



HAL
open science

Rénovation du bâtiment Besançon

Chady Sayed

► **To cite this version:**

| Chady Sayed. Rénovation du bâtiment Besançon. Autre. 2012. dumas-01288848

HAL Id: dumas-01288848

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01288848>

Submitted on 15 Mar 2016

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

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



Institut des Sciences Appliquées et Economiques
Centre associé au Conservatoire National
des Arts et Métiers Paris

le cnam
Liban

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME d'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITÉ : Energétique

OPTION : Froid et climatisation

par

SAYED Chady

RÉNOVATION DU BÂTIMENT BESANÇON

Soutenu le 17 Décembre 2012

JURY

Président: Christopher Marvillet

Membres: Tony Jabbour

Mohammad Hazim

Chady Assaker

Rony Rihany

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	8
NOMENCLATURES ET ABRÉVIATIONS.....	9
INTRODUCTION.....	12
I. Chapitre 1 : Bilan – Carbone 2012.....	14
I.1.Gaz à effet de serre (GES):	14
I.2.Potentiel de réchauffement global (PRG):	14
I.3.La tonne d'équivalent pétrole (Tep), la tonne d'équivalent CO ₂ (TeCO ₂) et la TeC:.....	14
I.4.Introduction au Bilan-Carbone:.....	15
I.4.1.Les périmètres du bilan Carbone:.....	15
I.4.2.Informations nécessaires pour l'étude du bilan carbone:.....	16
I.5.Le Bilan - Carbone 2012 du bâtiment (périmètre 3+):.....	17
I.5.1. Délimitations de l'étude:.....	17
I.5.2.Nombre et répartition de personnes présents dans le bâtiment:	18
I.5.3. Les personnes sources.....	18
I.6.Résultats sectoriels de l'étude.....	19
I.6.1.Energie du site:.....	19
I.6.1.1.Calcul du taux d'émission de kg CO ₂ lors de la combustion du fioul domestique	19
I.6.1.2.Emissions reliées aux Combustibles fossiles (le fioul domestique):.....	20
I.6.1.3.Emissions reliées à l'achat de l'électricité du réseau au Liban:.....	20
I.6.1.4.Conclusion énergie interne :	21
I.6.2.Les Transports:.....	23
I.6.2.1.Déplacements domicile – école:.....	23
I.6.2.2.Déplacements des élèves lors des sorties scolaires :.....	24
I.6.2.3.Déplacements des fournisseurs:.....	25
I.6.2.4.Conclusion Transports:.....	26
I.6.3.Matériaux entrants:.....	26
I.6.3.1.Conclusion matériaux entrants:.....	27
I.6.4.La cuisine:.....	27
I.6.4.1.Viandes et poissons:.....	27
I.6.4.2.Autres produits alimentaires:.....	28
I.6.4.3.Conclusion cuisine :	28

I.6.5.Déchets directs :	29
I.6.5.1.Conclusion déchets directs:	29
I.6.6.Amortissements:	30
I.6.6.1.Mobilier (amortissement matériel).	30
I.6.6.2.Matériel informatique (amortissement parc informatique)	30
I.6.6.3.Conclusion amortissements:	31
I.6.7.Synthèse des émissions globales:	31
I.6.7.1.Ratios obtenus:	32
I.7.Préconisations:	33
I.7.1.Energie interne:	33
I.7.2.Transports :	34
I.7.3.Autres postes:	34
II. Chapitre 2: Isolation du bâtiment.....	35
II.1- Les déperditions thermiques:.....	35
II.1.1. La double problématique.....	35
II.1.2.Les zones de perte de chaleur:.....	35
II.1.2.1- Les combles et la toiture.....	36
II.1.2.2.Les parois verticales : le mur manteau.....	36
II.1.2.3.Les menuiseries extérieures.....	36
II.1.2.4. Les ponts thermiques.....	36
II.1.2.5.Le sol.....	36
II.1.2.6.Le renouvellement de l'air.....	37
II.1.3.Les trois modes de propagation de chaleur:	37
II.1.3.1.la conduction :	37
II.1.3.2.La convection:.....	37
II.1.3.3.Le rayonnement:.....	37
II.1.4. La conductivité thermique et le coefficient globale d'échange superficiel:.....	38
II.1.4.1. La conductivité thermique:.....	38
II.1.4.2. Le coefficient global d'échange superficiel (h):.....	38
II.1.5 Le coefficient de transmission thermique (U):.....	38
II.2.Isolation des fenêtres:.....	38
II. 2.1.Eléments à prendre en considération:	39
II.2.2.Le coefficient de transmission thermique a travers le vitre d'une fenêtre du bâtiment :	39
II.2.3.Perte de chaleur à travers les vitres du bâtiment:.....	40

II.2.4.Amélioration du coefficient Ug des vitrages:.....	41
II.2.4.1 Remplacement du vitrage:.....	41
II.2.4.2.Le coefficient de transmission thermique à travers la vitre d'une fenêtre du bâtiment.....	45
II.2.4.3.Perte de chaleur à travers les vitres à haut rendement choisis pour le bâtiment:.....	46
II.2.5.Pourcentage d'amélioration :.....	47
II.3.Isolation du toit:.....	48
II.3.1.Epaisseur de l'isolant:.....	48
II.3.2.Pourcentage d'amélioration:.....	49
III. Chapitre 3: Eclairage efficace.....	51
III.1.Importance d'un éclairage efficace:.....	51
III.2.Grandeurs Photométriques:.....	51
III.2.1.Flux lumineux:.....	51
III.2.2.L'éclairement:.....	51
III.2.3.Température de couleur (T_c):.....	51
III.2.4.Indice de rendu des couleurs (IRC):.....	52
III.3.Etude de l'éclairage dans le bâtiment :.....	52
III.3.1.Distribution des tubes fluorescents dans le bâtiment:.....	53
III.3.2. Risques des lampes fluorescents pour la santé:.....	54
III.3.3.Consommations électriques des tubes fluorescents:.....	54
III.3.4.Etude de l'éclairage d'une classe complémentaire type avec les tubes fluorescents présents: ..55	
III.3.4.1.Les grandeurs recommandées par la norme européenne EN 12464-1.....	55
III.3.4.2.Calcul de l'éclairage dans une classe complémentaire type:.....	56
III.3.5.La rénovation partielle - Remplacement des tubes fluorescents:.....	58
III.3.5.1. la technologie des LED - Les tubes à LED:.....	58
III.3.5.2.Comparaison entre les tubes fluorescents et les tubes à LED:.....	59
III.3.5.3.Choix des tubes à LED :	60
III.3.5.4.Installation des tubes à LED:.....	62
III.3.6.Consommations électriques des tubes fluorescents:.....	63
III.3.7.Réduction en Emissions annuelle d'équivalent Carbone des tubes à LED:.....	63
III.3.8.Durée de remboursement du coût pour le remplacement des tubes lumineux:.....	64
IV. Chapitre 4: Le photovoltaïque.....	66
IV.1.Energie renouvelable:.....	66
IV.2. Rayonnement solaire:.....	66

IV.2.1. Spectre du rayonnement solaire extraterrestre :	66
IV.2.2. La constante solaire:	67
IV.2.2. le nombre de masse d'air (AM) :	67
IV.3. Energie solaire photovoltaïque:	68
IV.3.1 Description d'une cellule photovoltaïque:	68
IV.3.2. Le module photovoltaïque :	69
IV.3.2.1. Caractéristiques d'un module:	69
IV.3.3. Panneaux solaires:	70
IV.3.3.1. L'association des cellules photovoltaïques:	70
IV.3.4. Actualité au Liban:	71
IV.3.5. Principe de fonctionnement d'un Système photovoltaïque autonome:	72
IV.4. Intégration d'un système photovoltaïque autonome au parc informatique de l'école: :	73
IV.4.1. Irradiations solaires:	74
IV.4.2. Les masques solaires:	75
IV.4.3. Inclinaison des panneaux:	76
IV.4.4. Besoin d'énergie électrique pour le fonctionnement du parc informatique:	77
IV.4.5. Dimensionnement du champ photovoltaïque:	77
IV.4.6. Indicateur de validité:	78
IV.5. Utilisation de l'énergie produite accumulée dans la cantine:	79
IV.5.1. Besoin d'énergie électrique dans la cantine durant les trois mois:	79
IV.6. Diminution des émissions équivalent Carbone par an:	80
IV.7. Estimation de la période de remboursement du coût:	81
IV.8 Temps de retour énergétique:	82
IV.8.1. Définition:	82
IV.8.2. Calcul du temps de retour du système photovoltaïque à cellules monocristallines:	82
V. Chapitre 5: Eau chaude sanitaire.....	84
V.1. Introduction:	84
V.2. Types de capteurs solaires thermiques:	84
V.2.1. Les capteurs plans:	84
V.2.1.1. Les capteurs plans opaques:	84
V.2.1.2. Les capteurs plans vitrés:	85
V.2.2. Les panneaux solaires thermiques à tubes sous vide :	85
V.3. Le capteur thermique solaire plan vitré:	85
V.4. Composants du système solaire:	86

V.4.1. Les capteurs solaires:.....	87
V.4.2. Le circuit primaire:.....	87
V.4.3. Le circuit d'eau sanitaire:.....	88
V.4.4. Le circuit piscine:.....	88
V.4.5. La régulation:.....	89
V.4.6. L'appoint:.....	89
V.5. Besoin d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment:.....	89
V.5.1. La méthode "fixtures units":.....	89
V. 5.2. Besoin journalier d'eau chaude sanitaire:.....	91
V.6. Dimensionnement des capteurs solaires:.....	92
V.6.1. Orientation et inclinaison des capteurs solaires:.....	93
V.7. Réduction d'énergie grâce au système solaire de production d'eau chaude sanitaire.....	93
V.8. Réduction d'émissions d'équivalent Carbone :.....	94
V.9. Durée de remboursement du système solaire d'eau chaude sanitaire:.....	95
VI. Chapitre 6: Récupération de l'eau de pluie.....	96
VI.1. Réalité au Liban:.....	96
VI.1.1. Précipitation:	96
VI.2. Récupération de l'eau de pluie:.....	96
VI.2.1. Principe de fonctionnement d'un système de récupération de l'eau de pluie:.....	96
VI.3. Dimensionnement d'un système de récupération d'eau de pluie:	97
VI.3.1. Calcul de l'approvisionnement potentiel en eau de pluie par estimation de l'écoulement:.....	97
VI.3.2. Estimation de la demande domestique en eau:.....	98
VI.3.4. Dimensionnement du réservoir de captage (méthode graphique) :.....	99
VI.3.5. Filtration de l'eau de pluie:.....	102
VI.3.5. Volume de la citerne sur le toit :.....	102
VI.3.6. Réduction d'émission et économie en eau grâce au système d'eau de pluie :.....	103
VI.4. Mécanisme de chasse d'eau double flux:.....	103
VI.5. Une économie d'eau supplémentaire:.....	105
VI.6. Economie en eau après introduction d'un mécanisme de chasse d'eau à double flux couplé à un flotteur à ouverture différée:.....	106
VI.7. Coût du remplacement des flotteurs et des chasses d'eau traditionnels:.....	107
VI.8. Estimation des doses d'arrosage:.....	107
VI.9. Dimensionnement du nouveau réservoir de captage:.....	108
VI.10. Nouveau volume de la citerne sur le toit:.....	109

VI.11. Economie et réduction totale annuelle:.....	110
VI.12. Calcul de la station de pompage:.....	110
VII. Chapitre 7: La ventilation performante.....	113
VII.1.Introduction:.....	113
VII.2.L'importance de la ventilation.....	113
VII.3.La qualité de l'air	114
VII.4.L'humidité et les moisissures.....	115
VII.5.Le principe de fonctionnement de la ventilation.....	116
VII.5.1.Le plan de pression neutre.....	116
VII.5.2.Les différents types d'installation de ventilation.....	117
VII.5.2.1. La ventilation naturelle :.....	118
VII.5.2.2.La ventilation mécanique :.....	119
VII.5.2.3.Ventilation avec récupération d'énergie :.....	120
VII.6. Dimensionnement du système de ventilation pour le bâtiment:.....	122
VII.6.1.Débit d'air nouveau minimal:.....	122
VII.6.2. Débit minimal d'air évacué:.....	123
VII.6.3.Infiltration à travers les fenêtres et les portes:.....	124
VII.6.4.Roues de récupération d'énergie:.....	126
VII.6.5.Dimensionnement des gaines d'extraction d'air:.....	129
VII.6.5.1.Méthode des frottements égaux:.....	129
VII.6.6.Dimensionnement des grilles et des diffuseurs:.....	132
VII.6.7. Perte de charges dans la gaine principale d'évacuation d'air:.....	133
VIII. Chapitre 8: Confort thermique et climatisation solaire.....	134
VIII.I. Quelques propriétés physiques de l'air:.....	134
VIII.1.1. La température sèche de l'air (T_{DB}):.....	134
VIII.1.2. La température humide de l'air (T_{WB}):.....	134
VIII.1.3. La température de rosée:.....	134
VIII.1.4. La teneur de l'air en eau:.....	135
VIII.1.5. Le degré hygrométrique:.....	135
VIII.2. Confort thermique humain:	135
VIII.2.1.Le confort en fonction de l'humidité:.....	136
VIII.2.1.Le confort en fonction de la température:.....	137
VIII.2.2. Le confort température-humidité:.....	137

VIII. 2.3.Le confort en fonction de la vitesse de l'air	138
VIII.3.La climatisation du bâtiment:.....	138
VIII.3.1 Les paramètres de conception:.....	138
VIII.3.1.1. Transfert à travers le vitrage:.....	139
VIII.3.1.2. Les transferts à travers l'enveloppe opaque du bâtiment:.....	140
VIII.3.1.3.La production de chaleur interne :.....	142
VIII.3.1.4.Les Cloisons (partitions):	144
VIII.3.1.5.Le plafond/Sol:	144
VIII.3.1.6. Les infiltrations et la ventilation:.....	145
VIII.3.2.Conditions de Conception:.....	146
VIII.3.3 Calcul des Charges:.....	146
VIII.4.Une solution de climatisation renouvelable:.....	148
VIII.4.1. Machine de climatisation à compression mécanique:.....	149
VIII.4.2. Machine de climatisation solaire à absorption:.....	150
VIII.4.3. Description du cycle d'une machine à absorption H ₂ O/LiBr:.....	150
VIII.4.3.Conclusion:.....	151
CONCLUSION.....	152
LISTE DES FIGURES.....	154
LISTE DES TABLEAUX.....	157
BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE.....	160
RÉSUMÉ.....	161
ANNEXE.....	162

REMERCIEMENTS

"Ne laissez rien, peut-être c'est pour votre bon".

Je remercie tout d'abord mes professeurs de CNAM pour m'avoir transmis autant de savoirs, et surtout le goût de poursuivre dans la voie de la recherche.

Je remercie chaleureusement tout le corps professoral de l'école de Besançon et plus précisément, sœur Fériale Karam, qui ma donner toutes les informations nécessaires pour mon projet au niveau de l'école ainsi que la maison de retraite.

J'exprime ma gratitude à tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse, je cite: monsieur Chady Asaker et monsieur Amin Hawat, sans oublier tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Je dédie ce mémoire à tous mes proches et plus particulièrement à mon père qui n'est plus là, mais qui aurait été fier de savoir ce que je suis devenu.

NOMENCLATURES ET ABRÉVIATIONS

Kg	: Kilogramme
mg	: Milligramme
Km	: Kilomètre
m	: Mètre
W	: Watt
Wc	: Watt crête
KW	: Kilowatt
RT	: Réglementation thermique
mm	: Millimètre
CFM	: Pieds cube par minute
cm	: Centimètre
e	: Epaisseur
g	: Gramme
K	: Kelvin
lm	: Lumen
lx	: Lux
€	: Euro
ppm	: Particule par million
s	: Seconde
HAP	: HourlyAnalysis Program
T _{DB}	: Température sèche de l'air
T _{WB}	: Température mouillée de l'air
AM	: Nombre de masse d'air
PV	: Photovoltaïque
EVA	: Ethylène-vinyle- acétate
Pc	: Puissance crête
in	: Inch (pouce)
ft	: Feet (pied)
UV	: Ultra-violet
STC	: Conditions de test standard
Vco	: Tension à vide
Ce	: Coefficient d'écoulement.

Em : Eclairage moyen
Icc : Courant de court-circuit
LED : Diode électroluminescente
IRC : Indice de rendu des couleurs
Cp : Chaleur spécifique de l'eau
° C : Degré Celsius
Tc : Température de couleur
 λ : Conductivité thermique
h_c : Coefficient de transfert convectif
h_r : Coefficient de transfert radiatif
U : Coefficient de transmission thermique
U_g : Coefficient de transmission thermique a travers le vitre
R_t : Résistance thermique totale
T_{in} : Température intérieure
T_{ex} : Température extérieure
T : Température
SS1 : Premier étage Sous-sol
SS2 : Deuxième étage sous-sol
RDC : Rez de chaussé
WC : Toilettes
FU : Fixtures Units
GES : Gaz à effet de serre
Q : Quantité de chaleur
PUR : Polyuréthane
VIR : Vitrage à Isolation Renforcée
FS : Facteur solaire du vitrage
h : Heure
Ah : Ampère heure
L : Litre
an : Année
Tep : Tonne d'équivalent pétrole
TeCO₂ : Tonne d'équivalent CO₂
TeC : Tonne d'équivalent Carbone
J : Joule

Si : Silicium
ECS : Eau chaude sanitaire
V : Volt
H₂O : Eau
VD : Amortisseur de volume
FD : Clapets coupe-feu
H₂ SO₄: Acide sulfurique
CO₂ : Dioxyde de carbone
CH₄ : Méthane
LiBr : Bromure de lithium
O₂ : Ozone
Mph : Miles par heure
PPN : Plan de pression neutre
N₂O : Protoxyde d'azote
HFC : Hydrofluorocarbure
PFC : Per fluorocarbure
SF₆ : Hexafluorure de soufre
C₁₂H₂₃ : Diesel
O₂ : Dioxygène
KWh : Kilowattheure
mm CE : Millimètre colonne d'eau
m CE : Mètre colonne d'eau
BTU : British thermal unit
EDL : Electricité de Liban
IEA : Agence internationale de l'énergie
PVC : Polyvinylchloride (plastique)
GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
HVAC : Chauffage, ventilation et climatisation
PRG ou GWP : Potentiel de réchauffement global
ADEME : Agence De l'Environnement et Maîtrise de l'Energie
SMACNA : Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association
ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

INTRODUCTION

Nous sommes tous responsable pour agir contre les facteurs responsables de la détérioration de notre système écologique. L'environnement est nécessaire pour toute vie sur terre. Si notre environnement est détruit ou modifié, il devient impossible de se nourrir, de respirer et de boire donc de vivre. Les petits actes de pollution dont nous sommes tous responsables ont des conséquences sur tous les habitants de la planète. Ces menaces planétaires qui pèsent sur l'environnement exigent des solutions à l'échelle mondiale et c'est dans la durabilité que réside la clé du problème.

Dans ce projet on traitera le cas d'un bâtiment traditionnel énergivore situé à Kfour - Liban. On proposera des systèmes mécaniques et des techniques innovantes ainsi que des améliorations individuelles et globales sur ce bâtiment afin de le rendre, tant que possible, amicale avec l'environnement et un exemple-type à suivre au Liban.

Le bâtiment est Située à Kfour dans la région de Ftouh, à 20 Km de la baie de Jounieh. Il a été construit entre 1960 et 1962 pour un noviciat des sœurs de la charité qui a résidé jusqu'en 1982.

Les évènements du Liban de 1975 bouleversèrent tous les plans. Des milliers de déplacés se réfugièrent dans la région de Kfour. Ils demandèrent avec insistance d'ouvrir une école pour leurs enfants alors livrés à eux-mêmes, Sœur Noha Najjar, Régionale à l'époque, leur a ouvert les locaux de la maison pour scolariser plus de 300 élèves, du primaire au secondaire. Les Sœurs de Besançon à Beyrouth et à Bourjain, alors réfugiées elles aussi, s'adonnèrent à l'enseignement. Ce qui donna un souffle à l'école qui fut baptisée du nom de Ste Jeanne-Antide et le bâtiment se transformait à un moyen de promotion sociale, intellectuelle et spirituelle pour la région.

Aujourd'hui, le bâtiment est constitué de cinq étages, dont chaque étage possède une superficie approximative de 1000 m² (SS1-SS2-RDC-1^{er} étage -2^{ème} étage), groupés en deux parties. La première partie est formée de trois étages (SS2 - RDC - 2^{ème} étage) et se sert comme école, du maternel au cycle secondaire et regroupe plus que 500 élèves dont je me suis un professeur depuis 2007.

La deuxième partie est formée par le reste des étages (SS1 - 1^{er} étage) et forme une maison de retraite pour les sœurs âgées de la charité. Dans le premier étage sous-sol (SS1) on trouve la cuisine, la salle à manger, le salon et les chambre des employés, tandis que dans le premier étage on trouve les chambres des sœurs âgées.



Figure 1: Vue de l'espace du bâtiment Besançon d'après "2012 GeoEye"

On commencera à faire le bilan Carbone de l'école pour l'an 2012 (périmètre +3) pour avoir des informations sur les postes qui émettent le plus des polluants et par la suite établir un plan de travail pour lutter ou réduire tant que possible ces émissions.

Des améliorations seront faites sur l'isolation des fenêtres ainsi que pour le toit et les lampes. Un système photovoltaïque sera dimensionné pour recouvrir le besoin électrique du parc informatique de l'école.

La chaudière ancienne sera remplacée par un système solaire de chauffe-eau sanitaire avec appoint électrique pour recouvrir tout le besoin en eau chaude du bâtiment (école et maison de retraite).

Grâce à la précipitation énorme de l'eau de pluie sur la région de Kfour, un système de récupération d'eau de pluie sera dimensionné pour alimenter les toilettes (WC) et pour arroser le jardin. Une nouvelle technique sera proposée pour réduire le gaspillage des chasses d'eau des toilettes ainsi que les robinets flotteurs.

Le système de chauffage traditionnel (radiateurs + chaudière à fioul domestique) sera remplacé par une climatisation solaire efficace à haute rendement et un système de ventilation à double flux contrôlé sera introduit pour acquérir le confort ainsi que respecter les nouvelles normes.

I. Chapitre 1:

Bilan – Carbone 2012

I.1. Gaz à effet de serre (GES):

Les Gaz à Effet de Serre (GES) sont les gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations qui rencontrent d'autres molécules de gaz, répétant ainsi le processus et créant l'effet de serre, avec augmentation de la température. L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans notre atmosphère terrestre est en effet l'un des principaux facteurs à l'origine du réchauffement climatique.

Plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre ont été recensés par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) parmi lesquels figurent : la Vapeur d'eau (H₂O), le Dioxyde de carbone (CO₂), le Méthane (CH₄), l'Ozone (O₃), le Protoxyde d'azote (N₂O), l'Hydrofluorocarbure (HFC), le Per fluorocarbure (PFC) et l'Hexafluorure de soufre (SF₆).

Afin de limiter l'accentuation de l'effet de serre et la hausse des températures à la surface de la planète, des politiques de réduction ou de limitation d'émissions de certains GES ont été mises en place par de nombreux pays dont la France notamment dans le cadre du protocole de Kyoto.

I.2. Potentiel de réchauffement global (PRG):

Afin de caractériser l'impact sur l'environnement planétaire d'une substance, le RGP (ou le GWP : global warming potentiel) a été introduit. La substance prise comme référentiel est le dioxyde de carbone (CO₂). L'impact d'une substance prise dépend de la durée de prise en considération. La référence la plus couramment utilisée est le GWP₁₀₀ qui correspond à 100 ans. Le méthane a un GWP de 23, cela signifie que 1 Kg de méthane a un impact équivalent à celui de 23 Kg de CO₂.

I.3. La tonne d'équivalent pétrole (Tep), la tonne d'équivalent CO₂ (TeCO₂) et la tonne d'équivalent Carbone (TeC):

L'unité officielle d'énergie dans le système international est le Joule (J) mais, parce que le pétrole est l'énergie dominante, les énergéticiens utilisent la tonne d'équivalent pétrole (Tep) ou quelquefois la tonne d'équivalent charbon (TeC). Vis à Vis de l'effet de serre, les émissions étant enformées par rapport au CO₂, il est courant de nommer les émissions par rapport à des masses équivalentes de

CO₂. De plus les émissions sont souvent comptabilisées en tonnes équivalentes de carbone (TeC) sachant que 1 TeC correspond à 3,66 TeCO₂.

1 tonne équivalent carbone c'est :

- 1 aller-retour Paris – New York en avion
- 1,8 tonne de papier
- 8 500 km en 4x4 en Ville[11]

I.4.Introduction au Bilan-Carbone:

Le Bilan – Carbone est une méthode de comptabilisation des Gaz à Effet de Serre (GES) développée par l'ADEME (Agence De l'Environnement et Maîtrise de l'Energie). Elle permet de mesurer l'impact global d'une activité (entreprise ...) sur l'environnement en termes d'émissions de GES ainsi d'isoler les postes fortement émetteurs d'une activité. Les facteurs d'émission sont en équivalent carbone, et les résultats sont donnés en équivalent carbone et en équivalent CO₂. Les gaz pris en compte avec la méthode Bilan - Carbone Sauf exception explicitement mentionnée ou justifiée, les 6 gaz ou familles de gaz du protocole de Kyoto : CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆.

I.4.1.Les périmètres du bilan Carbone:

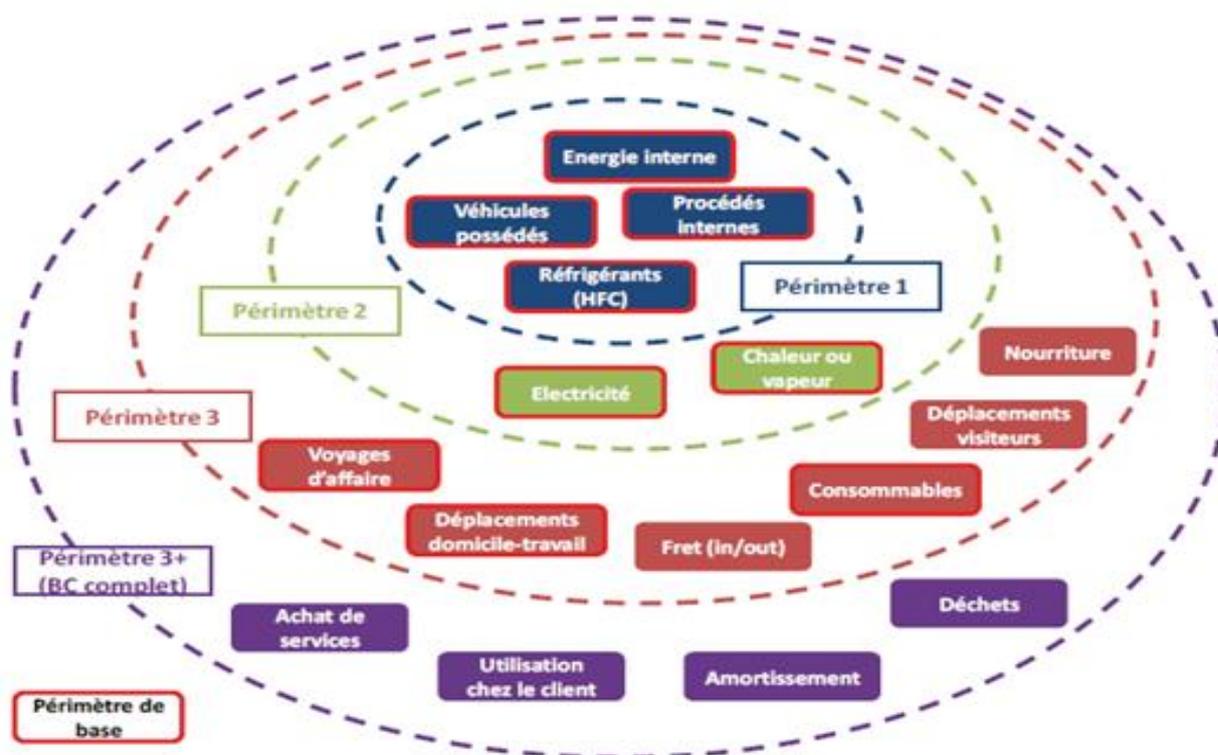


Figure I-1: Les périmètres du bilan Carbone

Les entreprises peuvent choisir de réaliser leur bilan carbone sur un, deux ou trois périmètres. Evidemment, plus l'analyse est large (c'est-à-dire plus elle englobe de périmètres), plus l'évaluation des émissions est complète et les possibilités d'actions nombreuses.

Le premier périmètre couvre les émissions directes de GES liées à la combustion d'énergie à l'intérieur de l'entreprise (procédés de production, transport interne, chauffage des bâtiments) et à la fuite de gaz réfrigérants.

Le second comprend les émissions indirectes liées à l'utilisation de vecteurs énergétiques (électricité et chaleur). Si l'entreprise n'est pas directement responsable de ces émissions, celles-ci, provenant de centrales électriques ou vapeur, sont intimement liées à la consommation de ces vecteurs énergétiques par l'entreprise.

Le troisième inclut les autres émissions indirectes. Cela inclut notamment les émissions générées par les déplacements des travailleurs (domicile-lieu de travail, déplacements professionnels, etc.) et des visiteurs, le fret (entrant et sortant), les consommables (papier, matériel) et la nourriture (restaurant d'entreprise).

Certaines entreprises vont encore plus loin (périmètre 3⁺) en calculant les émissions générées par l'achat de services, l'utilisation du produit chez le client, les déchets, le matériel, les machines, les bâtiments, etc.

I.4.2. Informations nécessaires pour l'étude du bilan carbone:

- Utilisation directe de l'énergie fossile : volumes achetés de fioul, charbon, gaz.
- Achats d'énergie « produite » (vapeur, électricité) : KWh achetés et mode de production, tonnes de vapeur achetées.
- Fuites : factures d'achat de recharges
- Transports de personnes : distances parcourues et modes de transport pour les salariés en mission, modes de transport et distances parcourues pour les déplacements domicile-travail...
- Transports de marchandises : distances parcourues et poids transporté par mode. Pour le tertiaire : envois postaux...
- Poids des produits manufacturés achetés : papier (consommables ou documents imprimés), plastiques, équipement informatique, etc.
- Fin de vie des déchets : poids jetés par nature et type de gestion (décharge...)
- Surface des locaux
- Achats de services : factures fournisseur

I.5.Le Bilan - Carbone 2012 du bâtiment (périmètre 3⁺):

La méthode Bilan – Carbone permet d'évaluer l'impact global d'une activité en matière d'émission de gaz à effet de serre. Cet impact global se compose des émissions qui proviennent directement de l'école (par exemple les émissions résultant de la combustion de gaz ou de fioul dans une chaudière) et des émissions qui prennent place ailleurs, mais qui sont liées à des processus nécessaires à l'activité. Il en va notamment des émissions engendrées par les transports consommés par l'activité, qu'il s'agisse d'amener les enseignants au travail le matin, ou de celles liées à la production et à l'acheminement des fournitures.

La méthode Bilan- Carbone propose donc de passer en revue tous les flux physiques qui concernent l'activité (flux de personnes, d'objets, d'énergie, de matières premières...) et de leur faire correspondre les émissions de gaz à effet de serre qu'ils engendrent. Puis ces émissions sont agrégées poste par poste. Dans la très grande majorité des cas, il n'est pas envisageable de mesurer directement les émissions de gaz à effet de serre résultant d'une action donnée. En effet, s'il est courant de mesurer la concentration en gaz à effet de serre dans l'air, ce n'est qu'exceptionnellement que les émissions font l'objet d'une mesure directe.

Les chiffres qui permettent de convertir les données observables dans l'école en émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent carbone, sont appelés des facteurs d'émission. Comme l'essentiel de la démarche est basé sur des facteurs d'émission moyens, cette méthode a pour vocation première de fournir des ordres de grandeur. Cependant, Cela n'empêchera pas, d'en tirer des conclusions pratiques si l'on souhaite passer à l'action car, bien souvent, quelques postes faciles à estimer seront prépondérants dans l'ensemble. On a choisi de réaliser le bilan carbone du bâtiment sur le périmètre 3⁺.

La méthodologie utilisée pour réaliser le bilan carbone a été développée par l'ADEME qui est l'administration française en charge de la gestion de l'environnement et de l'efficacité énergétique.

I.5.1. Délimitations de l'étude:

- La période étudiée est l'année 2012.
- Les eaux usées ne sont pas comptabilisées dans la poste des déchets.
- L'école dispose seulement de deux climatiseurs de 12000 BTU chacun et par raison les émissions liées aux fuites de gaz frigorigènes ne sont pas inclus dans le calcul. (L'école ne possède pas un système central de climatisation)

- En ce qui concerne les émissions engendrées par le traitement des déchets, le poids de papier jeté n'est pas connu, par contre pour les déchets de la cuisine nous avons supposé que 10% de la nourriture est jetée.
- Le déplacement des visiteurs n'est pas pris en considération dans l'étude.
- En ce qui concerne le transport des fournisseurs, l'étude se limite aux fournisseurs venant pour la cuisine et pour l'achat des utiles scolaires (livres, cahiers, craie..) car les autres données ne sont pas connues.
- Seul le papier et le carton achetés sont prisent en considération dans le calcul des matériaux entrants.

I.5.2. Nombre et répartition de personnes présents dans le bâtiment:

L'école est dans un bâtiment ancien, construit en 1960. Il possède deux cours de récréation et cinq niveaux. Le bâtiment possède un nombre de 569 personnes qui sont repartis de la manière suivante:

Bâtiment	Enfants	Adultes	Total
Ecole	500	31	531
Noviciat	0	10	10
Maison de retraite des sœurs	0	28	28
Total			569

Tableau I-1 -: Répartition de personnes

I.5.3. Les personnes sources

Voici la liste des personnes ayant participées à la collecte des informations :

Nom	Fonctions
Sœur Férialé Karam	Directrice de l'école et responsable du noviciat.
Sœur Véra Khoury	Mère supérieur de la maison de retraite.
Mademoiselle Suzanne Dléptany	Assistante directrice et responsable des cycles éducatifs
Madame Elhamme Zabbal	Responsable de la Comptabilité générale.
Sœur Noha Daou	Responsable alimentaire de la cuisine

Tableau I-2 : Liste des personnes sources

I.6.Résultats sectoriels de l'étude

I.6.1.Energie du site:

On considère ici l'ensemble des consommations électriques (achat d'énergie électrique de l'électricité du Liban EDL) et des consommations de combustibles (fioul domestique pour générateur d'électricité et pour le chauffage). Le bâtiment étant chauffé à l'aide d'un système ancien de chauffage central à chaudière et radiateurs fonctionnant sur le fioul domestique.

I.6.1.1.Calcul du taux d'émission de kilogrammes de CO₂ lors de la combustion du fioul domestique (Diesel)

Formule chimique du Diesel : C₁₂H₂₃

Masse molaire du Diesel : 167,3121 g/mol

Masse molaire du dioxyde de carbone : 44 g/mol

Masse volumique du Diesel : 0.832 Kg/Litre

L'équation de combustion totale du Diesel s'écrit:



Donc d'après le rapport stœchiométrique de l'équation de combustion totale on trouve que 4 moles de C₁₂H₂₃ produisent lors d'une combustion totale 48 moles de CO₂

Masse de 4 moles de C₁₂H₂₃ = 4 moles × 167,312g/mole = 669,25 grammes.

Masse de 48 moles de CO₂ = 48 moles × 44 g/mole = 2112 grammes.

D'où 1 Kilogramme de Diesel produit :

$$(2112 \times 1000) / 669,25 \text{ grammes de CO}_2 = 3155.77 \text{ grammes de CO}_2 = 3,15577 \text{ Kg de CO}_2$$

Et 1 litre of Diesel produit :

$$3,15577 \times 0.832 \text{ Kg/Litre} = 2,6272 \text{ Kg de CO}_2$$

Conversion en Kg carbone/Tep:

Pour le fioul domestique (Diesel), 1170 litres de diesel vaut 1 tonne d'équivalent pétrole(Tep) alors:

1 Litre de fioul domestique produit 2,6272 Kg de CO₂

1170 Litres de fioul domestique (1 tep) produit x Kg de CO₂.

$$x = (1170 \times 2,6272) / 1 = 3073,824$$

Donc le coefficient d'émission de CO₂ pour le Diesel est de 3073,824 Kg de CO₂/ Tep.

Or 1 tonne d'équivalent Carbone vaut 3,66 tonnes d'équivalent CO₂ d'où le calcul du facteur d'émission de Carbone pour le Diesel est :

$3073,824 / 3,66 = 840 \text{ Kg de Carbone /Tep}$

I.6.1.2.Emissions reliées aux Combustibles fossiles (le fioul domestique):

Le bâtiment a consommé un total de 33600 Litres de fioul domestique (Diesel) pour le chauffage des locaux et la production de l'électricité secondaire grâce à un générateur d'électricité. Les résultats sont dressés dans le tableau ci-dessous:

Combustible	Consommation en Litres	Kg équivalent Carbone/Tep	Kg équivalent Carbone
Fioul domestique (Diesel)	33 600	840	24 123,08

Tableau I-3 : Emissions du fioul domestique

Emission totale en Kg d'équivalent carbone du fioul domestique est de :

$[(840 \times 33600) / 1170] \text{ Kg équivalent Carbone} = 24\,123,08 \text{ Kg équivalent Carbone.}$

I.6.1.3.Emissions reliées à l'achat de l'électricité du réseau au Liban:

La consommation totale d'électricité achetée de l'électricité du Liban (EDL) est de 130 812 KWh. D'après la source internationale IEA (Agence internationale de l'énergie), l'émission de CO₂ équivalent par KWh d'électricité au Liban est de l'ordre de 716.6724 grammes de CO₂/ KWh. Les résultats sont dressés dans le tableau ci-dessous:

	Country (2009)	CO ₂ g/kWh
63	Sudan	355.5958
64	United Rep. of Tanzania	281.2221
65	Togo	201.5714
66	Tunisia	538.0795
67	Zambia	3.2466
68	Zimbabwe	618.9509
69	Other Africa	494.4978
70	Africa	643.2581
71	Bahrain	664.8702
72	Islamic Rep. of Iran	629.9627
73	Iraq	684.0861
74	Jordan	580.5480
75	Kuwait	869.6052
76	Lebanon	716.6724
77	Oman	842.4879
78	Qatar	494.0089
79	Saudi Arabia	757.2325
80	Syrian Arab Republic	640.8914
81	United Arab Emirates	631.2455

Tableau I-4 : Émissions de CO₂ par kWh d'électricité et de chaleur d'après la Source: International Energy Agency (IEA)

Conversion en Kg équivalent Carbone /KWh:

$716,6724 \text{ g de CO}_2 / \text{KWh} = (716,6724) / (3,66 \text{ kg} \times 1000) \text{ Kg équivalente Carbone} / \text{KWh} = 0,196 \text{ Kg équivalent Carbone /KWh.}$

Les résultats sont dressés dans le tableau ci-dessous:

Source	Consommation en KWh	Kg équivalent de Carbone par KWh	Taux de pertes en lignes	Kg équivalent de Carbone
EDL	130 812	0,196	10 %	28 203,07

Tableau I-5 : Emissions électricité de réseau au Liban

Emission totale en Kg d'équivalent Carbone dû à l'électricité de réseau au Liban est de :

$$(1 + 0,1) \times 130\,812 \times 0,196 = 28\,203,07 \text{ Kg de Carbone.}$$

I.6.1.4. Conclusion énergie interne :

L'ensemble de ces résultats permet de construire le diagramme suivant :

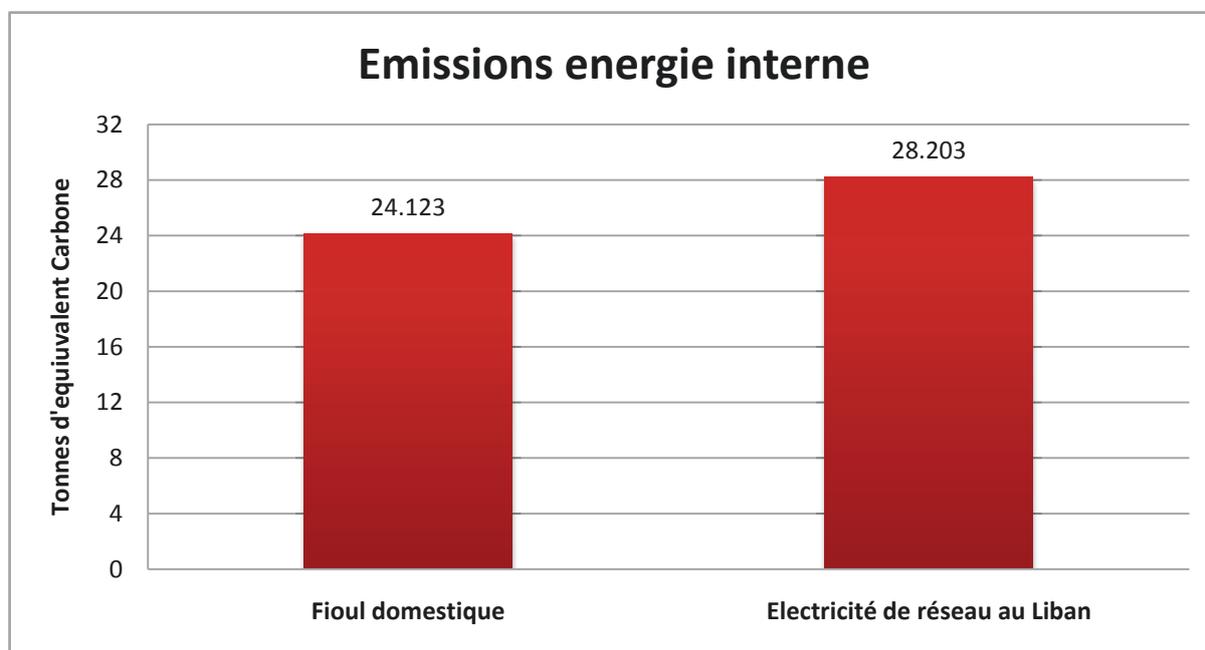


Figure I-2: Emissions énergie interne

Le total des émissions liées à l'énergie interne est de 52,326 tonnes d'équivalent Carbone (Emission Fioul + Emission électricité).

