les armoires à condenseur à air intégré sont bruyantes et n'offrent donc pas un confort acoustique acceptable. Elles sont délaissées de nos jours.
- les armoires à condenseur à air séparé peuvent occasionner des pertes de charges sur le circuit du fluide frigorigène et cela dû à l'éloignement.
- les armoires à condenseur à eau associé à une tour de refroidissement ne génèrent pas de bruits, mais dans un pays comme le Burkina Faso où l'eau est une denrée précieuse l'installation d'un tour de refroidissement ne saurait être économique que si l'on se trouve à proximité d'une retenue d'eau. Autrement le coût de l'eau s'ajouterait au coût d'exploitation.

En définitif nous choisissons l'armoire à condenseur à air séparé, mais lorsque l'activité menée dans le local permet d'engranger des bénéfices à même de supporter le coût

d'installation et de maintenance d'une armoire à condenseur à eau associé à une tour de refroidissement nous préconiserons celle-ci.

2.2.2.3.3. CHOIX DE LA CLIMATISATION CENTRALISEE

La climatisation centralisée est recommandée pour des puissances frigorifiques très élevées.

Nous avons deux grands types d'installation de climatisation centrale :

- Les installations tout air qui ont la particularité d'utiliser l'air pour l'évacuation de la charge thermique, on distingue dans cette catégorie les installations à débit d'air constant et les installations à débit d'air variable.
- Les installations air- eau où l'on distingue un réseau d'eau et un réseau d'air. Le réseau d'eau est utilisé pour évacuer la charge thermique alors que le réseau d'air sert à fournir l'air hygiénique aux occupants. On distingue deux principaux types d'installations les installations à éjecto-convecteurs et les installations à ventilo-convecteurs.

2.2.2.3.3.1. INSTALLATIONS DE CLIMATISATION TOUT AIR

Ces installations de climatisation tout air existent à un seul conduit ou à deux conduits. Seul l'installation à un seul conduit s'avère approprier à nos réalités de pays tropicaux.

Nous traiterons de l'installation à un seul conduit et débit d'air constant, le plus utilisés au Burkina Faso.

2.2.2.3.3.1.1. INSTALLATION TOUT AIR A UN SEUL CONDUIT A DEBIT D'AIR CONSTANT

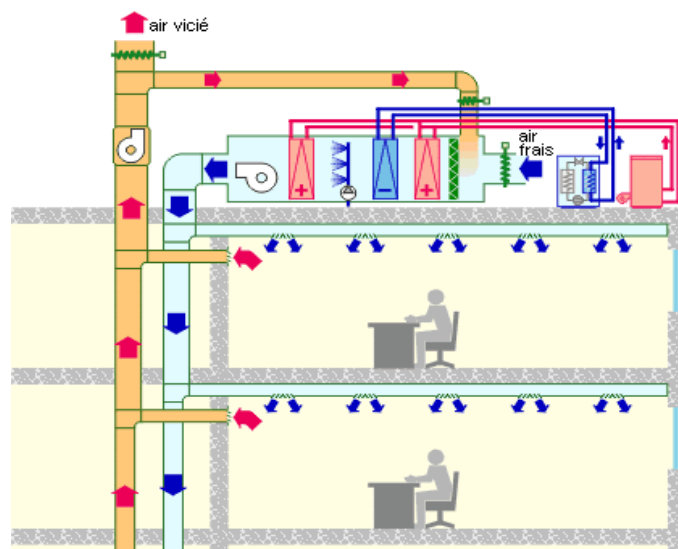


Figure 21: centrale à débit d'air constant

La climatisation tout air à un seul conduit à débit constant convient aux salles de réunion de spectacles de grande capacité, aux amphithéâtres et aussi à un ensemble de locaux

présentant les caractéristiques thermiques et des besoins frigorifiques similaires. Ce type d'installation a un inconvénient majeur qui est la constance du débit d'air. Le débit d'air constant le rend difficile d'exploitation dans nos pays car la charge thermique à évacuer dans les salles de réunion et de spectacles est variable et ce en fonction du nombre de spectateurs ou de participants. Elle est peut donc provoquer un inconfort thermique dans l'enceinte climatisée.

Mais malgré ces inconvénient nous préconisons pour nos pays ce type d'installation centralisée car celui à débit variable présente un coût d'investissement initial et d'entretien élevé.

2.2.2.3.4. INSTALLATIONS DE CLIMATISATION AIR-EAU

Les installations mixtes présentent une meilleure souplesse de fonctionnement et un niveau de confort élevé. Ils sont plus économiques à l'exploitation que les systèmes "tout air" car le transfert du froid se fait par l'eau et non par l'air.

Les équipements terminaux munis d'une batterie d'eau froide, reprennent l'air lequel se refroidi au contact de la batterie froide. L'air est ensuite pulsé dans l'enceinte à refroidir. Il existe deux types de systèmes:

- les installations à éjecto-convecteurs ;
- les installations à ventilo-convecteurs.

Les centrales éjecto-convecteurs, pratiquement inexistantes dans les pays chauds en développement, sont utilisées pour la climatisation de bâtiments comportant des zones périphériques importantes et à forte proportion de surfaces vitrées.

Leur manque de souplesse à l'installation (nécessité de raccorder la gaine d'air primaire à chaque appareil) et en fonctionnement (nécessité de pulser en permanence de l'air primaire à débit élevé) les défavorisent par rapport à leurs "concurrents" : les ventilo-convecteurs.

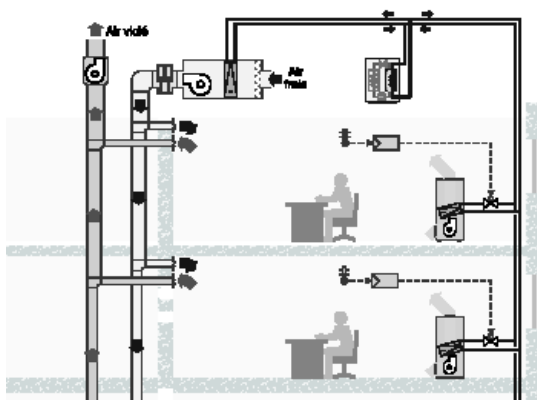


Figure 22: centrale air-eau

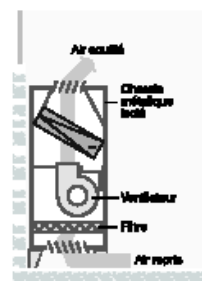


Figure 23: ventilo-convecteur

Le système de climatisation par ventilo-convecteurs est de loin le système le plus utilisé en climatisation centrale. Le principal avantage du ventilo-convecteur est lié au fait qu'il soit possible d'isoler une pièce inoccupée (ex. chambre d'hôtel) et de pouvoir très rapidement la remettre en température. L'installation à ventilo-convecteurs est nettement moins onéreuse qu'une installation à éjecto-convecteurs.