Les émissions liées au fioul domestique se divisent en deux catégories : Emissions liées au chauffage et émissions liées à la production de l'électricité par le générateur diesel. La part de chaque catégorie en volume de fioul domestique et émissions est dressée dans le tableau ci-dessous:

Catégories	Volume de fioul domestique (Litres)	Pourcentage de fioul domestique (%)	Kg d'équivalent Carbone
Chauffage	19 500	58	13 991,4
Production d'électricité	14 100	42	10 131,68
Total	33 600	100	24 123,08

Tableau I-6 : Emissions par catégories

Ces résultats nous permet de construire le diagramme suivant :

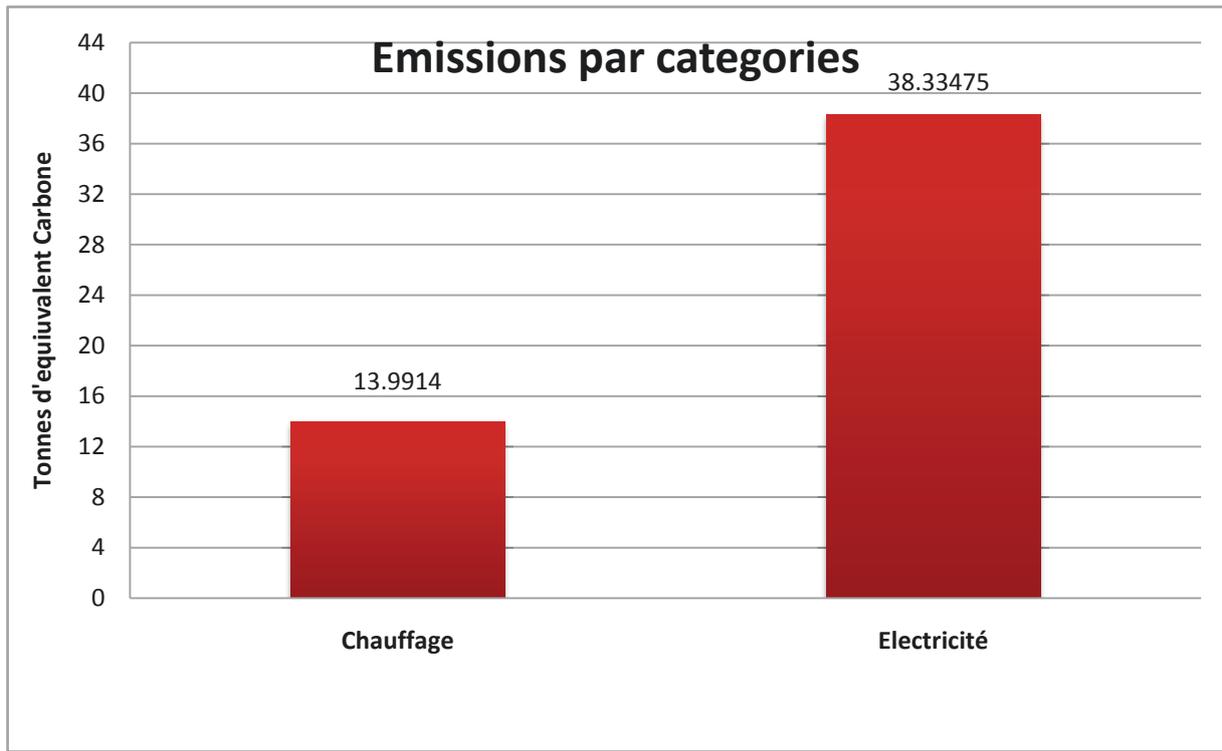


Figure I-3: Emissions par catégories

On constate que les émissions liées à l'électricité (achat et production) sont très grandes devant celles du chauffage. Cela est dû à la technique de production de l'électricité dans le réseau au Liban. (1kwh d'électricité produite au Liban émet 716,6724 Kg de CO₂ tandis qu'au France, le 1KWh émet 80, 851 Kg de CO₂). Le recourt aux techniques qui utilisent les énergies renouvelables pour la production de l'électricité, comme les panneaux solaires, peuvent être la solution contre ces énormes émissions.

I.6.2.Les Transports:

I.6.2.1.Déplacements domicile – école:

On a considéré ici les déplacements domicile-école des élèves, des professeurs et des salariés dans l'école. Les résultats sont groupés dans le tableau ci-dessous:

	Autobus	Voiture	Circulation à pied
Elèves	280	207	13
Professeurs	0	24	3
Employés	0	4	0
Total	280	235	16

Tableau I-7 : Moyen de locomotion domicile-école

La plupart des élèves (96%) habitent dans un cercle de rayon 5 Km où l'école est son centre. On prendra en considération que la distance moyenne domicile-école parcourue par un élève est de 3km (aller seulement) donc 6 km aller-retour. Les élèves vont à l'école 176 jours chaque année.

La moitié du nombre des élèves qui utilisent la voiture est prise dans le calcul à cause de l'utilisation commune de plusieurs élèves la même voiture (frères, sœurs, voisins..).

La distance totale moyenne parcourue par les voitures qui transportent les élèves pour le déplacement domicile -école en un an est de : $[(207 \times 0,5 \times 6 \text{ km})] \times 176 = 109\,296 \text{ Km}$.

Le nombre d'autobus au service de l'école est de 8 (capacité de 34 passagers par autobus).

La répartition des passagers utilisant l'autobus par rapport à la distance parcourue vers l'école est citée dans le tableau suivant:

Distance parcourue (allée)	1Km	2Km	3Km	4Km
Nb passagers	50	120	80	30

Tableau I-8 : Distance parcourue par passager en autobus

La distance parcourue par les autobus cumulée sur le nombre de passagers en un an est de :

$[(1 \times 50) + (2 \times 120) + (3 \times 80) + (4 \times 30)] \times 2 \times 176 = 228\,800 \text{ Km}$.passagers

Dans le cas des professeurs et des salariés, le tableau ci-dessous groupe le nombre de personnes par rapport à l'intervalle de la distance de séparation domicile-écoles :

Intervalle distance	Distance entre 0 Km et 4 Km	Distance entre 4 Km et 8 Km	Distance entre 8 Km et 12 Km	Distance entre 12 et 16 Km	Distance supérieure à 16 Km
Nombre	7	10	7	3	4

Tableau I-9: Distance de séparation domicile-écoles

Le centre de l'intervalle est pris comme valeur moyenne dans le calcul sauf pour les distances supérieures à 16 km, où une valeur moyenne de 19 km est prise comme moyenne. Les professeurs et les salariés accèdent à l'école 198 jours par an.

Le total de distances parcourues par les professeurs et les salariés en un an est de :

$$[(7 \times 2) + (10 \times 6) + (7 \times 10) + (3 \times 14) + (4 \times 19)] \times 2 \times 198 = 103\,752 \text{ Km}$$

Le tableau suivant groupe les résultats des émissions liées au transport domicile-école:

Type de véhicule	Nb passages	Km par an	Km cumulés sur nb passagers	Kg équivalent Carbone par km	Kg équivalent par passager. Km	Kg équivalent Carbone
Voiture (essence)	235	213 048	 	0,076	 	16 191,648
Autobus (Diesel)	280	 	228 800	 	0,021	4804, 8
Total						20 996,448

Tableau I-10: Emissions transport domicile-école

Les émissions des déplacements domicile-école représentent donc 20 996,448 Kg équivalent Carbone. (20,996448 tonnes équivalent Carbone). Ce résultat est énormément grand, d'où la nécessité de trouver une solution pour réduire ses émissions.

I.6.2.2. Déplacements des élèves lors des sorties scolaires :

Durant l'année scolaire, toute classe primaire et complémentaire assistent à deux sorties scolaires. Pour les classes secondaires, une sortie par année scolaire est organisée. Les classes maternelles n'assistent à aucune activité hors école. La distance moyenne de parcourt des sorties est de 20 Km (Aller seulement). Les classes se déplacent en utilisant les autobus de l'école. Le résultat des émissions dues au déplacement des élèves lors des sorties scolaires est citée ci-dessous :

	nombre de passagers	Km parcourus cumules sur le nb des passagers	Kg équivalent carbone par passager. Km	Kg équivalent Carbone
Cycle primaire	210	8 400	0,021	176,4
Cycle complémentaire	105	4 200	0,021	88,2
Cycle secondaire	95	3 800	0,021	79,8
Total				344,4

Tableau I-11: Emissions déplacements sorties scolaires

Le résultat total des émissions dues au déplacement des classes lors des sorties scolaires est de 344,4 Kg équivalent Carbone ce qui est une valeur relativement faible.

I.6.2.3.Déplacements des fournisseurs:

On considère que les fournisseurs se déplacent uniquement pour l'école. Il est donc facile de connaître le kilométrage engendré par une commande. L'aller et le retour fournisseur - Ecole sont comptabilisés. Le tableau suivant groupe les résultats obtenus :

Nom du fournisseur	Adresse	Double distance Fournisseur-Ecole (Km)	Nombre de trajet annuel	Distance parcourue Km/an
A tout Prix	JdeidetGhazir	11	60	660
Keyrouz Bakery	Jouret el Kattin	10	314	3140
Mémoire	Ghazir	21	5	105
Total				3 905

Tableau I-12: Distances parcourues par les fournisseurs

Le tableau suivant indique les émissions engendrées par le déplacement des fournisseurs:

Nom du fournisseur	Distance annuelle parcourue (Km)	Masse des marchandises (tonne)	Masse x distance parcourue (tonne. Km)	Kg équivalent Carbone par tonne. Km	Kg équivalent Carbone
A tout Prix	660	7,2	4752	0.3251	1 544,875
Keyrouz Bakery	3140	3,15	9891	0.3251	3 215,564
Mémoire	105	2,8	294	0.3251	95,579
Total					4 856,018

Tableau I-13: Emissions déplacements des fournisseurs

Les émissions engendrées par le déplacement des fournisseurs comptabilisés est de 4,856018 tonnes d'équivalent Carbone/an. On doit travailler sur cette poste pour diminuer les émissions relatives.

I.6.2.4. Conclusion Transports:

L'ensemble de ces résultats permet de construire le diagramme suivant :

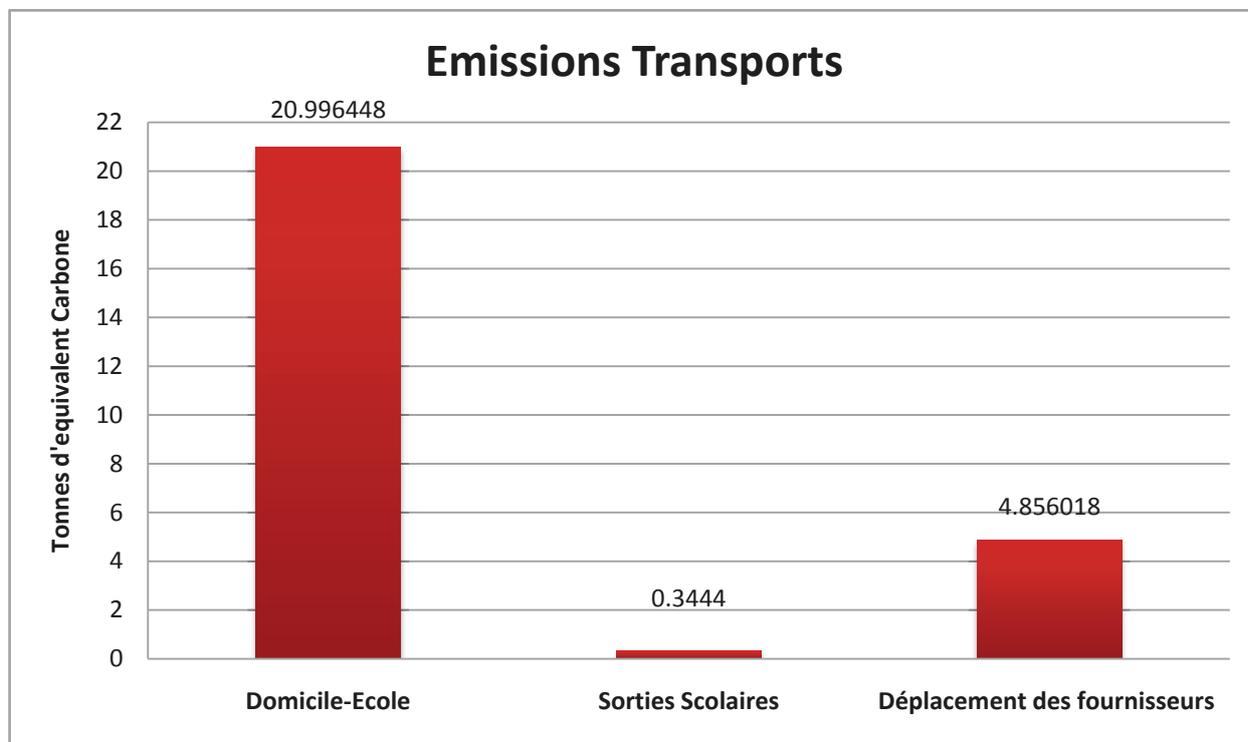


Figure I-4: Emissions Transports

Les émissions engendrées par les transports sont de 26,196866 tonnes d'équivalent Carbone/an. C'est le transport domicile-école qui émet le plus d'émissions.

I.6.3. Matériaux entrants:

Ce poste recouvre la quantité des papiers et des cartons consommée dans l'école.

Le tableau suivant résume le résultat des émissions engendrées par les matériaux entrants:

Matière	Masse en tonnes	Kg équivalent Carbone par tonne	Kg équivalent Carbone
Papier	3	500	1500
Carton vide	0,4	500	200
Total			1700

Tableau I-14: Emissions matériaux entrants

Un total de 1,7 tonnes d'équivalent Carbone est émis par la consommation du papier et du carton. L'émission par élève est de : $(1700/500) = 3,4$ Kg d'équivalent Carbone/élève.

I.6.3.1. Conclusion matériaux entrants:

Le graphe suivant illustre les résultats obtenus:

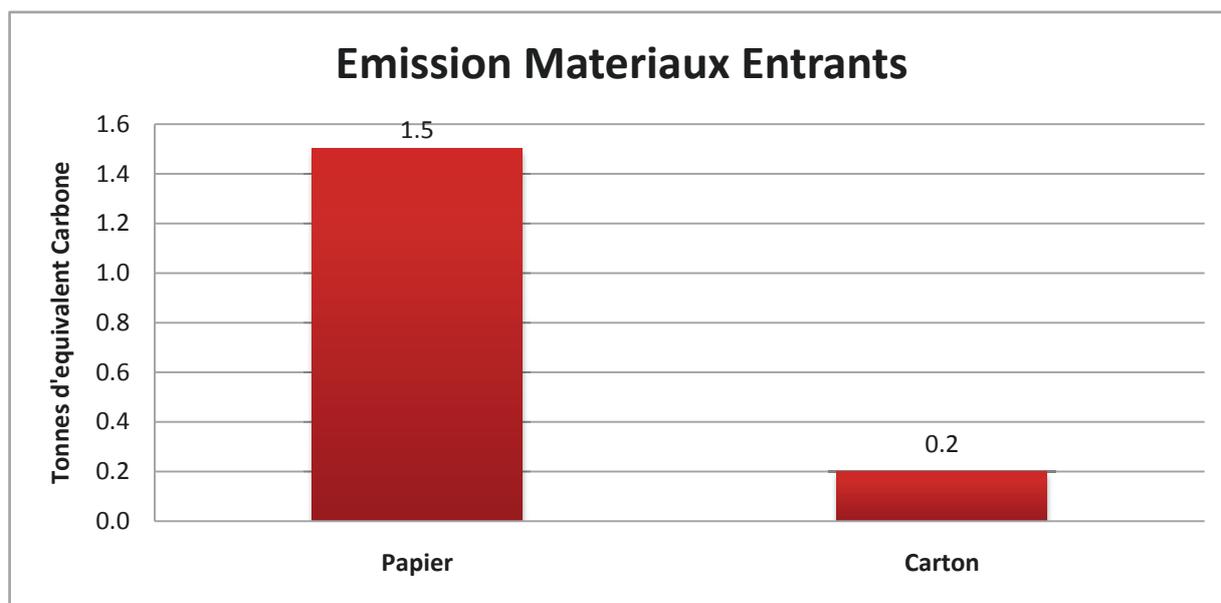


Figure I-5: Emissions matériaux entrants

I.6.4. La cuisine:

On va comptabiliser ici les émissions engendrées par l'élevage des animaux ainsi que la culture des différents légumes consommés par la cuisine. Cette cuisine est utilisée seulement par les Sœurs. Par exemple pour la culture du blé, les sources de gaz à effet de serre prises en compte sont les suivantes:

- émanations de N₂O liées à l'usage d'engrais azotés,
- utilisation directe de carburants dans les engins agricoles,
- dépense énergétique liée à la fabrication et à l'entretien des engins agricoles, à la fabrication de phytosanitaires et engrais..

I.6.4.1. Viandes et poissons:

Le tableau suivant explique les émissions engendrées par la consommation de viande et poisson:

Nature	Masse utilisée (tonne)	Kg équivalent Carbone par tonne	Kg équivalent Carbone
Poisson	0,3	440	132
Agneau/Mouton	0.1	3 832	383,2
Bœuf	0,78	4744	3700,32
Veau	0.1	12 802	1280,2
Poulet industriel	0,32	399	127,68
Total			5623,4

Tableau I-15: Emissions viandes et poissons

Les émissions annuelles engendrées par la consommation de viande et poisson est de 5,6234 tonnes d'équivalent Carbone.

I.6.4.2. Autres produits alimentaires:

Nature	Masse utilisée (tonne)	Kg équivalent Carbone par tonne	Kg équivalent Carbone
Beurre	0,03	3158	94,74
Fromage pâte cuite	0,06	3612	216,72
Yaourts	0,24	474	113,76
Pain	1,825	133	242,725
Maïs alimentaire	0,002	100	0,2
Huile de tournesol	0,1	250	25
Lait en poudre	0,08	3476	278,08
œufs	0,024	27	0,648
Farine	0,036	133	4,788
Sucre	0,012	200	2,4
Total			979,101

Tableau I-16: Emissions autres produits alimentaires

Les émissions annuelles engendrées par la consommation de viande et poisson est de 0,979101 tonnes d'équivalent Carbone qui est 6 fois plus petite que les émissions engendrées par la consommation de viande et poisson.

I.6.4.3. Conclusion cuisine :

Le graphe suivant illustre les résultats obtenus:

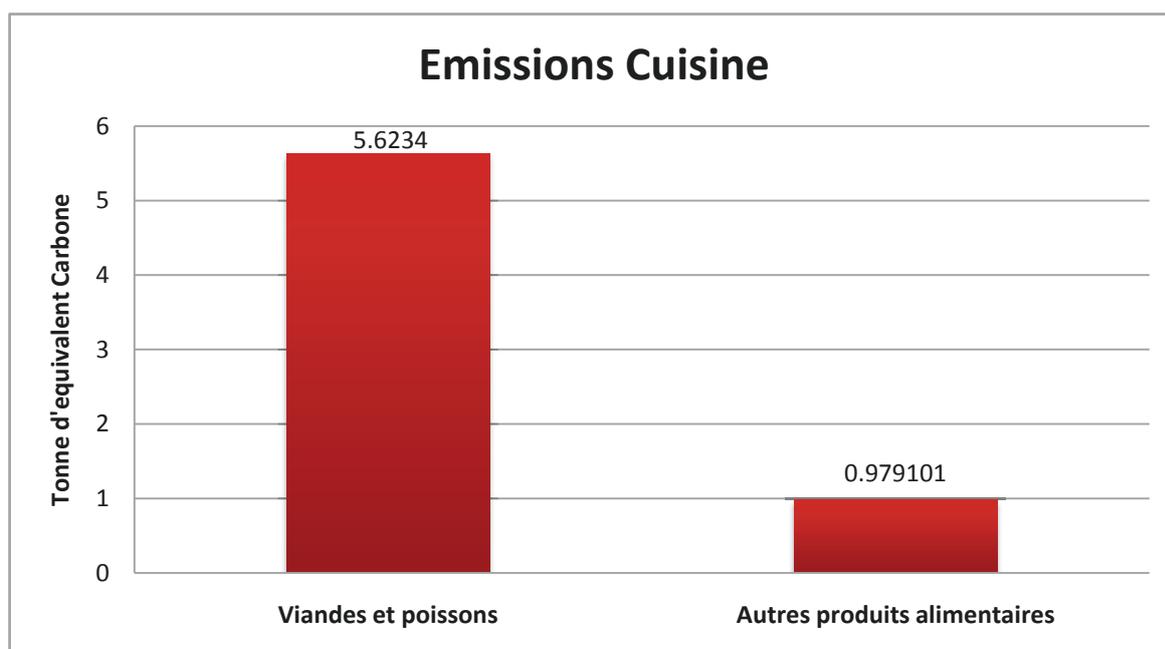


Figure I-6: Emissions cuisine

I.6.5.Déchets directs :

Ce poste recouvre le traitement de fin de vie des déchets "contenus dans la poubelle du bâtiment". Il découle pour l'essentiel de la mise à la poubelle du papier et du carton. On a supposé que l'ensemble du papier acheté par l'école finit dans les poubelles de l'école à plus ou moins long terme. De plus nous supposons qu'il y a 10 % de pertes sur les produits de la cuisine. La collecte des informations aboutie au tableau suivant:

Déchets	Masse en tonnes	Kg équivalent Carbone par tonne	Kg équivalent Carbone
Papier	3	61	183
Carton	0,4	42	16,8
Déchets alimentaires	0.4009	96	38,4864
Total			238,2864

Tableau I-16: Emissions déchets directs

Les émissions engendrées par le traitement des déchets sont de 0,2382864 tonne équivalent Carbone qui est relativement faible.

I.6.5.1.Conclusion déchets directs:

L'ensemble des résultats obtenus permet de construire le diagramme suivant :

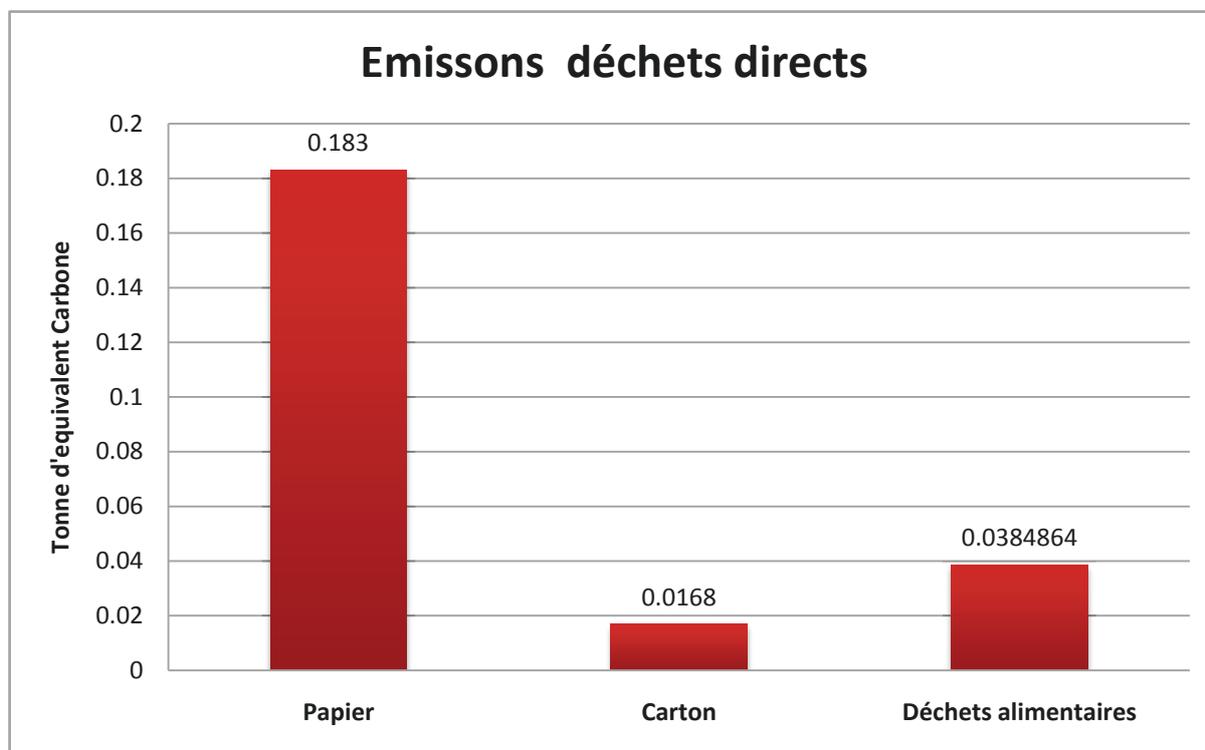


Figure I-7: Emissions déchets directs

I.6.6.Amortissements:

Construire des bâtiments engendre des émissions de gaz à effet de serre, qui sont réparties, conventionnellement, sur la durée d'amortissement comptable des immobilisations. Dans le cas de ce bâtiment la durée d'amortissement est de 5 ans pour l'enseignement et 10 ans pour le logement. Aucune construction n'est faite dans les dix années précédentes et pas conséquence l'immobilisation est totalement amortie sur le plan comptable et est donc comptée pour zéro dans les émissions. (C'est une approche conventionnelle).

I.6.6.1.Mobilier (amortissement matériel)

Ce poste concerne essentiellement les meubles. La durée d'amortissement est prise de 10 ans. Le nombre de chaque type de meuble est connu, par contre les poids ont été estimés comme suit:

Nature du mobilier	nombre	Masse d'un meuble (Kg)	Masse Totale (Kg)	Amortissement (années)	Kg équivalent Carbone par tonne	Kg équivalent Carbone/an
Banc	8	5	40	10	500	2
Plan de travail	280	15	4200	10	500	210
Armoires	20	25	500	10	500	25
Chaises	560	3	1680	10	500	84
Total						321

Tableau I-17: Emissions mobilier

Sur la base d'un amortissement sur 10 ans, il en résulte une contribution annuelle de 0,321 tonne équivalent Carbone/an qui est un résultat très faible.

I.6.6.2.Matériel informatique (amortissement parc informatique)

L'école dispose d'un parc informatique comprenant des ordinateurs individuels, des imprimantes, des télécopieurs et des photocopieurs. Le tableau suivant regroupe les informations ainsi que les émissions engendrées par ce parc:

Type d'équipement	Nombre d'équipements	Kg équivalent Carbone/équipement	Durée d'amortissement(an)	kg équivalent Carbone
PC avec écran plat	20	350	6	1166,6
Imprimantes	4	30	2	60
Photocopieurs	2	900	6	300
Télécopieurs	2	400	4	200
Total				1 726,6

Tableau I-18: Emissions matériel informatique

L'amortissement du matériel informatique engendre des émissions de 1,7266 tonnes équivalent Carbone / an.

I.6.6.3.Conclusion amortissements:

L'ensemble des résultats obtenus permet de construire le diagramme suivant :

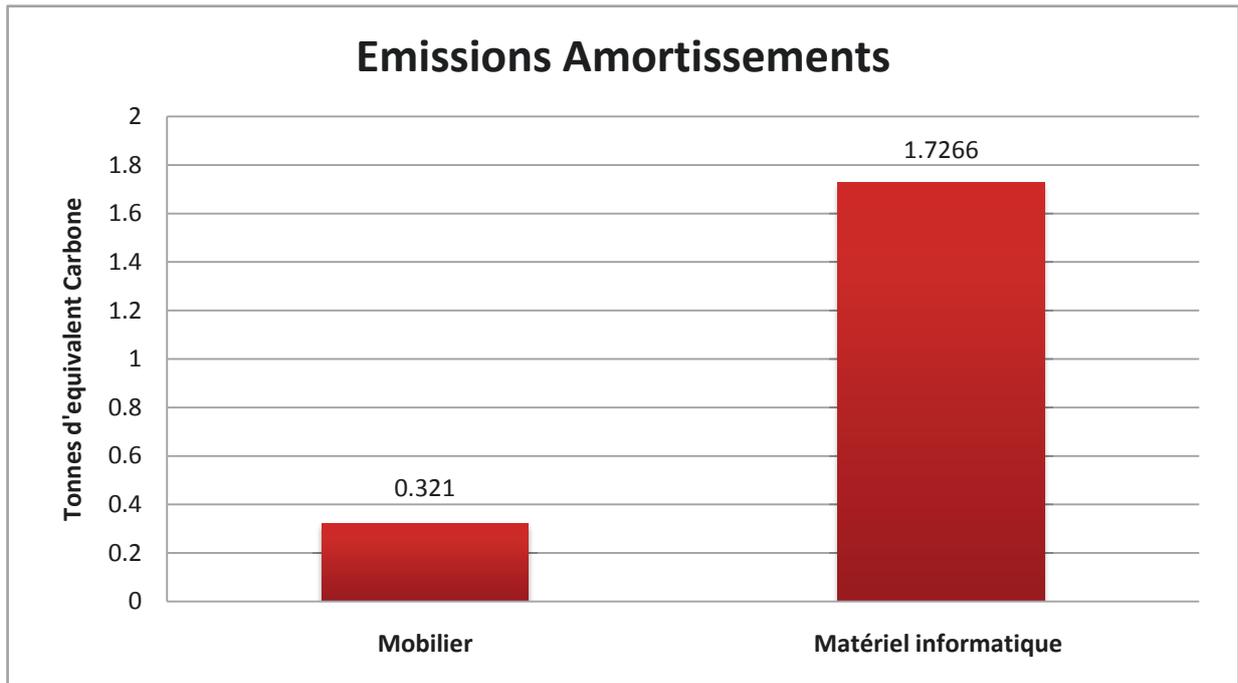


Figure I-8: Emissions amortissements

I.6.7.Synthèse des émissions globales:

Voici les émissions globales groupées dans un tableau :

Poste	Tonne d'équivalent Carbone/an
Energie interne	52.32615
Transports	26.196866
Matériaux entrants	1.7
Cuisine	6.602501
Déchets directs	0.2382864
Amortissements	2.0476
Total émissions globales	89.1114034

Tableau I-19: Emissions par poste

Les émissions globales représentent donc 89.1114034 tonnes d'équivalent Carbone/an.

Le graphe suivant illustre les émissions globales du bâtiment pour l'an 2012:

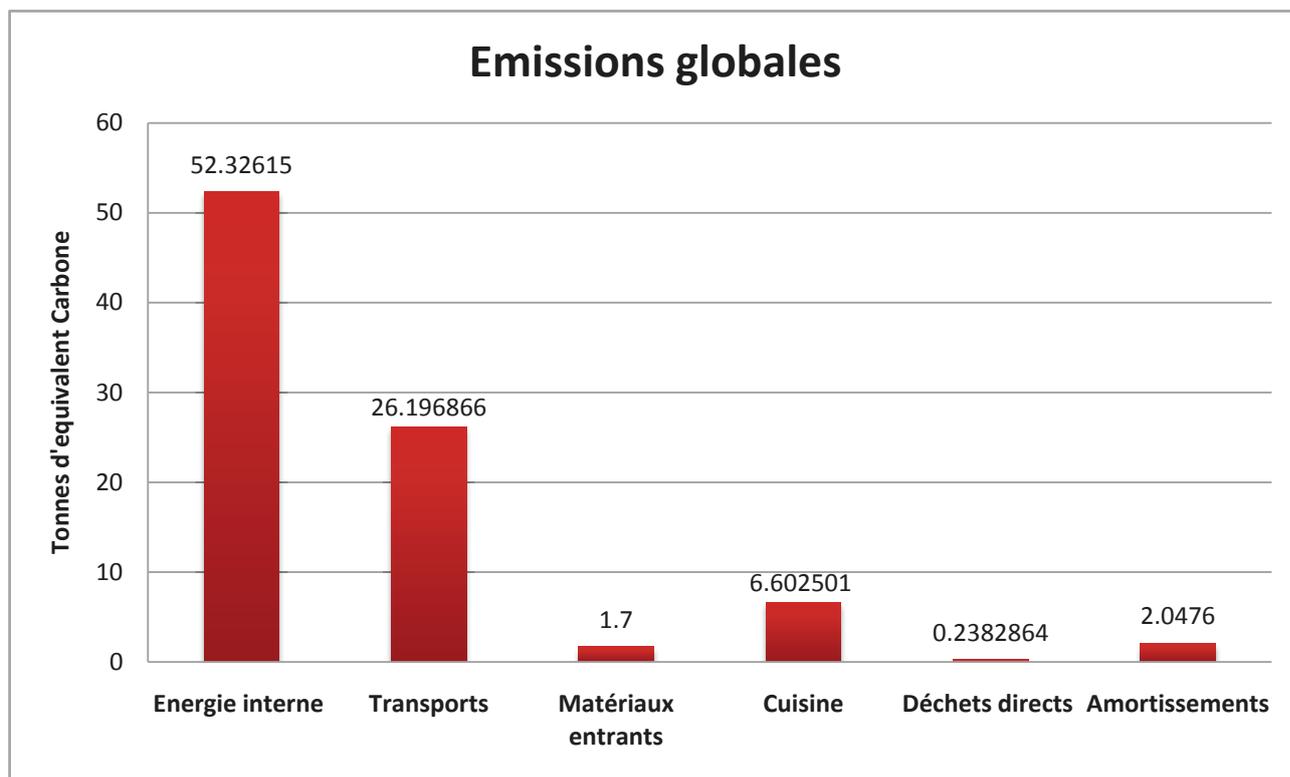


Figure I-9: Emissions globales

Il y a deux postes prépondérants, l'énergie interne du bâtiment et les transports.

I.6.7.1. Ratios obtenus:

- Emissions par personne : $(89111,4034 \text{ Kg équivalent Carbone /an}) / 500 \text{ personnes} = 178,2 \text{ Kg équivalent Carbone/an/élève.}$
- Emissions par personne : $(89111,4034 \text{ Kg équivalent Carbone /an}) / 569 \text{ personnes} = 156,6 \text{ Kg équivalent Carbone/an/personne.}$
- Emissions au m² : $(89111,4034 \text{ Kg équivalent Carbone /an}) / 4495 \text{ m}^2 = 19,82 \text{ Kg équivalent Carbone/an/m}^2.$
- Emissions sur surface chauffée: $(13\ 991,4 \text{ Kg équivalent Carbone /an}) / 3505 \text{ m}^2 = 4 \text{ Kg équivalent Carbone/an/m}^2.$

Pour avoir un ordre d'idée des émissions moyennes nationales annuelles voici les chiffres par habitant en France:

- 1,73 tonnes équivalent Carbone par français en 1990,
- 1,79 tonnes équivalent Carbone par français en 1998,
- 2,39 tonnes équivalent Carbone par français en 2010.[12]

On se rend donc compte que les émissions par élèves et les personnes sont très nettement inférieures aux émissions moyennes nationales. Il ne faut par contre pas oublier que les élèves, les employés et les professeurs ont une vie après l'école et qu'ils émettent donc des Gaz à Effet de Serre lors de voyage ou activités effectués en dehors de l'école.

I.7.Préconisations:

L'objectif majeur du Bilan Carbone est de mesurer les émissions de GES de l'école en vue de les maîtriser. Une fois les proportions d'émissions de chaque poste connues il est possible d'effectuer des recommandations afin de réduire les émissions.

Les postes d'émissions principaux sont :

- L'énergie interne
- Le transport des élèves

On va donc émettre des préconisations pour chacun de ces postes.

I.7.1.Energie interne:

Ce pôle peut être divisé en sous parties : L'électricité et le chauffage du bâtiment :

a. L'électricité du bâtiment:

- Eteindre les appareils électriques ainsi que l'éclairage en dehors des heures de travail.
- Vérifier que la veille des ordinateurs est bien configurée.
- Remplacer les ampoules à incandescence, les halogènes ou les anciens tubes fluorescents par des systèmes d'éclairage (LED) à basse consommation.
- Placer des détecteurs de présence dans les endroits peu utilisés comme les toilettes, en effet les salles de classe donnent en majorité sur la cours de récréation et sont donc éclairées naturellement donc ne nécessitent pas un éclairage permanent.
- Sensibiliser les élèves et travailleurs aux économies d'énergie.

b. Chauffage du bâtiment :

- Baisser la température dans les locaux (on s'accorde à penser que chaque degré de baisse fait gagner 7% de consommation),
- Investir dans la production d'énergies renouvelables comme les pompes à chaleur et les panneaux photovoltaïques.
- Isoler la toiture et les murs
- Isoler les tuyaux de chauffage
- Placer des vitrages super isolants (un vitrage double et même triple).

I.7.2. Transports :

- Réaliser une réunion de sensibilisation et de formation des parents et des élèves sur les gaz à effet de serre.
- Faire vérifier la pression des pneus des autobus et des voitures des professeurs de manière régulière (économie moyenne jusqu'à 10% des émissions du poste déplacement des travailleurs)
- Remplacer les voitures de société par des voitures peu émettrices.
- Installer des douches et des parkings à vélo pour inciter à l'utilisation de ce mode de transport
- Négocier avec les pouvoirs locaux la présence d'un arrêt de transport public à proximité de l'entreprise.

I.7.3. Autres postes:

- Placer des chasses d'eau et des douches économiques.
- Acheter du papier recyclé.
- Sensibiliser les élèves et personnel aux économies d'eau.
- Envisager des systèmes de récupération d'eau de pluie.
- Limiter l'utilisation de papier (recto verso, ...),
- Mise en place d'un tri sélectif.

II. Chapitre 2:

Isolation du bâtiment

II.1- Les déperditions thermiques:

II.1.1. La double problématique

Les climats à la surface de la Terre sont bouleversés sous l'effet d'une accumulation excessive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les gisements d'énergies fossiles se raréfient et les coûts des énergies augmentent. Le bâtiment est au sein de cette double problématique énergétique et environnementale. On peut dès maintenant mettre en œuvre des solutions pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. Une condition incontournable de réussite réside dans la conception et la rénovation du bâtiment et dans la qualité de son enveloppe pour réduire le besoin de chauffage.

II.1.2. Les zones de perte de chaleur:

Les déperditions thermiques ont lieu à travers plusieurs éléments du bâtiment, on cite:

- Les combles et la toiture
- Les parois verticales : le mur manteau
- Les menuiseries extérieures (fenêtres)
- Les ponts thermiques
- Le sol
- Le renouvellement de l'air.

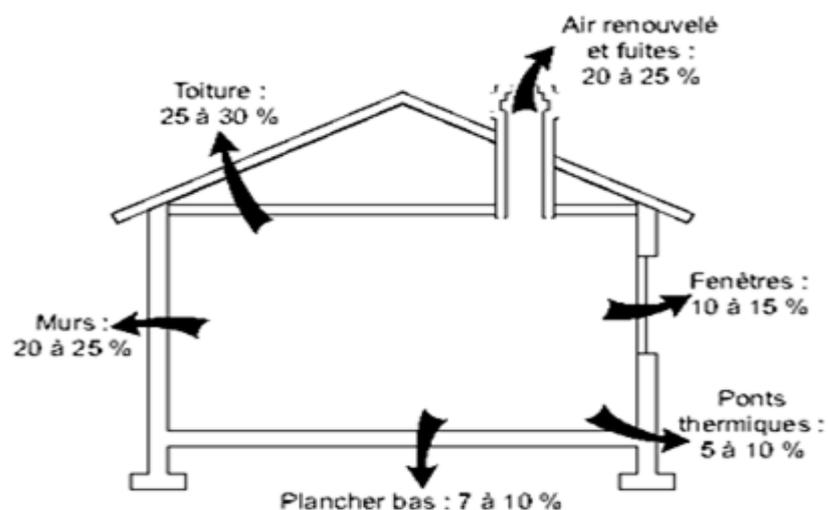


Figure II-1: Les zones de déperdition

II.1.2.1- Les combles et la toiture

Les combles et la toiture constituent la 1ère zone de perte de chaleur d'environ de 30% de la perte totale et doivent être isolés en priorité, l'air chaud monte et si la toiture ou les combles sont mal isolés, les pertes énergétiques sont importantes.

II.1.2.2.Les parois verticales : le mur manteau

Les murs constituent d'environ 25% des pertes de chaleur et doivent être bien isolés. Ils constituent la deuxième source de perte de chaleur dans un bâtiment. Les murs exposés vers le Nord sont prioritaires car peu ensoleillés. Le mur manteau consiste à envelopper la structure verticale d'un bâtiment par un isolant placé en continu à l'extérieur. De cette façon, les ponts thermiques sont supprimés au droit des planchers d'étage, néanmoins la gestion des ponts thermiques au niveau des sols et des raccords de toitures reste des points sensibles.

II.1.2.3.Les menuiseries extérieures

Une fenêtre peu ou mal isolée peu contribué à une perte de 15 % de la chaleur. Isoler les fenêtres est une priorité économique et écologique. La qualité de la structure de la menuiserie est très importante, une fenêtre bas de gamme finit par mal fermer et mal isoler. Le choix du matériau est moins déterminant sur des menuiseries de qualité, le PVC, le bois ou l'aluminium sont très utilisés.

II.1.2.4. Les ponts thermiques

Il s'agit d'une discontinuité dans l'isolation qui est due à la structure du bâtiment et qui peut représenter jusqu'à 5 à 7% des déperditions. Les ponts thermiques sont des points faibles dans l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. A ces endroits, en hiver, la température superficielle de l'enveloppe est plus basse que celle des surfaces environnantes.

Les ponts thermiques découlent, en général de contraintes constructives et géométriques, ils vont provoquer des dépenses énergétiques, un inconfort sur le plan de l'hygiène et une détérioration progressive des matériaux.

II.1.2.5.Le sol

Environ 7 à 10% des pertes de chaleur peuvent s'effectuer par le sol. Un revêtement (plancher, moquette) est déjà un isolant, mais il ne suffit pas. Il est nécessaire d'isoler en fonction du type de sol. La meilleure solution est de créer un vide sanitaire de 20 à 50 cm de hauteur entre votre sol et la terre ventilé sous les sols. C'est une bonne solution pour isoler parfaitement et éviter les éventuels problèmes d'humidité (écoulements d'eau, etc.).

II.1.2.6.Le renouvellement de l'air

Le renouvellement de l'air doit être suffisant du point de vue de l'hygiène, mais il doit être le plus réduit possible pour éviter les déperditions énergétiques dues à l'air chaud. Pour ce on privilégiera les ventilations à double flux d'air qui sont munies d'un échangeur thermique air/air. Dans ce projet, la toiture et les fenêtres seront traitées dans ce chapitre et le renouvellement de l'air dans un autre chapitre.

II.1.3.Les trois modes de propagation de chaleur:

Les échanges thermiques à travers une paroi se font selon 3 modes de propagation :

La conduction, la convection et le rayonnement.

II.1.3.1.la conduction :

La chaleur se propage instantanément de la source chaude vers la source froide à l'intérieur du corps. Ce transfert s'effectue sans déplacement de matière.



Figure II-2: Propagation par conduction

II.1.3.2.La convection:

C'est le transfert de chaleur entre la surface d'un solide et un fluide liquide ou gazeux. Ce transfert s'accompagne d'un déplacement de matière.

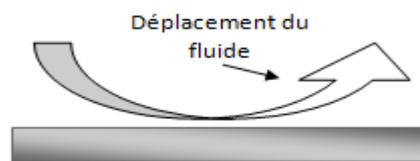


Figure II-3: propagation par convection

II.1.3.3.Le rayonnement:

C'est un échange de chaleur attribué à l'émission, par la matière, du fait de sa température, des ondes électromagnétiques. L'échange se fait entre deux corps se trouvant à des températures différentes.

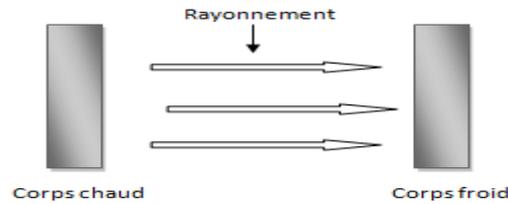


Figure II-4: propagation par rayonnement

II.1.4. La conductivité thermique et le coefficient globale d'échange superficiel:

II.1.4.1. La conductivité thermique:

C'est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction, notée " λ ". Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant.

II.1.4.2. Le coefficient global d'échange superficiel (h):

Le coefficient global d'échange superficiel est la somme du coefficient de transfert convectif (h_c) avec le coefficient de transfert radiatif (h_r) thermique. Il s'exprime en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) dans le système international d'unités ($h = h_c + h_r$).

II.1.5 Le coefficient de transmission thermique (U):

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est la quantité de chaleur traversant cette paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

Le coefficient de transmission thermique est l'inverse de la résistance thermique totale (R_t) de la paroi ($U = 1 / R_t$). Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée.

II.2. Isolation des fenêtres:

Le bâtiment est déjà construit en 1960 avec des fenêtres anciennes de simple vitrage en bois. L'épaisseur du vitre est de 6 mm. La répartition des fenêtres avec les surfaces des vitres sont représentées dans le tableau suivant:

Etage	Nombres des fenêtres	Surface totale du vitre (m ²)
SS2	7	25,6
SS1	25	81,26
RDC	47	100,21
1 étage	61	68,75
2 ^{ème} étage	47	100,21
Total surface		376,03

Tableau II-1: répartition des fenêtres dans le bâtiment

II. 2.1.Eléments à prendre en considération:

Les éléments qui interviennent dans le degré de performance d'isolation des fenêtres sont:

- le vitrage
- le châssis
- les joints entre les différents éléments.

Le degré d'isolation d'une fenêtre est déterminé par le type de châssis et par le vitrage. Etant donné que le vitrage a une plus grande surface que le châssis, il influence davantage le pouvoir isolant de la fenêtre. Si le châssis est encore en bon état, il peut être efficace et économique de ne remplacer que le vitrage. Les joints d'étanchéité à l'air et à l'eau influencent également la qualité d'isolation globale de la fenêtre et la sensation de confort.

II.2.2.Le coefficient de transmission thermique a travers le vitre d'une fenêtre du bâtiment (U_g):

L'écart de températures entre l'extérieur et l'intérieur est pris de 8 degrés kelvin dans les calculs suivants. L'analogie électrique de la vitre d'une fenêtre (schéma électrique équivalent) se représente de la manière suivante:

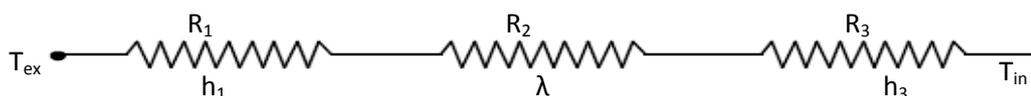


Figure II-5: Schéma électrique équivalent d'un simple vitre

Avec: T_{ex} : Température à l'extérieur du bâtiment.

T_{in} : Température à l'intérieur du bâtiment.

λ : La conductivité thermique.

h_1 : Le coefficient global d'échange superficiel sur la face extérieure.

h_3 : Le coefficient global d'échange superficiel sur la face intérieure.

$R_2 = e/\lambda$ (e = épaisseur du vitre)

$$R_1 = 1/h_1$$

$$R_3 = 1/h_3$$

La résistance totale équivalente (R_T) par unité d'aire est de :

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 1/h_1 + e/\lambda + 1/h_3 \end{aligned}$$

L'ensemble de ces transferts thermiques est défini de façon conventionnelle pour une vitesse de vent, des émissivités et des températures normalement rencontrées dans le domaine du bâtiment. Ces valeurs normalisées sont :

$$h_1 = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$h_3 = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

La conductivité thermique du verre simple est de: $\lambda = 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Le coefficient de transmission thermique (U_g) pour 1 m^2 est de :

$$\begin{aligned} U_g &= 1/R_T \\ &= 1/(1/h_1 + e/\lambda + 1/h_3) \\ &= (h_1 \cdot \lambda \cdot h_3) / (h_1 + \lambda + h_3) \\ &= (23 \cdot 1 \cdot 8) / (23 + 1 + 8) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \\ &= 5,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

II.2.3. Perte de chaleur à travers les vitres du bâtiment:

La perte de chaleur (Q) à travers les vitres est de :

$$Q = U_g \times A \times |(T_{\text{ex}} - T_{\text{in}})| \quad (\text{avec } A = \text{Surface du vitre})$$

Le tableau suivant illustre les pertes de chaleur à travers les vitres de chaque étage :

Etage	Nombres des fenêtres	Surface totale de la vitre (m^2)	Coefficient U_g ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	$ (T_{\text{ex}} - T_{\text{in}}) $ (K)	Perte de chaleur (W)
SS2	7	25,6	5,75	8	1 177,6
SS1	25	81,26	5,75	8	3 737,96
RDC	47	100,21	5,75	8	4 609,66
1 étage	61	68,75	5,75	8	3 162,5
2 ^{ème} étage	47	100,21	5,75	8	4 609,66
Total perte					17 296,38

Tableau II-2: Les pertes de chaleur à travers les vitres simples

La perte totale d'énergie à travers les vitres du bâtiment est de 17, 29638 KW (\approx 4,918 tonnes de réfrigération).

II.2.4.Amélioration du coefficient U_g des vitrages:

Le simple vitrage doit être remplacé par un double vitrage. Pour améliorer le coefficient U_g , il faut diminuer les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement. Comme il n'y a pas de possibilité d'agir sur les coefficients d'échange superficiel, l'amélioration va porter sur la diminution des échanges entre les deux composants du double vitrage. Les transferts par conduction et convection peuvent être diminués en remplaçant l'air se trouvant entre les deux verres par un gaz plus lourd présentant une conductivité thermique plus faible (argon en général).

II.2.4.1 Remplacement du vitrage:

Voici les valeurs «moyennes de U pour les châssis les plus courants [33]:

Type de châssis	Valeur U moyenne (W/m ² . K)
Bois	1,8
Polyuréthane (PUR)	2,9
PVC	
à plusieurs chambres sans renfort métallique	1,5
à plusieurs chambres avec renfort métallique	1,7
à une chambre sans renfort métallique	2,8
à une chambre avec renfort métallique	3,0
Aluminium	
sans coupure thermique	6,0
avec liaisons métalliques ponctuelles	4,8
avec coupure thermique continue	de 3,5 à 4,2

Tableau II-3: Valeurs moyennes de U pour les châssis

Dans le bâtiment étudié, les fenêtres possèdent un simple vitrage d'épaisseur 6 mm et des châssis en bois. D'après le tableau précédent, on constate que le bois possède une valeur moyenne U de 1,8 W/m² .K, qui est une valeur bonne pour l'isolation des fenêtres. Le châssis sera conservé car il possède a un bon pouvoir isolant à condition d'être réparé.

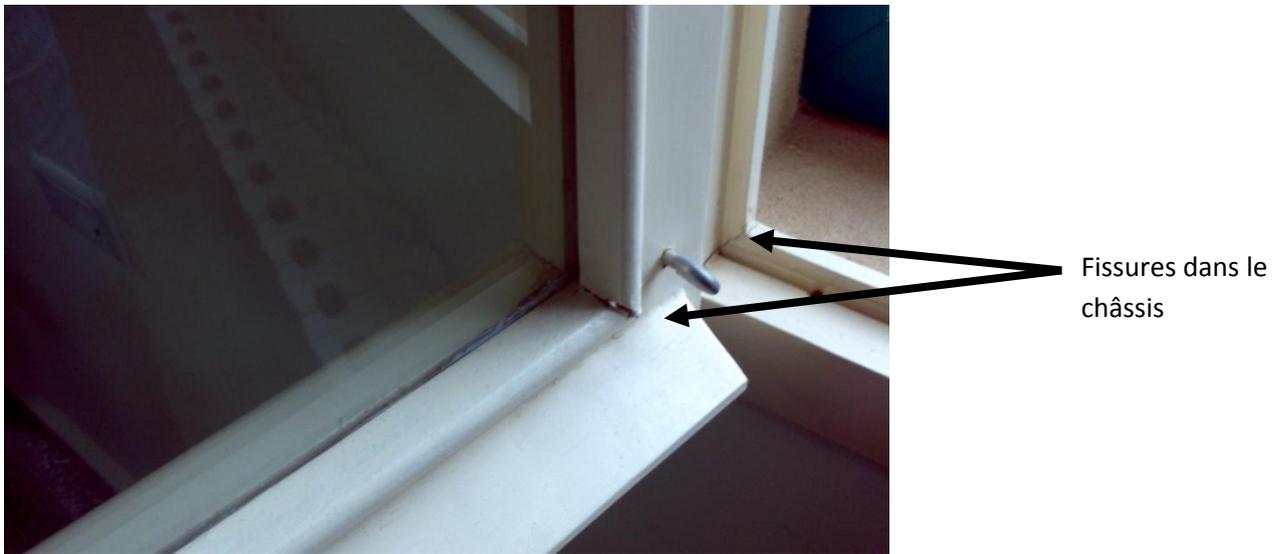


Figure II-6: Une fenêtre type du bâtiment

Principe du double vitrage "à basse émissivité":

Ce vitrage est aussi appelé "vitrage à haut rendement" ou "vitrage super isolant". En France, on l'appelle "Vitrage à Isolation Renforcée" (VIR). Quand de la chaleur ou de l'énergie solaire est absorbée par un vitrage, elle est réémise par le vitrage, soit par convection d'air le long de sa surface, soit par radiation de la surface du vitrage vers les autres surfaces plus froides. Par conséquent, la réduction de la chaleur émise par les fenêtres sous forme de radiation peut améliorer fortement ses propriétés isolantes. La capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative est appelée son émissivité.

Ce coefficient d'émissivité varie en fonction de la longueur d'onde du signal émis. Les fenêtres, ainsi que les matériaux que l'on trouve à l'intérieur d'un bâtiment, émettent typiquement des radiations sous forme d'infrarouges de très grande longueur d'onde. A savoir enfin que pour une longueur d'onde donnée, le coefficient d'absorption d'un matériau est égal au coefficient d'émissivité. Les vitrages standards ont une émissivité de 0,84 sur l'entièreté du spectre. Cela signifie qu'ils émettent 84 % de l'énergie possible pour un objet à cette température. Cela signifie également qu'en ce qui concerne les rayonnements à grande longueur d'onde qui frappent la surface du verre, 84 % est absorbé et seulement 16 % est réfléchi. Par comparaison, les couches basse-émissivité ont un coefficient d'émissivité de 0.04. Les vitrages sur lesquels on a déposé de telles couches émettront seulement 4 % de l'énergie possible à cette température, donc absorberont seulement 4 % du rayonnement de grande longueur d'onde qui les atteint. Autrement dit, ils réfléchiront 96 % du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde.[22]

La couche "basse émissivité":

C'est, en général, une couche métallique, en argent par exemple, déposée sous vide et qui doit être placée à l'intérieur du double vitrage vu sa fragilité. Elle bloquera une partie du transfert de chaleur par rayonnement, diminuant ainsi le flux total de chaleur au travers de la fenêtre.

Le facteur solaire (FS) du vitrage:

Le rayonnement solaire qui atteint une surface vitrée est réfléchi, transmis et absorbé dans des proportions variables suivant la nature du vitrage. Le facteur solaire représente la proportion du flux énergétique transmise par le vitrage. Sa valeur est un coefficient compris entre 0 et 1 (Il s'exprime également en pourcentage du rayonnement reçu) et est déterminé par la somme du rayonnement transmis, et celle du rayonnement absorbé puis retransmis vers l'intérieur par le vitrage. Par contre, le facteur solaire (FS) du vitrage est influencé par la position de la couche "basse émissivité".

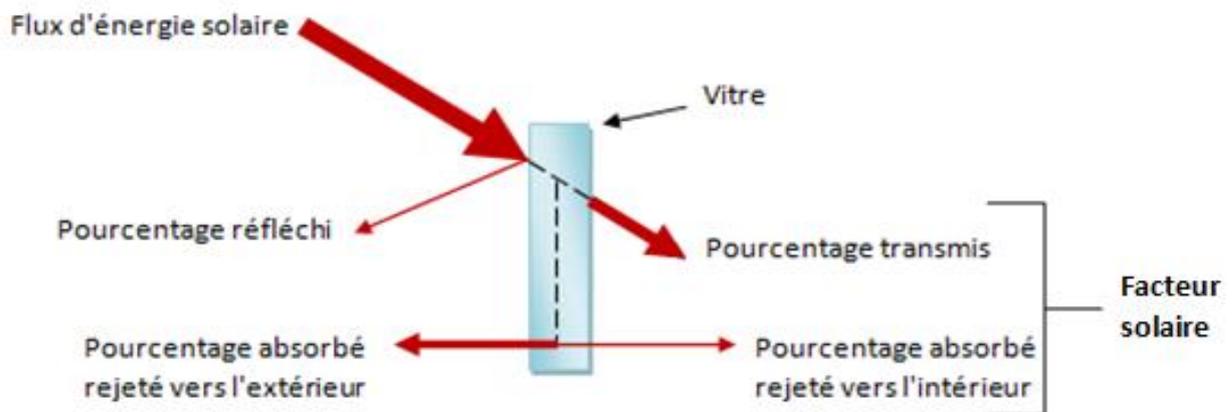


Figure II-7: Trajets d'un rayon solaire a travers un vitre

Importance de la position de la couche basse émissivité:

La position de la couche basse émissivité dans un double vitrage n'affecte en rien le facteur U de celui-ci. Donc, en ce qui concerne les pertes de chaleur par transmission, il n'y a absolument aucune différence que la couche basse émissivité soit placée sur le verre intérieur du double vitrage ou sur le verre extérieur.

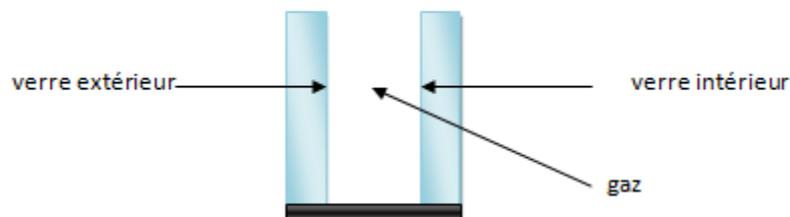


Figure II-8: Schéma d'un double vitrage

En effet, en plus de sa capacité à inhiber les transferts d'infrarouges à grande longueur d'onde, une couche basse émissivité absorbe aussi une certaine quantité de l'énergie solaire incidente. Cette énergie absorbée est transformée en chaleur, provoquant ainsi un échauffement du vitrage.

Si l'on cherche à laisser passer la chaleur solaire (cas du chauffage du bâtiment), la couche "basse émissivité" sera placée sur le verre intérieur du double vitrage (voir figure suivante). La chaleur absorbée par la vitre sera réémise vers l'intérieur.

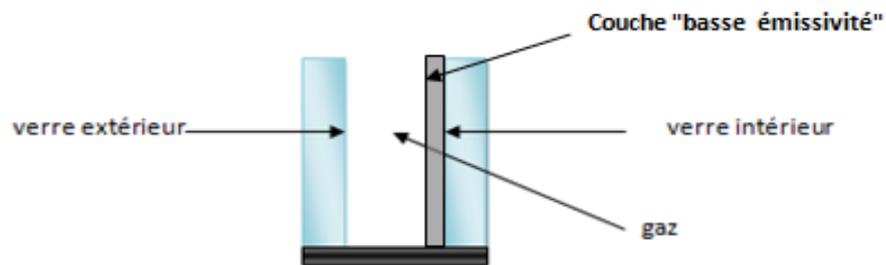


Figure II-9: Schéma d'un double vitrage avec couche "basse émissivité" cas chauffage

Si l'on cherche au contraire à diminuer la chaleur solaire entrante (Cas de l'été), la couche basse émissivité sera placée sur le verre extérieur du double vitrage, la chaleur absorbée par le vitrage étant alors essentiellement réémise vers l'extérieur (Voir figure suivante). Dans ce cas, on peut adjoindre une couche réfléchissante à la couche basse émissivité pour diminuer encore le facteur solaire (FS).

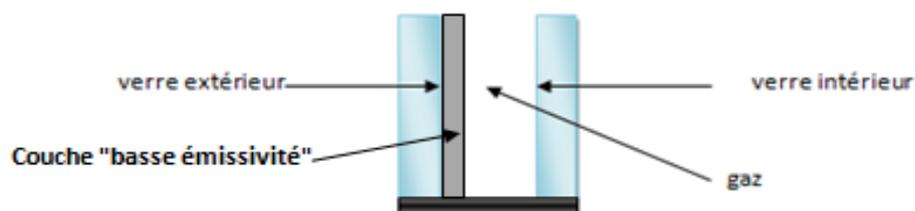


Figure II-10: Schéma d'un double vitrage avec couche "basse émissivité" cas refroidissement

Choix des vitres:

Le remplacement des vitres simples du bâtiment sera fait par des doubles vitres à haut rendement à argon (4mm/16mm/4mm). La couche "basse émissivité" sera placée sur la vitre intérieure (cas du chauffage) car ce bâtiment est le plus peuplé en hivers qu'en été (En été les élèves partent en vacance).

II.2.4.2. Le coefficient de transmission thermique a travers le vitre d'une fenetre du bâtiment:

L'écart de températures entre l'extérieur et l'intérieur est pris de 8 degrés kelvin dans les calculs suivants. La couche "basse émissivité" est formée en générale de l'argent ou d'un oxyde métallique transparent. La conductivité thermique de l'argent est de $\lambda = 429 \text{ W/(m. K)}$ et l'épaisseur de la couche "basse émissivité" est moins de 0,5 mm.

Le rapport de l'épaisseur sur la conductivité thermique de la couche "basse émissivité" sera très faible et cette couche n'entre pas dans le schéma électrique équivalent, ni dans les calculs du coefficient de transmission thermique. L'argon est un gaz plus lourd que l'air et présente une conductivité thermique plus faible. L'épaisseur de la lame d'argon est de 16 mm par conséquent la convection à travers cette lame d'argon de faible épaisseur est considérée négligeable. Seule la conduction sera prise en considération dans les calculs suivants.

L'analogie électrique d'un double vitrage à argon (schéma électrique équivalent) se représente de la manière suivante:

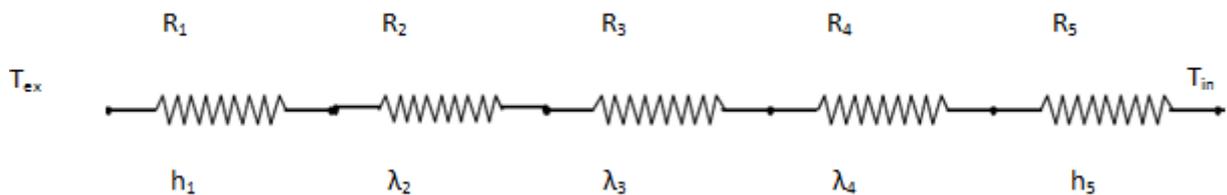


Figure II-11: Schéma électrique équivalent d'un double vitrage à argon

Avec: T_{ex} : Température à l'extérieur du bâtiment.

T_{in} : Température à l'intérieur du bâtiment.

λ_2 : La conductivité thermique de la première vitre.

λ_3 : La conductivité thermique de l'argon.

λ_4 : La conductivité thermique de la seconde vitre.

h_1 : Le coefficient global d'échange superficiel sur la face extérieure.

h_5 : Le coefficient global d'échange superficiel sur la face intérieure.

$$R_1 = 1/h_1$$

$$R_2 = e_2/\lambda_2 \text{ (} e_2 = \text{épaisseur du premier vitre)}$$

$$R_3 = e_3/\lambda_3 \text{ (} e_3 = \text{épaisseur de la lame d'argon)}$$

$$R_4 = e_4/\lambda_4 \text{ (} e_4 = \text{épaisseur du second vitre)}$$

$$R_5 = 1/h_5$$

Les valeurs normalisées des coefficients et des épaisseurs sont:

$$h_1 = 23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$h_5 = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

$$\lambda_2 = 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\lambda_3 = 0,01772 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\lambda_4 = 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$e_2 = 0,004 \text{ m}$$

$$e_3 = 0,016 \text{ m}$$

$$e_4 = 0,004 \text{ m}$$

La résistance totale équivalente (R_T) par unité d'aire est de :

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \\ &= 1/h_1 + e_2/\lambda_2 + e_3/\lambda_3 + e_4/\lambda_4 + 1/h_5 \\ &= (1/23 + 0,004/1 + 0,016/0,01772 + 0,004/1 + 1/8) \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \\ &= 1.0794 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W} \end{aligned}$$

Le coefficient de transmission thermique (U_g) pour 1 m^2 est de :

$$\begin{aligned} U_g &= 1/R_T \\ &= (1/1.0794) \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \\ &= 0,9264 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Le calcul théorique du coefficient de transmission thermique du double vitrage a donné une valeur de $0,9264 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$. On a pris en considération dans les calculs faites que le remplissage de l'argon entre les deux vitres est parfait (100% argon) ce qui n'est pas la réalité. En effet le pourcentage de l'argon dans la lame de gaz séparatrice est approximativement de 85 % du volume total de la lame. Le coefficient de transmission thermique s'élève à cause de cette impureté et atteint une valeur de $1,2 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ qui sera prise comme valeur moyenne dans les calculs qui se suivent.

II.2.4.3. Perte de chaleur à travers les vitres à haut rendement choisis pour le bâtiment:

La surface des vitres reste la même lors du remplacement par le double vitrage. Le tableau suivant illustre la perte de chaleur à travers le vitrage à haut rendement choisi:

Etage	Nombres des fenêtres	Surface totale du vitre (m ²)	Coefficient U _g (W m ⁻² k ⁻¹)	(T _{ex} – T _{in}) (K)	Perte de chaleur (W)
SS2	7	25,6	1,2	8	245,76
SS1	25	81,26	1,2	8	780,096
RDC	47	100,21	1,2	8	962,016
1 étage	61	68,75	1,2	8	660
2 étage	47	100,21	1,2	8	962,016
Total perte					3 609,0888

Tableau II-4: Perte de chaleur à travers le vitrage à haut rendement

La perte totale d'énergie à travers les vitrages à haut rendement du bâtiment est de 3,609888 KW (≈ 1,011 tonnes de réfrigération).

II.2.5.Pourcentage d'amélioration :

La perte de la chaleur à travers les vitres simples du bâtiment est de 17, 29638 KW. Cette perte sera de 3,609888 KW lors du remplacement des vitres simple par les vitres à haut rendement.

Le pourcentage d'amélioration est de:

$$[(17, 29638 \text{ KW} - 3,609888 \text{ KW})/17, 29638 \text{ KW}] \times 100\% = 79,13\%$$

Le bâtiment est seulement chauffé durant 5 mois de l'année. L'amélioration en puissance thermique sera: 17, 29638 KW - 3,609888 KW = 13,686492 KW.

L'énergie conservée pour un fonctionnement de 5 mois du système de chauffage a fioul domestique lors du remplacement des vitres est de: 13,686492 KW x 24 x 30 x 5 = 49 271,3712 KWh.

Or 1 KWh de fioul domestique libère 0,271 Kg de CO₂ (0,074 Kg d'équivalent Carbone).

Le tableau suivant illustre l'amélioration des émissions en équivalent Carbone grâce au changement des vitres:

Combustible	économie en KWh	Kg équivalent Carbone / KWh	Kg équivalent Carbone
Fioul domestique	49 271,3712	0,074	3 646,081

Tableau II-5: Amélioration d'émissions en équivalent Carbone grâce au changement des vitres

On constate que le remplacement des vitres en autres plus performants a contribué à un abaissement d'émissions de 3,646081 tonnes d'équivalent Carbone (Seulement du chauffage).

Le graphe suivant illustre les émissions par genre de vitres utilisées pour le chauffage du bâtiment:

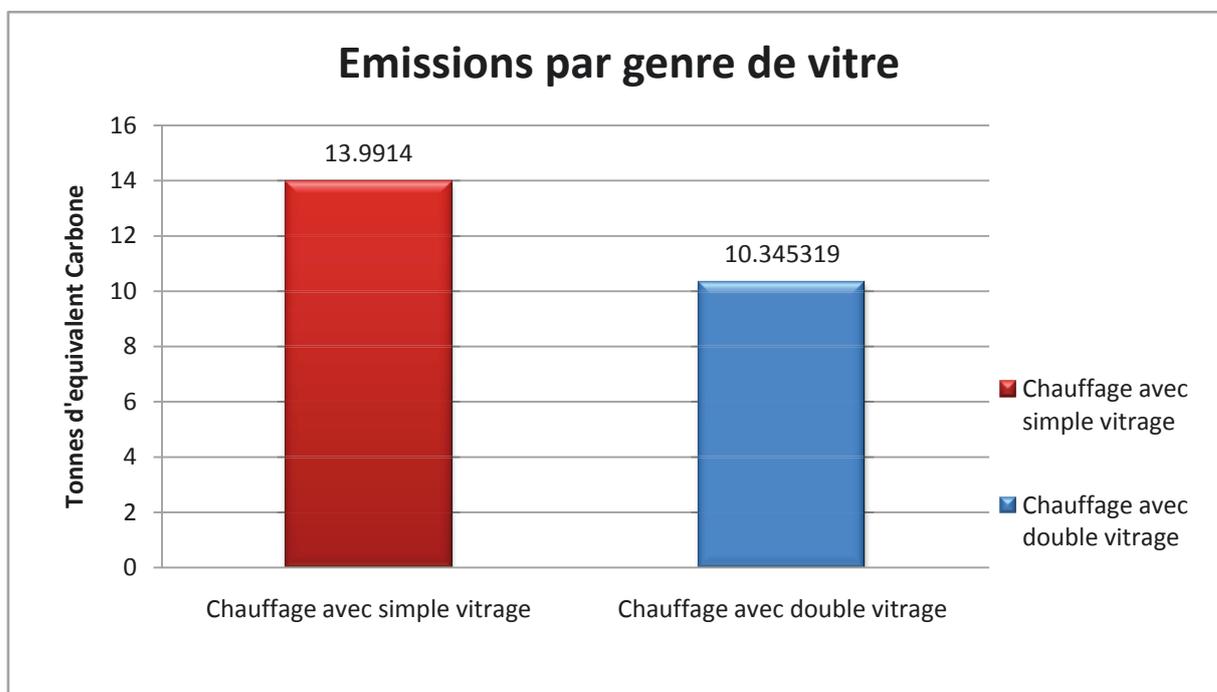


Figure II-12: les émissions par genre de vitres utilisés pour le chauffage

Le pourcentage d'amélioration en émissions d'équivalent Carbone est de:

$$[(13,9914 - 10,345319) / 13,9914] \times 100\% = 26,06 \%$$

II.3-Isolation du toit:

Que ce soit en rénovation ou en construction neuve, l'isolation du toit doit être une priorité dans la mesure où la chaleur monte et que le tiers des déperditions d'une maison non isolée se font par cet endroit.

En construction neuve, la RT 2005 actuellement en vigueur préconise une résistance thermique minimale de $R = 3,68 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ et de $R = 4,83 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$ minimum pour obtenir une performance apportant des économies d'énergies conséquentes. Pour une maison passive, il faudra envisager une isolation extrêmement performante permettant d'atteindre un $R = 10 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$.

II.3.1.Epaisseur de l'isolant:

Le matériel isolant utilisé est le polystyrène extrudé vu de sa disponibilité à l'échelle nationale, son coût faible et sa grande résistance thermique. La conductivité thermique de cet isolant est de $0,03 \text{ W}/\text{m}.\text{K}$. Le toit est formé des tuiles en terre cuite d'épaisseur $1,6 \text{ cm}$ et conductivité thermique $0,7 \text{ W}/\text{m}.\text{K}$. Le coefficient global d'échange superficiel sur la face intérieure étant de $8 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ et le coefficient global d'échange superficiel sur la face extérieure de $23 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$.

On choisira une résistance thermique R de 6 m². K/W pour le total du toit. L'épaisseur de l'isolant nécessaire pour aboutir à telle résistance thermique est de:

$$\begin{aligned} \text{Epaisseur isolant} &= (\text{Résistance thermique choisie} - \text{résistance existante}) \times \text{conductivité thermique de} \\ &\quad \text{l'isolant} \\ &= [6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} - (0,016\text{m} \times 1/0,7 \text{ W/m} \cdot \text{K}) - (1/8\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) - (1/23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})] \times 0,03 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\ &\approx 0.176 \text{ m} \end{aligned}$$

Une couche isolante d'épaisseur 17,6 cm sera suffisante pour avoir une résistance thermique performante de 5,8086 m². K/W. On veillera à coller des bandes d'étanchéité ou à injecter de la mousse isolante entre les joints des panneaux ou éléments de charpente.

II.3.2.Pourcentage d'amélioration:

L'aire du toit à isoler est de 995 m². La résistance supplémentaire obtenue lors du dépôt de 17,6 cm de polystyrène est de 5,8086 m². K/W. La quantité de chaleur économisée est de:

$$Q = 1/R_{\text{sans}} \times A \times (|T_{\text{in}} - T_{\text{ex}}|) - 1/R_{\text{avec}} \times A \times (|T_{\text{in}} - T_{\text{ex}}|)$$

$$Q = [1/0,191 \times 995 \times 8] - [1/6 \times 995 \times 8]$$

$$Q = 40\,348,7 \text{ W}$$

$$Q \approx 40,3487 \text{ KW}$$

Avec : A : L'aire totale du toit isolé

R_{sans} : Résistance thermique sans l'isolant

R_{avec} : Résistance thermique avec l'isolant.

T_{in} : Température à l'intérieur du bâtiment

T_{ex} : Température à l'extérieur du bâtiment.

Pour un chauffage de 5 mois par an, l'énergie économisée grâce à l'isolation du toit est de:

$$40,3487\text{KW} \times 24 \times 30 \times 5 = 145255,32\text{KWh/an.}$$

Or 1 KWh de fioul domestique libère 0,271 Kg de CO₂ (0,074 Kg d'équivalent Carbone).

Le tableau suivant illustre l'amélioration des émissions en équivalent Carbone grâce à l'isolation du toit:

Combustible	économie en KWh	Kg équivalent Carbone / KWh	Kg équivalent Carbone
Fioul domestique	145255,32	0,074	10748,89368

Tableau II-6: Amélioration des émissions en équivalent Carbone grâce à l'isolation du toit

On constate que l'isolation du toit a contribué à un abaissement d'émissions de 10,74889368 tonnes d'équivalent Carbone (Seulement du chauffage).

Pour un système de climatisation global fonctionnant toute l'année, l'abaissement des émissions peuvent atteindre 20 tonnes d'équivalent Carbone grâce à l'isolation du toit ce qui est une valeur bonne.

III. Chapitre 3

Eclairage efficace

III.1.Importance d'un éclairage efficace:

L'éclairage est responsable d'environ 25 % de la consommation totale d'énergie électrique dans un bâtiment. Les lampes et tubes d'éclairage contiennent souvent des terres rares (groupe de métaux aux propriétés voisines comme le scandium) et des métaux lourds (comme le mercure) particulièrement toxiques et écotoxiques. Le mercure par exemple est volatil et pouvant être sublimé si les lampes sont cassées lors de la collecte ou du recyclage. L'éclairage public contribue aussi indirectement à l'effet de serre, générant environ 110 g de CO₂ par kWh consommé.

L'éclairage participe donc aux émissions de CO₂, gaz à effet de serre, et contribue au changement climatique d'où la nécessité du bien maîtriser.

III.2.Grandeurs Photométriques:

Les grandeurs photométriques sont utilisées pour évaluer certaines caractéristiques physiques de la lumière déterminantes pour la sensation visuelle. Sur le terrain, les principales grandeurs mesurées par les ergonomes et qui nous intéressent dans ce chapitre sont : le flux lumineux, l'éclairement, la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs.

III.2.1.Flux lumineux:

Il caractérise la puissance lumineuse de la source rapportée à la sensibilité de l'œil, de façon à ne considérer qu'une puissance susceptible de provoquer la sensation visuelle. L'unité de mesure est le lumen (lm).

III.2.2.L'éclairement:

Il caractérise la puissance lumineuse qui atteint une surface donnée. L'unité de mesure est le lux (lx).
 $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$. La mesure de l'éclairement permet de déterminer si la quantité de lumière qui parvient à l'objet est suffisante pour que celui-ci soit perçu.

III.2.3.Température de couleur (T_c):

La température de couleur (T_c) d'une source de lumière est la température à laquelle il faut porter un élément incandescent de référence (corps noir) pour qu'il émette une lumière de même teinte dominante que celle de la source considérée. Son unité de mesure est le Kelvin (K).

Elle permet de caractériser la teinte dominante d'une source lumineuse. Lorsqu'on observe une source de lumière comme une lampe à incandescence ou un tube fluorescent, même si celle-ci apparaît blanche, elle présente une dominante plutôt jaune orangé pour une lampe à incandescence et blanc bleuté pour certains tubes fluorescents.

Les appellations de sources chaudes ou froides correspondent à des températures de couleur bien définies :

- $T_c < 3\,300\text{ K}$ —> teintes chaudes
- $3\,300\text{ K} \leq T_c \leq 5\,000\text{ K}$ —> teintes intermédiaires
- $T_c > 5\,000\text{ K}$ —> teintes froides [14]

III.2.4.Indice de rendu des couleurs (IRC):

Même lorsque deux sources ont la même température de couleur, elles peuvent, en éclairant les mêmes objets, ne pas restituer les couleurs de la même façon. L'indice de rendu des couleurs (IRC) permet de caractériser la capacité d'une lumière à restituer fidèlement la couleur des objets qu'elle éclaire. L'IRC est un chiffre compris entre 1 et 100 qui traduit le degré de concordance entre l'aspect coloré d'un objet éclairé par une source donnée et l'aspect coloré de ce même objet éclairé par une source de référence de même température de couleur.

L'indication de l'IRC d'une source doit toujours être accompagnée de la température de couleur. L'IRC 100, correspond à une lumière blanche ayant le même spectre que celui de la lumière solaire.

III.3.Etude de l'éclairage dans le bâtiment :

La plupart des lampes utilisées dans notre bâtiment (92%) sont des tubes fluorescents, marque Philips et de genre MASTER TL-D Reflex 18/840 1SL. Les spécifications de ce genre de lampes sont indiquées ci-dessous:

- Ampoule : T8 (Diamètre =26 mm)
- Indice de rendu des couleurs = 85
- Température de couleur = 4000 K
- Désignation de la couleur : Blanc frais.
- Flux lumineux à 25 ° C = 3350 Lm
- Puissance de la lampe = 36 W
- Teneur en mercure (Hg)= 5,0 mg
- la longueur d'insertion = 1204.1 mm (min), 1206.5 mm (max)
- Diamètre = 28 mm (max) [2]

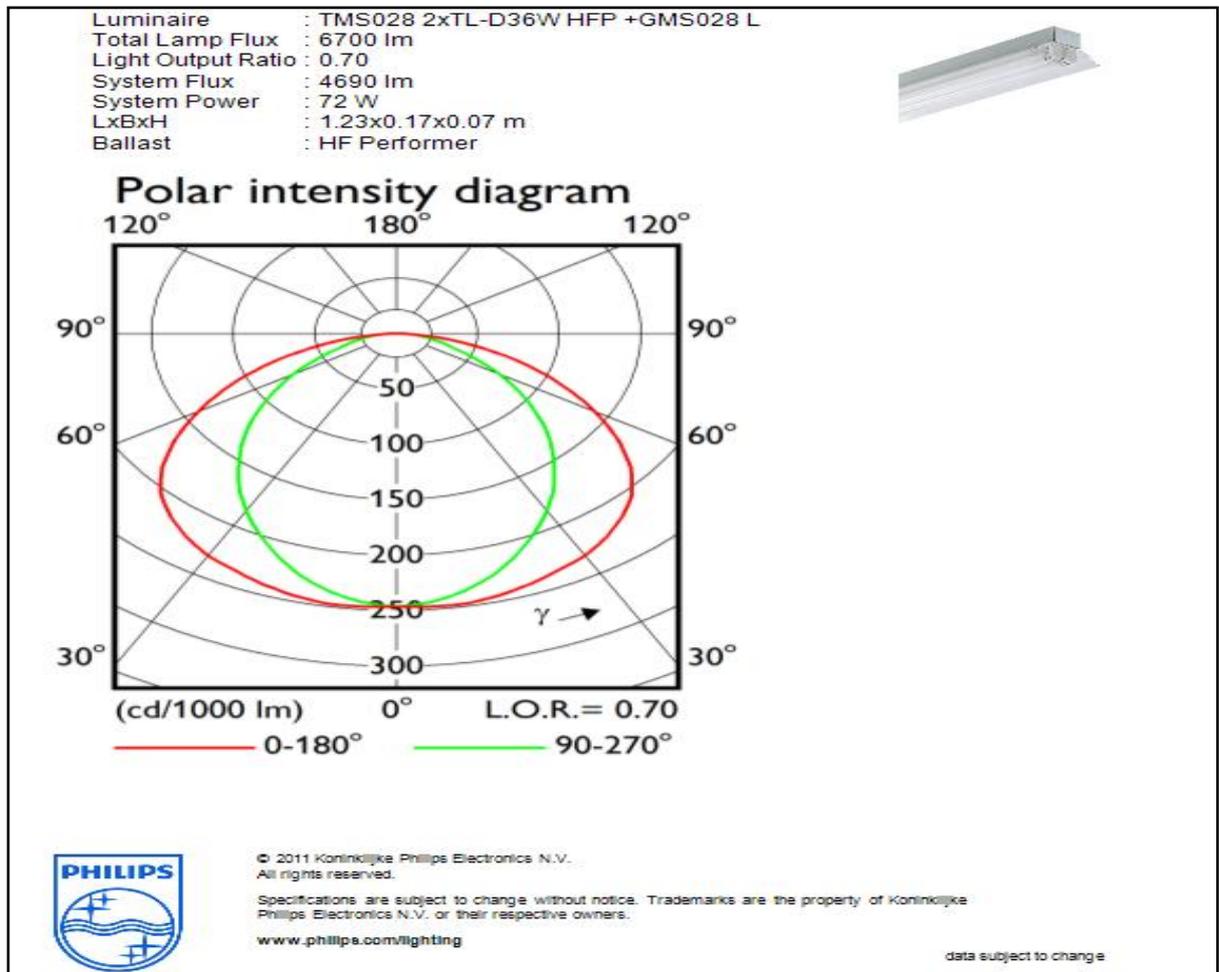


Figure III-1: Spécifications des luminaires TMS028 Philips

Les luminaires utilisés sont aussi de marque Philips et de genre TMS028 et qui peuvent contenir 2 tubes fluorescents T8 de longueur 1200 mm. Leurs spécifications sont mentionnées au-dessus.

III.3.1. Distribution des tubes fluorescents dans le bâtiment:

Le tableau suivant illustre le nombre de tubes fluorescent par étage du bâtiment avec leurs durées de fonctionnement annuelles:

Etage	Nombres de tubes fluorescents	Durée de fonctionnement journalière (heures)	Durée de fonctionnement annuelle (heure)
SS2	38	7	1162
SS1	126	9	3285
RDC	128	7	1162
Etage 1	130	10	3650
Etage 2	128	7	1162
Total	550		

Tableau III-1: Disposition et durées de fonctionnement des tubes fluorescent par étage

Donc ce bâtiment contient 550 tubes fluorescents accrochés à 275 luminaires.

III.3.2. Risques des lampes fluorescentes pour la santé:

Le contenu en mercure des lampes fluorescentes peut varier de 3mg à 46 mg. Dans le cas de ce bâtiment, les tubes fluorescents utilisés contiennent 5 mg de mercure. Le mercure est un métal toxique qui représente un danger important pour les femmes enceintes, les nouveau-nés et les enfants en général.

Une demi-cuillère à thé de mercure peut contaminer un lac ou un flux, rendant les poissons non comestibles. Le mercure est une neurotoxine puissante qui peut affecter le cerveau, reins, foie et causer des problèmes de développement. Études ont lié l'exposition au mercure à des niveaux dangereux de mercure dans le sang des femmes nubiles, troubles neurologiques et même métal retard chez les enfants et un risque accru de crise cardiaque.

Si une lampe fluorescente se brise, il est recommandé de bloquer la respiration, d'ouvrir une fenêtre et d'aérer la pièce 10 ou 15 minutes avant de ramasser les débris pour éviter de respirer des vapeurs de mercure.

De plus, la poudre de béryllium a été utilisée comme couche interne des tubes fluorescents. C'est un produit très toxique qui peut induire une maladie dite béryllose chez les ouvriers qui l'ont manipulé. Dans le bâtiment étudié, il existe 550 tubes fluorescents qui contiennent chacun une masse de 5 mg de mercure, d'où le total en masse de mercure de ce bâtiment est de 2,750 kg qui est une valeur à ne pas négliger. Il faut donc réfléchir à remplacer ces tubes avec autres moins polluants.