2.2.2.3.5. INSTALLATIONS DEBIT REFRIGERANT VARIABLE

La climatisation centralisée par débit réfrigérant variable s'effectue par une détente directe dans le terminal jouant le rôle d'évaporateur au niveau du local à climatiser. Le fluide frigorigène étant transporté jusqu'à cet évaporateur du local par un réseau de conduite du fluide frigorigène. Un système de débit réfrigérant variable peut alimenter plusieurs unités terminales (évaporateurs).

Ce type d'installations est plus approprié aux chambres d'hôtel, aux immeubles de bureaux ne présentant pas de similarité au niveau du besoin de confort. Chaque occupant de local a la latitude d'adapter la climatisation à son besoin de confort. Mais le coût élevé de plus l'existence du réseau de fluide frigorigène dans tout le bâtiment rend l'entretien délicat surtout en cas de fuite.

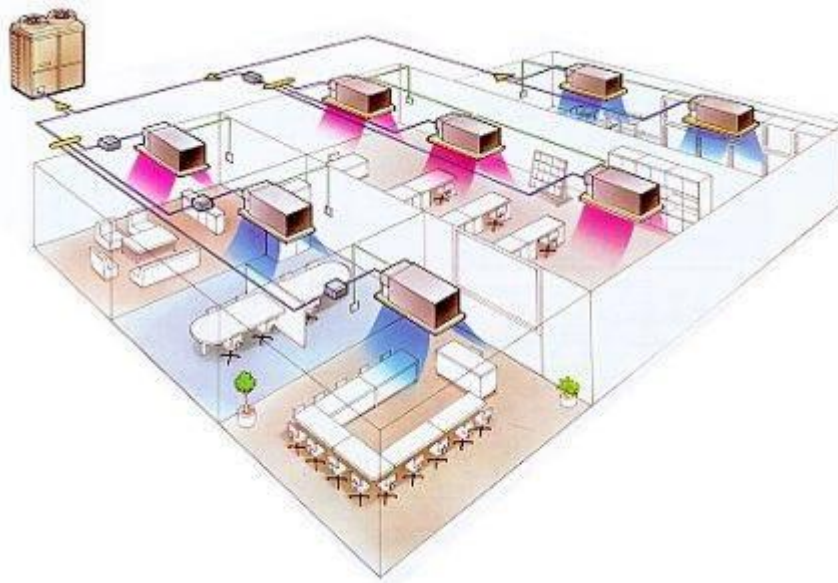


Figure 24: *débit réfrigérant variable*

Il est à signaler que dans toutes ces différentes installations de climatisation, l'on ne saurait choisir un système fonctionnant à base de fluide frigorigène constituant un danger pour la couche d'ozone. Les CFC sont donc exclure.

En récapitulatif les critères de choix de la climatisation et les domaines d'application sont résumés dans les tableaux suivants :

Familles d'installation	systèmes	Coût investissement	Coût énergie	Confort thermique	Confort acoustique
autonome	Window	faible	Elevé	Faible	Faible
	Split system	moyen	Moyen	Faible	Bon
	VRV	Très élevé	faible	Bon	Bon
	Armoire climatisation	élevé	moyen	Moyen	Moyen
	Roof top	élevé	faible	un peu moyen	Un peu bon
Tout air	Débit constant	élevé	élevé	Bon	Bon
	Débit variable	élevé	moyen	Bon	Bon
Air-eau	Ventilo convecteurs	élevé	moyen	bon	Bon

Tableau 13 : coût et confort des systèmes de climatisation

[Source : outil d'information énergie+ version 4]

Destination	Systèmes de climatisation				
	split	armoires	Roof top	Air-eau ventilo convecteurs	DRV
Petits bureaux commerciaux	+	+			
Grandes banques				+	+
Hall et salles		+	+		
Grands hôtels				+	+
Climatisation Industrielle ateliers		+	+		

Tableau 14 : domaines d'application des systèmes de climatisation

[Source : outil d'information énergie+ version 4]

2.2.3. RECOMMANDATIONS POUR URE

2.2.3.1. CLIMATISATION INDIVIDUELLE

Pour les climatiseurs individuels nous pouvons :

- Au niveau du condenseur, abaisser la température de condensation en plaçant cette unité à l'ombre où dans un endroit où l'air circule bien.

La réduction de la température de condensation, abaisse le niveau de pression à la sortie du compresseur, et donc diminue le travail de celui-ci ainsi que l'énergie consommée.

- Au niveau de l'évaporateur on peut envisager rehausser la température de consigne, mais tout en garantissant le confort des occupants.

Le rehaussement de la température de consigne, diminue le travail du compresseur et par conséquent l'énergie électrique qu'il consomme. Il en résulte ainsi une économie d'énergie.

- La limitation du temps de fonctionnement de la climatisation en fonction de la présence et de la charge à évacuer est aussi source d'économie d'énergie, en effet l'arrêt de la climatisation pendant la période de décembre, janvier et même durant la première moitié du mois de février est souhaitable. Des affiches avec la mention '*veuillez éteindre les climatiseurs à la descente*' permettent d'associer les occupants à l'utilisation rationnelle de l'énergie. Mais si les moyens le permettent il est souhaitable de réguler automatiquement la climatisation en fonction des horaires de travail.

Pour les immeubles au fort vitrage l'emploi de films réfléchissants est préconisé et limite les apports solaires. Il faudra donc recouvrir le vitrage de films réfléchissants ayant un bon pouvoir de réflexion des rayons solaires.

- Le gestionnaire doit aussi s'assurer que le système de climatisation bénéficie d'un entretien (nettoyage).

2.2.3.2. CLIMATISATION CENTRALE

En plus des mesures ci-dessus citées pour la climatisation individuelle, les recommandations suivantes sont à l'origine d'une utilisation rationnelle de l'énergie :

- Améliorer l'efficacité ventilo-convecteurs ;
- Réduire le débit d'eau glacée de l'installation afin de diminuer la consommation des pompes ;
- Équilibrer le réseau hydraulique ;
- Augmenter la température du réseau d'eau glacée ;
- Arrêter le fonctionnement des unités terminales en dehors des heures de présence ;
- Installer un équipement de régulation par local ;
- Veiller à l'emplacement correct du thermostat d'ambiance ;
- Bien choisir la température de consigne en refroidissement ;
- Éviter d'encombrer les équipements.

3. EAU CHAUDE SANITAIRE

3.1. INTRODUCTION

La production d'eau chaude sanitaire nécessite une source de chaleur laquelle peut être fournie par les combustibles fossiles et renouvelables comme la biomasse et le solaire source d'énergie inépuisable. Utiliser le soleil pour chauffer l'eau sanitaire est une idée intéressante et logique car les rayons soleil chauffe notre environnement et nous mêmes les personnes et l'idée d'utiliser ce rayonnement pour nos besoins, est salubre.

Non polluante et inépuisable à l'échelle humaine, l'énergie solaire permet de préserver l'environnement et s'intègre bien dans le concept de développement durable. Son utilisation permet de préserver les ressources énergétiques menacées d'épuisement, et de limiter la production de déchets et des gaz notamment le gaz carbonique (CO₂) cause par excellence du réchauffement climatique.