III.3.3.Consommations électriques des tubes fluorescents:

La consommation annuelle d'énergie électrique des tubes fluorescents est calculée en utilisant le tableau ci-dessous:

Etage	Nombres de tubes fluorescents	Durée de fonctionnement annuelle (heure)	Puissance électrique d'un tube (W)	Energie électrique annuelle consommée (KWh)
SS2	38	1162	36	1 589,616
SS1	126	3285	36	14 900,760
RDC	128	1162	36	5 354,496
Etage 1	130	3650	36	17 082,000
Etage 2	128	1162	36	5 354,496
Total				44 281,368

Tableau III-2: La consommation annuelle d'énergie électrique des tubes fluorescents

La consommation annuelle d'énergie électrique des tubes fluorescents est de 44 281,368 KWh. Sachant que la consommation annuelle en électricité de réseau du Liban du bâtiment est de 130 812 KWh et en prenant en considération que 70% de l'énergie électrique consommée par les tubes fluorescents provient du réseau du Liban, on trouve que l'énergie consommée par les tubes fluorescents forme 23,7% de la consommation totale en électricité du bâtiment.

III.3.4. Etude de l'éclairage d'une classe complémentaire type avec les tubes fluorescents présents:

III.3.4.1. Les grandeurs recommandées par la norme européenne EN 12464-1

- Indice de rendu des couleurs (IRC):

La norme européenne EN 12464-1 précise l'indice de rendu des couleurs que doivent avoir les lampes en fonction du type de local et de la tâche visuelle exécutée. L'indice de rendu des couleurs dans les bureaux est fixé par la norme à une valeur de **80** sauf dans les salles d'art dans les écoles des Beaux-arts où la valeur de **90** est recommandée. [13]

- Température de couleur

Le choix de l'apparence colorée est une affaire de psychologie, d'esthétique et de ce qui est considéré comme naturel. Le choix dépendra du niveau d'éclairage (ou l'inverse), des couleurs du local et du mobilier, du climat environnant et de l'application. En climat chaud, une apparence de couleur de lumière plus froide est généralement préférée et vice versa. A ce niveau, la norme EN 12464-1 laisse le libre choix de la température de couleur. [13]

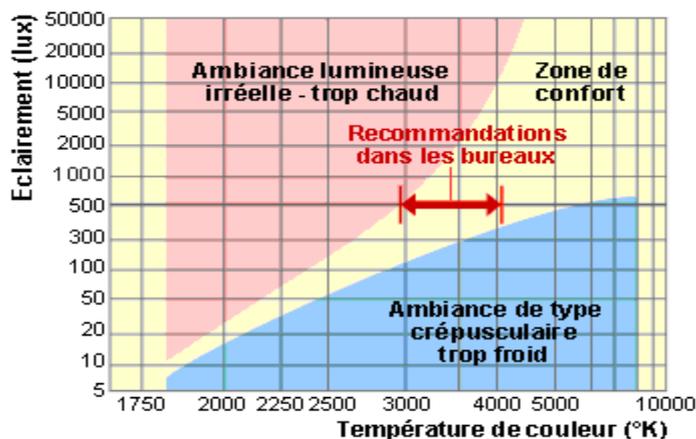


Figure III-2: Graphe de l'éclairage en fonction de la température des couleurs

Type de local	Température de couleur (K)	
Classes	entre 2 000 et 5 000 K	blanc chaud à blanc neutre
Salles de réunion	entre 2 000 et 3 500 K	blanc chaud
Ateliers	entre 3 500 et 5 000 K	blanc neutre
Ateliers graphiques	de préférence > à 5 000 K	lumière du jour froide

Tableau III-3: Les températures de couleurs en fonction du type de local

- Le niveau d'éclairage recommandé:

L'éclairage moyen recommandé sur le plan de travail d'une école d'après la norme européenne EN 12464-1 est illustré dans le tableau suivant:

Éclairage moyen recommandé sur le plan de travail (en lux) suivant la EN 12464-1 (La hauteur du plan utile est variable suivant la tâche à réaliser).		
Type d'intérieur, tâche ou activité	Em (lux)	Plan de référence
Salle de classe en primaire et secondaire	300	Banc
Salle de classe pour les cours du soir	500	Banc
Salle de conférence	500	Table de conférence
Salle de dessin industriel	750	Table à dessin
Salle de travaux pratiques et laboratoire	500	Table de laboratoire
Salle de travaux manuels	500	Table de travail
Atelier d'enseignement	500	Établi, axe machine
Salle de pratique informatique	500	Table de travail
Atelier et salle de préparation	500	Table de travail
Zones de circulation et couloirs	100	Sol
Escaliers	150	Escalier
Salles des professeurs	300	Table de travail
Bibliothèque : rayonnages	200	Rayonnage
Bibliothèque : salle de lecture	500	Table de travail
Hall de sport, gymnases et piscines	300	Voir EN 12193
Cantine scolaire	200	Table

Tableau III-4: Éclairage moyen recommandé sur le plan de travail

Lorsque la classe est occupée par des personnes plus âgées (cours pour adultes), un éclairage plus important sera nécessaire. Lorsque des moyens de projection sont utilisés, l'éclairage de la pièce doit être diminué. Dans ce cas, des niveaux d'éclairage de 2 à 20 lux sont tout à fait acceptables. Cela nécessite d'utiliser des occultations sur les fenêtres. Des stores avec un facteur de transmission lumineuse inférieur à 15 % conviennent pour créer une pénombre suffisante. En cas d'obscurité totale, il suffit de maintenir une lampe allumée pour obtenir un résultat satisfaisant.

III.3.4.2. Calcul de l'éclairage dans une classe complémentaire type:

Dans cette partie on prendra une classe de l'étage RDC de dimensions 7m x 5m x 4m , éclairée par 8 tubes fluorescents genre MASTER TL-D Reflex 18/840 1SL et répartis dans 4 luminaires de type Philips TMS028.

La température de couleur des tubes fluorescent TL-D Reflex est de 4000 K ce qui est confort avec la norme européenne EN 12464-1 qui recommande une température entre 2000K et 5000K dans les

classes. Le rendement des couleurs (IRC) des tubes fluorescents TL-D Reflex est de 85 qui est une valeur acceptable d'après la norme européenne EN 12464-1 qui la fixe à 80.

Pour le niveau d'éclairage de la classe, le programme DIALux est utilisé, et voici les résultats obtenues:

Saisie des données
Entrez ici toutes les valeurs nécessaires concernant la pièce et sélectionnez vos luminaires ainsi que le type de montage.

Géométrie de la pièce
 Longueur (a) : 7.000 m
 Largeur (b) : 5.000 m
 Hauteur : 4.000 m
 Utiliser pièce en L
 c : 2.743 m
 d : 1.829 m

Degrés de réflexion
 Plafond : 86 % 9010(blanc pur)
 Murs : 86 % 9010(blanc pur)
 Sol : 68 % Marbre

Paramètres de la pièce
 Valeurs de référence : Exemple d'application
 Facteur de maintenance : 0.80

Plan utile
 Hauteur : 0.760 m
 Marge : 0.000 m

Sélection des luminaires
 Luminaire : Philips TMS028 2xTL-D36W HFP +GMS028
 Vous pouvez sélectionner l'équipement : Philips
 Emission de lumière 1
 Lampes : TL-D36W/840
 Vous pouvez modifier le courant photoélectrique du luminaire :
 Courant : 6700 lm
 Puissance⁺ : 72 W

Montage luminaires
 Type montage : Pose
 Modifier la hauteur de montage à l'aide d'un des paramètres suivants :
 Longueur de suspension : 0.000 m
 Hauteur du point d'éclairage : 3.170 m
 Hauteur de montage : 4.000 m
 Dimensions (L x l x H) : 1.232 x 0.165 x 0.070 m

Figure III-3: Les données introduites dans le programme DIALux (tube fluorescent)

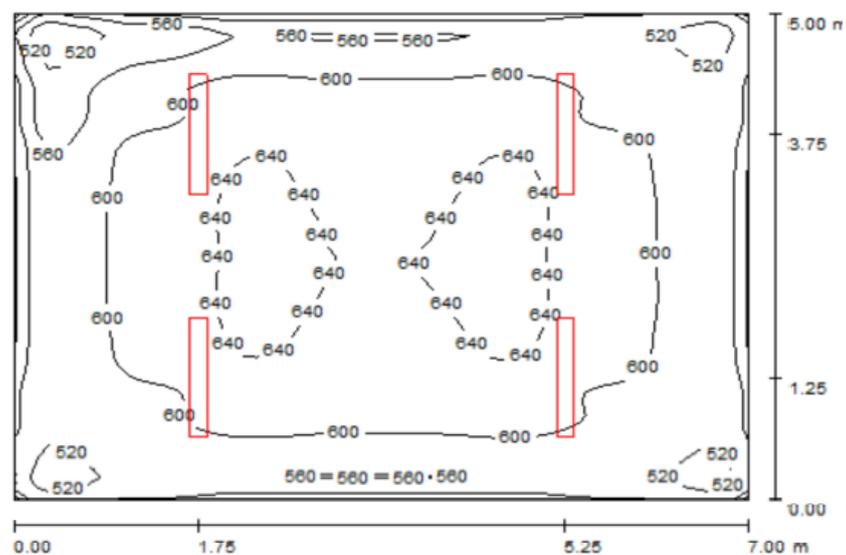


Figure III-4: Les niveaux d'éclairage (lux) dans la classe type

On constate que le niveau d'éclairage de la classe varie entre deux valeurs extrêmes 520 lux et 640 lux. La norme européenne EN 12464-1 recommande un niveau moyen de 300 lux dans les classes complémentaires, alors le niveau d'éclairage de cette classe est plus que suffisant et peut être réduit jusqu'à 300 lux pour économiser au maximal en terme énergétique.

III.3.5.La rénovation partielle - Remplacement des tubes fluorescents:

On cherche à diminuer la puissance installée, tout en garantissant un éclairage suffisant. Le choix se portera sur le système d'éclairage et sur le matériel ayant la meilleure efficacité énergétique.

Les luminaires ne seront pas remplacés à cause de leur coût énorme, donc on cherchera à remplacer les tubes fluorescents T8 en autres plus performants et qui peuvent être insérés dans les anciens luminaires. Une technologie très nouvelle apparaît: c'est la technologie des LED.

III.3.5.1. la technologie des LED - Les tubes à LED:

Une diode électroluminescente ou diode émettrice de lumière (LED) est un composant optoélectronique capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Une diode électroluminescente ne laisse passer le courant électrique que dans un seul sens (le sens passant, comme une diode classique, l'inverse étant le sens bloquant) et produit un rayonnement monochromatique ou polychromatique incohérent à partir de la conversion d'énergie électrique lorsqu'un courant la traverse.

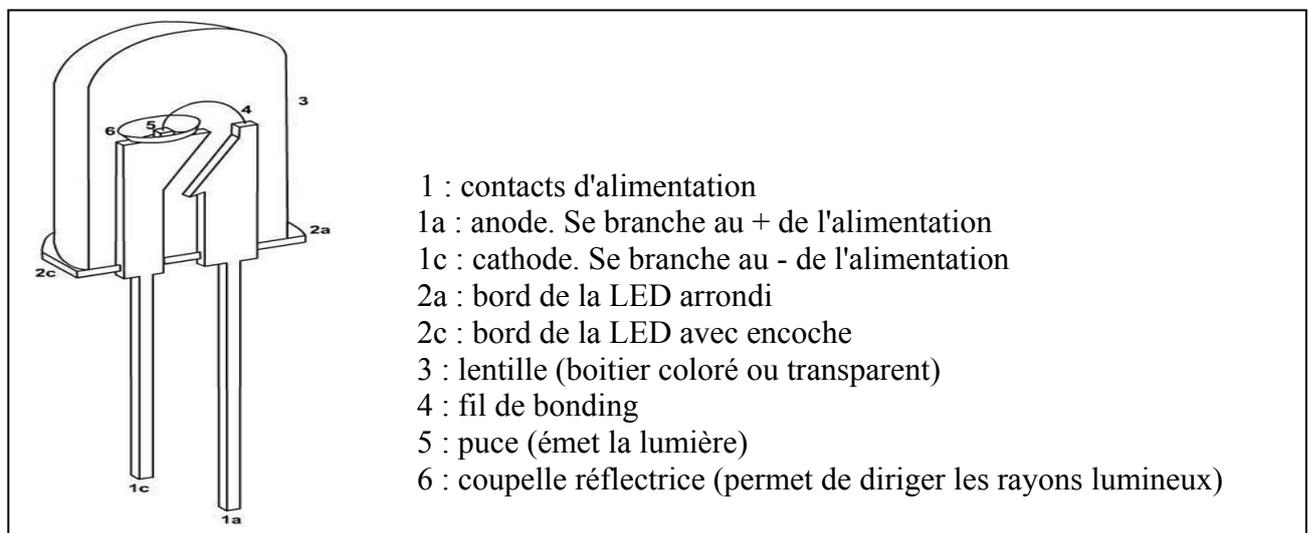


Figure III-5: Schéma d'une diode électroluminescente

Les tubes à LED font partie des dernières innovations en termes d'éclairage économique et écologique. Ils se composent d'une coque arrière en aluminium permettant la dissipation thermique des composants électroniques et d'un couvercle en polycarbonate. La lumière d'éclairage est émise par des LED permettant à ces tubes LED de se substituer en lieu et place des traditionnels néons fluorescents en présentant plusieurs avantages écologiques et économiques.



Figure III-6: Schéma d'un tube à LED

III.3.5.2.Comparaison entre les tubes fluorescents et les tubes à LED:

Le tableau suivant fait apparaître clairement la comparaison entre les tubes Fluorescents et les tube à LED en plusieurs secteurs:

Comparatif	Tube à LED	Tube fluorescent
Consommation électrique	faible	élevée
Dégagement de chaleur	faible	élevé
Recyclage	facile	spécialisé
Emission de CO ₂	faible	élevée
Radiation	aucune	infrarouge et ultraviolet
Toxicité	aucune	mercure, plomb, phosphore
Interférence électromagnétique	aucune	oui, nuisible aux équipements
Clignotement	aucun	fréquent
Bourdonnement sonore	aucun	fréquent
Maintenance	rare	fréquente
Equipement complémentaire	aucun	starter, ballast
Durée de vie	plus que 50000 heures	moins que 18000 heures
Solidité	très résistants	fragile
Allumage	instantané à efficacité max	allumage progressif

Tableau III-5: Tableau comparatif entre tube à LED et tube fluorescent

D'après le tableau comparatif on peut conclure que le remplacement des tubes fluorescents en tubes à LED présentera plusieurs avantages sur plusieurs niveaux, on cite:

- Avantage écologique: fabrication non polluante, émission de CO₂ réduite grâce à une consommation énergétique faible, recyclage simple.

- Avantage économique : une facture énergétique réduite d'un minimum de 55%, une durée de vie élevée, peu de maintenance
- Avantage technique : émettent uniquement une lumière d'éclairage stable, très résistants et insensibles aux chocs et vibrations, chauffent peu.

III.3.5.3.Choix des tubes à LED :

Puisqu'on ne cherche pas à changer les luminaires de marques Philips mais seulement de remplacer les tube fluorescents, c'est préférable de les remplacer par des tubes à LED aussi de marque Philips. On trouve le modèle "MASTER LED tube GA 1200mm 22W 840 G13" dans le catalogues des lampes de la marque Philips qui est l'équivalent du tube fluorescent déjà utiliser dans le bâtiment, le "MASTER TL-D Reflex 18/840 1SL". Les spécifications de ce tube à LED sont écrites si dessous:

- Ampoule : T8 (Diamètre =26 mm)
- Indice de rendu des couleurs = 85
- Température de couleur = 4000 K
- Désignation de la couleur : Blanc frais.
- Flux lumineux à 25 ° C = 1900 Lm
- Puissance de la lampe = 22 W
- Teneur en mercure (Hg)= 0 mg
- la longueur d'insertion = 1200 mm
- Angles d'éclairage : Très Large (200°) [2]

On constate que lors du remplacement des tubes fluorescents en tube à LED, la température des couleurs (4000 K) et le rendu des couleurs (85) restent invariable et acceptables suivants la norme européenne EN 12464-1. Mais le flux lumineux a diminué jusqu'a 1900 lm (3350 lm pour les tubes fluorescents), donc il faut vérifier que le niveau d'éclairage dans la classe type reste acceptable après le remplacement des tubes (Eclairage moyen de 300 lux).

D'après le programme DIALux, les résultats du niveau d'éclairage dans la classe type, lors du remplacement des tubes fluorescents par les tubes à LED sont les suivants:

Saisie des données
Entrez ici toutes les valeurs nécessaires concernant la pièce et sélectionnez vos luminaires ainsi que le type de montage.

Géométrie de la pièce
 Longueur (a) : 7.000 m
 Largeur (b) : 5.000 m
 Hauteur : 4.000 m
 Utiliser pièce en L
 c : 2.743 m
 d : 1.829 m

Degrés de réflexion
 Plafond : 86 % 9010(Blanc pur)
 Murs : 86 % 9010(Blanc pur)
 Sol : 68 % Marbre

Paramètres de la pièce
 Valeurs de référence : Exemple d'application
 Facteur de maintenance : 0.80

Plan utile
 Hauteur : 0.760 m
 Marge : 0.000 m

Sélection des luminaires
 Luminaire : Philips TMS028 2xTL-D36W HFP +GMS028
 Vous pouvez sélectionner l'équipement : Philips
 Emission de lumière 1
 Lampes : Défini par l'utilisateur
 Vous pouvez modifier le courant photoélectrique du luminaire :
 Courant : 3800 lm
 Puissance : 44 W

Montage luminaires
 Type montage : Pose
 Modifier la hauteur de montage à l'aide d'un des paramètres suivants :
 Longueur de suspension : 0.000 m
 Hauteur du point d'éclairage : 3.170 m
 Hauteur de montage : 4.000 m
 Dimensions (L x l x H) : 1.232 x 0.165 x 0.070 m

Figure III-7: Les données introduites dans le programme DIALux (tube à LED)

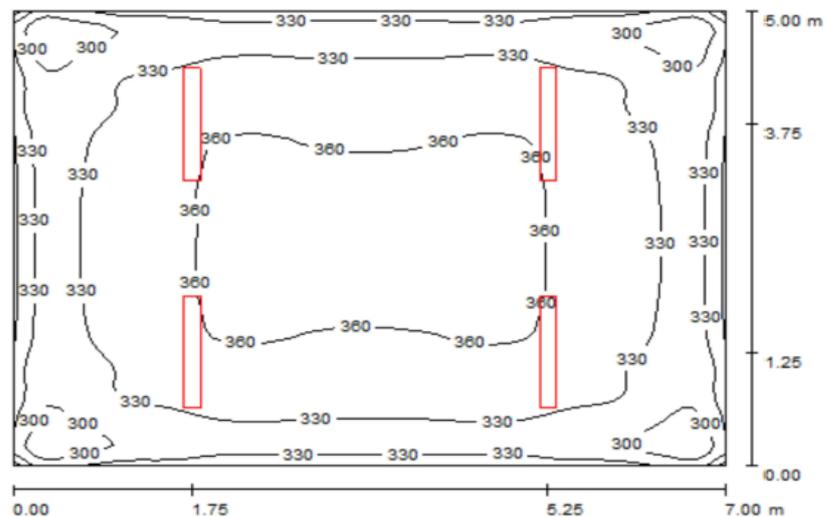


Figure III-8: Répartition de l'éclairage (lux) dans la classe type avec des tube à LED

D'après les résultats obtenus, on constate que le niveau d'éclairage varie entre 300 lux et 360 lux, avec un niveau d'éclairage de 340 lux sur le plan de travail, ce qui est conforme à la norme européenne EN 12464-1.

III.3.5.4.Installation des tubes à LED:

Remplacer un tube fluorescent par un tube à LED nécessite une simple intervention sur les dispositifs existants :

- **Cas d'un luminaire avec starter et ballast ferromagnétique:**

Dans ce cas , le starter doit être enlevé et le ballast ferromagnétique court-circuité.

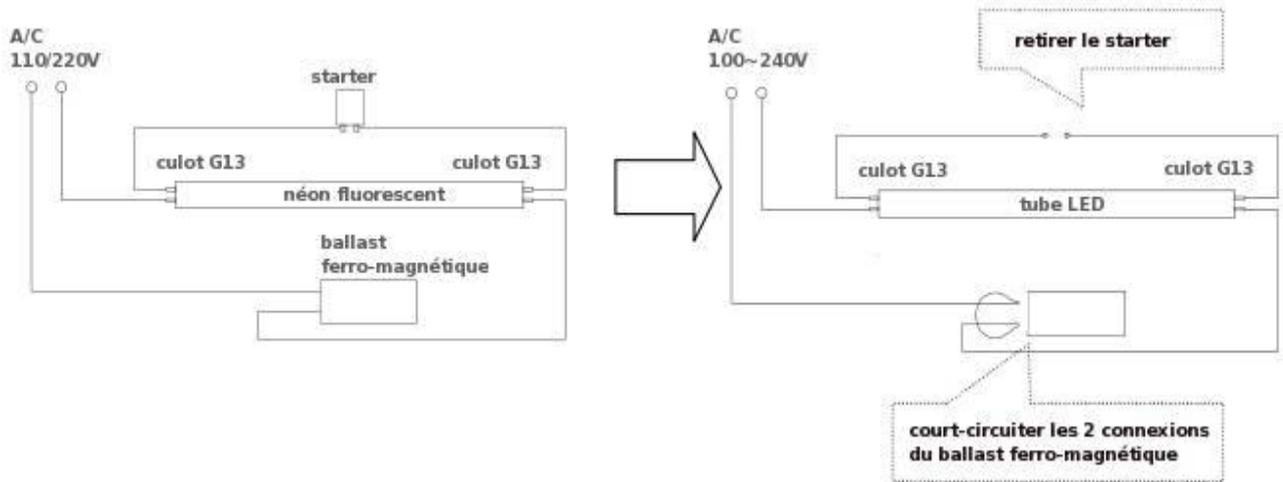


Figure III-9: Remplacement des tubes dans un luminaire a ballast ferromagnétique.

- **Cas d'un luminaire avec ballast électronique:**

Dans ce cas-là, il suffit de déconnecter le ballast électronique puis fermer le circuit électrique.

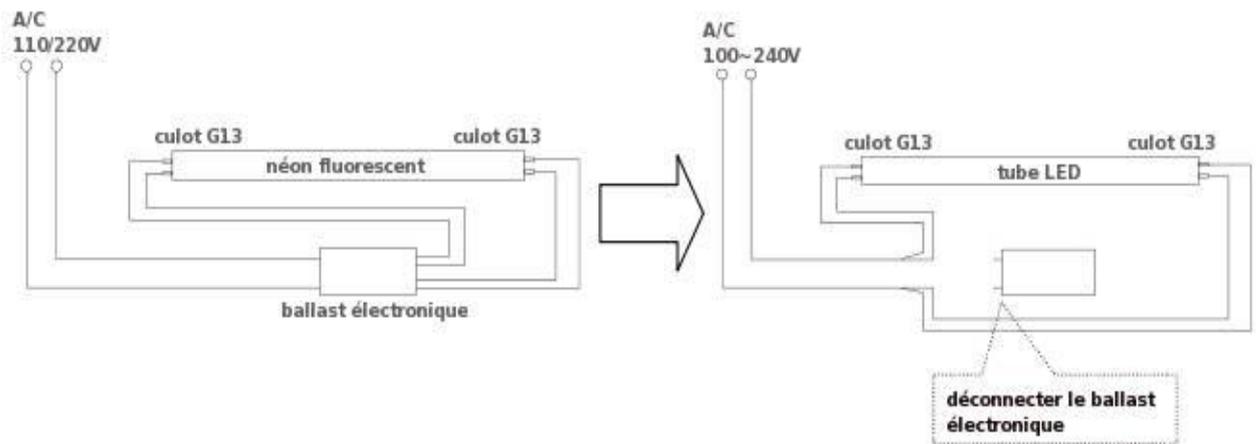


Figure III-10: Remplacement des tubes dans un luminaire a ballast électronique

Dans le cas de ce bâtiment, les luminaires sont du type starter et ballast ferromagnétique (premier cas).

III.3.6.Consommations électriques des tubes à LED:

La consommation annuelle d'énergie électrique des tubes à LED est calculée en utilisant le tableau si dessous:

Etage	Nombres de tubes à LED	Durée de fonctionnement annuelle (heure)	Puissance électrique d'un tube (W)	Energie électrique annuelle consommée (KWh)
SS2	38	1162	22	971,432
SS1	126	3285	22	9 106,020
RDC	128	1162	22	3 272,192
Etage 1	130	3650	22	10 439,000
Etage 2	128	1162	22	3 272,192
Total				27 060,836

Tableau III-6: Consommation annuelle d'énergie électrique des tubes à LED

La consommation annuelle d'énergie électrique des tubes à LED est de 27 060,836KWh devant une consommation annuelle électrique de 44 281,368 KWh en tube fluorescents. L'amélioration de la l'énergie électrique consommée est de :

$$(44281,368 - 27 060,836)/ 44 281,368 \times 100\% = 39 \%$$

III.3.7.Réduction en Emissions annuelle d'équivalent Carbone des tubes à LED:

Le remplacement des tubes fluorescents en tubes à LED a économisé 17220,532 KWh en énergie électrique. Sachant qu'on prend en considération que la réduction en énergie électrique dans le bâtiment provient de l'électricité du réseau du Liban, on trouve que les émissions d'équivalent Carbone réduites sont de:

$$17220,532 \text{ KWh} \times 0,196 \text{ Kg/KWh} = 3 375,2 \text{ Kg d'équivalent Carbone.}$$

A Cette réduction d'émissions importante, de 3,3752 tonnes d'équivalent Carbone, s'ajoute la masse nulle en produits nocifs à l'environnement comme le mercure (réduction de 2,750 kg) et le plomb.

Le graphe suivant illustre les émissions liées à l'électricité avec tubes fluorescent et avec tubes à LED:

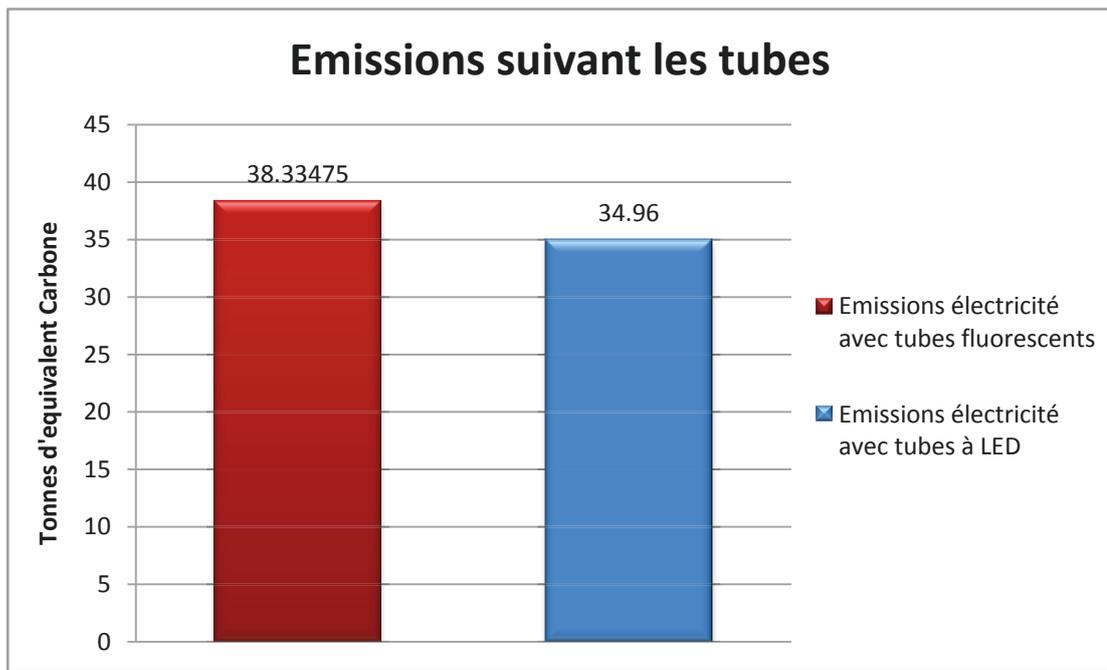


Figure III-11: Emissions d'équivalent Carbone par genres de tubes lumineux

III.3.8. Durée de remboursement du coût pour le remplacement des tubes lumineux:

Le prix unitaire d'un tube à LED "MASTER LED tube GA 1200mm 22W 840 G13" marque Philips est de 24 euros. On voulait remplacer 550 tubes fluorescents par des tubes à LED. Le montant du prix de remplacement est de 13 200 euros (550 x 24 euros = 13 200 euros).

Les tubes fluorescents consomment 44281,368 kWh/an devant une consommation de 27 060,836 kWh/an pour les tubes à LED. La réduction d'énergie lors du remplacement des tubes est de 17220,532 kWh/an. Sachant que le prix du kWh au Liban est de 0,12 euro et en prenant en considération que l'économie en énergie est à l'origine du réseau du Liban on obtient une réduction annuelle en euros de :

$$\begin{aligned}
 \text{Réductions annuelle} &= 17220,532 \text{ kWh/an} \times 0,12 \text{ euro/KWh} \\
 &= 2066,46384 \text{ € /an} \\
 &\approx 2067 \text{ €/an}
 \end{aligned}$$

La durée de remboursement du coût pour le remplacement des tubes en prenant en considération seulement l'économie en énergie sera de:

$$\begin{aligned}
 \text{Durée remboursement} &= (13200 \text{ €} : 2067 \text{ €/an}) \\
 &\approx 6,3 \text{ ans}
 \end{aligned}$$

Un autre facteur entre dans le calcul de la durée de remboursement des tubes. C'est la durée de vie des tubes à étudiés. Pour un tube a fluorescent, la durée de vie moyenne est de 8000 heures d'éclairage devant une durée de vie moyenne pour les tube à LED de 50 000 heures d'éclairage.

Pour un éclairage de 8 heures par jour, la durée de vie des tubes fluorescents est de deux ans et demi, devant une durée de 17 ans pour les tubes à LED sous un fonctionnement de 8 heures par jour. Si on prend en considération ce facteur et le prix unitaire d'un tube à fluorescent (approximativement de 12 euros), on obtient une durée de remboursement de trois ans après le remplacement. Le tableau suivant explique la méthode utilisée pour le calcul de la durée de remboursement.

	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	3 ^{ème} année	4 ^{ème} année
Economie cumulée grâce à l'énergie (€)	2067	4134	6201	8268
Economie cumulée grâce à la durée de remplacement (€)	0	0	6600	6600
Total (€)	2067	4134	12801	14868

Tableau III-7: Les économies cumulées

En considérant qu'après trois ans tous les tubes fluorescents ont été remplacés, on trouve qu'après la troisième année, l'économie totale en euro (12801 €) atteint presque le coût du remplacement des tubes fluorescents (13000 €). Alors on conclut que la durée de remboursement est presque supérieure à trois ans.

IV. Chapitre 4

Le photovoltaïque

IV.1.Énergie renouvelable:

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple).

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil, la Lune et la Terre. Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque.

IV.2. Rayonnement solaire:

Le soleil est une étoile qui possède un diamètre d'environ 50 fois plus grand que celui de la Terre pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium. La réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement solaire formé en rayons cosmiques (particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées) et en rayons électromagnétiques .

Le rayonnement électromagnétiques possède une vitesse de 300000 km/s et a besoin environ de 8 minutes pour parvenir à la Terre. [18]

IV.2.1. Spectre du rayonnement solaire extraterrestre :

Le rayonnement solaire est composé de particules de lumière appelés les photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde λ .

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir

porté à 5800° K. La répartition du rayonnement en énergies est à peu près pour moitié dans la lumière visible (48%) et dans l'infrarouge (45,6%), avec 6,4% d'ultraviolets.

IV.2.2.La constante solaire:

Elle exprime la quantité d'éclairement solaire (puissance d'éclairage ou irradiance) que recevrait une surface de 1m² située à une distance de 1 unité astronomique (distance moyenne Terre-Soleil) exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, si l'atmosphère terrestre n'existait pas. Elle est égale à 1,367 kW/m² (soit 1367 W/m²).

IV.2.2.le nombre de masse d'air (AM) :

La terre reçoit une fraction de la constante solaire car l'atmosphère absorbe et reflète une partie de ce rayonnement (la plupart des rayons X et rayons d'ultra-violet). La part d'énergie reçue dépend de l'épaisseur du milieu à traverser (atmosphère), et est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

La déperdition d'énergie solaire dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que cette énergie doit traverser. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Le spectre solaire extraterrestre a une masse d'air "0" (AM0) à cause de l'inexistence de l'air à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, entre la Terre et le Soleil.

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. La masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m².

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la Terre. C'est le AM1,5G ou le AM1,5D. Le nombre "1,5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith. Le "G" représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre "D" tient compte seulement du rayonnement direct. [18]

L'intensité du rayonnement AM1, 5D est calculé en réduisant le spectre AM0 de 28%, où 18% est absorbé et 10% est diffusé. (Pour le spectre AM1, 5G il est calculé en réduisant le spectre AM0 de 18% seulement). L'intensité du rayonnement AM1, 5D = $[(100-28) \times 1367]/100 \text{ W/m}^2 = 984,24 \text{ W/m}^2$.

Cependant, le spectre standard d'AM1,5G est pris égal à 1000 W/m^2 , en raison des variations inhérentes de rayonnement solaire incident.

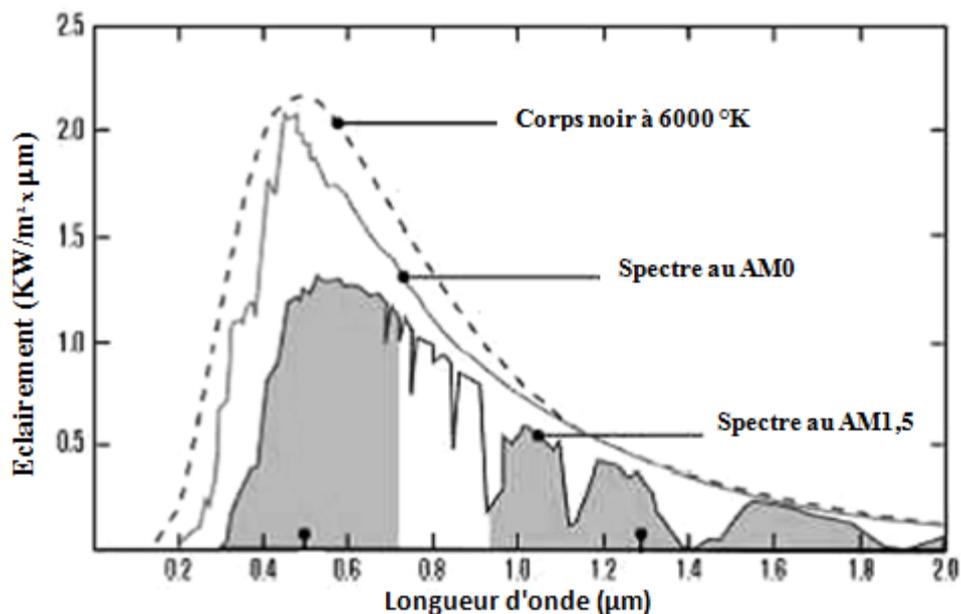


Figure IV-1: Les spectres de la lumière

IV.3.Énergie solaire photovoltaïque:

L'énergie solaire photovoltaïque est la transformation directe de la lumière solaire en énergie électrique à l'aide de cellules solaires (cellules photovoltaïques ou cellules PV). Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Ses applications vont de la calculatrice de poche (puissance de quelques watts) jusqu'à la centrale photovoltaïque (d'une puissance pouvant atteindre plusieurs mégawatts).

IV.3.1 Description d'une cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque est constituée d'un semi-conducteur généralement à base de silicium, de sulfure de cadmium, ou de tellure de cadmium. Le semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la

bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule. [18]

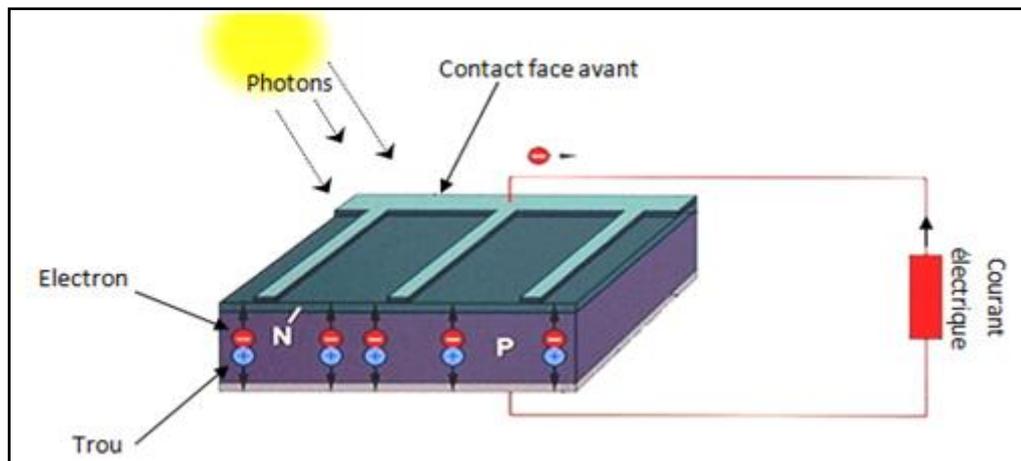


Figure IV-2: Une cellule photovoltaïque

IV.3.2. Le module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires photovoltaïques sont assemblées pour former un module photovoltaïque. Si les cellules sont montées en série, la tension délivrée par l'ensemble des cellules augmente tout en conservant le même courant débité par une seule cellule solaire. Si les cellules sont montées en dérivation, le courant débité augmente mais la tension reste la même qu'une cellule solaire.

Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière de polyéthylène. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre

IV.3.2.1. Caractéristiques d'un module:

- La puissance crête, P_c :

Puissance électrique maximum que peut fournir le module. elle est mesurée dans les conditions standard de test (Courant de court-circuit, I_{cc}) qui sont:

- Une radiation solaire de 1.000 W/m^2

- Une température de la cellule de 25°C
- Une masse d'air AM1,5
- Tension à vide, V_{co} :
Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit, I_{cc} :
Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

IV.3.3. Panneaux solaires:

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Il convient de distinguer deux types d'utilisation de panneaux solaires:

• Système connecté au réseau:

L'installation PV est raccordée au réseau électrique, qui joue le rôle de tampon. L'énergie électrique produite est utilisée sur place selon la demande. Si la quantité d'énergie consommée sur place est inférieure à l'énergie produite, l'excédent de production est stocké dans le réseau. Si la quantité d'énergie consommée sur place est supérieure à l'énergie produite, le réseau fournit l'électricité nécessaire.

• Système autonome

Dans ce cas-là l'installation PV est non raccordée au réseau, l'électricité produite est exclusivement consommée sur place. L'excédent éventuel est stocké dans des accumulateurs et utilisé en cas de besoin. Les installations insulaires sont appliquées essentiellement aux endroits où une connexion au réseau est impossible pour des raisons techniques ou économiques (campings, maisons de campagne, alimentation électrique dans les régions éloignées et les pays en développement).

IV.3.3.1. L'association des cellules photovoltaïques:

Dans les conditions standard STC ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C ; AM1, 5), la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm^2 serait d'environ 1,25 W. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres existant dans un réseau de photopiles en fonctionnement. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension.

- Mise en série:

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

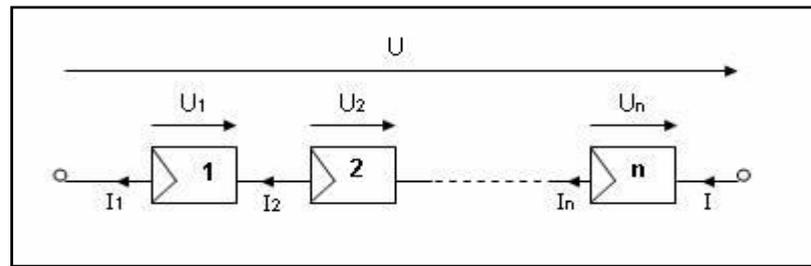


Figure IV-3: Association en série des modules photovoltaïques

- Mise en parallèle:

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

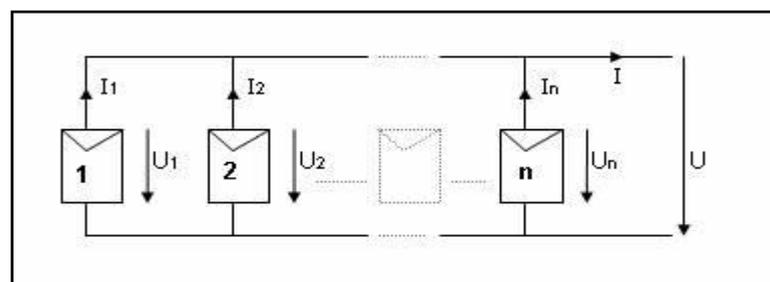


Figure IV-4: Association en parallèle des modules photovoltaïques

IV.3.4.Actualité au Liban:

Au Liban un accord entre le ministère de l'Énergie et de l'Eau et la Banque centrale a déjà été conclu pour encourager les initiatives personnelles en production d'énergie renouvelable avec le photovoltaïque, mais le décret officiel n'a pas encore été publié.

Cet accord concernerait des « prêts verts », à taux quasi-nuls, concédés à tout particulier ou entreprise, désireux de faire un état des lieux de leurs besoins énergétiques pour investir dans les énergies renouvelables. Le prêt serait aussi valable dans un deuxième temps, pour l'installation des panneaux photovoltaïques.

Au Liban deux problèmes apparaissent :

- Le premier étant que cet accord prend des années pour obtenir l'adoption d'une loi.
- Le second étant que le réseau électrique du Liban n'est pas fiable. Le consommateur peut effectivement générer de l'électricité et envoyer l'excès au réseau, mais il ne peut rien obtenir en retour à cause des fréquentes pannes de courant. L'électricité du Liban doit donc améliorer le réseau électrique.

Le tarif est de 4,49 euros par puissance d'un Wc (Watt crête), toutes taxes comprises. Bien sûr, on parle ici de panneaux solaires monocristallins, avec ratio élevé d'efficacité. Cependant, si on inclut le coût des changements climatiques et de la pollution, ce n'est pas cher du tout. Le problème pour le client potentiel reste néanmoins le paiement initial. Mais si on étale le paiement sur 20 années, le coût n'est pas élevé. Le retour sur investissement peut avoisiner les 10 ans.

Donc on peut dire pour aujourd'hui que le système photovoltaïque autonome est le seul à utiliser au Liban.

IV.3.5.Principe de fonctionnement d'un Système photovoltaïque autonome:

Le groupement de modules (champ de modules) charge une batterie qui permet d'utiliser l'énergie a convenance. Généralement, la charge et la décharge de la batterie sont contrôlées et gérées par un dispositif de gestion d'énergie. Sur certains systèmes un dispositif d'acquisition de données permet de surveiller le fonctionnement du système .Le système photovoltaïque autonome comprend 6 sous-ensembles :

- Le champ de modules : Les modules solaires photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en électricité
- Le système de régulation : Il empêche la surcharge ou la décharge profonde des batteries, prévenant ainsi tout risque de dommage aux batteries et a l'ensemble de l'installation. Il peut également signaler les dysfonctionnements du générateur ou de la batterie.
- Batterie d'accumulation : c'est un accumulateur spécialement adapté pour ces applications. Les plus utilisés sont des accumulateurs stationnaires au plomb (batterie plomb/acide). L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique ($H_2 SO_4$).

- L'onduleur : un appareil permettant de transformer le courant continu en courant alternatif et d'alimenter les appareils alternatifs à partir de l'énergie stockée dans la batterie.
- Le groupe électrogène d'appoint : c'est un générateur d'énergie électrique. Il sert de générateur d'appoint pour alimenter les appareils demandant une trop grande puissance ne pouvant être fournie par l'onduleur et utilisés ponctuellement. Il peut aussi servir à recharger la batterie en cas de période de manque d'ensoleillement trop prolongée ou de surconsommation
- chargeur : Il apporte une charge complémentaire à partir du groupe électrogène.

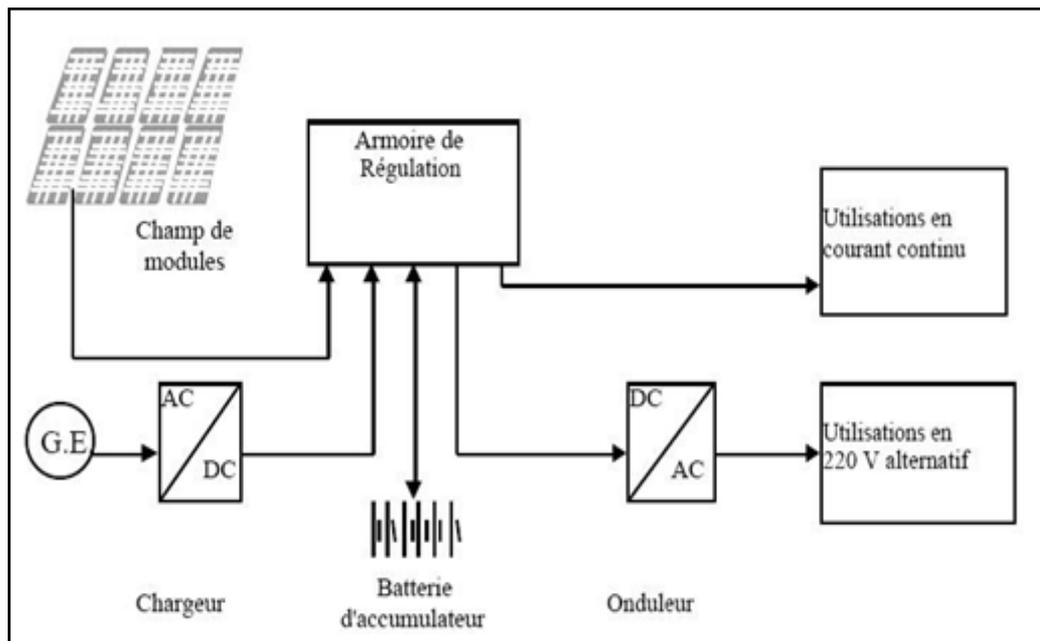


Figure IV-5: Système photovoltaïque autonome

IV.4.Intégration d'un système photovoltaïque autonome au parc informatique de l'école:

Les données géographiques du bâtiment sont les suivantes:

Latitude : Nord $34^{\circ} 02' 00''$

Longitude: Est $35^{\circ} 42' 00''$

Altitude : 700 mètres.

Le toit utilisé pour installer le système autonome possède les grandeurs suivantes:

Orientation : 0° Sud

Inclinaison : 40° (avec l'horizontale)

Un logiciel est utilisé pour le dimensionnement de ce système .c'est "Archelios Pro" version 12.0. Les cellules choisies sont des cellules photovoltaïques monocristallines en silicium (Si). Le système photovoltaïque intégré sera autonome avec un courant alternatif de sortie de tension efficace 220 volts.

IV.4.1.Irradiations solaires:

Les irradiations globales mensuelles au Liban sont introduites dans le tableau suivant en utilisant le logiciel "Archelios". On obtient une irradiation globale annuelle de 1878 KWh/m²/an, dont 558 KWh sont en rayonnement direct et 666 KWh en rayonnement diffus. [16]

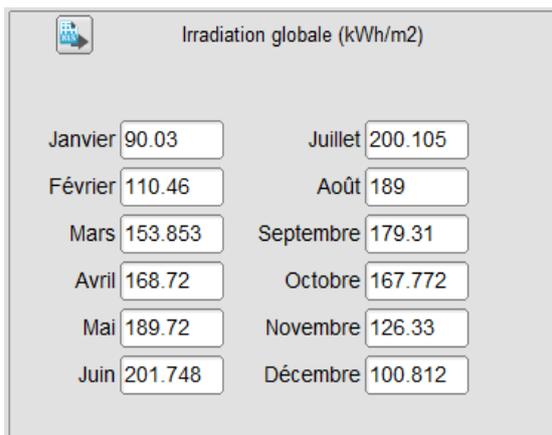


Figure IV-6: Irradiation globale par mois

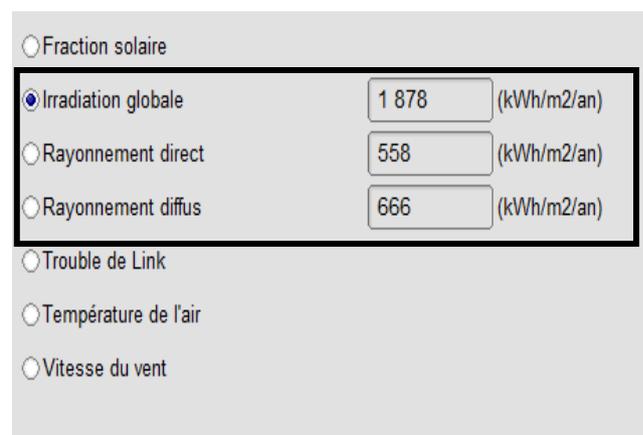


Figure IV-7: Irradiation globale annuelle

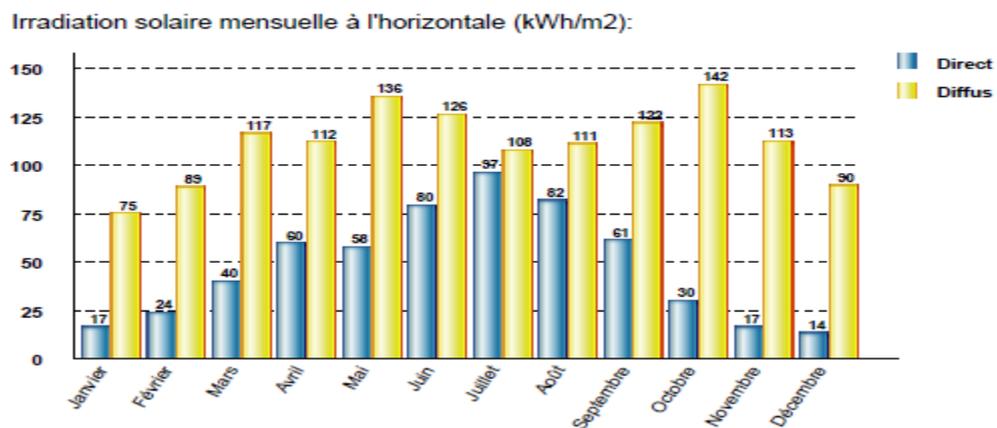


Figure IV-8: Graphe des irradiations directes et diffusées

IV.4.2. Les masques solaires:

Les ombres portées sur les modules s'appellent le masque solaire. On distingue deux types de masques : le masque proche et le masque lointain. Le masque proche correspond à l'ensemble des obstacles proches susceptibles de faire de l'ombre au module : arbre, câble électrique, bâtiment voisin ... Le masque lointain correspond aux obstacles lointains qui se trouvent à l'horizon, c'est-à-dire les montagnes, les collines...

Dans le cas du bâtiment, les masques proches affectent l'éclairage solaire de la manière suivante:

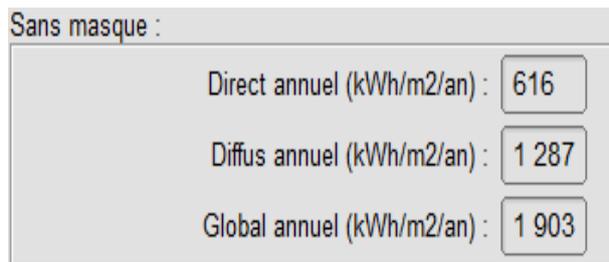


Figure IV-9: Irradiations sans masque

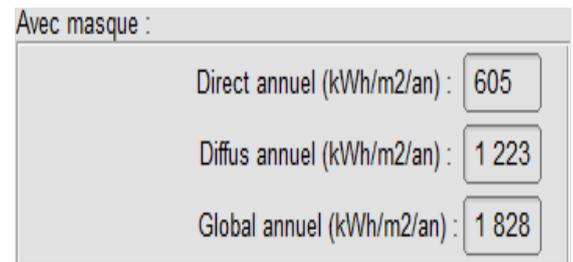


Figure IV-10: Irradiation avec masque

Le graphe suivant montre les positions des masques ainsi que leurs effets sur l'irradiation globale solaire reçue par les cellules photovoltaïques:

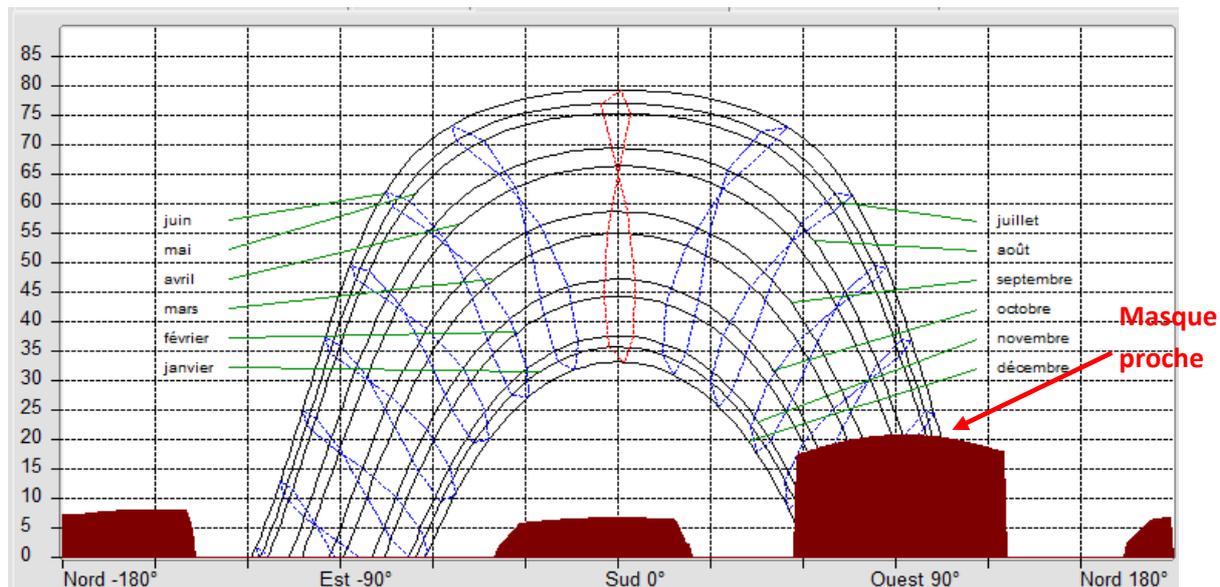


Figure IV-11: Positions des masques proches

IV.4.3. Inclinasion des panneaux:

Après avoir introduit les coordonnées du bâtiment ainsi que l'altitude et les irradiations mensuelles, le logiciel donne une inclinasion optimale de 44° avec l'horizontale vers le Sud pour l'installation des modules photovoltaïques.

Le toit Sud du bâtiment a une inclinasion de 40° avec l'horizontale donc, les modules photovoltaïques seront intégrés dans le toit Sud pour ne pas utiliser des châssis et rendre le coût total de l'installation plus petit.

IV.4.4. Besoin d'énergie électrique pour le fonctionnement du parc informatique:

Les appareils électriques utilisés dans le parc informatique ainsi que leurs puissances électriques et leurs consommations énergétiques annuelles sont inscrites dans le tableau suivant:

Liste des appareils électriques	Puissance max (W)	Nombre	Besoins annuels totaux (kWh)
PC(LCD)	230.00	20	3256.21
PC portable	80.00	4	57.44
Fax	350.00	1	0.61
Imprimante (Jet d'encre)	25.00	4	1.95
Photocopieuse moyenne vitesse	177.00	2	46.02
Scanner conventionnel.	36.00	1	0.37
Distributeur d'eau	550.00	1	429.00
Sterio	3.00	1	0.02
Telephone	2.00	1	1.56
Television	80.00	1	31.20
Tube a LED	22.00	20	68.20

Tableau IV-1: Besoins annuels d'énergie dans le parc informatique par appareil

En introduisant ces informations dans le logiciel et après l'édition d'un profil d'utilisation pour chaque appareil électrique on obtient un besoin total annuel d'énergie de 3892,58 kKWh.

The screenshot shows a software interface with two columns: 'Liste des appareils électriques :' and 'Nombre :'. The list includes PC(LCD) x 20, PC portable x 4, Fax x 1, Imprimante (Jet d'encre) x 4, Photocopieuse moyenne vitesse x 2, Scanner conventionnel. x 1, Distributeur d'eau x 1, Sterio x 1, Telephone x 1, Television x 1, and Tube a LED x 20. To the right, there are buttons for 'Ajouter un appareil' and 'Supprimer l'appareil'. Below these is a label 'Besoins annuels du poste (kWh)'. At the bottom right, a label 'Besoins totaux annuels (kWh/an)' is circled, with a text box containing the value '3 892.58'.

Figure IV-12: Besoins totaux annuels dans le parc informatique

IV.4.5. Dimensionnement du champ photovoltaïque:

Après avoir choisi le type des cellules photovoltaïques (monocristallin à Silicium), le choix de l'onduleur, du régulateur et des batteries est sélectionné.

On a besoin de 36 modules photovoltaïques, dont 9 modules sont montés en série et 4 modules en parallèles pour recouvrir les besoins annuels en énergie.

Deux régulateurs sont liés au système photovoltaïque pour rendre l'intensité crête I_{cc} acceptable.

The screenshot shows a software interface for photovoltaic system dimensioning. It includes a compass rose and a house icon on the left. The main area contains various input fields and sliders for system parameters. The 'Déficit stockage annuel (Ah/an)' field is highlighted in green.

Paramètre	Valeur
Type de suivi	Fixe
Orientation (°)	0
Inclinaison (°)	40
Nombre de modules en série	9
Nombre de branches en parallèle	4
Nombre d'onduleurs	1
Distance champ-onduleurs (m)	0
Section des câbles champ-onduleur (mm ²)	0.00
Vieillessement des modules par an (%)	0.444301
Ventilation arrière des modules	0.00
Nombre de batteries en série	19
Branches de batteries en parallèle	1
Déficit stockage annuel (Ah/an)	[Green Highlight]
Nombre de régulateurs	2

Figure IV-13: Dimensionnement du système photovoltaïque

Les batteries choisies sont de type "Vectron 12V Gel 220 Ah" de tension par élément 12 V. Donc on a besoin de 19 batteries montées en série pour obtenir une tension de sortie faiblement supérieure à 220V (de valeur 228 V) pour l'utilisation dans le parc informatique.

La production annuelle en courant alternatif de modules photovoltaïques est de 5862 KWh tandis que le besoin annuel est de 3893 KWh.

The screenshot shows the 'Résultats de production' (Production Results) window. It displays various performance metrics in a table format.

Metric	Value
Nombre total de batteries	19
Nombre total de modules	36
Puissance crête (kWc)	5.04
Production annuelle DC (kWh)	5 687
Production annuelle AC (kWh)	5 862
Besoins annuels (kWh)	3 893
Productible spécifique DC (kWh/kWc)	1 128
Productible spécifique AC (kWh/kWc)	1 163
Ratio de performance (%)	63.63
Ratio de performances avec masques (%)	61.10

Figure IV-14: Résultats de production

Le graphe suivant illustre la production et le besoin d'énergie mois par mois en kWh.

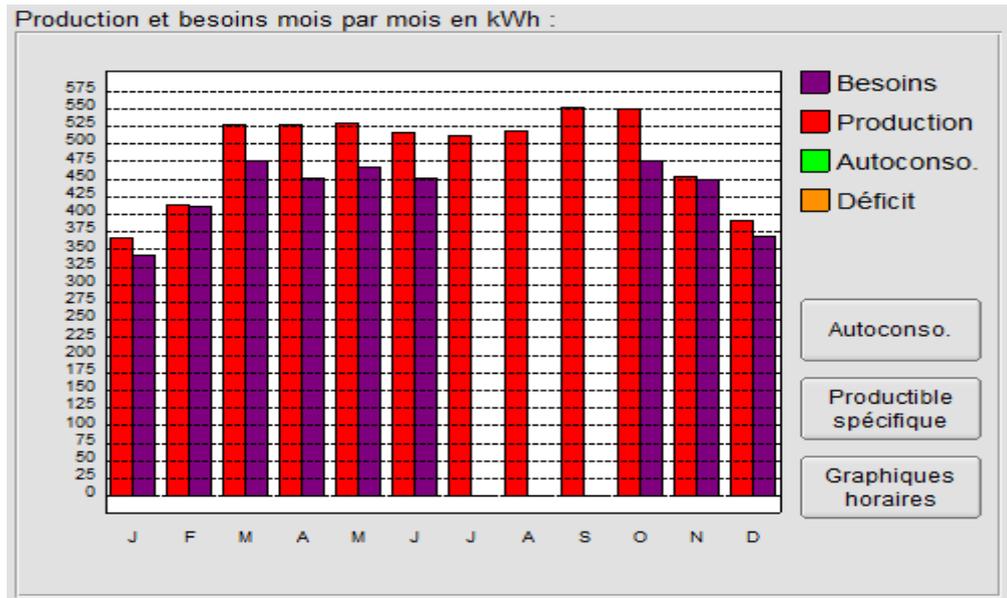


Figure IV-15: Production et besoin d'énergie par mois

On constate que l'énergie mensuelle produite par les modules photovoltaïques est suffisante pour recouvrir le besoin mensuel du parc informatique. Dans un cas de déficit énergétique, le groupe électrogène d'appoint (électricité du réseau et générateur d'électricité en fioul domestique) recouvre le besoin électrique.

IV.4.6.Indicateur de validité:

Le programme "Archelios" calcul plusieurs indicateurs de validité pour connaître si le système photovoltaïque dimensionné va fonctionner correctement et qu'il n'existe aucune faute électrique ou systématique. Voilà les indicateurs de validité du système photovoltaïque autonome qu'on vient de le dimensionner:

Indicateurs de validité :				
	Status	Valeur	Mini	Maxi
- Projet - Vco (-10°C)	OK	418.6		600.0
- Onduleur - Vco (-10°C)	OK	418.6		700.0
Tension à la puissance maxi Vmp (70°C)	OK	269.7	125.0	
Courant de court circuit Icc (A)	OK	18.0		25.5
Ratio P nominale onduleurs/P crête (%)	OK	0.91	0.70	1.10

Tableau IV-2: Les indicateurs de validité du système dimensionné

On constate que le système fonctionne correctement et il n'existe aucune modification à faire.

IV.5.Utilisation de l'énergie produite accumulée dans la cantine:

D'après le graphe de la production et du besoin mensuel en énergie, on constate que le parc informatique ne fonctionne pas durant trois mois de l'année (Juillet, Août, Septembre). Cette énergie emmagasinée durant ces trois mois sera utilisée dans la cantine alimentaire, formée d'une cuisine, d'un salon et d'une salle de séjour, pour profiter au maximum de l'énergie "verte" produite.

Un simple contrôleur électronique va diriger le flux énergétique produit par le système photovoltaïque vers les appareils électrique de la cantine durant les trois mois sélectionnés, en coupant l'alimentation en énergie du parc informatique.

IV.5.1.Besoin d'énergie électrique dans la cantine durant les trois mois:

Les appareils électriques utilisés dans la cantine ainsi que leurs besoins énergétiques durant les trois mois (Juillet, Août et Septembre) sont inscrites dans le tableau suivant:

Liste des appareils électriques	Puissance max (W)	Nombre	Besoins annuels totaux (kWh)
Distributeur d'eau	550.00	1	151.80
Interphone	2.00	1	0.01
Eclairage cuisine	22.00	20	141.68
Micro Onde	800.00	2	368.00
Ordinateur fixe	250.00	1	49.29
Réfrigérateur	110.00	2	86.22
Eclairage salon	22.00	21	212.52
Eclairage salle de sejour	22.00	18	109.30
Television	80.00	1	22.08

Tableau IV-3: Besoins annuels d'énergie dans la cantine par appareil

En introduisant ces informations dans le logiciel et après l'édition d'un profil d'utilisation pour chaque appareil électrique on obtient un besoin total d'énergie pendant les trois mois de 1140,89 KWh.

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- Liste des appareils électriques :**
 - Distributeur d'eau
 - Interphone
 - Eclairage cuisine
 - Micro Onde
 - Ordinateur fixe
 - Réfrigérateur
 - Eclairage sallon
 - Eclairage salle de sejour
 - Television
- Nombre :**
 - x 1
 - x 1
 - x 20
 - x 2
 - x 1
 - x 2
 - x 21
 - x 18
 - x 1
- Buttons:**
 - Ajouter un appareil
 - Supprimer l'appareil
- Besoins annuels du poste (kWh)**
- Besoins totaux annuels (kWh/an)** (highlighted with a black oval): 1 140.89

Figure IV-16: Besoins totaux annuels dans la cantine

Le graphe suivant illustre la production et le besoin d'énergie mois par mois en KWh.

Le graphe suivant illustre la production totale annuelle d'énergie et le besoin d'énergie dans la cantine mois par mois en KWh.

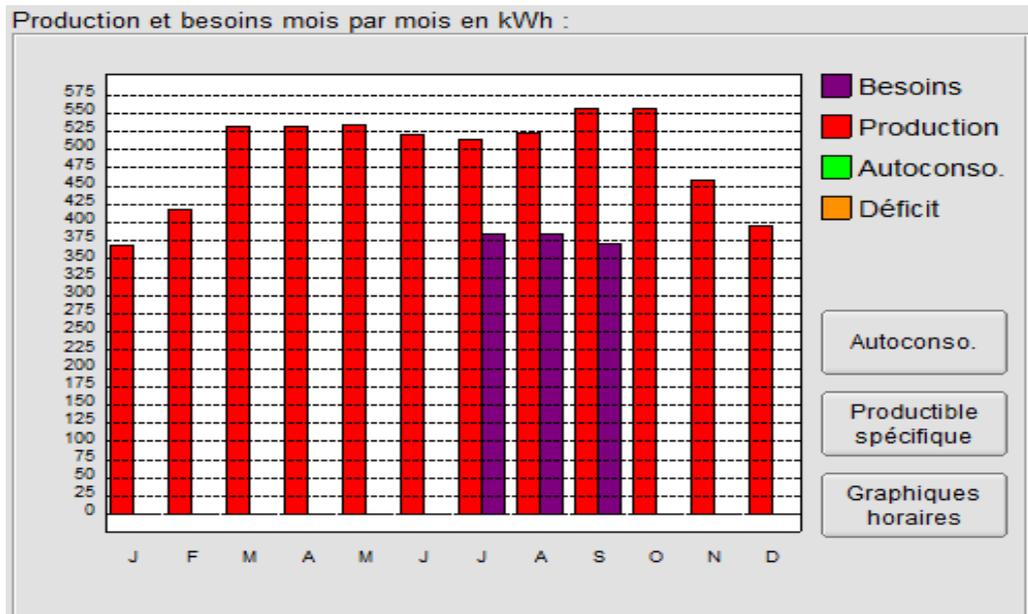


Figure IV-17: Production et besoin d'énergie par mois dans la cantine

IV.6. Diminution des émissions équivalent Carbone par an:

Le système photovoltaïque autonome dimensionné produit 5862 kWh/an. Le parc informatique consomme 3892,58 kWh/an tandis que la cantine 1140,89 kWh/an, donc soit un total de 5033,47 kWh/an pour tout le besoin électrique.

Ce système n'est pas raccordé au réseau et par la suite l'excès de l'énergie produite ne peut pas être vendu au réseau. L'énergie qui va entrer dans le calcul de la diminution des émissions équivalent Carbone est celle de l'énergie consommée par la cantine et le parc informatique en utilisant le système photovoltaïque et non pas l'énergie totale produite par ce système.

Sachant que l'électricité du réseau au Liban se coupe pour 8 heures chaque jour, le générateur d'électricité à fioul domestique alimentera les appareils électriques durant cette coupure quotidienne. On admet que 30% de l'énergie électrique consommée est produite par le générateur d'électricité à fioul domestique. Le tableau suivant illustre la diminution des émissions équivalent Carbone pour chaque type de production d'électricité:

Production	Energie électrique réduite (KWh/an)	Kg équivalent Carbone par kWh	Kg équivalent Carbone/an
Electricité du réseau Liban	3523,429	0,196	690,592084
Générateur à fioul domestique	1510,041	0,082	123,823362
Total			814,415446

Tableau IV-4: Diminution des émissions équivalent Carbone pour chaque type de production d'électricité

La diminution des émissions d'équivalent Carbone annuelle grâce a l'installation du système photovoltaïque est d'environ 0,815 tonnes d'équivalent Carbone. Cette valeur atteint la tonne d'équivalente Carbone si le réseau du Liban achète l'excès d'énergie électrique produite.

IV.7.Estimation de la période de remboursement du coût:

Le coût total de ce système photovoltaïque autonome est détaillé dans le tableau suivant:

Type	Coût en Euros
Modules photovoltaïques	15120
Onduleur	800
Câbles	400
Protections électriques	300
Structure	600
Régulateurs	220
Batteries	1500
Installation	1000
Total hors taxe	19 940
Total taxe comprise	21 934

Tableau IV-5: Coût du système photovoltaïque dimensionné en détails

Le montant total de cette installation vaut 21 934 euros pour une production de 5,04 KW_{crête}.

Le prix du KWh d'électricité produite au réseau du Liban vaut 0,12 € pour ce type de bâtiment. Le prix d'un KWh d'électricité produite par le générateur à fioul domestique au Liban vaut 0,3 €. Sachant que 30% de l'énergie réduite est d'origine fioul domestique et que le reste vient réseau électrique au Liban. On obtient d'après le tableau suivant la période de remboursement de ce système photovoltaïque autonome.

Type d'énergie	Prix du KWh en euro	Energie économisée en KWh/an	Prix annuel économisé/an en euros
Fioul domestique	0,3	1510,041	453,0123
Electricité du Réseau	0,12	3523,429	422,81148
Total			875,2378
Durée de remboursement (Coût total/prix économisé par an)			25,04

Tableau IV-6: Durée de remboursement du système photovoltaïque dimensionné

Cette durée est de 25 ans ce qui est une durée très grande. Cela est causé par le coût énorme de l'installation de ce système par rapport au salaire mensuel moyen d'un Libanais et de l'inexistence d'une loi qui bénéficie à l'utilisation des systèmes photovoltaïques personnels. Malgré cette période énorme de remboursement, les bénéfices environnementaux sont importants et à ne pas négliger.

IV.8. Temps de retour énergétique

IV.8.1. Définition:

Le temps de retour énergétique est le délai évalué en année qu'il faut pour qu'un système photovoltaïque (modules, structure et onduleur) rembourse le contenu énergétique nécessaire à sa fabrication.

IV.8.2. Calcul du temps de retour énergétique du système photovoltaïque à cellules monocristallines en Silicium:

Ce temps de retour énergétique est donc équivalent quel que soit le lieu de production puisque l'on considère que les processus de fabrication sont globalement les mêmes partout dans le monde. La production d'un module photovoltaïque intervient dès la purification du silicium jusqu'à l'encapsulation des cellules dans ce qui deviendra un module photovoltaïque.

Les différentes phases de production jusqu'au système photovoltaïque à cellules monocristallines en Silicium complet sont présentées ci-dessous.[17]

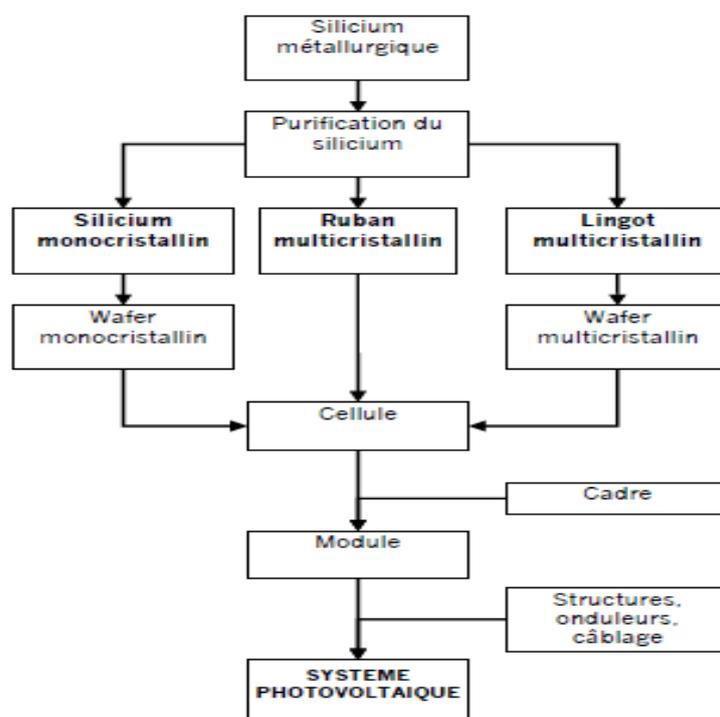


Figure IV-18: Diagramme des phases de production d'un système monocristallin

Les quantités d'énergies nécessaires pour chaque phase de production d'un système photovoltaïque monocristallin sont inscrites dans le tableau suivant:

Phase industrielle	Quantité d'énergie pour 1KWc Module (KWh)
Silicium métallurgique	349
Wafers	2365
Cellule	240
Module	51
Structures, câbles	212
Onduleurs	166

Tableau IV-7: Quantité d'énergie consommée par phase industrielle

On constate qu'un total de 3383 KWh est nécessaire pour la production d'un système photovoltaïque monocristallin (modules, structure et onduleurs) de 1KWc.

Le système photovoltaïque monocristallin de 1KW_c produit chaque année 1100 KWh.

Le temps de remboursement énergétique est calculé en divisant la consommation totale d'énergie pour la production du système par la production énergétique annuelle de ce même system. On obtient une durée d'environ 3 ans pour ce type de système photovoltaïque.

$$\begin{aligned} \text{Temps de remboursement énergétique} &= 3383 \text{ KWh} : 1100 \text{ KWh/an} \\ &= 3,07 \text{ ans.} \end{aligned}$$

V. Chapitre 5:

Eau chaude sanitaire

V.1.Introduction:

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. Utiliser le soleil pour chauffer l'eau sanitaire est une idée qui paraît d'une logique implacable. Par la suite, le principe des chauffe-eau solaires est simple et la technique est aujourd'hui fiable et éprouvée.

Le solaire thermique ne produit pas de l'électricité mais transforme le rayonnement solaire en chaleur, à la différence du solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité. Ce sont les capteurs solaires qui permettent de convertir le rayonnement solaire en chaleur. Il existe toute une gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre à différents besoins. Il faut choisir le type de capteurs qui correspond le mieux au niveau de température auquel on désire "travailler". Bien entendu, plus le niveau de température est élevé, plus les technologies mises en œuvre sont évoluées et plus les coûts de production sont élevés.

V.2.Types de capteurs solaires thermiques:

Il existe deux principales familles de capteurs solaires thermiques : les capteurs plans et les capteurs à tubes sous vide

V.2.1.Les capteurs plans:

Les capteurs solaires plans se divisent en deux catégories: Les capteurs plans opaques (non-vitrés) et les capteurs plans vitrés.

V.2.1.1.Les capteurs plans opaques:

Ceux sont les capteurs les plus simples du marché. Ils sont constitués d'un ensemble de tuyaux opaques de couleur foncée qui jouent à la fois le rôle d'une plaque absorbante qui permet la captation de l'énergie thermique du rayonnement solaire et de tuyauterie dans laquelle circule directement le fluide caloporteur (généralement l'eau).

Ils ne possèdent ni isolation ni couvercle transparent. Leur rendement est donc globalement moins bon sauf s'ils sont destinés à des applications estivales à basse température (proche de la température extérieure), par exemple pour les piscines extérieures.

V.2.1.2. Les capteurs plans vitrés:

Il s'agit des capteurs que l'on rencontre le plus souvent ; ils conviennent pour la plupart des applications courantes (ECS, appoint chauffage, piscine...). Les tubes métalliques renferment de l'eau ou plus souvent un liquide caloporteur en circuit fermé (antigel). Pour augmenter le rendement de chauffe, les tubes à ailettes sont enfermés dans une boîte vitrée isolante pour provoquer un effet de serre. Cette famille de capteurs est utilisée aussi bien pour le chauffage que pour produire de l'eau chaude sanitaire entre 50 et 70°C.

V.2.2. Les panneaux solaires thermiques à tubes sous vide :

Un capteur solaire sous vide se compose d'une série de tubes transparents en verre avec à l'intérieur un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert d'énergie thermique. Les capteurs sous vide permettent de chauffer l'eau chaude sanitaire à des températures plus élevées (environ 90°C) que les capteurs plans. Ainsi, cette technologie convient mieux aux climats plus froids. Par ailleurs, ce type de capteurs convient également pour la climatisation. Les capteurs sous vide présentent, en général, de meilleurs rendements mais sont plus onéreux.

V.3. Le capteur thermique solaire plan vitré:

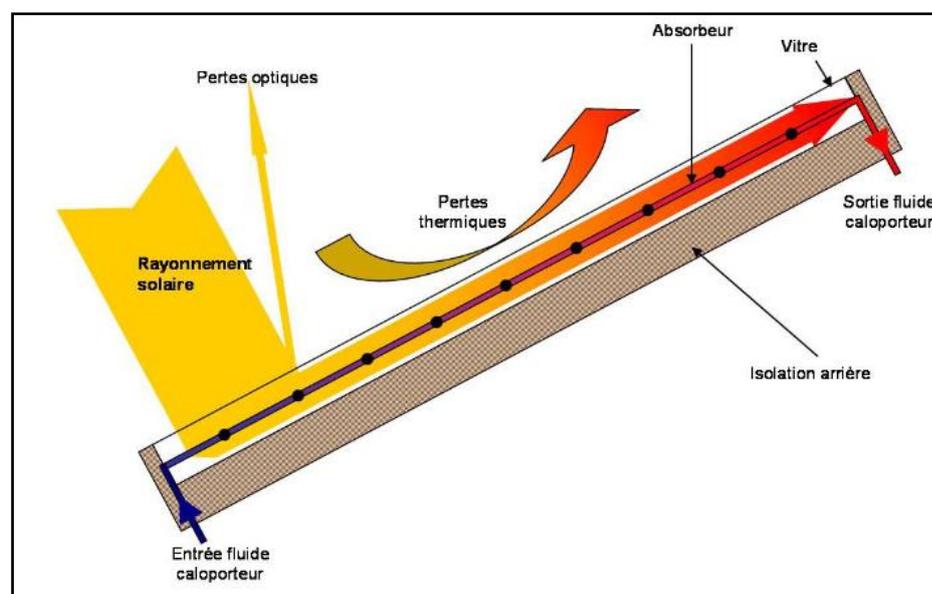


Figure V-1: Capteur plan vitré

Il est constitué d'un coffre, en général, métallique, contenant un absorbeur de couleur foncé et refermé par une vitre. Les rayons du soleil traversent la vitre sur toute sa surface pour atteindre des absorbeurs métalliques sélectifs, auxquels ils cèdent leur énergie. La chaleur est transmise à des tuyaux de cuivre soudés à l'absorbeur métallique, réchauffant le fluide caloporteur qui y circule.

La température du fluide caloporteur augmente en raison du transfert de la chaleur reçue par l'absorbeur. Comme dans une serre, le vitrage piège le rayonnement calorifique à l'intérieur du capteur. La température du fluide caloporteur peut atteindre facilement 80°C. Le fluide caloporteur est constitué d'un mélange d'eau et d'antigel pour protéger l'installation jusqu'à - 25°C pendant les nuits d'hiver et les jours d'hiver sans ensoleillement.

V.4.Composants du système solaire:

Les composants du système solaire thermique présenté à la figure ci-dessous peuvent être groupés en 6 catégories: [22]

- Les capteurs solaires
- Le circuit primaire
- Le circuit d'eau sanitaire
- Le circuit piscine
- La régulation
- L'appoint

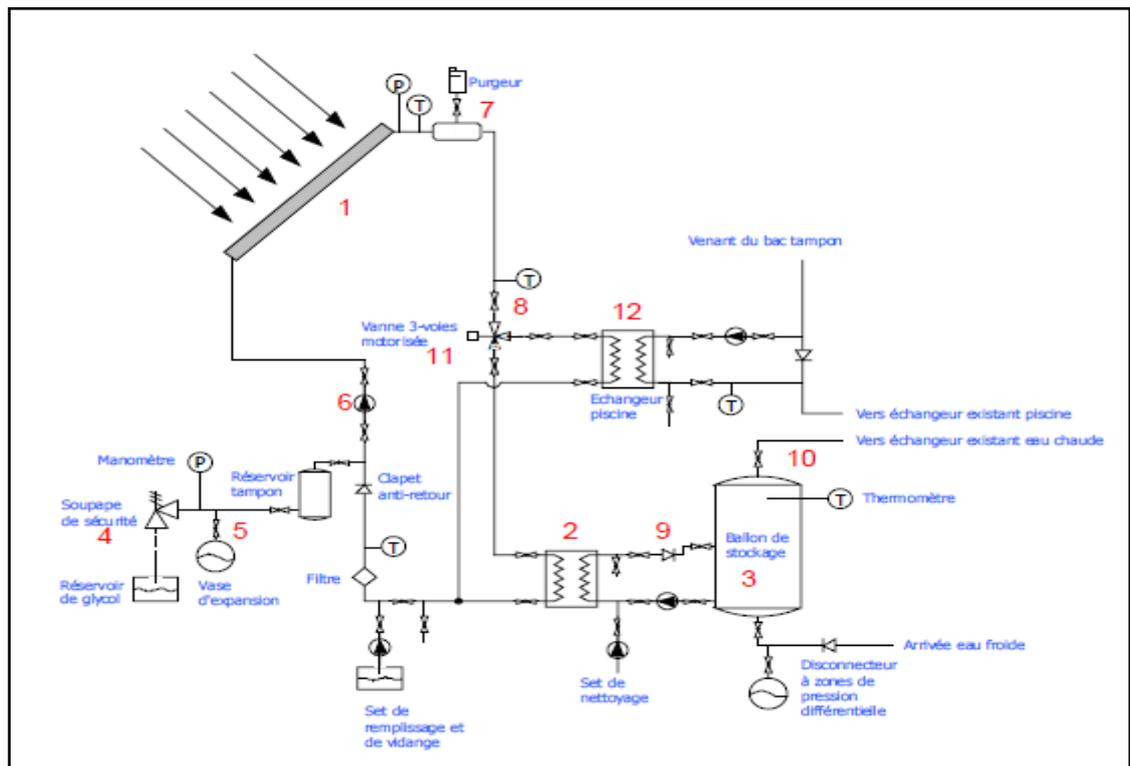


Figure V-2: Schéma d'un système solaire thermique

V.4.1. Les capteurs solaires:

Pour la production d'eau chaude sanitaire on choisira des capteurs plans vitrés. En effet, des capteurs solaires sous vides ne conviennent bien souvent que pour des applications à hautes températures ou lorsque la surface disponible en toiture est très limitée. Les capteurs sous vide possèdent des performances supérieures pour une même surface installée. Cependant, ces capteurs sont, à production identique, plus chers que des capteurs plans atmosphériques.

V.4.2. Le circuit primaire:

Le circuit primaire est un circuit fermé composé de tuyauteries, généralement en cuivre, qui relie le capteur (1) à un échangeur de chaleur (2) externe au ballon de stockage solaire (3).

Typiquement, pour les grands systèmes solaires, au-delà de 30 m² de capteurs, un échangeur de chaleur externe est utilisé. En effet, les puissances importantes mises en jeu nécessitent de grandes surfaces d'échange. Il n'est cependant pas rare de rencontrer des ballons de stockage solaires à échangeur interne, même pour ces grands systèmes. Ce choix est à discuter avec le fournisseur.