Au-delà des enjeux environnementaux et de l'impact sur la production de gaz à effet de serre, l'eau chaude représente une part non négligeable de la facture énergétique d'un bâtiment, qui peut être réduite grâce à l'utilisation de l'énergie solaire.

Nous allons traiter de la production d'eau chaude dans les bâtiments tertiaires par utilisation des capteurs thermiques solaires.

3.2. GISEMENT SOLAIRE

L'apport annuel moyen au niveau du sahel est évalué à plus de 6 kWh/m²/jour, ce qui représente pour l'ensemble du territoire burkinabé un énorme potentiel énergétique.

Le rayonnement solaire se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Il produit à la lisière, mais en dehors de l'atmosphère terrestre, un éclairage énergétique à peu près constant et égal à 1 370 W/m², appelé de ce fait constante solaire.

Pour atteindre chaque point de la surface du globe terrestre, les rayons solaires traversent l'atmosphère qui dissipe une partie de l'énergie provenant du soleil par :

- Diffusion moléculaire (en particulier pour les radiations U.V.) ;
- Réflexion diffuse sur les aérosols atmosphériques (gouttelettes d'eau, poussières...) ;
- Absorption sélective par les gaz de l'atmosphère.

L'atténuation correspondante du rayonnement solaire dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, celle-ci dépendant à son tour de la latitude du lieu considéré et du temps.

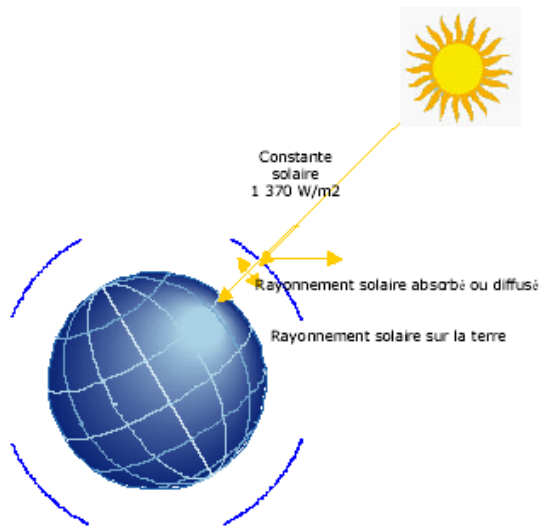


Figure 25: Propagation du rayonnement solaire dans l'atmosphère

Avant son arrivée dans l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est dirigé. Il se présente sous la forme d'un faisceau à peu près parallèle. Seule une partie de ce rayonnement direct traverse l'atmosphère et atteint le sol. Une autre partie du rayonnement est diffusée et répartie à peu près uniformément dans toutes les directions de l'espace.

Ce rayonnement diffus, lorsqu'il atteint le sol terrestre, semble ainsi provenir de l'ensemble des directions de la voûte céleste.

A la surface de la terre, le rayonnement solaire global est la somme des rayonnements :

- direct, ayant traversé l'atmosphère,
- diffus, en provenance de toutes les directions de la voûte céleste.

Une surface exposée reçoit ainsi du rayonnement direct et diffus, mais elle reçoit en plus une partie du rayonnement global réfléchi par les objets environnants, en particulier par le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé « albédo ».

3.3. PRINCIPAUX COMPOSANTS DU SYSTEME ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

3.3.1. COMPOSANTS DU SYSTEME

Une installation de production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire comporte en général 5 sous-ensembles :

- ✓ un sous ensemble de captage ;
- ✓ un sous-ensemble de transfert ;
- ✓ un sous-ensemble de stockage ;
- ✓ un sous-ensemble d'appoint ;
- ✓ un sous-ensemble de distribution.

La réduction des consommations d'énergie par rapport à une installation classique est notre objectif et cela dépendra des conditions d'implantation des capteurs solaires, du dimensionnement et de la conception du système, ainsi que du choix des composants et de leur maintenance.

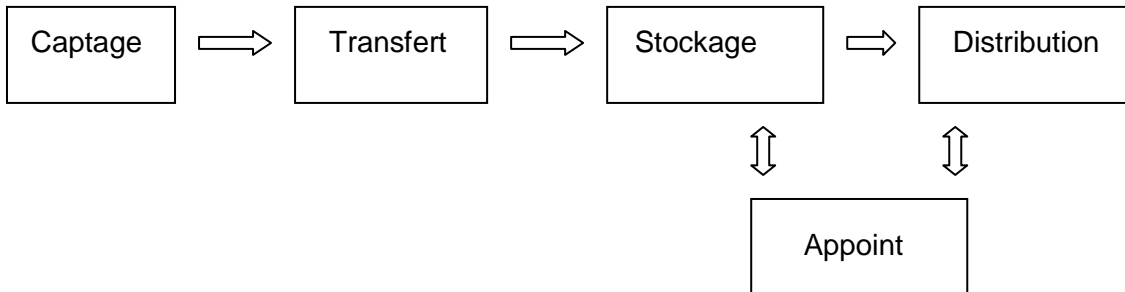


Figure 26: éléments principaux d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire

3.3.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Un capteur solaire plan est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur les calories produites par absorption du rayonnement incident, et émet en s'échauffant un rayonnement thermique de plus grande longueur d'onde (Loi de Stefan-Boltzman). Il est recouvert d'un vitrage lequel piège l'énergie thermique (effet de serre) car opaque au rayonnement thermique de grande longueur d'onde et limite ainsi les déperditions par les différentes modes de transfert de chaleur que sont la convection la conduction et le rayonnement.

Le fluide caloporteur transfère l'énergie à l'eau stockée dans le ballon et provenant du réseau de distribution d'eau courante, par l'intermédiaire d'un échangeur thermique. Le fluide caloporteur refroidit est de nouveau transférer vers le capteur plan où il absorbera l'énergie thermique cédée par l'absorbeur et le cycle recommence.

Notons que la circulation du fluide caloporteur peut être effectuée par une pompe ou par thermosiphon ; le fluide caloporteur réchauffé se dilate, devient plus légère et monte naturellement vers le ballon de stockage situé au dessus. Les systèmes en thermosiphon sont généralement moins chers puisqu'ils ne nécessitent aucun dispositif de circulation ou de contrôle, mais l'unité de stockage doit être obligatoirement positionné au-dessus du capteur. Ces systèmes conviennent le plus à nos pays, dans les applications domestiques, vu leur coût réduit.

3.4. ETUDES PRELIMINAIRES

3.4.1. CHOIX DU MODE DE PRODUCTION

Différentes modes de production d'eau chaude sanitaire existent à savoir :

- ✓ La production instantanée ;
- ✓ La production semi-instantanée ou en semi-accumulation ;
- ✓ La production en accumulation.

La différence entre ces types de production tient du rapport entre la puissance de production et le volume de stockage choisi pour assurer le confort d'utilisation.

La production d'eau chaude sanitaire en semi-accumulation ou semi-instantanée (capteur + ballon de stockage) est la plus appropriée au mode de consommation d'eau chaude sanitaire dans la plupart des applications courantes, c'est ce mode de production qui sera l'objet de l'étude dans la suite.