Le circuit primaire, relatif à l'installation sous pression, est totalement rempli d'un fluide caloporteur résistant au gel. On pourrait également travailler avec de l'eau pure non glycolée dans le cas d'un système à vidange. Dans ce cas précis, on peut omettre le vase d'expansion car le circuit primaire n'est pas mis sous pression, mais il faut prévoir la place pour installer le réservoir à vidange entre le champ des capteurs et le ballon de stockage solaire. Le choix d'un système "sous pression" ou "à vidange" peut encore s'effectuer lors de la rédaction du cahier des charges ou même lors de l'adjudication. Le circuit primaire est muni des accessoires suivants :

- Une soupape de sécurité (4) munie d'un manomètre destinée à évacuer les surpressions en cas de surchauffe de l'installation. Cette vanne est raccordée à un réservoir de collecte du fluide caloporteur avec antigel pour éviter tout rejet toxique dans le réseau d'égout.
- Un vase d'expansion (5), placé du côté aspiration de la pompe de circulation, chargé d'absorber les différences de volume et de récolter la totalité du fluide caloporteur expulsé des capteurs en cas de surchauffe.
- Une pompe de circulation (6) assurant la circulation du fluide caloporteur dans le circuit.
- Un purgeur manuel (7) permettant d'éliminer l'air en partie haute du circuit lors du remplissage et des entretiens.
- Un clapet anti-retour (8) pour éviter la formation d'un contre-courant de thermo-circulation qui déchargerait le ballon de stockage solaire de sa chaleur.
- Plusieurs vannes d'isolement pour isoler les composants principaux du système en cas d'entretien ou de remplacement.
- Un robinet permettant le remplissage et la vidange du circuit en fluide caloporteur.[22]

V.4.3. Le circuit d'eau sanitaire:

En amont des ballons de stockage, le circuit d'eau sanitaire est équipé des dispositifs suivants:

- Une vanne d'arrêt permettant d'isoler le chauffe-eau solaire du réseau de distribution d'eau sanitaire.
- Une soupape de sécurité destinée à protéger le circuit des surpressions.
- Un robinet permettant de vidanger l'installation.

Le risque de fuite de liquide caloporteur du circuit primaire au niveau de l'échangeur de chaleur externe ne pouvant être totalement exclu, le réseau d'eau froide sanitaire doit être protégé de toute contamination par le fluide caloporteur. L'alimentation en eau sanitaire est donc équipée du dispositif suivant :

- Un disconnecteur non contrôlable à zones de pression différente interdisant le retour de l'eau sanitaire du ballon de stockage solaire vers le réseau. Précisons que ce disconnecteur, les soupapes et robinet de vidange sont raccordés à des réservoirs de collecte du fluide caloporteur, l'évacuation directe vers les égouts étant interdite, vu la toxicité du fluide. Le ballon de stockage (3), alimenté par le circuit de transfert (9), permet de stocker temporairement l'énergie apportée par l'échangeur (2).

Le circuit d'eau sanitaire est également pourvu des composants suivant :

- Une vanne on/off à contrôle thermostatique dirigeant l'eau sortant du ballon de stockage solaire, en fonction de sa température, soit vers l'installation de chauffe complémentaire, soit directement vers les points de puisage.
- Une conduite (10) équipée d'un clapet anti-retour et d'un calculateur permettant de transférer l'eau chaude du ballon vers les échangeurs.

En outre, en cas d'ensoleillement important, l'eau chaude sanitaire peut sortir du ballon de stockage solaire à une température supérieure à la consigne. Afin d'éviter tout risque de brûlure aux points de puisage, l'installation est donc munie d'une vanne thermostatique à 3 voies mélangeant de l'eau froide à l'eau chaude de façon à produire de l'eau à une température maximale égale à la consigne.[22]

V.4.4. Le circuit piscine:

Lorsque la température dans le stockage solaire (2) dépasse la température de consigne, la vanne à trois voies motorisées (11) bascule en position B et envoie la chaleur utile vers le bac tampon de la piscine via l'échangeur piscine (12). Ce schéma peut être complété par une conduite reliant le ballon de stockage solaire au bac tampon.[22]

V.4.5. La régulation:

L'installation solaire thermique de production d'eau chaude est totalement automatisée.

Ce système possède plusieurs organes de régulation (généralement contenu dans un seul boîtier), avec entre autres un appareil de régulation pour le circuit primaire, qui commande le circulateur et celui du circuit de transfert, un appareil de régulation commandant le circulateur de la chaudière et le circulateur de la conduite.

V.4.6. L'appoint:

Les panneaux solaires ne peuvent à eux seuls satisfaire l'entièreté des besoins en eau chaude, un système solaire comprend donc toujours une connexion à un appoint. Dans la plupart des cas, l'appoint sera assuré par les chaudières et les échangeurs de chaleur existants.

V.5. Besoin d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment:

V.5.1. La méthode "fixturesunits":

L'eau chaude sanitaire sera seulement disponible à travers les douches et les lavabos utilisés par les sœurs en non pas par les élèves. (Il n'existe pas de douche dans la partie du bâtiment conservée pour l'école). Le besoin en eau chaude sanitaire aura lieu seulement dans les étages suivants du bâtiment:

- Le niveau SS1 où existe une cuisine et des toilettes et lavabos pour les sœurs.
- Le 1^{er} étage où existe la maison de retraite des sœurs.

Le tableau suivant représente la répartition des éléments du système de plomberie qui ont besoin d'eau chaude sanitaire en fonction de l'étage:

Etage	Nombres d'évier de service	Nombre d'évier de cuisine	Nombre de douches	Nombre de cuves à lessive fixes
1 ^{er} étage	10	0	7	2
Niveau SS1	6	4	1	0
Total	16	4	8	0

Tableau V-1: Répartition des éléments de plomberie

En se référant à la table suivante selon ASHRAE HVAC Applications et en se basant sur le nombre total des éléments, l'estimation pourra être réalisée:

Service Water Heating								
Table 10 Hot Water Demand per Fixture for Various Types of Buildings (Litres of water per hour per fixture, calculated at a final temperature of 60°C)								
	Apartment					Office	Private	
	House	Club	Gymnasium	Hospital	Hotel	Building	Residence	School
1. Basin, private lavatory	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
2. Basin, public lavatory	15	23	30	23	30	23	—	57
3. Bath tub ^c	76	76	114	76	76	—	76	—
4. Dishwasher ^a	57	190-570	—	190-570	190-760	—	57	76-380
5. Foot basin	11	11	46	11	11	—	11	11
6. Kitchen sink	38	76	—	76	114	76	38	76
7. Laundry, stationary tub	76	106	—	106	106	—	76	—
8. Pantry sink	19	38	—	38	38	38	19	38
9. Shower	114	568	850	284	284	114	114	850
10. Service sink	76	76	—	76	114	76	57	76
11. Hydrotherapeutic shower				1520				
12. Hubbard bath				2270				
13. Leg bath				380				
14. Arm bath				130				
15. Sitz bath				114				
16. Continuous-flow bath				625				
17. Circular wash sink				76	76	76		114
18. Semicircular wash sink				38	38	38		57
19. DEMAND FACTOR	0.30	0.30	0.40	0.25	0.25	0.30	0.30	0.40
20. STORAGE CAPACITY FACTOR ^b	1.25	0.90	1.00	0.60	0.80	2.00	0.70	1.00

Tableau V-2: Demande d'eau chaude par type d'élément et type de bâtiment

D'après le tableau de la répartition des éléments du système de plomberie qui ont besoin d'eau chaude sanitaire, on trouve 16 éviers de service, 4 éviers de cuisine, 8 douches et 2 cuves à lessive. Le type du bâtiment choisi est une maison de retraite pour les sœurs, donc on utilisera la colonne réservée aux hôpitaux dans le tableau ci-dessus.

La demande maximale possible d'eau chaude sanitaire pour tous les éléments mentionnés en haut est égale à la somme des produits des nombres des éléments appartenant à un même type par la demande en eau chaude donnée en L/h selon le type de l'immeuble d'une part et le type de l'équipement d'autre part.

Le calcul est le suivant:

$$\begin{aligned}
 \text{Demande maximal possible} &= (16 \times 76 \text{ L/h}) + (4 \times 76 \text{ L/h}) + (8 \times 284 \text{ L/h}) + (2 \times 106 \text{ L/h}) \\
 &= 1216 \text{ L/h} + 304 \text{ L/h} + 2272 \text{ L/h} + 212 \text{ L/h} \\
 &= 4004 \text{ L/h}
 \end{aligned}$$

Pour calculer la demande maximale probable, un facteur de la demande est appliqué à la demande maximale possible. La demande maximale probable est la vitesse à laquelle le chauffage doit produire de l'eau chaude et est également nommé comme le taux de récupération. Les facteurs de la demande économique sont présentés dans Tableau ci-dessus, mais pourrait être modifié sur l'analyse du concepteur de données historiques pour similaire des projets, l'expérience et la discrétion.

La demande maximale probable d'eau chaude sanitaire pour tous les éléments mentionnés en haut est le produit de la demande maximale possible par le facteur de sécurité nommé de demande déterminé selon le type de l'immeuble. Dans le cas d'un hôpital, le facteur de demande est de 0,25 mais on prendra le facteur 0,4 car il s'agit d'une maison de retraite et non pas d'un hôpital. Le calcul est le suivant:

$$\begin{aligned} \text{Demande maximal probable} &= 4004 \text{ L/h} \times 0,4 \\ &= 1601,6 \text{ L/h} \end{aligned}$$

La demande maximale probable est prise en compte par le facteur de la capacité de stockage pour déterminer la capacité du réservoir de stockage. La capacité du réservoir de stockage est la capacité disponible pour l'utilisation. Les réservoirs de stockage ne sont pas considérés pour être utilisable à 100% et donc, un utile facteur de réservoir de stockage doit être appliqué à la capacité du réservoir de stockage calculée. La capacité considérée comme utilisable pour la plupart des réservoirs est de 70%.

La capacité de stockage est calculée en multipliant la demande maximale probable par un nouveau facteur de sécurité nommé de stockage déterminé selon le type de l'immeuble. Ce facteur est égal à 0,60 dans le cas d'un hôpital mais est pris de 0,7 pour le cas d'une maison de retraite. Le calcul est le suivant: La capacité de stockage $\approx 1601,6 \text{ L/h} \times 0,70$

$$\approx 1122 \text{ L/h}$$

Si on désire stocker l'eau pendant une heure et demi, la capacité de stockage devra être, d'après le calcul suivant: La capacité de stockage pour 1,5 heure = 1,5 h x 1122 L/h

$$= 1683 \text{ Litres}$$

V. 5.2. Besoin journalier d'eau chaude sanitaire:

D'après les tableaux suivants on trouve que la consommation d'eau chaude sanitaire à 60⁰ C pour le type de ce bâtiment (maison de retraite) est de 60 L/jour/lit, hors restauration et buanderies. La part de la restauration en eau chaude sanitaire est de 5L/lit pour un repas ordinaire et celle de la buanderie de 5 L/kg de linge.

Type d'établissement	Observation	Consommation d'eau à 60°C
Hôpital et clinique	Hors restauration et buanderies	60 l / jour /lit
Maison de retraite	Hors restauration et buanderies	60 l / jour /lit

(Source : Calculs pratiques de plomberie sanitaire. Editions Parisiennes)

Type d'établissement	Observation	Consommation d'eau à 60°C
Gymnases	Vérifier la nature des sports pratiqués (Football ou rugby : + 50 %)	30 l / utilisateur
Restaurant	Repas ordinaire Repas luxe Petit déjeuner	8 l / repas 12 à 20 l / repas 2 l / repas
Cantine	Cuisine de réchauffage Repas normal	3 l / repas 5 l / repas
Buanderie	Hôtel 4/5 * Cycle court Cycle automatique	7 l / kg de linge 6 l / kg de linge 5 l / kg de linge

(Source : Calculs pratiques de plomberie sanitaire. Editions Parisiennes)

Tableau V-3: Consommation d'eau par type d'établissement

Le nombre des lits réservé pour les sœurs âgées du bâtiment est de 30 lits. Les sœurs obtiendront 3 repas normaux par jour. 10 kg de linge est pris en considération chaque jour pour la buanderie à cycle automatique.

Le besoin journalier en eau chaude sanitaire est calculée de la manière suivante:

$$\begin{aligned}
 \text{Besoin} &= (30 \text{ lits} \times 60 \text{ L/lit}) + (3\text{repas} \times 30 \text{ personnes} \times 5 \text{ L/repas. personne}) + (10 \text{ kg} \times 5\text{L/kg}) \\
 &= 1800 \text{ L} + 450 \text{ L} + 50 \text{ L} \\
 &= 2300 \text{ L}
 \end{aligned}$$

On notera que pour ce qui concerne la performance future du système solaire, il est préférable de sous-estimer les consommations d'eau chaude sanitaires, plutôt que les surestimer.

V.6. Dimensionnement des capteurs solaires:

D'après l'abaque de dimensionnement suivant on peut estimer rapidement la surface des capteurs solaires plans.

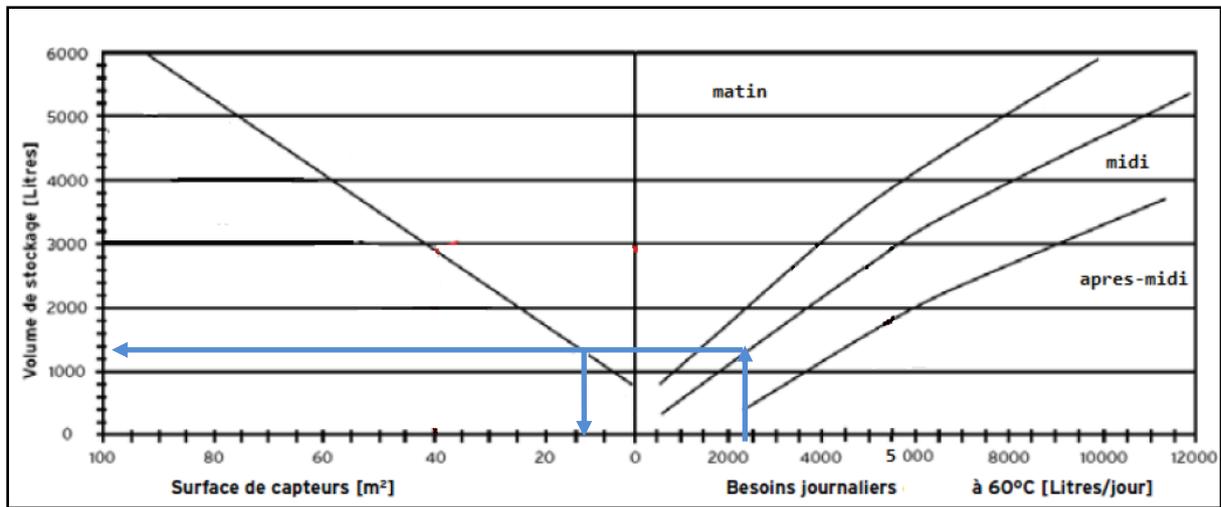


Figure V-3: Abaque de dimensionnement des capteurs solaires plans

On obtient d'après l'abaque ci-dessus une surface de 12 m² pour les capteurs solaires et un volume de stockage d'environ 1300 Litres. (La capacité de stockage pour une durée de 1,16 heures suivant la méthode "fixtures units")

V.6.1. Orientation et inclinaison des capteurs solaires:

Les capteurs solaires seront installés sur le toit Sud d'orientation 0⁰ et d'inclinaison 40⁰ avec l'horizontale. D'après le programme "Archelios Pro" une inclinaison de 44⁰ avec l'horizontal vers le Sud (0⁰) est optimale. Cependant, selon les saisons, l'inclinaison de la Terre varie et une inclinaison de 40⁰ (celle du toit) reste efficace.

V.7. Réduction d'énergie grâce au système solaire de production d'eau chaude sanitaire.

La température moyenne de l'eau au Liban est 15⁰ C. Pour un recouvrement de 70% du besoin total journalier d'eau chaude sanitaire par les capteurs solaires, on obtient d'après la formule suivante, la réduction en énergie journalière grâce au système solaire:

$$Q = m \times Cp \times (T_{ch.} - T_f)$$

Où: Q : quantité de chaleur nécessaire

m: masse de l'eau à chauffer

Cp : chaleur spécifique de l'eau

T_{ch.} : Température de l'eau chaude

T_f : Température de l'eau froide

$$Q = (0,7 \times 2000 \text{ kg}) \times 4180 \text{ J/Kg} \cdot \text{C} \times (60^0 \text{ C} - 15^0 \text{ C})$$

$$= 263340 \text{ KJ}$$

La quantité d'énergie annuelle réduite est Q_t :

$$\begin{aligned} Q_t &= 263340 \text{ KJ/jour} \times 365 \text{ jours} \\ &= 96119100 \text{ KJ} \\ &= 96119100 \text{ KJ} : 3600 \text{ KWh/KJ} \\ &= 26699,75 \text{ KWh} \\ &\approx 26700 \text{ KWh} \end{aligned}$$

V.8.Réduction d'émissions d'équivalent Carbone :

Le rendement de la chaudière à fioul domestique utilisée dans le bâtiment pour le chauffage de l'eau sanitaire est de 70%.L'énergie nécessaire à cette chaudière pour chauffer la même quantité de l'eau annuelle que le système solaire est de :

$$\text{Energie nécessaire} = 26700 \text{ KWh} / 0,70 = 38\ 143 \text{ KWh.}$$

Sachant que le 1 KWh produit par le fioul domestique libère 0,082 kg d'équivalent Carbone, on obtient la réduction en émissions:

$$\begin{aligned} \text{Réduction émissions} &= 38\ 143 \text{ KWh} \times 0,082 \text{ Kg d'équivalent Carbone/ KWh} \\ &= 3\ 127,726 \text{ Kg d'équivalent Carbone} \\ &\approx 3,1 \text{ tonnes d'équivalent Carbone} \end{aligned}$$

Le graphe suivant illustre les émissions d'équivalent Carbone avant et après 'utilisation du système solaire :

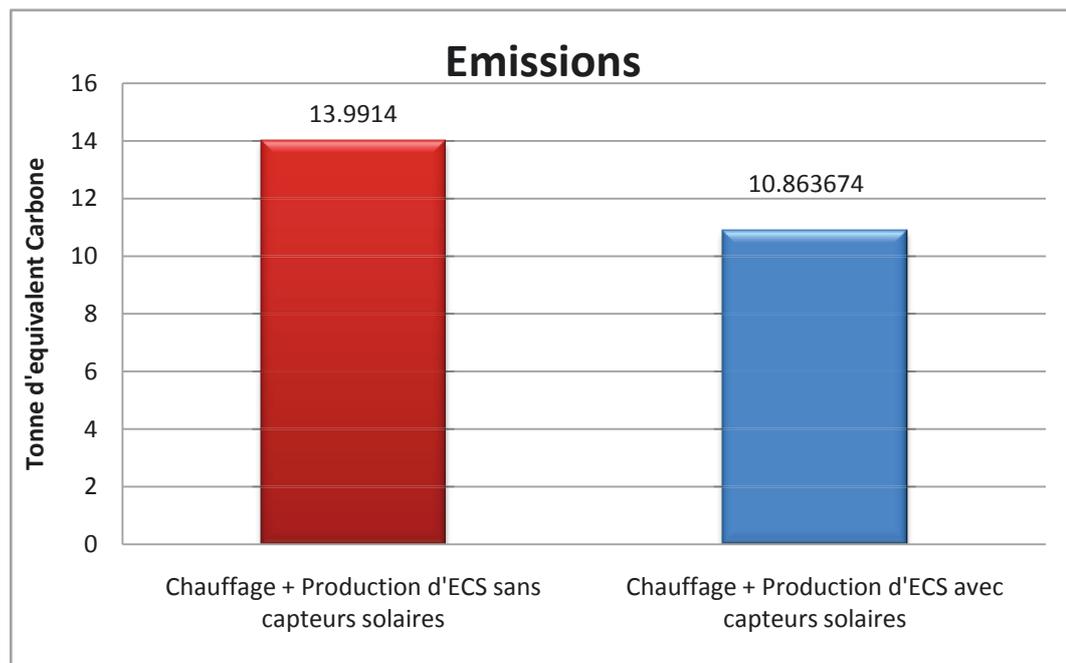


Figure V-4: Graphe des émissions avant et après introduction des capteurs solaires

V.9. Durée de remboursement du système solaire d'eau chaude

sanitaire:

Le coût total du système chauffe-eau solaire est de 5970 euros et les détails sont inscrits dans le tableau suivant:

Eléments	Prix en euros
Capteurs solaires plans (12m ²)	2600
Ballon solaire	1500
Fixation panneaux	500
Liaison hydraulique solaire isolée	540
Vanne d'expansion	250
Vanne mitigeur thermostatique	120
Accessoires de raccordement hydraulique	130
Groupe de sécurité du ballon solaire.	30
Autres coûts	300
Total	5970

Tableau V-4: Prix par élément du système solaire

L'énergie récupérée pour la combustion de 1 litre de fioul domestique est d'environ 9 KWh.

On trouve après calcul, que la quantité annuelle de fioul domestique réduite pour une réduction de 35600 KWh d'énergie fossile est de :

$$\text{Quantité réduite} = (38\ 143 \text{ KWh} : 9 \text{ KWh/L})$$

$$\approx 4\ 238 \text{ Litres.}$$

Sachant que le prix du litre de fioul domestique au Liban vaut 0,676 €, la réduction annuelle de la dépense en euros lors de l'introduction du système solaire thermique est de :

$$\text{Réduction euros} = 4\ 238 \text{ L} \times 0,676 \text{ €/L}$$

$$\approx 2\ 865 \text{ euros}$$

La durée de remboursement du système chauffe-eau solaire est calculée en divisant le coût total de l'installation par la réduction annuelle de la consommation en euros et on obtient:

$$\text{Durée de remboursement} = 5970 \text{ €} : 2\ 865 \text{ €/an}$$

$$= 2,081 \text{ ans}$$

$$\approx 2 \text{ ans.}$$

VI - Chapitre 6

Récupération de l'eau de pluie

VI.1.Réalité au Liban:

Le Liban est dans une position hydrologique relativement chanceux (Ministère de l'éducation, 2001), il reçoit une moyenne de 661 mm / an par rapport à 252 mm en Syrie et en Jordanie 111 mm (El Fadel, 2009). Toutefois, le Liban fait face à des défis importants à satisfaire la demande en eau du pays en termes de quantité et de qualité. Des pratiques non durables de gestion des eaux, les risques environnementaux et les lacunes de gouvernance de l'eau sont parmi les principaux obstacles auxquels est confronté le secteur.[26]

VI.1.1.Précipitation:

Le Liban est généralement caractérisé par un climat méditerranéen. La précipitation se produit principalement entre les mois d'octobre et mars. Les précipitations peuvent atteindre plus que 1400 mm/an sur les sommets de Faraya et Becharreh, tandis qu'une modeste de 300mm/an à 400 mm/an est enregistrée par voie navigable. Le plus bas niveau enregistré durant 51 ans pour le pays était de 80 mm/an tandis que l'observation maximale atteinte est de 3010 mm/an.[26]

VI.2.Récupération de l'eau de pluie:

L'eau est une ressource des plus précieuses. Malgré sa gratuité, il est important de songer à des façons simples et efficaces de consommer l'eau de manière intelligente. La récupération de l'eau de pluie est l'une de ces façons.

VI.2.1.Principe de fonctionnement d'un système de récupération de l'eau de pluie:

L'eau de pluie qui tombe sur le toit d'un bâtiment est acheminée par gravité dans les descentes de gouttières vers un dispositif de stockage, plutôt que d'entrer dans le système de drainage. Un séparateur de feuilles est placé sur la descente pour effectuer un premier filtrage avant d'entrer dans le réservoir de stockage. Afin de limiter la prolifération bactérienne, il est recommandé de stocker l'eau de pluie dans l'obscurité et à une température inférieure à 17°C.

L'eau pluviale est aspirée via une crépine d'aspiration flottante située généralement à une quinzaine de centimètres au-dessous du niveau de l'eau, là où elle est la plus propre. Ceci évite l'aspiration d'éventuels éléments indésirables qui pourraient détériorer la pompe. Un raccord de stabilisation ou « diffuseur-tranquillisateur » évite que l'eau qui tombe en fond de cuve ne soulève les sédiments en

dépôt dans le fond. Ce système d'arrivée permet également d'oxygéner l'eau stockée. Si nécessaire, cette eau est ensuite automatiquement pompée dans le bâtiment et après une filtration supplémentaire est mise à utiliser dans les applications de l'eau non potable.

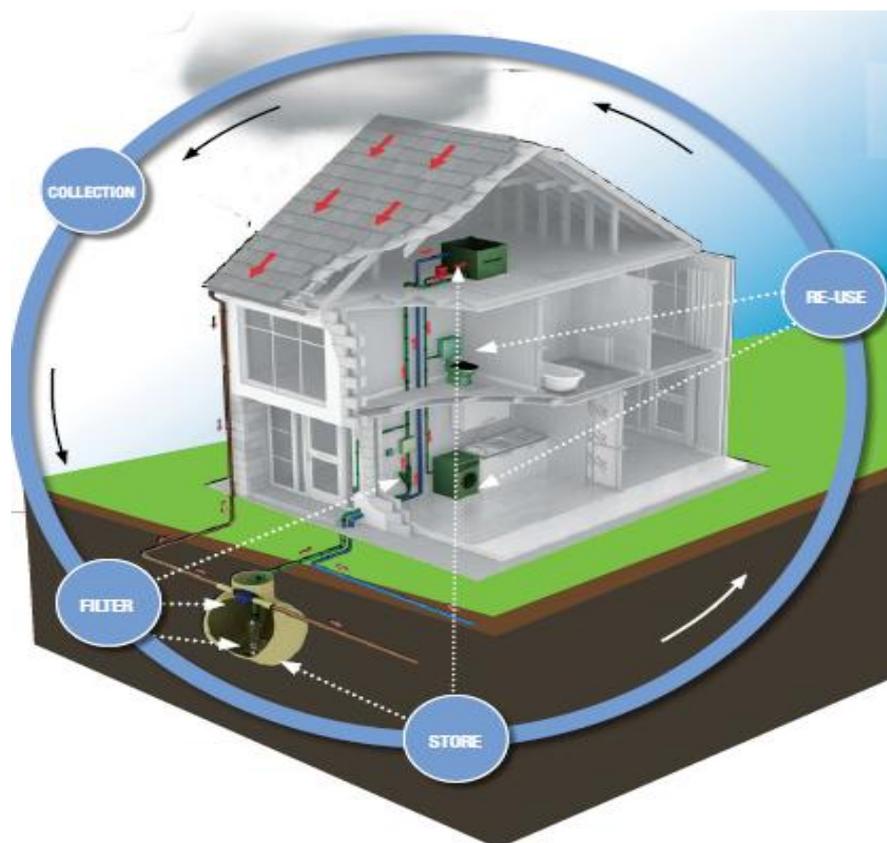


Figure VI-1: Les étapes d'un système de récupération d'eau de pluie

VI.3. Dimensionnement d'un système de récupération d'eau de pluie:

VI.3.1. Calcul de l'approvisionnement potentiel en eau de pluie par estimation de l'écoulement:

La quantité d'eau de pluie disponible dépend du volume de précipitation, de la surface de captage et de son coefficient d'écoulement. Lorsque l'eau est collectée sur un toit ou sur une surface en pente, c'est le plan horizontal qu'il faut mesurer. Le coefficient d'écoulement prend en compte toutes les pertes dues à l'évaporation, aux fuites, au débordement et au drainage.

Le coefficient d'écoulement est le rapport entre le volume d'eau qui s'écoule d'une surface et le volume des précipitations qui tombent sur cette surface. Un coefficient d'écoulement de 0,9 indique que 90 % des précipitations seront récupérés. Le coefficient d'écoulement d'un système de captage sur toiture bien construit est de 0,9 (une toiture imperméable permettra un écoulement élevé). L'équation suivante permet d'obtenir une estimation de l'écoulement moyen annuel d'un captage donné [25]:

$$A = P \times S \times C_e$$

Où :A : Approvisionnement annuel moyen en eau de pluie (m³/an)

P : Précipitations annuelles moyennes (m/an)

S : Surface de captage (m²)

C_e : Coefficient d'écoulement.

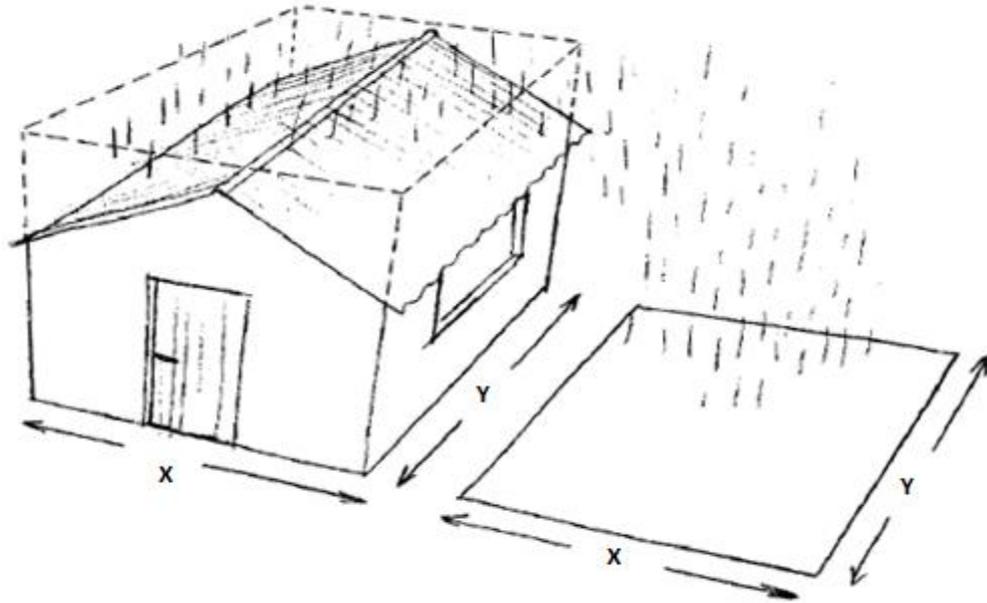


Figure VI-2: Plan horizontal de la superficie du toit pour calculer la surface de captage

Dans le cas du bâtiment étudié, la surface de captage de l'eau de pluie est de 690 m². Le coefficient d'écoulement du toit est de 0,9 et la précipitation annuelle moyenne de la région de Kfour est de 891 mm/an. L'approvisionnement annuel moyen sera de :

$$\begin{aligned} A &= 0,891 \text{ m/an} \times 0,9 \times 690 \text{ m}^2 \\ &= 553,311 \text{ m}^3/\text{an} \\ &= 553\ 311 \text{ Litres /an} \end{aligned}$$

VI.3.2.Estimation de la demande domestique en eau:

L'eau de pluie récupérée par le toit du bâtiment sera utiliser dans les chasses d'eau des toilettes du bâtiment. Le volume des réservoirs des chasses d'eau utilisé dans l'école est de 9 Litres alors le ratio de la consommation d'eau dans les chasses eau toilette réservées pour l'école est de 9 L/usage. On considère que 40% de la population des élèves avec les employés de l'école utilisent les toilettes une fois par jour pendant 176 jours chaque année.

Le volume des réservoirs des chasses d'eau utilisées dans la maison de retraite est de 6 Litres alors le ratio de la consommation d'eau dans les chasses d'eau des toilettes réservées pour la maison de

retraite est de 6 L/usage .On considère que 100% des sœurs âgées utilisent les toilettes trois fois par jours pendant 365 jours chaque année.

Le nombre des élèves et employés dans l'école est de 531 et celui des sœurs âgées de 28.

La demande d'eau des chasses de toilettes se calcule de la manière suivante:

$$\begin{aligned} \text{Demande toilette} &= (531 \times 0,4 \times 176 \times 9 \text{ L}) + (28 \times 3 \times 365 \times 6\text{L}) \\ &= 336\,441,6\text{Litres} + 183\,960\text{Litres} \\ &= 520\,401,6 \text{ Litres} \end{aligned}$$

Alors l'estimation de la demande en eau pour les chasses d'eau des toilettes donne 520 401,6Litres /an ce qui est plus petit que l'estimation du volume de récupération de l'eau de pluie (553 311 Litres /an).

VI.3.4.Dimensionnement du réservoir de captage (méthode graphique) :

Comme le stockage revient cher, il est indispensable de calculer précisément les besoins en eau pour éviter des dépenses inutiles. La méthode graphique d'estimation du réservoir de captage utilisée ci-après comprend trois étapes citées ci- dessous :

- Tracez un graphique en barres de l'écoulement moyen mensuel du bâtiment dans un lieu donné. Ajoutez une ligne pour la demande par mois.
- Tracez un graphique cumulatif de l'écoulement du toit, en faisant la somme des totaux mensuels de l'écoulement.
- Ajoutez une ligne pointillée indiquant l'utilisation de l'eau cumulée (eau retirée ou demande en eau) [25]

Pour la région de Kfour où se trouver le bâtiment, les précipitations mensuelles moyennes sont citées dans le tableau ci-dessous. L'écoulement mensuel moyen est calculé en multipliant la précipitation moyenne mensuelle par 90% de la surface de captage. (90% est le pourcentage d'écoulement ou bien le coefficient d'écoulement déjà expliqué en 3.1.) [28]

Mois	Précipitation moyenne (m/mois)	Surface de captage (m ²)	Écoulement moyen (m ³ /mois)
Janvier	0,193	690	119,853
Février	0,158	690	98,118
Mars	0,099	690	61,479
Avril	0,054	690	33,534
Mai	0,021	690	13,041
Juin	0,003	690	1,863
Juillet	0	690	0
Aout	0,001	690	0,621
Septembre	0,007	690	4,347
Octobre	0,050	690	31,05
Novembre	0,124	690	77,004
Décembre	0,181	690	112,401

Tableau VI-1: Précipitations et écoulements mensuels moyens de l'eau de pluie

Les résultats peuvent être représentés graphiquement dans le graphe suivant:

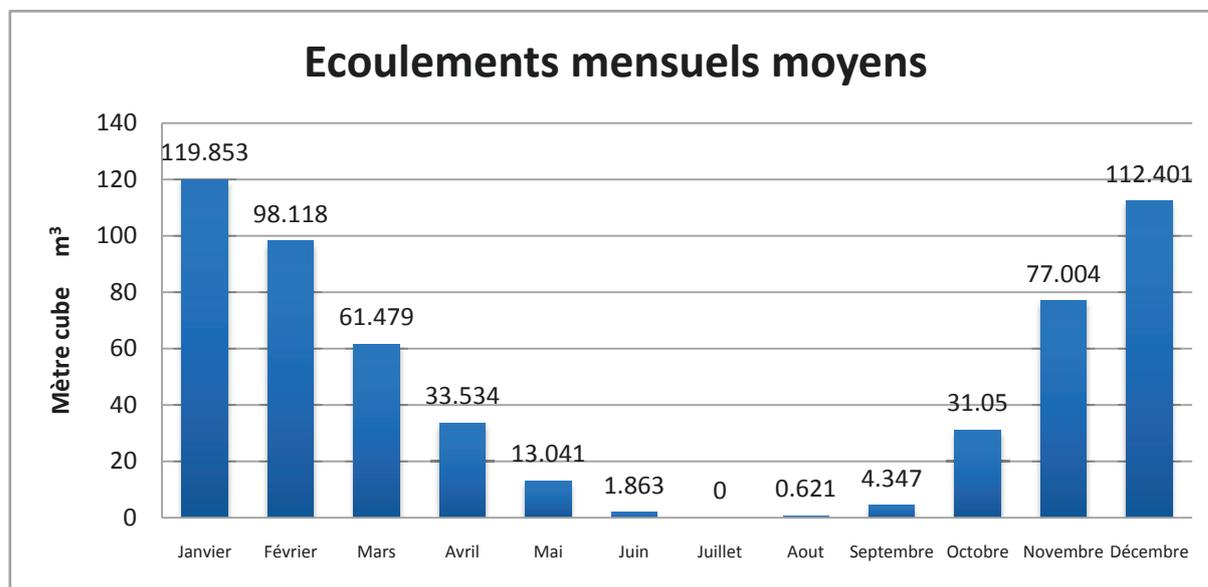


Figure VI-3: Graphe en bâtons des écoulements mensuels moyens du toit

Les demandes mensuelles en eau pour les chasses d'eau des toilettes sont représentées dans le tableau ci-dessous:

Mois	Demandes mensuelle en eau (m ³ /mois)
Janvier	57,6792
Février	52,344
Mars	55,7676
Avril	41,8824
Mai	59,5908
Juin	45,7056
Juillet	15,624
Aout	15,624
Septembre	15,120
Octobre	59,5908
Novembre	57,1752
Décembre	44,298

Tableau VI-2: Demandes mensuelles en eau pour les chasses d'eau des toilettes du bâtiment

Le tableau suivant groupe la demande mensuelle cumulée en eau ainsi que l'écoulement mensuel moyen cumulé de l'eau de pluie:

Mois	Écoulement mensuel moyen cumulé (m ³)	Demande mensuelle cumulée d'eau (m ³)
Janvier	119,853	57,6792
Février	217,971	110,0232
Mars	279,45	165,7908
Avril	312,984	207,6732
Mai	326,025	267,264
Juin	327,888	312,9696
Juillet	327,888	328,5936
Aout	328,509	344,2176
Septembre	332,856	359,3376
Octobre	363,906	418,9284
Novembre	440,91	476,1036
Décembre	553,311	520,4016

Tableau VI-3: La demande et l'écoulement mensuel moyen cumulé de l'eau

L'écoulement total annuel est 553,311 m³ tandis que la demande annuelle est de 520,4016 m³. Alors un stockage résiduel d'environ 33 m³ reste dans le réservoir au début de la saison humide. Les résultats peuvent être représentés graphiquement dans le graphe suivant. Le graphe en bâtons représente l'écoulement mensuel cumulé augmenté de 32 m³ et la courbe représente la demande mensuelle cumulée en eau:

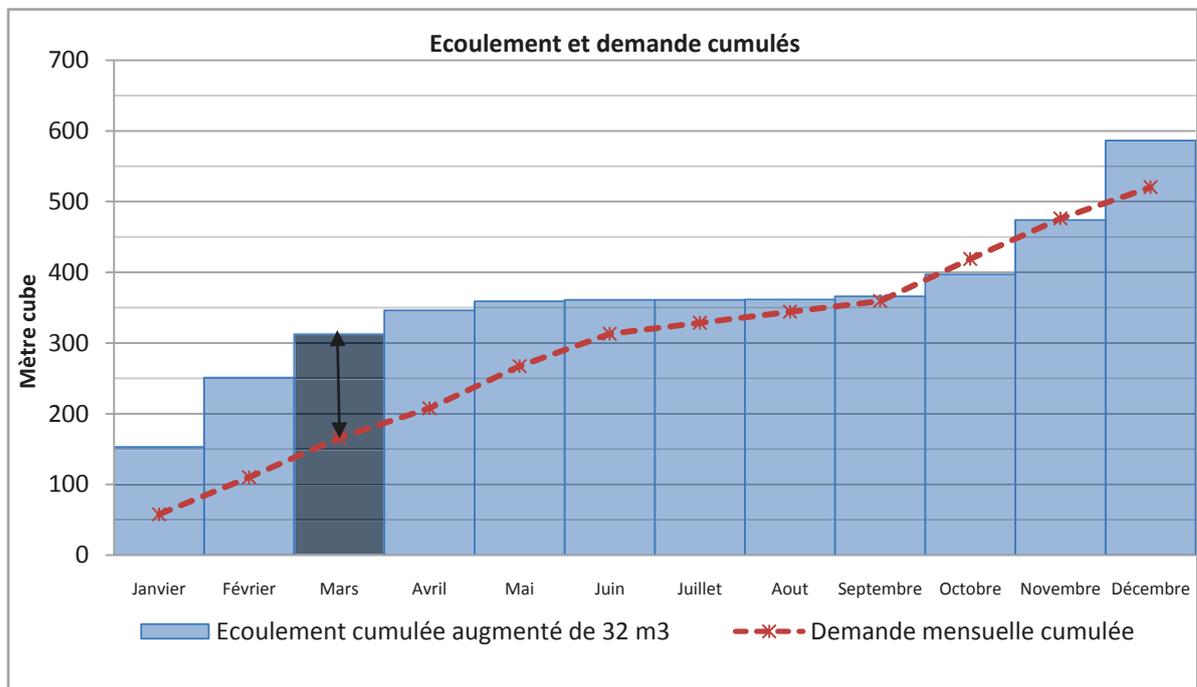


Figure VI-4: Graphe de l'écoulement et la demande cumulés en eau

Le graphe ci-dessus montre la détermination de la taille du réservoir. Il prend en compte le cumul d'arrivée et de sortie d'eau de la citerne de stockage. La capacité requise correspond au plus grand surplus d'eau restant après consommation (le plus grand écart entre les deux courbes). Dans le cas du bâtiment, le surplus d'eau a lieu en mois de Mars. Le volume du stockage doit être:

$$\begin{aligned}
\text{Volume de stockage} &= \text{Ecoulement cumulé augmenté de } 32 \text{ m}^3 \text{ au mois de Mars} - \text{Demande} \\
&\quad \text{cumulée au mois de Mars} \\
&= 312,45 \text{ m}^3 - 165,7908 \text{ m}^3 \\
&= 146,6592 \text{ m}^3 \\
&\approx 147 \text{ m}^3
\end{aligned}$$

VI.3.5. Filtration de l'eau de pluie:

Les systèmes de filtration utilisés pour les chasses d'eau des toilettes ne permettent pas de rendre l'eau potable, ni son usage pour l'hygiène corporelle. Les deux réseaux, eau de ville et eau de pluie, doivent être totalement séparés et les robinets doivent porter un pictogramme "eau non potable". Si l'eau de pluie vient à manquer, le groupe de pompage doit basculer sur l'eau de ville avec un dispositif de déconnexion physique aux normes pour empêcher tout retour d'eau dans le réseau d'eau potable. Pour obtenir une eau de bonne qualité pour usage dans les chasses-eau des toilettes, il faut prévoir :

- une crapaudine ou un bout de grillage en haut de chaque descente de gouttière
- un dispositif de filtration accessible en amont de la cuve avec tamis inox 10 à 0,5 mm
- une cuve accessible pour un nettoyage intégral
- un système de trop-plein avec clapet anti-retour
- une arrivée d'eau noyée avec dispositif anti-remous pour éviter de remuer les fins dépôts
- un tuyau de soutirage équipé d'une crépine filtrante et d'un flotteur pour de capter l'eau sous la surface, là où elle est la plus propre
- un système de pompage automatique et de mise sous pression (3 bars) précédé d'un filtre 50 microns (0,05 mm)

VI.3.5. Volume de la citerne sur le toit :

L'eau de pluie captée et filtrée sera envoyée vers une citerne localisée sur le toit afin d'alimenter les chasses d'eau des toilettes du bâtiment. Le volume de la citerne doit être dimensionné d'une manière à recouvrir la moitié de la demande en eau des chasses d'eau des toilettes du bâtiment. Le calcul du volume de la citerne au toit va se baser sur la demande journalière maximale en eau pour le bâtiment, où les élèves ainsi que les sœurs âgées sont présents dans le bâtiment. Le besoin journalier maximal estimé pour le bâtiment se calcul de la manière suivante:

$$\begin{aligned}
\text{Besoin journalier maximal} &= (531 \times 0,4 \times 9 \text{ L}) + (28 \times 3 \times 6\text{L}) \\
&= 3\,823,2 \text{ Litres}
\end{aligned}$$

Le volume de la citerne localisée sur le toit sera de :

$$\begin{aligned}
\text{Volume citerne} &= \text{Besoin journalier maximal} / 2 \\
&= 1911,6 \text{ Litres} (\approx 2000 \text{ Litres})
\end{aligned}$$

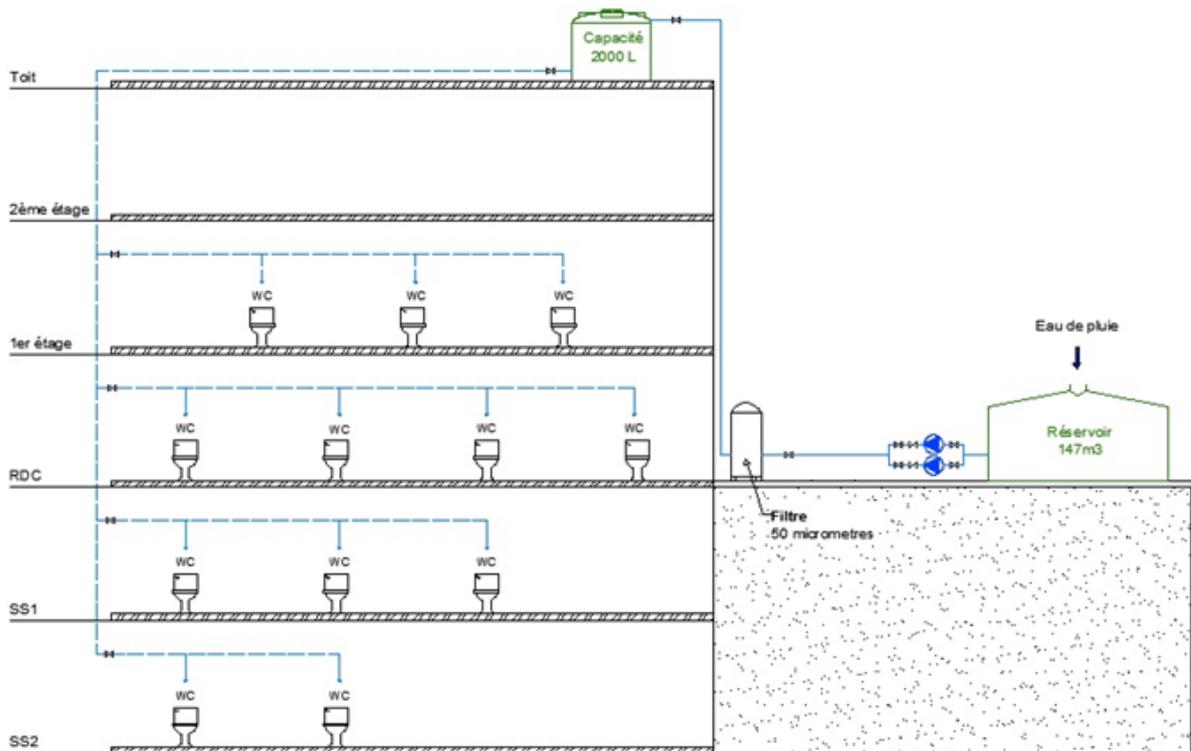


Figure VI-5: Diagramme de distribution de l'eau de pluie récupérée

VI.3.6. Réduction d'émission et économie en eau grâce au système de récupération d'eau de pluie :

Le système de récupération de l'eau de pluie peut couvrir tout le besoin en eau pour les chasses d'eau des toilettes sauf pour le mois d'Octobre où un volume de 22 m³ doit être recouvert par l'eau de la ville. La réduction approximative estimée en eau lors de l'introduction du système de récupération de l'eau de pluie est de 498,4016 m³ (≈ 498 000 Litres /an). Donc on peut économiser jusqu'à 498 000 Litres d'eau chaque année.