3.4.2. EVALUATION DES BESOINS EN EAU CHAUDE SANITAIRE

L'analyse des besoins constitue le travail préliminaire indispensable à l'étude d'une installation et au choix des appareils de production.

A partir d'une estimation correcte des besoins, les outils de calcul et de dimensionnement permettent une bonne évaluation des performances prévisionnelles des installations.

Pour évaluer les besoins en eau chaude sanitaire des bâtiments tertiaires, il est préférable de partir des consommations de bâtiments identiques et d'établir un profil de consommation d'eau chaude sanitaire encore appelé profil de puisage. Ce profil de puisage peut être continu mais dans bien des cas et pour ce qui concerne les bâtiments tertiaires ce profil est discontinu et le système sera dimensionné pour répondre au besoin le plus critique identifié lors de l'établissement dudit profil de puisage. Une enquête sur la consommation desdits bâtiments s'impose dans l'optique d'établir une base de données des quantités d'eau chaude puisées.

Dans le cas où les données sur les consommations spécifiques d'eau chaude sanitaire ne peuvent être obtenues et entravant ainsi la mise en place d'un profil de puisage, les besoins journaliers en eau chaude seront estimés en utilisant les valeurs figurant dans les deux tableaux qui suivent. Le dimensionnement des éléments se fera sur la base de ces données.

Type d'utilisation	Consommation moyenne à 45°C
Douches	30 Litres
Bains	100 à 150 Litres
Lavabo-Toilette	2 Litres
Bidet	5 Litres
Repas	2 Litres/couvert
Vaisselle main	8 Litres/couvert
Lessive	10 Litres/kg de linge

Tableau 15 : consommations moyennes journalières d'eau chaude

[Source : bpsolar]

Nombre d'utilisateur	Consommation moyenne à 45°C
Jusqu'à 3 personnes	150 Litres/jour
Jusqu'à 5 personnes	225 Litres/jour
Jusqu'à 7 personnes	300 Litres/jour

Tableau 16 : consommations moyennes journalières pour les personnes

[Source : bpsolar]

3.4.3. UNIFORMISATION DES TEMPERATURES DE L'EAU CHAUDE PUISEE

Il est évident que la température de l'eau puisée varie en fonction besoins et du type de puisage. En général les températures de puisage sont inférieures à 60°C.

Afin de faciliter les calculs et permettre l'addition de volumes puisés à des températures différentes, tous les volumes quelconques V_x puisés à une température quelconque T_x seront convertis en des volumes d'eau équivalents à 60°C par l'expression suivante:

$$V_{60} = V_x \frac{T_x - 24}{60 - 24}$$

Dans cette expression, 24°C représente la température en degré Celsius de l'eau du réseau de distribution d'eau courante.

3.4.4. CHOIX DE LA TEMPERATURE MAXIMUM DU STOCK D'EAU CHAUDE

Le dimensionnement d'un ballon de stockage de l'eau chaude dépend directement de la température de consigne choisie au préalable pour l'eau chaude de ce ballon (T_{ec})

La température de stockage de l'eau sera choisie en fonction de la température souhaitée au niveau des points de soutirage.

Dans les cas courants d'utilisation d'eau chaude sanitaire, il est conseillé de choisir une température de stockage de 55 à 60°C pour diminuer le risque de développement de la legionella pneumophila, bactérie pouvant être à l'origine de la pneumonie et de la grippe.

Cependant des températures, supérieures à 60°C, présentent les inconvénients suivants:

- une forte augmentation de l'entartrage ;
- une plus grande usure de la robinetterie ;
- un danger de brûlures ;
- une augmentation des pertes par stockage.

3.4.5. STRATIFICATION ET COEFFICIENT D'EFFICACITE DU BALLON DE STOCKAGE

La stratification est la propriété d'un fluide à se répartir en couches superposées ou strates de températures différentes.

La stratification dans le ballon de stockage tient au transfert de chaleur du fluide caloporteur à l'eau du réseau du ballon. La masse d'eau chauffée devient moins dense et a tendance à s'élever. La température augmente progressivement lorsqu'on parcourt le réservoir de bas en haut. La stratification est d'autant plus importante que le gradient de température entre l'eau se situant en bas du réservoir et l'eau de la partie supérieure du réservoir est élevé. Elle est un paramètre caractéristique du bon fonctionnement du système de chauffage d'eau et se doter d'un ballon de stockage présentant une stratification importante est souhaitable ; l'énergie exploitable du ballon est optimale en d'autres termes cela signifie qu'au moment où le ballon ne fournira plus le confort adéquat aux utilisateurs, la température de son eau sera proche de la température de l'eau sortant du réseau de distribution d'eau potable.

Le ballon devra donc être muni de déflecteurs, de chicanes et placé verticalement afin d'optimiser la stratification et donc le volume d'eau exploitable.

Dans le dimensionnement, pour tenir compte du degré de stratification des ballons, on introduira un coefficient d'efficacité notée **a**. La valeur de ce coefficient est comprise entre 0,8 et 0,95 dans la plupart des cas courants, cela signifie que 80 à 95% du volume réel du ballon est utilisable pour la température voulue.

$$0,80 \leq a \leq 0,95$$

3.5. DIMENSIONNEMENTS DES COMPOSANTS : CAS DU SECTEUR TERTIAIRE

Pour le secteur tertiaire, il est fréquent que le profil de puisage rencontré soit typiquement discontinu.

La méthode présentée ici n'est applicable que si on admet l'hypothèse qu'aucun puisage n'est effectué entre deux pointes et que le stock d'eau chaude est reconstitué durant cette période. Le système étant dimensionné pour satisfaire la pointe la plus critique.

Elle repose sur deux équations:

1. Energie puisée à travers l'eau chaude = Energie contenue dans le stock + Energie fournie par les capteurs durant le puisage :

$$1,16 V_{60} (60 - 24) = 1,16 a V (T_{ec} - 24) + (t_p - 3)P * 16,7$$

où V_{60} = volume puisé durant la période la plus critique, ramené à 60°C (en litres)

V = volume du ballon de stockage (en litres)

T_{ec} = température de l'eau stockée (en °C)

a = coefficient d'efficacité du ballon de stockage

t_p = temps de puisage (en minutes)

P = puissance du capteur solaire sans les pertes de distribution et de stockage (en kW)

2. Energie fournie par l'échangeur durant la période de reconstitution du stock = Energie nécessaire pour augmenter la température du stock jusqu'à la température maximum de stockage :

$$16,7 t_r P = 1,16 * a V (T_{ec} - 24)$$

où t_r = temps de reconstitution du stock entre 2 pointes de puisage (en minutes)

Avec ces deux équations nous avons les deux relations suivantes donnant respectivement le volume du ballon et la puissance de l'échangeur

3.5.1. BALLON DE STOCKAGE

Le volume du ballon est donné par l'expression :

$$V = \frac{V_{60} (60 - 24) t_r}{(T_{ec} - 24) a (t_r + t_p - 3)} \text{ (litres)}$$

3.5.2. ECHANGEUR THERMIQUE

L'échangeur thermique est un élément du système de production de l'eau chaude sanitaire, il assure le transfert de la chaleur du fluide caloporteur à l'eau se trouvant dans le ballon.

Sa puissance est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{1,16 a V (T_{ec} - 24)}{16,7 t_r} \text{ (kW)}$$

Le type d'échangeur thermique que nous allons préconiser est l'échangeur intégré dans le ballon de stockage car étant en climat tropical l'utilisation d'un échangeur externe n'est pas nécessaire, mais il est indispensable dans les pays tempérés où le gel impose un antigel surtout en hiver.

Pour une efficacité de fonctionnement du système, nous choisirons des échangeurs dont la puissance d'échange par unité de surface de capteur vérifie :

$$p \geq 100 \text{ W}/^\circ\text{C par m}^2 \text{ de capteur}$$

C'est avec cette relation que nous estimerons la surface minimale de capteur qu'il faudra installer et cela connaissant la puissance de l'échangeur et le gradient de température de l'eau.

3.5.3. SURFACE DE CAPTATION

Bien que pour certaines utilisations à basse température on puisse faire l'économie d'une couverture, la plupart du temps et surtout pour la production de l'eau chaude à partir du solaire, c'est un bon investissement de recouvrir l'absorbeur d'une couverture transparente qui retienne les infra-rouges émises tout en laissant passer le maximum de rayonnement solaire.

Pour son coefficient de transmission de l'ordre de 84 à 92% le verre, entre autres, est un bon matériau de couverture pour la production d'eau chaude sanitaire.

La satisfaction des besoins d'eau chaude en quantité et en température, requiert l'installation de surface capable de répondre au besoin énergétique indispensable à la production de l'eau chaude. Comme pour un mètre carré de capteur on doit disposer d'un échangeur de 100W/°C, il faut pour une différence de température de 40°C une puissance d'échange minimum de 4000W/m² de capteur. Par conséquent avec la puissance de l'échangeur on en déduit la surface de captation minimale qu'il faille installer.

Celle-ci est de : $S = \frac{P}{4000}$

Où S : la surface de captation

P : la puissance de l'échangeur

3.5.4. ABSORBEUR ET FLUIDE CALOPORTEUR

L'absorbeur d'un capteur a pour rôle de transformer en chaleur le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit et de transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Le choix d'un absorbeur dépend :

- du facteur d'absorption lequel doit être aussi voisin de l'unité
- du pouvoir d'émissivité dans l'infra rouge lequel doit être aussi faible que possible
- de la conductibilité thermique laquelle doit être élevée

- de l'inertie thermique laquelle doit être faible
- de la résistance chimique vis-à-vis du fluide caloporteur

L'acier galvanisé d'absorptivité 0,64 recouvert d'une couche de peinture noire d'absorptivité 0,94 s'avère être, entre autre, un bon absorbeur.

Les valeurs d'absorptivité des différents matériaux et peintures pour un rayonnement solaire normal sont assignées dans le tableau qui suit :

Matériaux	valeur	Peinture	valeur
Acier galvanisé	0,64	Bleu foncé	0,91
aluminium	0,12-0,16	Gris	0,75
Cuivre	0,35	Noir	0,94
fer	0,44	Rouge sombre	0,57

Tableau 17 : valeur absorptivité des différents matériaux et peintures

[Source : Maîtrise de l'énergie et développement - Les chauffe-eau solaires capteurs-stockeurs]

Le fluide caloporteur par excellence reste l'eau car à la fois bon marché et possédant les propriétés physiques requises (chaleur massique, densité et viscosité), en effet sa chaleur massique est de 1 cal/g/°C alors celle de l'air sec est de 0,24 cal/g/°C. Le risque d'ébullition est quasi inexistant car la température maximale est de 60°C. Il sera donc préconisé comme fluide caloporteur l'eau courante.

3.5.5. DIMENSIONNEMENT DES CONDUITES

Le choix de la nature des tuyauteries et des éléments des circuits hydrauliques doit être effectué conformément à la réglementation sanitaire en vigueur.

En particulier :

- les tubes en acier galvanisé ne doivent pas être utilisés pour véhiculer de l'eau dont la température est supérieure à 60 °C. De plus, ils ne doivent pas être placés en aval de portions de circuit en cuivre, laiton ou en bronze ;
- l'emploi de tubes nus ou ayant fait l'objet d'un revêtement interne ou d'un traitement de surface est autorisé, sous réserve que les matériaux soient autorisés et qu'ils soient inertes vis à vis de l'eau sanitaire.

Dans la pratique, les matériaux suivants sont réputés satisfaire à cette condition :

- tubes en cuivre d'épaisseur supérieure ou égale à 0,8 mm ;
- tubes en acier ;

- matériaux non métalliques dont la compatibilité d'emploi avec le fluide caloporteur est reconnue (tenue à la température et à la pression, compatibilité chimique).

Le dimensionnement du circuit primaire conduit à calculer le diamètre des tuyauteries, connaissant d'autres facteurs qui interviennent dans l'écoulement :

- le débit du fluide,
- sa masse volumique et sa viscosité.

Les tuyauteries du circuit doivent être d'un diamètre suffisant pour permettre la circulation du fluide caloporteur au débit recommandé, en général 40 à 70 l/h par m² de capteur, avec une vitesse de circulation inférieure ou égale à 1m/s.

Au sahel l'ensoleillement est élevé, pour cela pour un pays comme le Burkina Faso, il a été choisi un débit de 70 l/h/m² de capteur.

Avec ces données et le choix du débit de 70 l/h/m², nous aboutissons par application de la relation entre le débit et la vitesse du fluide caloporteur à l'expression suivante :

$$d = 4,98\sqrt{S}$$

Avec d : le diamètre de la conduite en mm²

S : la surface totale de capteurs installés en m²

Notons qu'à titre indicatif la section des tuyauteries en mm² est environ prise à 14 fois la surface des capteurs (source ADEME).

Pour limiter les pertes thermiques, les tuyauteries doivent être les plus courtes possibles. On évitera en général de dépasser 3 à 5 m linéaires par m² de capteur car une mauvaise isolation des tuyauteries peut dégrader de manière notable, les performances de l'installation solaire. Dans le choix des tuyauteries on veillera à ce que le coefficient de conductivité thermique soit au moins égale à $\lambda=0,040\text{W}/\text{m}_2/^\circ\text{C}$ et que les pertes thermiques qu'elles vont occasionner n'excèdent pas dans la mesure du possible 1W/°C par m² de capteur.

Le tableau qui suit donne les limites du diamètre des conduites pour un coefficient de conductivité $\lambda=0,040\text{W}/\text{m}_2/^\circ\text{C}$ et pour une épaisseur d'isolation donnée.