De plus, sachant que chaque litre d'eau rejeté émet 0,38 gramme de CO₂ lors de sa production et sa distribution, on obtient le taux d'émission réduit en équivalent Carbone par le calcul suivant: (NB: 1 Kg d'équivalent Carbone = 3,66 Kg d'équivalent CO₂ et 1 Litre d'eau ≈ 1 Kg de masse en eau)

$$\begin{aligned} \text{Réduction en émission} &= (498401,6 \text{ Kg} \times 0,00038) : 3,66 \text{ d'équivalent Carbone} \\ &\approx 52 \text{ Kg d'équivalent Carbone /an} \end{aligned}$$

VI.4. Mécanisme de chasse d'eau double flux:

Le réservoir des toilettes consacrées pour l'école a une capacité de 9 Litres et est équipé d'un système traditionnel de chasse d'eau à un seul flux. Lors de l'usage de ces toilettes, l'utilisateur verse le volume total de l'eau présent dans le réservoir pour les déchets liquides ainsi que solides.

De même pour les toilettes consacrées à la maison de retraite, la capacité du réservoir étant de 6 Litres, équipé d'un système traditionnel de chasse d'eau aussi à simple flux. Ce type de mécanisme ainsi que le réservoir de 9 Litres, mènent à un grand gaspillage d'eau. La figure suivante montre un schéma d'un système traditionnel de chasse d'eau présent dans le bâtiment.

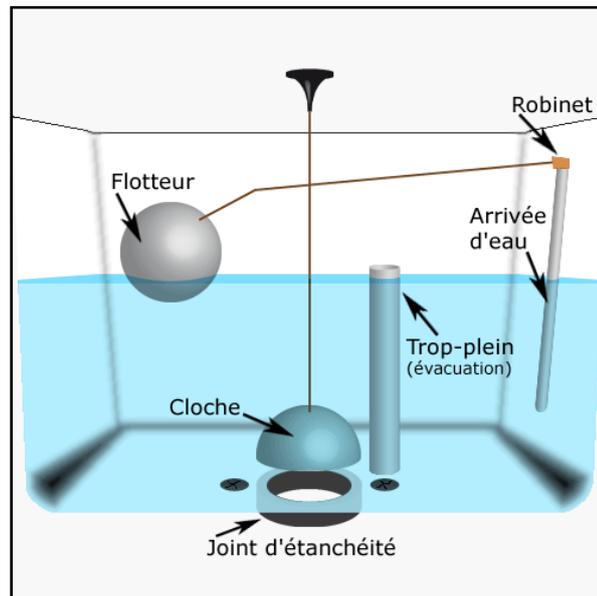


Figure VI-6: Système de chasse d'eau traditionnel

On propose, pour économiser au maximum l'eau dans le bâtiment, de remplacer les mécanismes traditionnels des réservoirs des toilettes à simple flux par système double chasse qui permet de libérer deux quantités d'eau différentes, selon ce qu'il y a à évacuer.

Plusieurs modèles existent et peuvent remplacer les anciens systèmes sans faire aucune modification au réservoir. Les chasses d'eau réservées à l'école seront remplacées par une chasse d'eau à double flux 9L/4,5L réglable. Cela signifie que le grand bouton d'évacuation de 9 Litres peut se régler jusqu'à 6 Litres tandis que le petit bouton d'évacuation (4,5 Litres) se règle jusqu'à 3 Litres.

Pour les chasses d'eau réservées à la maison de retraite, on les remplace par le système chasse d'eau à double flux 6L/3L. La figure suivante montre un schéma d'une chasse d'eau à double flux [24]:

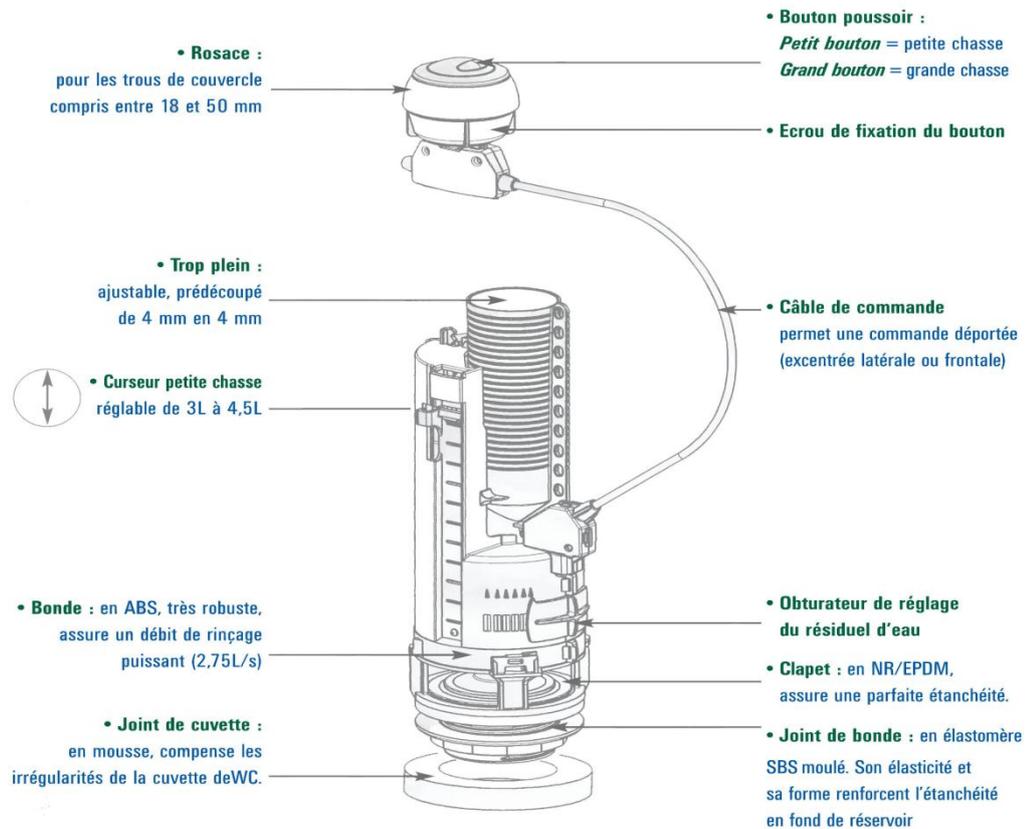


Figure VI-7: Chasse d'eau a double flux réglable

VI.5. Une économie d'eau supplémentaire:

L'importance de l'eau pour la vie et comme composant de l'écosystème mondial n'est plus à démontrer. Cette ressource qui répond aux besoins fondamentaux de l'homme est un élément-clé du développement. Il faut alors adopter sans plus tarder les petits gestes quotidiens mais également les innovations technologiques qui visent à en préserver la qualité et à en réduire la consommation. En effet 600 litres d'eau sont perdus à travers une chasse d'eau et 120 litres d'eau sont gaspillés par un robinet qui fuit pendant une journée.

Pour une économie d'eau supplémentaire à celle créée par le remplacement des chasses d'eau traditionnelles, le robinet ancien de remplissage du réservoir devra être remplacé par un robinet flotteur à ouverture différée. Le robinet flotteur à ouverture différée prévient la perte d'eau qui se produit habituellement lorsque le robinet flotteur commence à remplir le réservoir alors que le mécanisme de chasse est encore ouvert. Il retarde alors le remplissage du réservoir.

Avec un niveau d'eau réglable, le flotteur à ouverture différée peut remplacer tout genre de flotteur présent dans le bâtiment. (Dans les réservoirs de capacité 9 Litres., le flotteur sera réglé à un volume de 6 Litres). Voici une figure qui montre le principe de fonctionnement d'un flotteur à ouverture différée.[24]

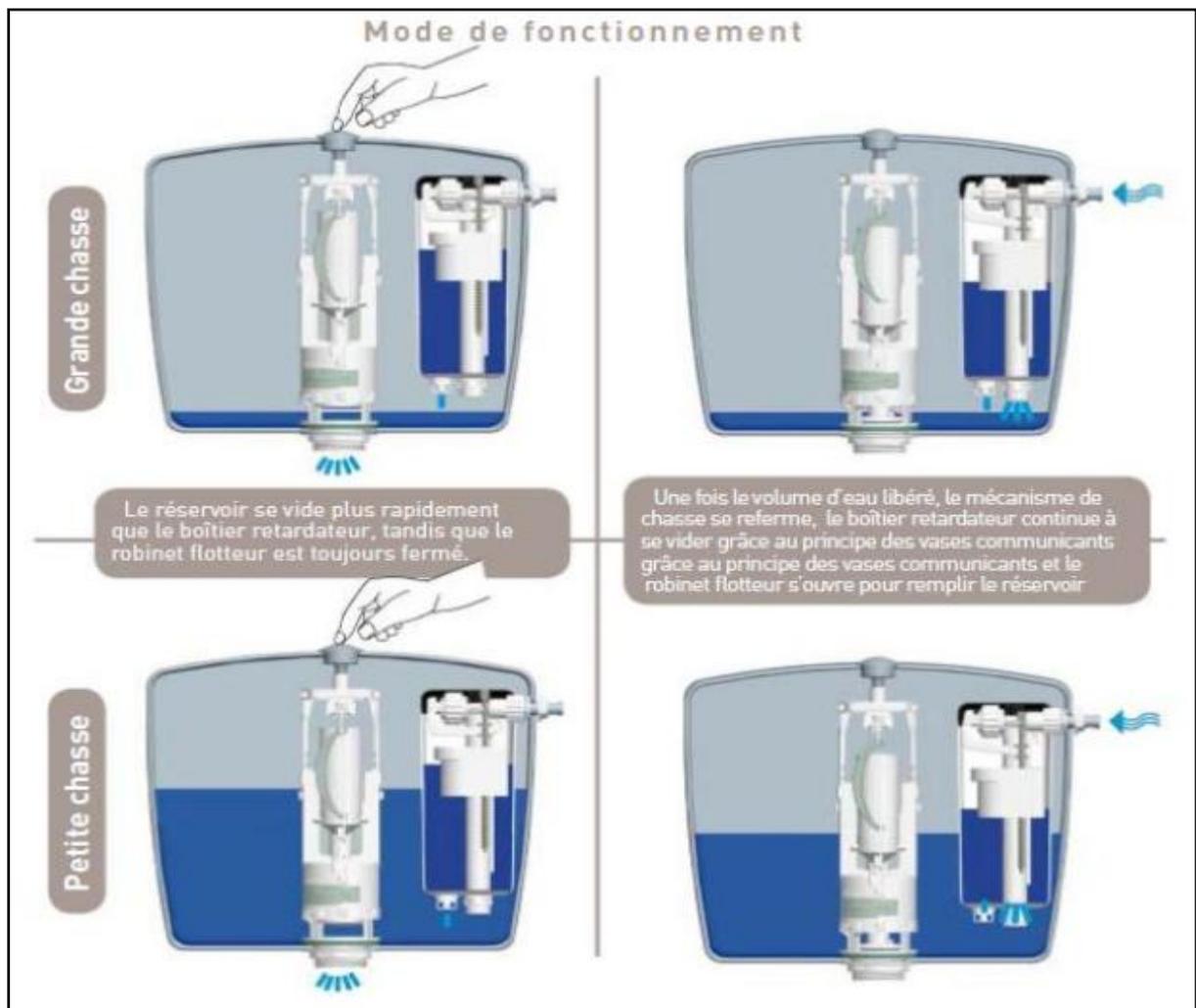


Figure VI-8: Mode de fonctionnement d'un flotteur à ouverture différée.

VI.6. Economie en eau après introduction d'un mécanisme de chasse d'eau à double flux couplé à un flotteur à ouverture différée:

Les réservoirs des toilettes consacrées à l'école auront une capacité de remplissage maximale de 6 Litres après réglage du flotteur et du robinet flottant. Le personnel (sœurs, élèves et employées) dans le bâtiment suivra une session sur l'importance de l'économie en eau et sur la méthode de fonctionnement des boutons de la chasse d'eau à double flux.

On prendra en considération que la moitié de l'usage des toilettes du bâtiment sont à l'origine des déchets liquides et que le flotteur à ouverture différée économisera 10% d'eau utilisée.

L'économie d'eau annuelle pour les toilettes de l'école est de :

$$\begin{aligned} \text{Economie école} &= (531 \times 0,4 : 2 \times 3\text{Litre} \times 176) + (531 \times 0,4 : 2 \times 3 \text{ Litres} \times 176) + 10 \% \text{ de } (531 \\ &\quad \times 0,4 \times 176 \times 9 \text{ L}) \\ &= 145791,36 \text{ Litres/an} \end{aligned}$$

L'économie en eau annuelle pour les toilettes de la maison de retraite est de:

$$\begin{aligned} \text{Economie retraite} &= (28 \times 3 : 2 \times 3 \text{ Litres} \times 365) + 10\% \text{ de } (28 \times 3 \times 365 \times 6\text{L}) \\ &= 64\,386 \text{ Litres/an} \end{aligned}$$

L'économie totale annuelle en eau lors du remplacement du système mécanique des toilettes est de :

$$\begin{aligned} \text{Economie totale système} &= \text{Economie école} + \text{Economie retraite} \\ &= 210\,177,36 \text{ Litres/an} \end{aligned}$$

La demande annuelle en eau pour les toilettes du bâtiment fonctionnant sur le système mécanique traditionnel d'eau était de 520,4016 m³. Cette demande devient 310,22424 m³ lors du remplacement du système traditionnel par le double flux avec robinet à ouverture différée (520,4016 m³ - 210,17736 m³). Le pourcentage de réduction est de :

$$\begin{aligned} \text{Réduction pourcentage} &= (210,17736 \text{ m}^3 / 520,4016 \text{ m}^3) \times 100\% \\ &= 40,38\% \end{aligned}$$

A cause de cette économie en eau, la quantité de l'eau économisée peut être utilisée dans l'arrosage du jardin.

VI.7. Coût du remplacement des flotteurs et des chasses d'eau traditionnels:

Le prix moyen d'une chasse d'eau à double flux couplée à un robinet à ouverture différée est de 60 euros. On a besoin de 20 systèmes (chasse + robinet) pour remplacer les systèmes anciens dans les 20 toilettes du bâtiment. Le coût total du remplacement est de 1200 € d'après le calcul suivant:

$$\begin{aligned} \text{Coût} &= 20 \times 60 \text{ €} \\ &= 1200 \text{ €} \end{aligned}$$

On peut conclure que pour une petite somme de 1200 € on peut économiser d'environ 210177 Litres d'eau chaque année.

Le ratio de la réduction en eau journalière grâce au nouveau système des toilettes est de :

$$\begin{aligned} \text{Ratio réduction} &= 210\,177 \text{ Litres} / 365 \\ &= 576 \text{ Litres/ jour} \end{aligned}$$

VI.8. Estimation des doses d'arrosage:

Le bâtiment est semi entouré par un jardin de surface 250 m². L'estimation des doses d'arrosage sera calculée par l'équation suivante d'après " California Department of Water Resources":

$$\text{HW} = \text{LA} \times \text{ET} \times \text{PF} \times 0.62$$

Où: LA = La surface du jardin en pieds carrés (ft²)

HW = Estimation de l'eau de pluie nécessaire en gallons /semaine

ET = Evapotranspiration en pouces/semaine (in/week)

PF = Facteur des plantes

0.62 = Facteur de conversion du pouces/semaine au gallons/semaine

NB: Évapotranspiration est la quantité d'eau perdue par évaporation à partir du sol et par transpiration de la plante.

La surface du jardin à arroser est de 250 m² (2691 ft²). L'évapotranspiration pour la région de Kfour est de 2 pouces/semaines et le facteur des plantes est de 0,8. La relation écrite ci-dessus nous donne :

$$HW = 2691 \text{ ft}^2 \times 2 \text{ in/week} \times 0,8 \times 0,62$$

$$HW = 2,669.472 \text{ galons/semaine}$$

$$HW \approx 10105 \text{ Litres/semaine}$$

La demande en eau pour arroser la totalité du jardin est de 10105 Litres par semaine. Ce jardin est arrosé 14 jours par mois (2 semaines) alors le volume de l'eau mensuel pour l'arrosage du jardin sera de 20210 Litres par mois (20,21 m³). Ce jardin sera arrosé seulement 9 mois par an (sauf pour l'hiver).

VI.9. Dimensionnement du nouveau réservoir de captage:

Le tableau suivant groupe la demande mensuelle cumulée en eau pour les toilettes à chasse-eau double flux couplées à des robinets différés, pour les machines à lave-linge, pour l'arrosage du jardin ainsi que la demande totale mensuelle cumulée.

Mois	Écoulement moyen cumulé (m ³)	Demande cumulée pour toilettes (m ³)	Demande cumulée pour arrosage (m ³)	Demande totale cumulée (m ³)
Janvier	119,853	34,600	0	34,600
Février	217,971	66,01392	20,21	86,22392
Mars	279,45	99,47448	40,42	139,89448
Avril	312,984	124,60392	60,63	185,23392
Mai	326,025	160,60392	80,84	241,44392
Juin	327,888	187,78176	101,05	288,83176
Juillet	327,888	197,15616	121,26	318,41616
Aout	328,509	206,53056	141,47	348,00056
Septembre	332,856	215,60256	161,68	377,29704
Octobre	363,906	251,35704	181,89	433,24704
Novembre	440,91	285,66216	181,89	467,55216
Décembre	553,311	310,22424	181,89	492,11424

Tableau VI-3: Les demandes cumulées pour toilettes et arrosage

L'écoulement total annuel est 553,311 m³ tandis que la demande annuelle est de 492,11424 m³. Alors un stockage résiduel d'environ 61 m³ reste dans le réservoir au début de la saison humide.

Les résultats peuvent être représentés graphiquement dans le graphe suivant.

Le graphe en bâtons représente l'écoulement mensuel cumulé augmenté de 61 m³ et la courbe représente la demande mensuelle cumulée en eau:

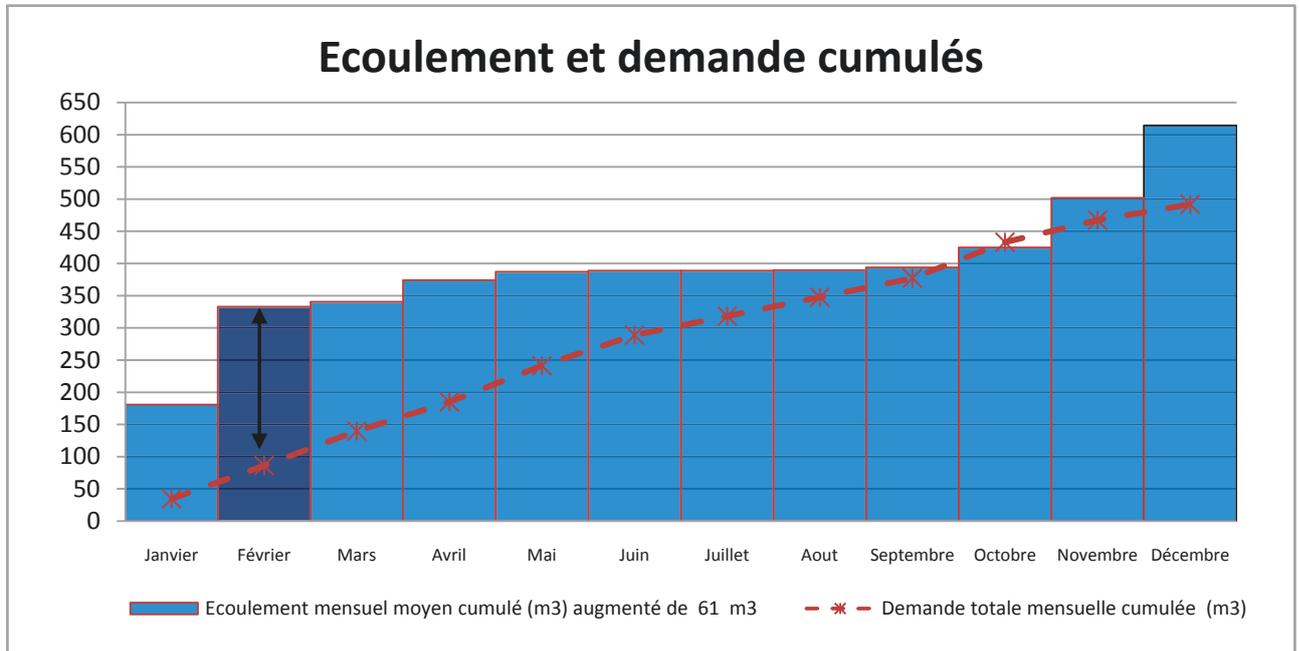


Figure VI-9: Graphe de l'écoulement et la nouvelle demande cumulée en eau

Le plus grand surplus d'eau restant après consommation (le plus grand écart entre les deux courbes) est dans le mois de Février, alors le volume du stockage doit être:

$$\begin{aligned}
 \text{Volume de stockage} &= \text{Ecoulement cumulé augmenté de } 61 \text{ m}^3 \text{ au mois de Février} - \text{Demande} \\
 &\quad \text{cumulée au mois de Février} \\
 &= 332,971\text{m}^3 - 86,22392\text{m}^3 \\
 &= 246.02316\text{m}^3 \\
 &\approx 246 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

VI.10. Nouveau volume de la citerne sur le toit:

La demande journalière maximale en eau pour les toilettes est de :

$$\begin{aligned}
 \text{Demande journalière} &= (35754,48 \text{ Litre}/30) \\
 &\approx 1191,816\text{Litres}
 \end{aligned}$$

Alors la capacité de la citerne sur le toit sera celle de la moitié de la demande journalière maximale, donc de 596 Litres approximativement. On choisira une citerne de capacité 500 Litres.

VI.11. Economie et réduction totale annuelle:

Le nouveau système de récupération d'eau de pluie ainsi que le remplacement des systèmes mécaniques des toilettes par des chasses d'eau à doubles flux couplées à des robinets flotteurs à ouverture différée économisent un volume total annuel en eau de $912,46896 \text{ m}^3$ (520 401,6 Litres + 181890 Litres + 210177,36 Litres).

Cette quantité d'eau économisée réduit les émissions en équivalent Carbone liées à la distribution et la production de cette eau. La réduction totale en émissions est calculée de la manière suivante:

(NB: 1 Kg d'équivalent Carbone = 3,66 Kg d'équivalent CO₂)

(1 Litre d'eau \approx 1 Kg de masse en eau)

Réduction annuelle totale en émission = $(912468,96 \text{ Kg/an} \times 0,00038) : 3,66 \text{ Kg d'équivalent Carbone}$
 $\approx 95 \text{ Kg d'équivalent Carbone/an}$

VI.12. Calcul de la station de pompage:

On souhaite remplir le réservoir situé au toit en une demi-heure. Sa capacité est de 500 Litres donc le débit de refoulement de la pompe doit être égale à:

$$\begin{aligned} \text{Débit} &= \text{Capacité citerne} / \text{Durée de remplissage} \\ &= 500 \text{ Litres} / 0,5 \text{ heure} \\ &= 1 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Les tuyaux seront de type acier. On fixera la perte de charge linéaire dans les tuyaux à 20 mm CE/m et en utilisant le graphe suivant d'après ASHRAE on trouve que le diamètre des tuyaux est de 1" (\approx 2,5cm).

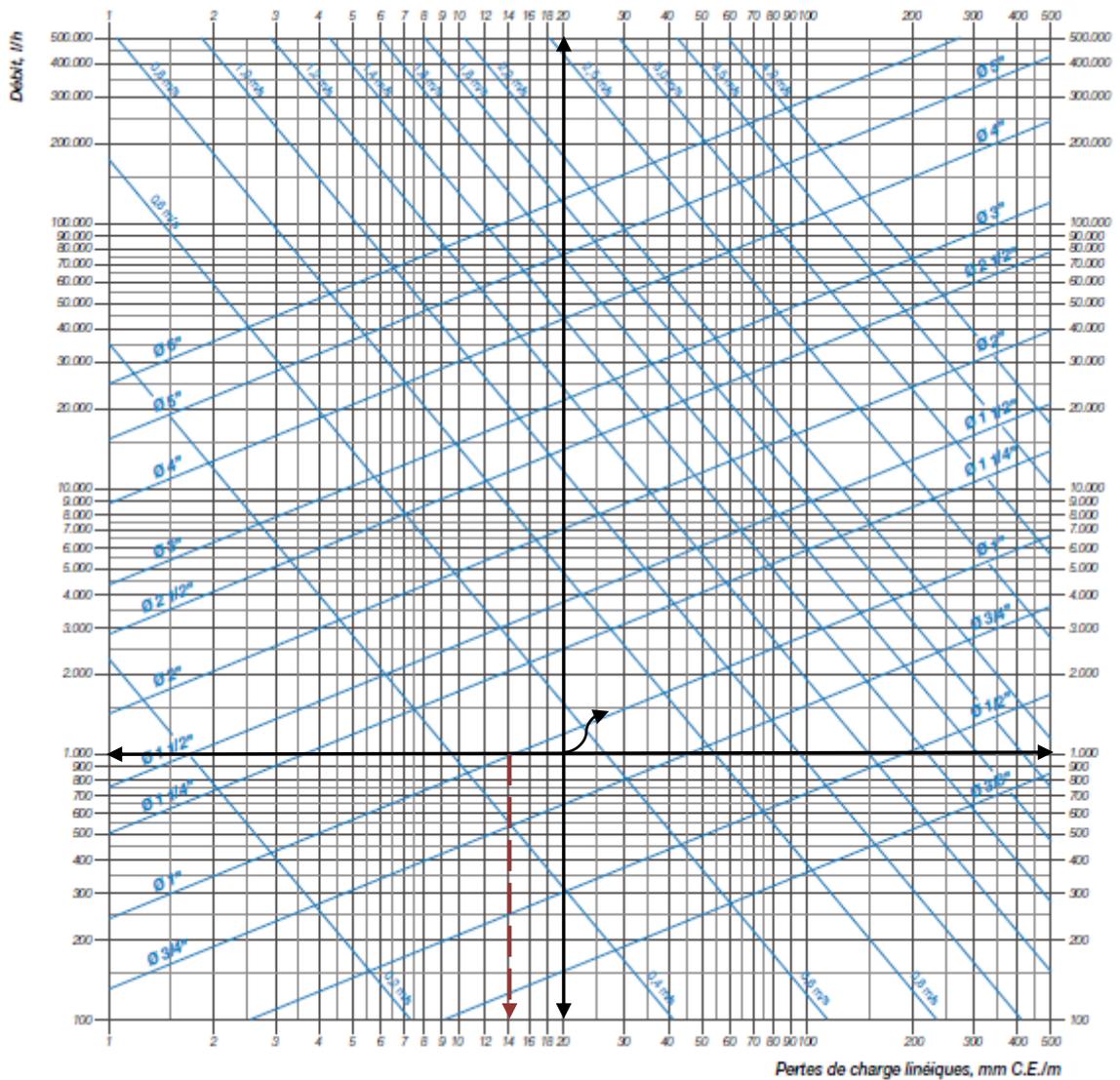


Figure VI-10: Abaque de dimensionnement pour tuyau en acier

Alors pour un débit de 1000 L/h et un diamètre de 1" par les tuyaux, la perte de charge linéaire sera de 14 mm CE/m (voir abaque ci-dessus). La longueur des tuyaux est de 30 mètres, alors la perte linéaire sera de :

$$\begin{aligned} \text{Perte de charge linéaire} &= 14 \text{ mm CE/m} \times 30 \text{ m} \\ &= 420 \text{ mm CE} \\ &= 0,42 \text{ m CE} \end{aligned}$$

La hauteur statique (différence entre le point bas et le point le plus haut) est de 21mètres.

Pour les pertes de charges singulières, on utilisera le tableau d'ASHRAE suivant.

	Nominal Pipe Size (inches)												
	½	¾	1	1¼	1½	2	2½	3	4	5	6	8	10
45° Elbow	0.8	0.9	1.3	1.7	2.2	2.8	3.3	4.0	5.5	6.6	8.0	11.0	13.2
90° Elbow standard	1.6	2.0	2.6	3.3	4.3	5.5	6.5	8.0	11.0	13.0	16.0	22.0	26.0
90° Elbow long	1.0	1.4	1.7	2.3	2.7	3.5	4.2	5.2	7.0	8.4	10.4	14.0	16.8
Gate valve open	0.7	0.9	1.0	1.5	1.8	2.3	2.8	3.2	4.5	6.0	7.0	9.0	12.0
Globe valve open	17	22	27	36	43	55	67	82	110	134	164	220	268
Angle valve	7	9	12	15	18	24							
Tee—side flow	3	4	5	7	9	12	14	17	22	28	34	44	56
Swing check valve	6	8	10	14	16	20	25	30	40	50	60	80	100
Tee—straight through flow	1.6	2.0	2.6	3.3	4.3	5.5	6.5	8.0	11.0	13.0	16.0	22.0	26.0
Radiator angle valve	3	6	8	10	13								
Diverting tee		20	14	11	12	14	14	14					
Flow check valve		27	42	60	63	83	104	125	126				
Air eliminator		2	3	4	5	7	8	13	15				
Boiler (typical)	5	7	9	11	13	17							

Tableau VI-4: Equivalence des accessoires de plomberie en pouce

Le tableau suivant illustre les étapes suivies pour calculer les pertes de charges singulières:

Accessoires	Nombre	Longueur équivalente (inch)	Totale longueur équivalente
90°Elbow standard	4	2,6	10,4
Tee straight flow	1	2,6	2,6
Tee - side flow	1	5	5
Flow check valve	1	42	42
Strainer	1	5,5	5,5
Gate valve open	4	1,0	4,0
Filtre 50 micromètre	1	354	354
Total			423,5

Tableau VI-5: Listes des accessoires et leurs longueurs équivalentes

Un total de 423,5pouces (10,7569 mètres) est obtenu pour la perte de charge singulière. Un facteur de sécurité de 10% sera appliquer sur le calcul de la perte par frottement .On trouve alors la hauteur manométrique de la pompe, en appliquant la formule suivante et en prenant en considération que la perte de charge à la sortie de l'eau dans la citerne du est de 3 mètres (pression résiduelle) :

$$\begin{aligned}
 \text{Hauteur manométrique} &= [\text{Hauteur statique} + \text{pression résiduelle} + \text{Perte par frottement}] \times 1,1 \\
 &= [21 \text{ m CE} + 3 \text{ m CE} + (30 \text{ m} + 10,7569 \text{ m}) \times 0,014 \text{ m CE/m}] \times 1,1 \\
 &= 27.02765626 \text{ m CE} \\
 &\approx 27 \text{ m CE.}
 \end{aligned}$$

Le choix de la pompe sera fait par le programme GRUNDFOX.

VII . Chapitre 7

La ventilation performante

VII.1.Introduction:

Dans le passé, la ventilation des habitations n'était pas un problème. Celles-ci comportaient en effet suffisamment de fentes et d'ouvertures qui assuraient l'aération. De nos jours, les projets de construction et de rénovation modernes cherchent à atteindre un niveau d'isolation maximal. Ceci empêche tout air de s'échapper sans un système de ventilation. Là où la chaleur ne peut sortir, l'air neuf, riche en oxygène ne peut entrer.

Le résultat : un climat intérieur humide, pauvre en oxygène et insalubre. Ceci entraîne des troubles de la santé, tels que des allergies, des maux de tête, la somnolence, et à terme la dégradation de votre habitation ou bâtiment.

VII.2.L'importance de la ventilation

On passe plus de 80 % de notre temps dans des lieux clos (habitat, travail, voiture). Or, plusieurs études scientifiques ont démontré que le niveau de pollution à l'intérieur des locaux était en moyenne de deux à cinq fois plus important qu'à l'extérieur. La ventilation facilite l'aération des locaux en favorisant le renouvellement de l'air du logement par l'évacuation de l'air vicié et le renouvellement de l'air intérieur, pour un plus grand confort. L'air circulant à travers le logement se trouve ainsi renouvelé toutes les 3 heures environ. De cette façon, les odeurs et les fumées sont évacuées et on limite l'humidité ainsi que les dégradations du logement liées à la condensation.

En renouvelant l'air qui assure l'alimentation des appareils de combustion, la ventilation contribue aussi à la sécurité des personnes face aux émanations de gaz toxiques. Lorsque l'air extérieur pénètre dans les locaux sans être filtré, il est porteur d'un ensemble de particules plus ou moins nocives pour l'organisme.

En respirant, on consomme l'air tout en le dégradant, notre présence et nos activités augmentant sa teneur en vapeur d'eau. Sans ventilation suffisante, le taux d'humidité croît donc automatiquement, entraînant des risques de condensation, de moisissures et de prolifération des acariens, voire, à terme, un risque de manque d'oxygène. L'humidité de l'air peut aussi provoquer de graves problèmes de santé chez les habitants.

D'autres types de pollutions intérieures nuisent à notre santé : les sources de pollution intérieure sont nombreuses et difficiles à éviter (aérosols et produits d'entretien, poussières, gaz carbonique, monoxyde de carbone, pesticides, bois aggloméré, ...). Certains polluants sont cancérigènes, allergènes ou provoquent de l'asthme.

VII.3.La qualité de l'air

En pratique, il apparaît que la qualité de l'air extérieur laisse souvent à désirer. Elle est parfois à la limite de l'acceptable, surtout dans des régions urbaines ou industrielles. La qualité de l'air nécessaire pour atteindre la notion de confort est subjective et dépend des circonstances, de la densité d'occupation et du type d'utilisation du bâtiment. Dans de nombreux cas, la qualité de l'air intérieur est également mauvaise ; tel est le cas dans les nombreux locaux où l'on fume. Depuis peu, les risques qu'impliquent le radon, l'asbeste et les formaldéhydes ont suscité une attention croissante. Les principaux polluants intérieurs proviennent du métabolisme, des activités des occupants et des émissions des matériaux sont :

- Le dioxyde de carbone CO₂ :

C'est un gaz produit par le métabolisme en fonction de l'activité. Le CO₂ ne constitue pas en soi un polluant détériorant la qualité de l'air, mais il donne une bonne mesure de la pollution de l'air due aux occupants (odeurs, vapeur d'eau, émanations biologiques...).

Généralement, le niveau de CO₂ doit être maintenu sous 1000 ppm (le niveau de CO₂ de l'air extérieur est de l'ordre de 350 à 400 ppm), ce qui équivaut plus ou moins à la limite à partir de laquelle les odeurs corporelles sont perçues par plus de 80 % des occupants d'un local.

- Les produits de combustion et du monoxyde de carbone CO :

Il est nécessaire d'estimer soigneusement les volumes d'éléments polluants produits et de s'assurer que l'aération soit suffisante pour maintenir les concentrations sous des limites acceptables. On ne peut tolérer que de très bas niveaux de CO : on spécifie parfois une valeur maximale de 0,02 % pour une exposition de 8 heures et de 0,1 % pour des expositions occasionnelles.

TABLE B-1 Comparison of Regulations and Guidelines Pertinent to Indoor Environments ^a							
(The user of any value in this table should take into account the purpose for which it was adopted and the means by which it was developed.)							
	Enforceable and/or Regulatory Levels			Non-Enforced Guidelines and Reference Levels			
	NAAQS/EPA (Ref. B-4)	OSHA (Ref. B-5)	MAK (Ref. B-2)	Canadian (Ref. B-8)	WHO/Europe (Ref. B-11)	NIOSH (Ref. B-13)	ACGIH (Ref. B-1)
Carbon dioxide		5000 ppm	5000 ppm 10,000 ppm [1 h]	3500 ppm [L]		5000 ppm 30,000 ppm [15 min]	5000 ppm 30,000 ppm [15 min]
Carbon monoxide ^e	9 ppm ^k 35 ppm [1 h] ^g	50 ppm	30 ppm 60 ppm [30 min]	11 ppm [8 h] 25 ppm [1 h]	90 ppm [15 min] 50 ppm [30 min] 25 ppm [1 h] 10 ppm [8 h]	35 ppm 200 ppm [C]	25 ppm
Formaldehyde ^h		0.75 ppm 2 ppm [15 min]	0.3 ppm 1 ppm ⁱ	0.1 ppm [L] 0.05 ppm [L] ^b	0.1 mg/m ³ (0.081 ppm) [30 min] ^p	0.016 ppm 0.1 ppm [15 min]	0.3 ppm [C]
Lead	1.5 µg/m ³ [3 months]	0.05 mg/m ³	0.1 mg/m ³ 1 mg/m ³ [30 min]	Minimize exposure	0.5 µg/m ³ [1 yr]	0.050 mg/m ³	0.05 mg/m ³
Nitrogen dioxide	0.05 ppm [1 yr]	5 ppm [C]	5 ppm 10 ppm [5 min]	0.05 ppm 0.25 ppm [1 h]	0.1 ppm [1 h] 0.02 ppm [1 yr]	1 ppm [15 min]	3 ppm 5 ppm [15 min]
Ozone	0.12 ppm [1 h] ^q 0.08 ppm	0.1 ppm	j	0.12 ppm [1 h]	0.064 ppm (120 µg/m ³) [8 h]	0.1 ppm [C]	0.05 ppm ^k 0.08 ppm ^l 0.1 ppm ^m 0.2 ppm ⁿ
Particles ^e <2.5 µm MMAD ^d	15 µg/m ³ [1 yr] ^o 65 µg/m ³ [24 h] ^o	5 mg/m ³	1.5 mg/m ³ for <4 µm	0.1 mg/m ³ [1 h] 0.040 mg/m ³ [L]			3 mg/m ³ [C]
Particles ^e <10 µm MMAD ^d	50 µg/m ³ [1 yr] ^o 150 µg/m ³ [24 h] ^o		4 mg/m ³				10 mg/m ³ [C]
Radon				800 Bq/m ³ [1 yr]			
Sulfur dioxide	0.03 ppm [1 yr] 0.14 ppm [24 h] ^g	5 ppm	0.5 ppm 1 ppm ⁱ	0.38 ppm [5 min] 0.019 ppm	0.048 ppm [24 h] 0.012 ppm [1 yr]	2 ppm 5 ppm [15 min]	2 ppm 5 ppm [15 min]
Total Particles ^e		15 mg/m ³					

Tableau VII-1: Concentrations maximales de contaminations dans un endroit fermé

La ventilation s'avère toujours le moyen le plus efficace pour obtenir une bonne qualité de l'air dans les bâtiments. Une mauvaise qualité de l'air intérieur peut se manifester sous la forme du "Syndrome des bâtiments malsains", en anglais "Sick Building Syndrome", dont les symptômes sont, entre autres : léthargie, mal de tête, manque de concentration, irritation des yeux et de la peau, etc.