Diamètre des conduites (mm)	Epaisseur d'isolation (mm)
<60	30
70 à 114	40
139 à 250	50
>250	60

Tableau 18 : limite des diamètres en fonction de l'épaisseur

[Source : ADEME]

3.5.6. DIMENSIONNEMENT DE LA POMPE ET ACCESSOIRES

Le dimensionnement de la pompe s'impose lorsque le transfert de l'eau ne s'effectue pas naturellement par thermosiphon. Dans ce cas il faut dimensionner un groupe motopompe qui permettra le transfert. Notons que dans nos pays le système de transfert par pompe est si possible à écarter car constituant un organe de consommation d'énergie électrique, on s'évertuera à privilégier le transfert naturel par thermosiphon.

Les pompes sont dimensionnées pour vaincre les pertes de charge du circuit sous la vitesse de circulation maximale autorisée par l'implantation du circuit hydraulique.

La perte de charge moyenne linéique sera typiquement de l'ordre de 10 mm de colonne d'eau par m de conduite.

La puissance du moteur (en Watt) est déterminée par la relation :

$$P = \frac{2,725 * k * Q * H}{\eta}$$

Avec Q : le débit en m³/h,

H : la hauteur manométrique en mètres de colonne d'eau,

η : le rendement de l'ensemble pompe/moteur, qui devra être supérieur à 0,8.

k : un coefficient de surpuissance, compris entre 1,15 et 1,25 pour s'affranchir des pertes de charge dues à l'entartrage du circuit.

Les accessoires sont ceux de sécurité pour assurer le bon fonctionnement du système de production d'eau chaude sanitaire par le solaire.

Ce sont : la vase d'expansion, les purgeurs au niveau des points hauts, et les soupapes.

3.5.7. INCLINAISON DES CAPTEURS

Le rayonnement solaire arrivant sur un plan horizontal, atteint son intensité maximale lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires à celui-ci. Ainsi, pour capter le maximum d'énergie rayonnée, l'inclinaison du capteur devrait suivre la course du soleil. Pour plan fixe, le cas du chauffage d'eau sous les tropiques, le rayonnement solaire annuel capté est maximum pour une inclinaison du plan égal à la latitude du lieu et orienté plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud.

Pour le cas du Burkina Faso se trouvant à la latitude 12° dans l'hémisphère nord les capteurs doivent être orientés plein sud en direction et inclinés de 12°.

Pour cause d'intempéries la latitude est augmentée de 5 à 10° afin de faciliter l'écoulement des eaux de pluies et le glissement des objets solides tombant sur la surface du capteur.

3.6. RECOMMANDATIONS POUR UNE UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE

Les pertes d'énergie dans le système de production d'eau chaude sanitaire, sont en grande partie dues à une mauvaise isolation du circuit de conduites et du ballon de stockage. La réduction de ces pertes nécessite une isolation. Celle-ci se doit être conçue dans la mesure du possible avec des isolants biodégradables ou recyclables. Dans la mise en œuvre, l'on doit être attentif à ce que l'isolation ne génère pas de pertes par convection (circulation d'air entre la cuve et le manteau isolant).

Pour les ballons de stockage dont le volume n'excède pas 400 litres il est recommandé une épaisseur d'isolant de 10 cm d'après le programme suisse "Ravel" pour les accumulateurs calorifugés sur place.

Pour les conduites, nous avons déterminé les pertes thermiques en mètre linéaire de conduite en fonction de l'épaisseur d'isolant du diamètre extérieur de la conduite et de la différence de température. Les isolants utilisés sont : le polystyrène, le kapok, le polyuréthane, la laine de verre. A $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ et avec un diamètre extérieur de 60 mm, nous obtenons l'historgramme suivant qui donne l'importance des pertes en W/m pour chaque classe d'épaisseur.

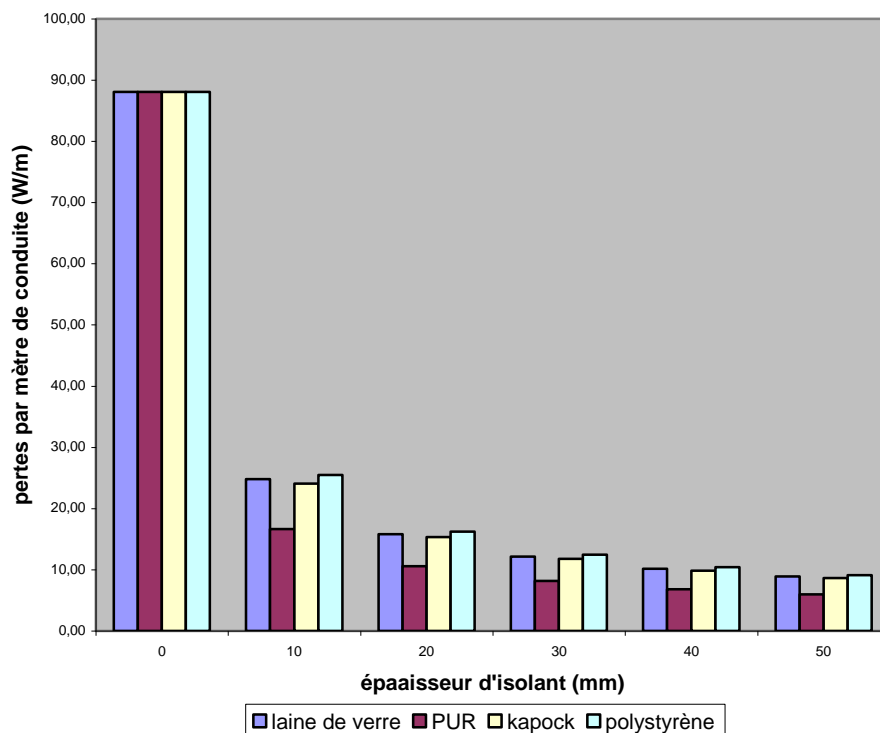


Figure 27: pertes thermiques (W/m)

Nous arrivons donc avec une isolation d'épaisseur 10 cm à réduire les pertes de 30% ce qui équivaut en terme financier est substantiel.

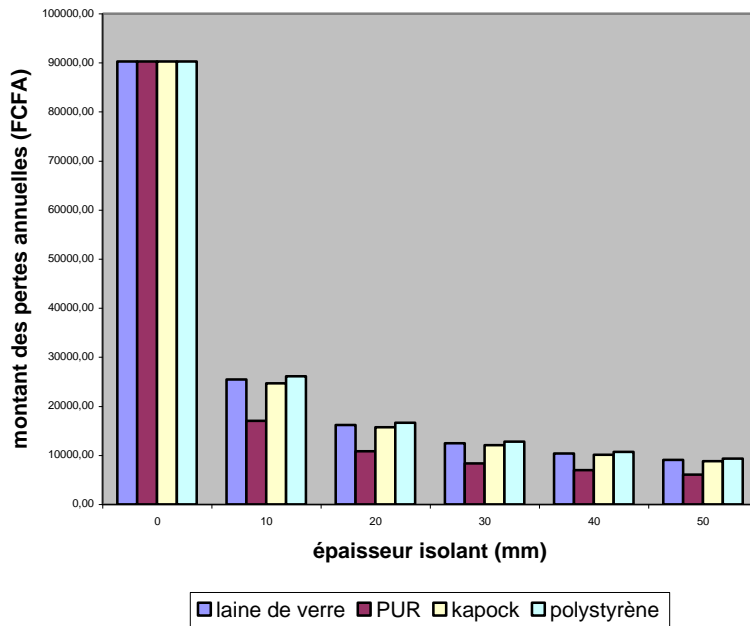


Figure 28: coût financier occasionné par les pertes thermiques

Le kapok de coefficient de conductivité $0,035 \text{ W/m}^2/^\circ\text{C}$ peut avec une technique de mise en œuvre maîtrisée s'avérer très adapter aux réalités économiques du Burkina Faso car la matière existe et ne demande qu'à être rentabilisée.

Outre les mesures d'isolation, il faut sensibiliser les bénéficiaires de l'eau chaude sanitaire de manière à ce qu'ils évitent le gaspillage de l'énergie par l'utilisation excessive de l'eau pour des besoins ne nécessitant pas d'eau chaude.

3.7. ETUDE ECONOMIQUE

3.7.1. INVESTISSEMENT

L'investissement est la capitalisation des coûts relatifs à la conception de l'installation, aux équipements tels le capteur le ballon les conduites et autres accessoires, à leur installation.

Nous le désignerons par I_0 .

3.7.2. COUT D'EXPLOITATION

Fonctionnant avec une énergie n'engendrant pas de coût d'acquisition, le coût d'exploitation est généré par le fonctionnement des équipements auxiliaires comme les pompes électriques et autres accessoires fonctionnant à l'énergie payante.

Nous le désignerons par CE le coût d'exploitation annuel.

$$CE = \sum_{i=1}^{12} CE_i \text{ Avec } CE_i \text{ le coût d'exploitation mensuel.}$$

3.7.3. COUTS DE MAINTENANCE

Les coûts de maintenance concernent l'ensemble des coûts liés à l'entretien, la réparation ou le remplacement de tout ou partie des équipements de l'installation solaire de production d'eau chaude.

Nous désignerons par CM le coût de maintenance annuel.

$$CM = \sum_{i=1}^{12} CM_i \text{ Avec } CM_i \text{ le coût de maintenance mensuel}$$

3.7.4. TEMPS DE RETOUR

Pour la détermination du délai de récupération de l'investissement, nous partirons sur la base d'une substitution de l'énergie solaire par l'énergie électrique.

Le temps de retour brut est le temps au bout duquel la somme des économies financières réalisée par la substitution de l'énergie solaire à l'énergie traditionnelle est égale au montant des investissements.

L'expression donnant le temps de récupération est la suivante :

$$t_r = \frac{I_0}{M - CE - CM}$$

Avec M : le montant annuel des économies réalisées grâce à la substitution,

tr : le temps de récupération.

4. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE

La plupart des activités humaines (éclairage, chauffage, réfrigération, industrie) rejettent des gaz à effet de serre auteur du réchauffement climatique. En particulier, l'utilisation de sources fossiles d'énergie (charbon, pétrole, gaz) ou de l'électricité produite à partir de ces sources fossiles, est à l'origine de l'émission du CO₂, qui se diffuse très rapidement dans l'atmosphère et y demeure en moyenne plusieurs années avant d'être piégé par la végétation.

Ces émissions de gaz à effet de serre augmentent à un rythme soutenu. Selon l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), le total de ces émissions pourraient ainsi tripler d'ici 2050, pour atteindre 50 à 70 milliards de tonnes d'équivalent CO₂, soit 15 à 20 milliards de tonnes d'équivalent carbone par an. Le réchauffement climatique va donc en s'accroissant et aura de lourdes conséquences sur l'homme et ses activités socio-économiques et culturelles.

Il est donc primordial d'avoir dans toutes les activités humaines nécessitant une source d'énergie, une utilisation rationnelle de cette source d'énergie et ce dans la recherche de l'efficacité.

L'éclairage, la climatisation et la production d'eau chaude sanitaire ne peuvent se réaliser sans énergie, de plus le fonctionnement des appareils rejette des gaz dont certains sont à effet de serre destructeurs de la couche d'ozone donc à la base du réchauffement climatique.

Nous devons donc s'atteler à la recherche d'une efficacité énergétique afin d'éviter l'utilisation en grande quantité de ces ressources précieuses. Rentabiliser l'énergie solaire dans la production d'eau chaude sanitaire est aussi une des meilleures solutions de protection de l'environnement car les ressources fossiles auxquelles on pourrait la substituer sont les principaux producteurs du gaz à effet de serre par excellence le CO₂.

Le développement durable passe entre autre par l'utilisation rationnelle de l'énergie et aussi le développement des énergies renouvelables comme l'énergie solaire.

5. PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Au terme de cette étude, nous se devons de jeter un regard critique du travail accompli et cela dans une optique constructive. En rappel, l'objectif de l'étude d'adaptation de l'outil était :

- ✓ Mettre à la disposition des gestionnaires et autres acteurs des bâtiments tertiaires d'Afrique Tropicale des ratios de dimensionnement permettant de maîtriser leurs dépenses énergétiques ;

- ✓ Optimiser les consommations d'énergie dans les bâtiments tertiaires ;

- ✓ Améliorer le confort thermique ;

- ✓ Réduire le coût de l'énergie par une utilisation rationnelle de l'énergie.

- ✚ Concernant les ratios dimensionnement:

- Au niveau l'éclairage :

Pour l'éclairage nous avons dans la définition deux ratios :

$$Rec = \frac{\text{puissance électrique totale installée en éclairage}}{\text{surface totale plancher}}$$

$$R5 = \frac{\text{consommation électrique totale évaluée en éclairage}}{\text{surface totale plancher}}$$

De ces deux ratios, nous avons exploité le premier Rec, car dans la recherche de calcul de R5 des difficultés sont survenues. En effet dans les audits, les documents de base du travail, nous avons constaté que le total des consommations électrique des postes de consommations était dans la majeure des cas supérieur à la consommation électrique fournit par la société nationale d'électricité. Cela est dû à l'évaluation du temps de fonctionnement des appareils dans les audits, il faudra donc pour une exploitation éventuelle de ce ratio pallier à ce problème pour qu'enfin l'écart soit acceptable.

Pour ce qui concerne Rec, les données nécessaires à son évaluation n'étaient pas disponibles dans tous les audits nous avons dressé les valeurs de ce ratio avec le disponible.

Le traitement de Rec nous a permis de déterminer une plage de valeurs de dimensionnement, cet intervalle qui est de 11W/m^2 à 14W/m^2 ne s'écarte pas trop de valeur proposée dans le CDROM énergie + laquelle est de $12,5\text{W/m}^2$.

Au niveau de la climatisation

Pour la climatisation, il a été défini plusieurs ratios. Mais en définitif l'exploitation a concerné un nombre réduit de ratios à savoir R_0 , R_{ct} et R^*_{ct} , et ce pour des différentes raisons. Ces raisons sont l'absence de données de calcul, la mauvaise corrélation, le manque de pertinence sur les données de calcul. Ces raisons évoquées nous ont conduit à abandonner le traitement des ratios qui suivent : la consommation électrique annuelle évaluée en climatisation par surface totale climatisée (R_3), la consommation électrique annuelle évaluée en climatisation par surface totale plancher (R_4), la puissance électrique totale installée en climatisation par surface totale (plancher) de l'édifice (R_7), la puissance électrique totale installée en climatisation par surface totale (plancher) climatisée de l'édifice (R_6).

Pour les ratios exploités, nous avons pour R_0 constaté que les valeurs sont dans la plupart des cas supérieures à la valeur donnée dans le CDROM énergie+. Concernant R_{ct} et R^*_{ct} l'exploitation des deux courbes donne un ratio de dimensionnement pour les gestionnaires et les concepteurs des bâtiments tertiaires.

Au niveau de la production d'eau chaude sanitaire par les capteurs solaire

L'aspect production d'eau chaude sanitaire n'a pas été abordé par les audits à notre disposition. De plus au niveau de l'outil d'information énergie+ c'est plutôt la production à l'aide de combustible fossile qui a été le plus développée. Ainsi la méthode que nous avons proposé se doit être appliquée et améliorée par la suite si des défaillances subsistent.

 **Concernant l'amélioration du confort et l'utilisation rationnelle de l'énergie (URE)**

Au niveau de l'éclairage

L'adaptation des choix technologiques à nos conditions, effectuée en climatisation et au niveau de l'éclairage ainsi que les mesures préconisées, concourent à l'amélioration des conditions de confort et à la gestion de l'énergie électrique.

 **Suggestion pour la conduite des audits énergétiques dans les bâtiments tertiaires**

A la lumière des difficultés rencontrés dans l'exploitation des audits énergétiques, nous proposons d'intégrer les éléments suivants afin de rendre les données exploitables pour ceux qui voudraient poursuivre ce travail, tant bénéfique pour notre pays en ce sens qu'il peut aboutir à une réglementation sur la consommation énergétique dans les bâtiments tertiaires au Burkina Faso.

Nous recommandons donc de :

- ressortir les caractéristiques géométriques du bâtiment en intégrant le vitrage et cela en fonction des orientations ;

- ressortir la superficie totale, la superficie totale climatisée, la superficie éclairée du bâtiment ;
- faire l'état des lieux à travers les la description des installations électriques (nombre et indice de confort) en climatisation en éclairage et des équipements de bureaux en veillant à fournir les caractéristiques de ces installations ;
- dresser un tableau donnant les puissances électriques totales installées tant en climatisation en éclairage qu'aussi des autres équipements ;
- évaluer la consommation énergétique annuelle avec un temps de fonctionnement des appareils judicieusement déterminé pour que l'écart entre la consommation fournit par la société d'électricité soit minime ;
- interpréter de la consommation énergétique annuelle en dégagant les principaux postes de consommation sur lesquels des mesures d'économie sont à préconiser ;
- Pour la climatisation à l'aide des puissances électriques, évaluer les puissances frigorifiques installées ;
- évaluer le bilan thermique à l'aide de la procédure intégrant le calcul des apports solaire de LIBERT (confère calculs de charges frigorifiques de M COULIBALY, Y), car elle permet d'introduire les conditions atmosphériques et les orientations;
- Faire l'interprétation du bilan thermique et de la puissance frigorifique installée.

CONCLUSION

Pour gérer la consommation énergétique des édifices de ce secteur économique il faut, un dimensionnement et un choix technologique, qui tiennent compte de nos réalités socio-économiques et de nos conditions climatiques.

Les outils de dimensionnement des installations utilisées sans aucune adaptation sont la cause de la consommation excessive d'énergie constatée dans nos pays.

La tropicalisation de l'outil d'énergie, en ce qui concerne les thèmes de climatisation, d'éclairage et de production d'eau chaude sanitaire, permet de mettre à la disposition des concepteurs et des gestionnaires un outil adapté au climat tropical de notre pays.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KODJO G.D., 2004. *Audit énergétique des bâtiments de la CNSS à Ouagadougou*. Mémoire de fin d'études, EIER.
- [2] GAMBONI F., 2003. *Audit énergétique de l'immeuble de la Bank Of Africa Agence Bobo Dioulasso*, EIER.
- [3] O'TYK E., 2003. *Audit énergétique du bâtiment de la Caisse Générale de Péréquation des prix*, Projet intégrateur, EIER.
- [4] CAMARA M., MOULOKI C. J., VOUIDIBIO L., 2003. *Audit énergétique des deux principaux bâtiments de l'Assemblée Nationale*, Projet intégrateur, EIER.
- [5] BINGUIMATCHI D., DIAGNE E., DOUHADJI K., HOUENHA P., 2005. *Audit énergétique de l'hôtel Sofitel Silmandé*, Projet intégrateur, EIER.
- [6] GAMBONI F., EHLI .K.G., TIEMGNI M., 2003. *Audit énergétique de l'immeuble de la Bank Of Africa Agence Ouagadougou*, Projet intégrateur, EIER.
- [7] MAGA G., IDO B.D., TCHALLA K., OUEDRAOGO A., 2002. *Audit énegétique du bâtiment principal de la CNSS*, Projet intégrateur, EIER.
- [8] AZONHITODE C., DIEDOU I., TOGOLA L., YACOUBA A., 2004. *Audit énergétique des bâtiments administratifs de l'ONATEL*, Projet intégrateur, EIER.
- [9] NZAMBA M., BOUTOU G. A., 2003. *AUDIT énergétique du bâtiment de la Comptoir Burkinabé des Chargeurs*, EIER.
- [10] CAMARA C., FALIBAÏ B., MAZOU MO B., TCHEGNONSI., 2006. *Etude de la facturation électrique du Groupe EIER-ETSHER et Audit Energétique du site de KAMBOINSE*, Projet intégrateur, EIER.
- [11] IEPF, 2000. *Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale* Tome 1 et 2
- [12] REINMUTH F., 1996. *Climatisation et conditionnement d'air modernes par l'exemple* Tome 1 et 2
- [13] CELAIRE R., 1987. *Maîtrise de l'énergie et développement - Les chauffe-eau solaires capteurs-stockeurs*
- [14] COULIBALY Y., 2006. *Cours d'énergie I3*
- [15] SEMPORE J. F., 2005. *Technique de climatisation*, cours
- [16] JANNOT Y., 2005. *Cours de transferts thermiques*
- [17] CDROM énergie + version 4
- [18] COULIBALY Y., *calcul des charges frigorifiques*, cours
- [19] COULIBALY Y., THIOMBIANO G., TRAORE M. Y., *Climat et Confort thermique*, *Sud Sciences & technologies N°2 Juillet 1998*
- Site Web [20] <http://www.bpsolar.fr> ; [21] www.ademe.fr ; [22] www.solarwiss.fr