Assurer une bonne qualité de l'air, c'est prévoir une ventilation capable de diluer les polluants émis dans le bâtiment jusqu'à une concentration jugée acceptable, c'est-à-dire ne provoquant ni malaises, ni problèmes de santé.

VII.4.L'humidité et les moisissures

Sous nos climats, l'air de tout local habité ou occupé contient plus de vapeur d'eau (en absolu) que l'air extérieur (la température intérieure étant supérieure à la température extérieure sur une grande partie de l'année), à moins qu'on intervienne en traitant l'air, car nos corps ainsi que nos activités dégagent de la vapeur d'eau. La production de vapeur par notre corps, qui expire de l'air humide et qui transpire, dépend de l'activité et de la température ambiante. Au repos, elle est de l'ordre de 50 g/h et, en activité, elle peut atteindre 1000 g/h dans une ambiance à température élevée. L'intérieur du bâtiment est donc comme un réservoir de chaleur et de vapeur d'eau, qui tendent à s'échapper vers l'extérieur au travers des parois extérieures.

Généralement, une température faible, combinée à un degré d'humidité élevé, augmente le risque de condensation superficielle et/ou interne à la paroi. La composition de l'enveloppe doit éviter les ponts

thermiques de sorte qu'en aucun endroit, on n'y rencontre des conditions de basse température qui, alliées à une forte teneur en vapeur d'eau, pourraient occasionner des dégradations.

En effet, l'hygroscopicité peut favoriser le développement de champignons, entraîner la dégradation de certains matériaux et, combinée au gel, l'éclatement des matériaux imprégnés. Dans le cadre du classement de leurs parois extérieures du point de vue hygrothermique, les bâtiments se subdivisent en fonction de la pression de vapeur de l'air intérieur, en se basant sur la pression annuelle moyenne p_i de la vapeur du climat intérieur (exprimée en pascals), comme repris dans le tableau ci-contre. Dans des conditions habituelles de confort, le taux courant d'humidité relative de l'air ambiant est préféré entre 30 et 70 %, pour des températures d'air entre 20 et 25° C.

Dans le cas d'un local humide et chaud (salle de bain, de douche, cuisine), la température élevée de l'air le rend capable de contenir potentiellement plus de vapeur d'eau qu'en d'autres espaces du bâtiment. En cas de paroi froide ou de pont thermique, des condensations importantes sont à craindre.

En matière d'humidité relative, il faut surtout veiller à évacuer l'humidité produite. La production de vapeur d'eau doit rester un pic et la ventilation doit permettre un retour à la normale : une ventilation permanente est préférable à une ventilation intense mais de courte durée.

VII.5.Le principe de fonctionnement de la ventilation

Le débit d'un fluide à travers un trou ou une ouverture est proportionnel à la surface d'ouverture et à la différence de pression maintenue de part et d'autre de l'orifice. Plus l'ouverture est grande, plus l'écoulement est important ; plus la différence de pression est élevée, plus le débit est élevé. Le débit d'écoulement, ou taux de renouvellement d'air, ne dépend pas seulement des dimensions et du trajet de fuite, mais aussi de l'ampleur et de la direction de la pression exercée.

VII.5.1.Le plan de pression neutre

La notion de plan de pression neutre (PPN) aide à comprendre l'effet de l'installation de ventilation sur la répartition de la pression de l'air. Elle s'apparente au phénomène de tirage, selon lequel l'air froid pénètre par la partie basse d'un bâtiment et l'air chaud s'évacue vers l'extérieur par la cheminée. L'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment amène un écart de pression. Le PPN correspond à la hauteur à laquelle la pression est la même à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, lorsqu'il n'y a pas ou presque pas de vent. Au-dessous du PPN, l'écart de pression fait pénétrer l'air dans le bâtiment (dépression) ; au-dessus, il l'expulse au dehors (surpression).

Dans un bâtiment sans cheminée, ni ventilateur d'extraction, le vent fait pénétrer de l'air à travers la façade exposée et en fait sortir à travers la façade sous le vent. Le PPN se situe donc à peu près à mi-hauteur. C'est la ligne de démarcation entre la partie de l'enveloppe du bâtiment où il y a infiltration d'air et celle où il y a extraction d'air. Son emplacement exact dépend de la répartition des fuites d'air dans l'enveloppe du bâtiment.

Dans une maison avec cheminée, le tirage de celle-ci tend à diminuer la pression intérieure du bâtiment, de sorte que, dans la plupart des circonstances, la circulation d'air se fait vers l'intérieur à travers tous les murs et vers le bas à travers le plafond. L'air qui s'infiltré dans la maison finit par être évacué avec les produits de combustion par la cheminée. La cheminée constitue un point de fuite supplémentaire dans la partie supérieure de l'enveloppe. Le PPN se trouve alors plus haut, et l'infiltration d'air ainsi que le taux global de fuite d'air augmentent.

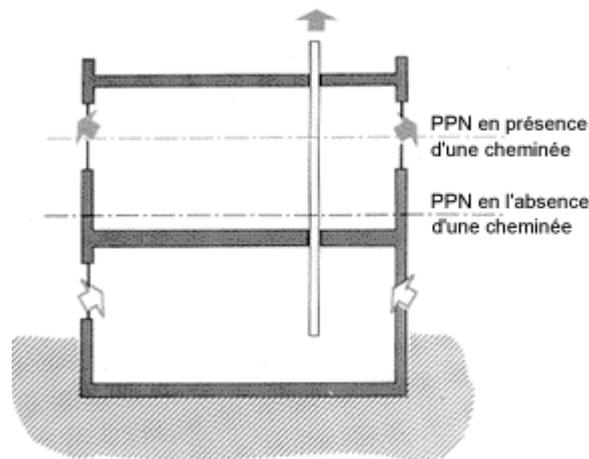


Figure VII-2: Plan de pression neutre

Autrement dit, plus l'emplacement du PPN est haut, plus la partie de l'enveloppe où s'exercent les pressions causant les extractions d'air est réduite. L'évacuation d'air par la cheminée comble l'écart qui existe entre les infiltrations et les extractions d'air se faisant par les autres ouvertures de l'enveloppe du bâtiment.

VII.5.2. Les différents types d'installation de ventilation

Dans un premier temps, il faut choisir le type d'installation de ventilation (naturelle, simple flux, double flux) en fonction non seulement des contraintes imposées par le type de bâtiment, le climat, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe extérieure et l'environnement, mais aussi de celles induites par le coût et la performance de l'installation, l'énergie d'utilisation et la facilité de maintenance. Les composants d'une installation (ventilateurs, conduits, diffuseurs, bouches d'amenées d'air, extracteurs d'air, grilles, etc.) doivent répondre à ces contraintes, mais assurer un débit d'air permettant de satisfaire la réglementation et d'atteindre le confort. Des mesures et des calculs

permettent de vérifier si les composants d'une installation de ventilation sont adaptés aux besoins. Par ces méthodes, diverses estimations sont possibles, comme par exemple :

- le flux d'air induit par infiltration et ventilation
- l'influence des paramètres tels que le climat, l'étanchéité à l'air
- le taux et la direction du flux d'air
- le flux d'air entre deux pièces
- la concentration des polluants
- l'impact sur l'énergie.

VII.5.2.1. La ventilation naturelle :

Dans la ventilation naturelle, l'air se déplace grâce aux différences de pression qui existent entre les façades du bâtiment et grâce à la différence de masse volumique de l'air en fonction de sa température. Des amenées d'air (grilles et vasisas réglables) doivent être disposées en façade pour les locaux dits "secs" (bureaux, séjours,...) ; des ouvertures de transfert (détalonnage des portes ou grilles) permettent le passage de l'air vers les locaux dits "humides" (sanitaires, cuisine,...). Dans ces derniers, l'air est évacué grâce à des conduits verticaux débouchant en toiture. Il est sous-entendu que les espaces de passage (couloirs, halls, escaliers, etc.) sont suffisamment ventilés par l'air qui provient des locaux "secs" et transite par les ouvertures de transfert pour gagner les locaux "humides". Il n'y a donc pas besoin d'amenée d'air ou d'évacuation d'air spécifiques dans les espaces de circulation des maisons unifamiliales. Par contre, les dispositifs de ventilation sont obligatoires dans les cages d'escalier et couloirs communs des immeubles d'habitation collective, où ils sont considérés comme locaux spéciaux. Dans un bâtiment, la sécurité incendie est assurée par un compartimentage.

La ventilation et la distribution de l'air dans les locaux au moyen de gaines doivent être conçues de telle sorte que :

- la fumée et les flammes ne puissent se propager dans tout le bâtiment.
- les éléments de construction traversés par ces gaines conservent leur résistance au feu.

Il est intéressant d'adapter le fonctionnement de la ventilation en fonction des besoins (en période d'occupation, la nuit, le weekend). Il existe plusieurs possibilités de réguler la ventilation naturelle : bouches réglables, grilles hygroréglables, grilles commandées électriquement en fonction d'un horaire, par exemple.

Les avantages de la ventilation naturelle

- Aucune consommation électrique n'est demandée.
- Les éléments de ventilation naturelle demandent très peu d'entretien et ne comprennent pas de ventilateurs bruyants.

Les inconvénients de la ventilation naturelle

- La performance de la ventilation n'est pas garantie
- L'air neuf n'est pas filtré.
- Les grilles d'amenée d'air peuvent laisser filtrer les bruits extérieurs.
- Les grilles d'ouvertures peuvent engendrer un inconfort.
- Les ouvertures entre les locaux favorisent le passage des bruits gênants.
- Les évacuations doivent se faire par des conduits verticaux
- Les débouchés des conduits d'extraction verticaux doivent se situer près du faîtage.
- Les ouvertures dans les façades sont parfois peu esthétiques.

VII.5.2.2.La ventilation mécanique :

Pour une ventilation mécanique, on peut rencontrer plusieurs types comme:

- La ventilation à alimentation mécanique (simple alimentation)
- La ventilation à extraction mécanique (simple extraction)
- La ventilation à alimentation et extraction mécaniques

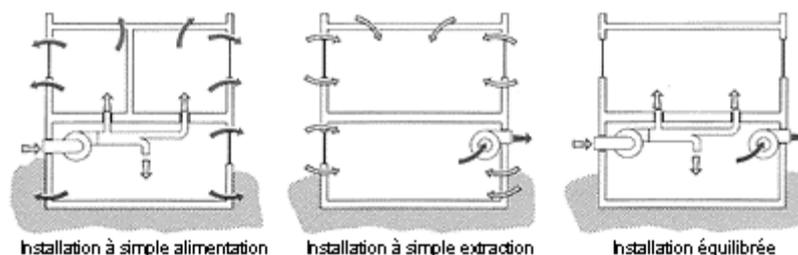


Figure VII-3: Types de ventilation mécanique

Pour la ventilation à alimentation et extraction mécaniques plusieurs compléments à ce type d'installation sont possibles comme:

- une récupération de chaleur par échange entre l'air extrait et l'air neuf ;
- un traitement de l'air en température et en humidité pour assurer un confort optimal ;
- un recyclage partiel de l'air, dans le cas où l'air de ventilation assure également le chauffage ou le refroidissement des locaux.

Lorsque ce type d'installation de ventilation fonctionne dans un environnement en équilibre (c'est-à-dire lorsque l'alimentation est égale à l'extraction), il n'influence aucunement la répartition naturelle des pressions qui s'exercent sur le bâtiment, ni le plan de pression neutre qui n'est ni abaissé, ni relevé. Toutefois, en raison du milieu ambiant, l'installation fonctionne souvent en léger déséquilibre.

VII.5.2.3. Ventilation avec récupération d'énergie :

Une installation double flux n'a pas besoin d'échangeur de chaleur pour bien fonctionner ; la seule fonction de cet appareil est d'économiser de l'énergie en fournissant une partie de celle qui est nécessaire pour réchauffer l'air de ventilation par récupération de la chaleur contenue dans l'air extrait.

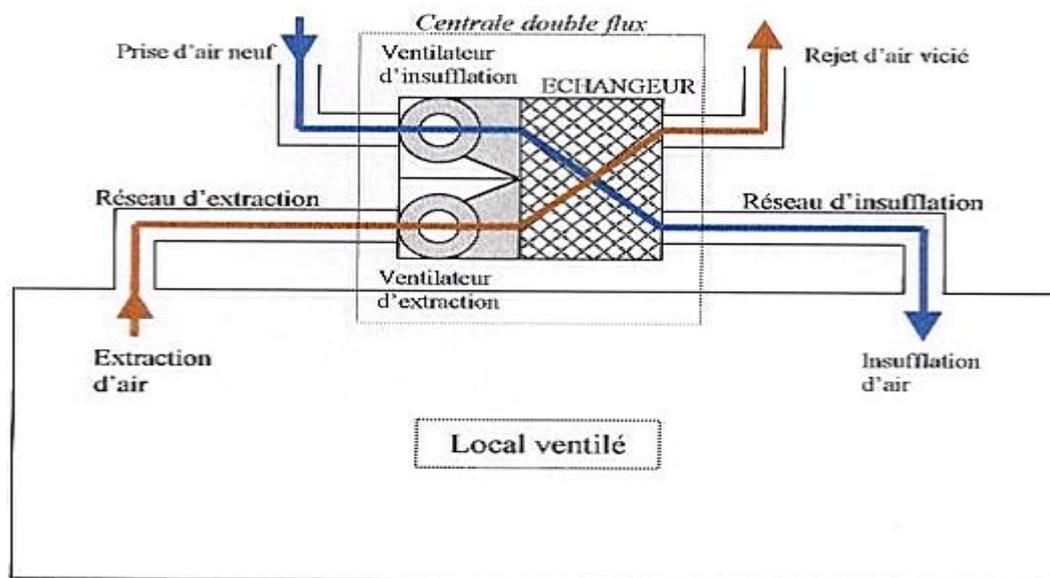


Figure VII-4: Ventilation double flux avec échangeur

L'air vicié et l'air neuf sont entraînés par deux ventilateurs, au lieu d'un pour les systèmes simple flux, entre deux flux d'air on dispose d'un échangeur de calories, assurant la récupération de 60 à 70 % des déperditions dues au renouvellement d'air, soit une économie de chauffage d'environ 15 % par rapport à un simple flux classique.

Des bouches de sorties doivent être notamment installées dans les pièces humides. En effet, chaque personne produit environ 1 à 1.5 litre d'eau par jour, qui se répand sous forme de vapeur dans l'habitation. Avant d'opter pour l'utilisation d'un ventilateur à récupération de chaleur, il faut donc prendre en considération le coût d'installation de cet appareil et la quantité d'énergie qu'il permettra d'économiser. Lorsqu'un échangeur de chaleur est utilisé, l'air d'alimentation doit toujours être acheminé vers le même point central que l'air extrait, de sorte que la chaleur puisse se transmettre de l'un à l'autre.

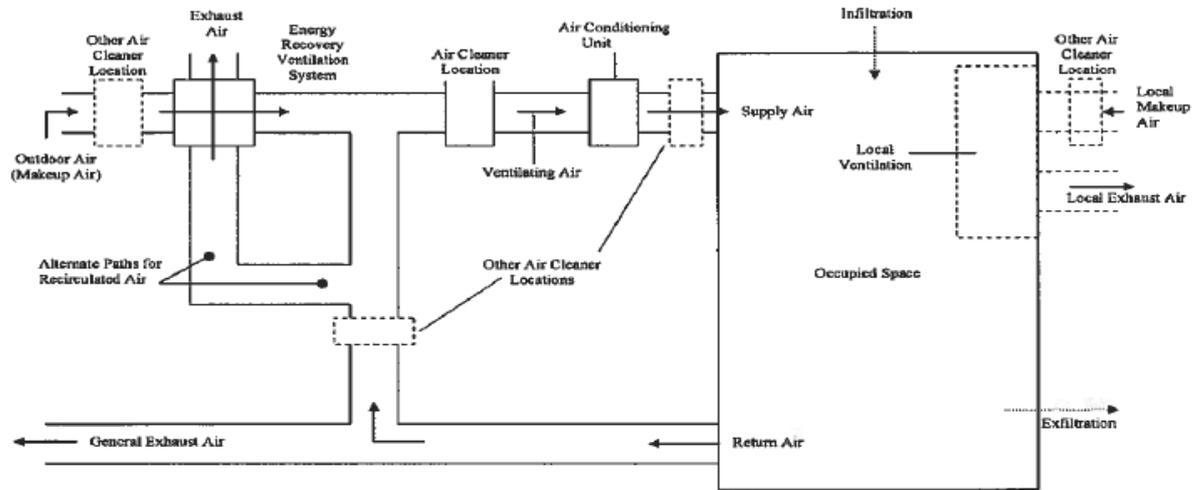


Figure VII-5: Système de ventilation

Les avantages de la ventilation à alimentation et à extraction mécanique

- C'est un système très maîtrisable. Quelles que soient les conditions climatiques extérieures, il est possible de :
 - capter l'air extérieur à un endroit "sain"
 - filtrer l'air
 - contrôler les débits de pulsion et d'extraction
 - mettre à volonté certains locaux en surpression ou en dépression s'il y a pulsion et extraction dans chaque local.
- Elle peut assurer un taux de renouvellement d'air élevé. Par conséquent, on observe :
 - une diminution du niveau d'humidité à l'intérieur ;
 - une atténuation de la concentration de polluants.
 - une diminution du danger de refoulement des gaz de combustion.
- Elle induit une très bonne distribution de l'air.
- Elle se prête bien à une commande automatique, ce qui facilite la gestion des débits.
- Elle permet la récupération de chaleur dans l'air extrait pour préchauffer l'air neuf.
- Aucune ouverture dans l'enveloppe extérieure du bâtiment n'est nécessaire, sauf la prise d'air centralisée et le refoulement.

Les inconvénients de la ventilation à alimentation et à extraction mécanique

- C'est un système coûteux.
- Elle demande de la place dans les locaux techniques.
- Elle est la plus compliquée des installations de ventilation.
- L'enveloppe extérieure du bâtiment nécessite une bonne étanchéité à l'air.
- La pulsion de l'air dans les locaux peut engendrer du bruit

- Elle a besoin d'énergie électrique.
- Elle nécessite une maintenance régulière (inspection et nettoyage).

VII.6. Dimensionnement du système de ventilation pour le bâtiment:

VII.6.1.Débit d'air nouveau minimal:

La quantité minimale d'air nouveau sera calculée en utilisant ASHRAE Standards 62.1-2007 "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality". La formule suivante sera utilisée pour calculer le débit d'air neuf nécessaire pour chaque espace:

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_a \times A_z$$

Où: A_z = Superficie du sol de la zone d'occupation (m^2)

P_z = Nombre maximal d'occupants dans la zone

R_p = Débit d'air extérieur requis pour une personne

R_a = Débit d'air extérieur requis pour une unité d'aire

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate R_p		Area Outdoor Air Rate R_a		Notes	Default Values		Air Class	
						Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
	cfm/person	L/s/person	cfm/ft ²	L/s-m ²		#/1000 ft ² or #/100 m ²	cfm/person		L/s-person
Correctional Facilities									
Cell	5	2.5	0.12	0.6		25	10	4.9	2
Dayroom	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5	1
Guard stations	5	2.5	0.06	0.3		15	9	4.5	1
Booking/waiting	7.5	3.8	0.06	0.3		50	9	4.4	2
Educational Facilities									
Daycare (through age 4)	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Daycare sickroom	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	3
Classrooms (ages 5-8)	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Classrooms (age 9 plus)	10	5	0.12	0.6		35	13	6.7	1
Lecture classroom	7.5	3.8	0.06	0.3		65	8	4.3	1
Lecture hall (fixed seats)	7.5	3.8	0.06	0.3		150	8	4.0	1
Art classroom	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Science laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
University/college laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Wood/metal shop	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Computer lab	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Media center	10	5	0.12	0.6	A	25	15	7.4	1
Music/theater/dance	10	5	0.06	0.3		35	12	5.9	1
Multi-use assembly	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1	1

Tableau VII-1: Taux de ventilation minimaux dans les zones de respiration

Le tableau suivant groupe le taux de ventilation minimal pour chaque type d'espace dans le bâtiment étudié :

Espace	Débit d'air extérieur requis pour une personne (R_p) (L/s)	Débit d'air extérieur requis pour une unité d'aire (R_a) (L/s.m ²)
Classe maternelle	5	0,9
Classe (âges 5 ⁺)	5	0,6
Par informatique	5	0,6
Théâtre	5	0,6
Salle à manger	3.8	0.9
Corridor	0	0.3
Chambre	2.5	0.3
Salle de lavage	2.5	0.6
Entrée principale	2.5	0.3
Salon	2.5	0.3
Bureau	2.5	0.3
Toilettes	0	0

Tableau VII-2: Taux de ventilation minimaux dans le bâtiment

On constate que l'air est jamais injecté dans les toilettes pour créer un espace en dépression par rapport à l'entourage afin de prévenir les odeurs d'infiltrer dans les couloirs.

La pression négative créée au niveau des toilettes doit être compensée dans les couloirs pour avoir le bâtiment entier sous pression positive par rapport à l'extérieur pour empêcher les infiltrations et par la suite minimiser le taux de refroidissement (ou de chauffage).

Pour une classe de type de surface 40 m² et d'occupation de 30 élèves, on obtient le taux du débit d'air neuf nécessaire en appliquant la formule suivante:

$$\begin{aligned}
 V_{bz} &= R_p \times P_z + R_a \times A_z \\
 &= 5 \text{ L/s. personne} \times 30 \text{ personnes} + 0.6 \text{ L/s.m}^2 \times 40 \text{ m}^2 \\
 &= 150 \text{ L/s} + 24 \text{ L/s} \\
 &= 174 \text{ L/s}
 \end{aligned}$$

VII.6.2. Débit minimal d'air évacué:

Le débit minimal d'air évacué sera calculer en utilisant le tableau 6-4 de ASHRAE 62.1-2007 "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality".

Le tableau suivant groupe quelques taux d'évacuation d'air nécessaires dans le bâtiment suivant le type d'espace:

Espace	Débit d'air (L/s.m ²)	Débit d'air (L/s. unité)
Chambre avec toilettes	5	
Cuisine commercial	3.5	
Toilettes- public		35
Classe	2.5	

Tableau VII-3: Débit d'évacuation dans le bâtiment

TABLE 6-4 Minimum Exhaust Rates

Occupancy Category	Exhaust Rate, cfm/unit	Exhaust Rate, cfm/ft ²	Notes	Exhaust Rate, L/s-unit	Exhaust Rate, L/s-m ²	Air Class
Arenas	—	0.50	B	—	—	1
Art classrooms	—	0.70		—	3.5	2
Auto repair rooms	—	1.50	A	—	7.5	2
Barber shops	—	0.50		—	2.5	2
Beauty and nail salons	—	0.60		—	3.0	2
Cells with toilet	—	1.00		—	5.0	2
Copy, printing rooms	—	0.50		—	2.5	2
Darkrooms	—	1.00		—	5.0	2
Educational science laboratories	—	1.00		—	5.0	2
Janitor closets, trash rooms, recycling	—	1.00		—	5.0	3
Kitchenettes	—	0.30		—	1.5	2
Kitchens—commercial	—	0.70		—	3.5	2
Locker/dressing rooms	—	0.25		—	1.25	2
Locker rooms	—	0.50		—	2.5	2
Paint spray booths	—	—	F	—	—	4
Parking garages	—	0.75	C	—	3.7	2
Pet shops (animal areas)	—	0.90		—	4.5	2
Refrigerating machinery rooms	—	—	F	—	—	3
Residential kitchens	50/100	—	G	25/50	—	2
Soiled laundry storage rooms	—	1.00	F	—	5.0	3
Storage rooms, chemical	—	1.50	F	—	7.5	4
Toilets—private	25/50	—	E	12.5/25	—	2
Toilets—public	50/70	—	D	25/35	—	2
Woodwork shop/classrooms	—	0.50		—	2.5	2

Tableau VII-4 :Débit d'air minimal évacué

Pour une classe type de surface 40 m² et d'occupation de 30 élèves, on obtient un débit d'air extrait minimal égale à:

$$\begin{aligned} \text{Débit d'air extrait minimal} &= 2,5 \text{ L/s. personne} \times 30 \text{ personnes} \\ &= 75 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Le débit d'air neuf minimal, indiquée par ASHRAE sera respecter et le débit d'air extrait sera calculer d'une manière à avoir la classe sous pression positive. Le débit d'air extrait ne doit jamais descendre au-delà de 75 L/s dans le cas de cette classe type étudiée.

VII.6.3. Infiltration à travers les fenêtres et les portes:

La méthode utilisée pour estimer l'infiltration de l'air à travers les portes et les fenêtres est la "Crack method". Cette méthode s'appuie sur la longueur des fissures (ouvertures) présentes dans les fenêtres et les portes pour estimer le débit d'air infiltré à travers. La formule est la suivante:

$$\text{Infiltration} = \text{Coefficient d'infiltration} \times \text{Somme des longueurs des fissures}$$

TABLE 44—INFILTRATION THRU WINDOWS AND DOORS—CRACK METHOD—SUMMER—WINTER*

TABLE 44a—DOUBLE HUNG WINDOWS—UNLOCKED ON WINDWARD SIDE

TYPE OF DOUBLE HUNG WINDOW	CFM PER LINEAR FOOT OF CRACK											
	Wind Velocity—Mph											
	5		10		15		20		25		30	
	No W-Strip	W-Strip	No W-Strip	W-Strip	No W-Strip	W-Strip	No W-Strip	W-Strip	No W-Strip	W-Strip	No W-Strip	W-Strip
Wood Sash												
Average Window	.12	.07	.35	.22	.65	.40	.98	.60	1.33	.82	1.73	1.05
Poorly Fitted Window	.45	.10	1.15	.32	1.85	.57	2.60	.85	3.30	1.18	4.20	1.53
Poorly Fitted—with Storm Sash	.23	.05	.57	.16	.93	.29	1.30	.43	1.60	.59	2.10	.76
Metal Sash	.33	.10	.78	.32	1.23	.53	1.73	.77	2.3	1.00	2.8	1.27

TABLE 44b—CASEMENT TYPE WINDOWS ON WINDWARD SIDE

TYPE OF CASEMENT WINDOW AND TYPICAL CRACK SIZE	CFM PER LINEAR FOOT OF CRACK						
	Wind Velocity—Mph						
	5	10	15	20	25	30	
Roll-up Section—Steel Sash							
Industrial Pivoted 1/4" crack	.87	1.80	2.9	4.1	5.1	6.2	
Architectural Projected 3/8" crack	.25	.60	1.03	1.43	1.86	2.3	
Architectural Projected 3/4" crack	.33	.87	1.47	1.93	2.5	3.0	
Residential Casement 3/8" crack	.10	.30	.55	.78	1.00	1.23	
Residential Casement 3/2" crack	.23	.53	.87	1.27	1.67	2.10	
Heavy Casement Section Projected 3/4" crack	.05	.17	.30	.43	.58	.80	
Heavy Casement Section Projected 3/2" crack	.13	.40	.63	.90	1.20	1.53	
Hollow Metal—Vertically Pivoted	.50	1.46	2.40	3.10	3.70	4.00	

Tableau VII-5 : Infiltration par type de fissures et fenêtres

La classe type étudiée dans ce cas-là possède deux fenêtres intégrées sur le mur Est, de type vitrage triple battant (triple casement windows) comme l'indique la figure suivante. La longueur des fenêtres étant de 1,2 mètres et largeur de 0,46 mètre. La vitesse de l'air extérieur est de 6,7 m/s (15Mph) et l'épaisseur des fissures est estimée de 1/32" (0,8 millimètres). D'après le tableau d'ASHRAE ci-dessous, on constate que le taux d'infiltration pour une fenêtre de ce type du bâtiment est de 0,87 CFM/ft fissures.

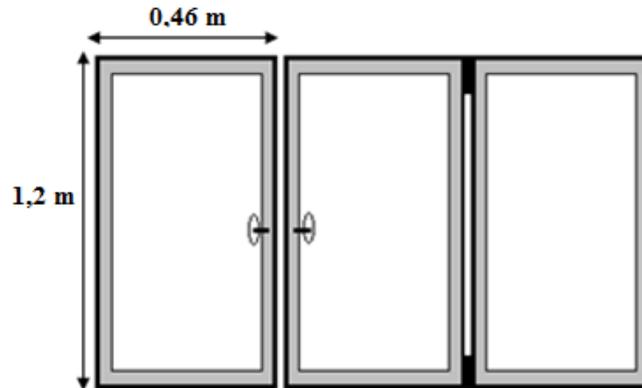


Figure VII-6: Schéma d'une fenêtre du bâtiment

Le calcul de l'infiltration à travers cette fenêtre est le suivant:

$$\begin{aligned}
 \text{Infiltration fenêtre} &= 0,87 \text{ CFM/ft} \times [(1,2\text{m} \times 4) + (0,46\text{m} \times 6)] \times 3,28083989\text{ft/m} \\
 &= 21,5787 \text{ CFM} \\
 &\approx 10 \text{ L/s}
 \end{aligned}$$

Pour la porte, la longueur est de 2,1 mètres et la largeur de 0,9 mètre. Une infiltration de 40 L/s sera prise pour la porte à cause de la fréquence d'utilisation de cette porte et qui attend 80 personnes/heure (déplacements des professeurs et des élèves durant les périodes).

Le débit de l'air évacué de la classe type sera de :

$$\begin{aligned} \text{Débit d'air évacué} &= 174 \text{ L/s} - 40 \text{ L/s} - 10 \text{ L/s} + 10 \text{ L/s} \\ &= 114 \text{ L/s} \end{aligned}$$

Ce débit est supérieur à la valeur minimale posée par ASHRAE et qui a une valeur de 75 L/s d'après le calcul déjà fait en haut. La classe est maintenant sous pression positive par rapport à son entourage.

La figure suivante montre une classe sous pression positive par rapport à son entourage.

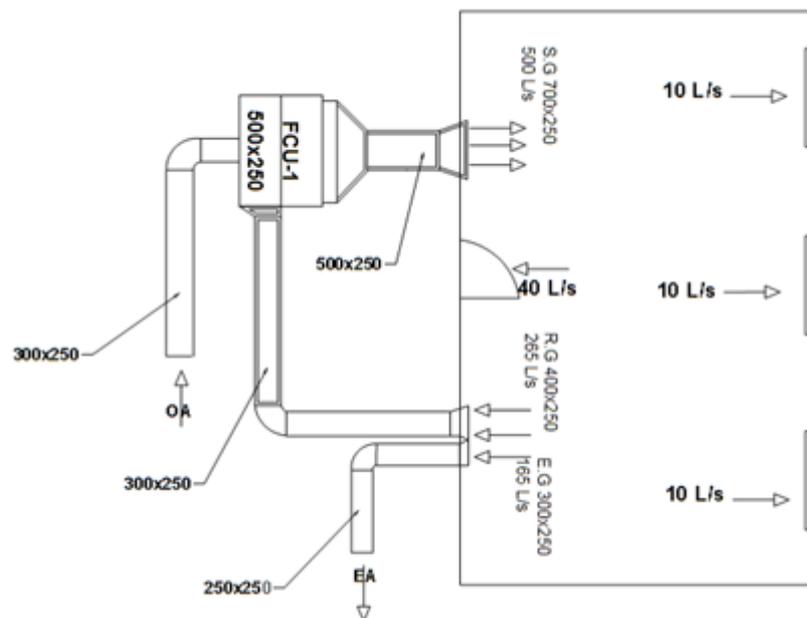


Figure VII-7: Ventilation d'une classe

VII.6.4. Roues de récupération d'énergie:

L'air évacué sera dirigé à travers les gaines vers un caisson d'échange à double flux avec une roue de récupération de chaleur localisée sur le toit.

Le tableau suivant illustre le débit d'air nouveau ainsi que le débit d'air évacué nécessaire pour chaque étage:

Étage	Débit d'air nouveau (L/s)	Débit d'air évacué (L/s)
SS2	733	533
SS1	3191	2390
RDC	2130	1430
1 ^{er} étage	1303	910
2 ^{ème} étage	2697	1910
Total	10054	7173

Tableau VII-6: Débits d'air par étage

On introduira deux roues de récupération d'énergie qui seront localisées sur le toit. La première roue traitera l'air extrait et l'air nouveau de l'école (SS2 - RDC - 2^{ème} étage) et la deuxième roue servira l'échange pour le reste du bâtiment (SS1 - 1^{er} étage).

Le tableau suivant illustre les débits d'air entrants et sortants pour chaque roue de récupération.

	Première roue (Pour SS2 , RDC et 2 ^{ème} étage)	Deuxième roue (Pour SS1 et 1 ^{er} étage)
Air nouveau (L/s)	5560	3873
Air évacué (L/s)	4494	3300

Tableau VII-7: Débits d'air par roue

Le programme "ECOFRESH" sera utilisé pour calculer le taux de récupération de chaque roue en hiver et en été. Voici les résultats obtenues pour chaque roue.

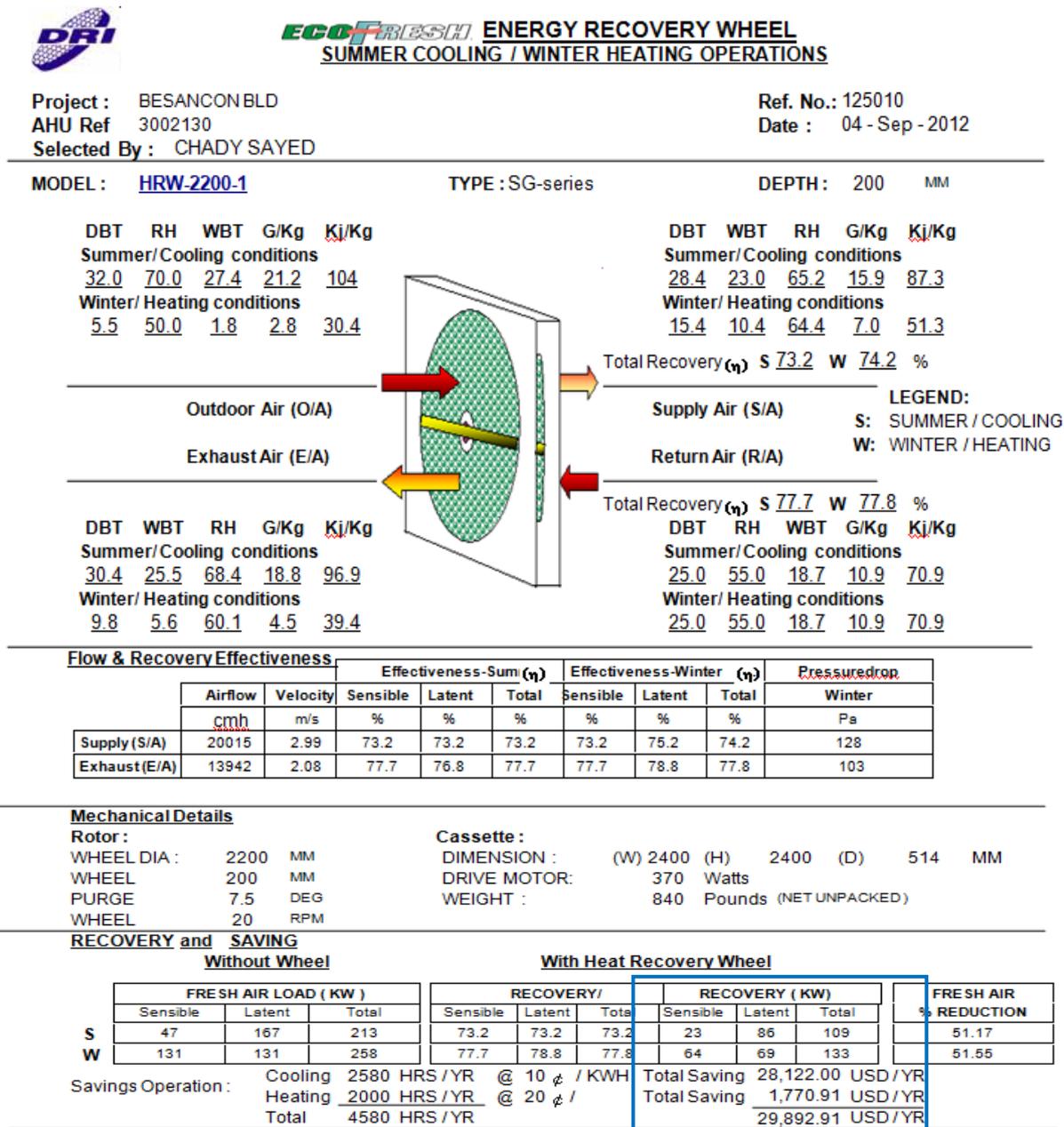


Figure VII-8: Résultat pour la première roue

On constate que la première roue récupère 109 KW en été et 133 KW en hiver et peut économiser jusqu'à 30 000 \$ chaque année pour un fonctionnement de 4580 heures /année.



ECO-FRESH ENERGY RECOVERY WHEEL
SUMMER COOLING / WINTER HEATING OPERATIONS

Project : BESANCONBLD
 AHU Ref 3002130
 Selected By : CHADY SAYED

Ref No.: 125012
 Date : 04 - Sep - 2012

MODEL : **HRW-1900-1** TYPE : SG-series DEPTH : 200 MM

DBT RH WBT G/Kg K _i /Kg Summer/Cooling conditions 32.0 70.0 27.4 21.2 104 Winter/ Heating conditions 5.5 50.0 1.8 2.8 30.4		DBT WBT RH G/Kg K _i /Kg Summer/Cooling conditions 28.3 22.8 64.8 15.7 86.7 Winter/ Heating conditions 15.8 10.8 64.6 7.2 52.2
		Total Recovery (η) S <u>71.9</u> W <u>73.2</u> %
DBT WBT RH G/Kg K _i /Kg Summer/Cooling conditions 30.3 25.3 68.5 18.7 96.3 Winter/ Heating conditions 10.2 5.9 59.8 4.6 39.9		Total Recovery (η) S <u>75.9</u> W <u>76.6</u> % DBT RH WBT G/Kg K _i /Kg Summer/Cooling conditions 25.0 55.0 18.7 10.9 70.9 Winter/ Heating conditions 25.0 55.0 18.7 10.9 70.9

LEGEND:
 S: SUMMER / COOLING
 W: WINTER / HEATING

	Flow & Recovery Effectiveness								
	Airflow	Velocity	Effectiveness-Sum (η)			Effectiveness-Winter (η)			Pressure drop
			Sensible	Latent	Total	Sensible	Latent	Total	Winter
	cmh	m/s	%	%	%	%	%	%	Pa
Supply (S/A)	16180	3.24	72.2	71.9	71.9	72.2	74.2	73.2	137
Exhaust (E/A)	11880	2.38	75.9	75.6	75.9	75.9	77.6	76.6	111

Mechanical Details

Rotor :	WHEEL DIA : 1900 MM	Cassette :	DIMENSION : (W) 2030 (H) 2030 (D) 463 MM
	WHEEL 200 MM		DRIVE MOTOR: 370 Watts
	PURGE 7.5 DEG		WEIGHT : 426 Pounds (NET UNPACKED)
	WHEEL 20 RPM		

RECOVERY and SAVING

	Without Wheel			With Heat Recovery Wheel			FRESH AIR % REDUCTION
	Sensible	Latent	Total	Sensible	Latent	Total	
S	38	135	172	72.2	71.9	71.9	52.91
W	106	106	208	75.9	77.6	76.6	53.85

Savings Operation :
 Cooling 2580 HRS /YR @ 10 ¢ / KWH Total Saving 23,478.00 USD /YR
 Heating 2000 HRS /YR @ 20 ¢ / Total Saving 1,491.29 USD /YR
 Total 4580 HRS /YR 24,969.29 USD /YR

FigureVII-9: Résultats pour la deuxième roue

On constate que la deuxième roue récupère 91 KW en été et 112 KW en hiver et peut économiser jusqu'à 25 000 \$ chaque année pour un fonctionnement de 4580 heures /année.

Alors les deux roues de récupération d'énergie peuvent récupérer un total de 200 KW pour le refroidissement dans l'été et 235 KW pour le chauffage en hivers.

Le système de climatisation fonctionne 2580 heures/an aux mois chauds et 2000 heures/an aux mois froids. La puissance totale récupérée durant l'année pour les deux roues est calculée de la manière suivante: Puissance récupérée = 2580 h/an x 200 KW + 2000 h/an x 235 KW
 = 516 000 KWh/an + 470 000 KWh/an
 = 986000KWh/an

En prenant en considération que l'énergie primaire pour le chauffage était le fioul domestique et celle du refroidissement, l'électricité du Liban on trouve que la réduction en émissions d'équivalent Carbone annuelle est de :

$$\begin{aligned} \text{Réduction émissions} &= (516\,000 \text{ KWh/an} \times 0,196 \text{ Kg équivalent Carbone}) + \\ &\quad (470\,000 \text{ KWh/an} \times 0,082 \text{ Kg équivalent Carbone}) \\ &= (101\,136 + 38\,540) \text{ Kg d'équivalent Carbone} \\ &= 139\,676 \text{ Kg d'équivalent Carbone} \\ &\approx 140 \text{ tonnes d'équivalent Carbone} \end{aligned}$$

(Le 1 KWh produit par le fioul domestique libère 0,082 kg d'équivalent Carbone)

(Le 1 KWh produit par l'électricité du Liban libère 0,196 Kg d'équivalent Carbone)

Pour les espaces réservés à l'école (classes, parc informatique, théâtre. salle de réunion...), la ventilation sera contrôlée par des détecteur de CO₂ qui régleront les débits d'extractions et d'apport d'air tout en commandant les vannes motorisées.

VII.6.5.Dimensionnement des gaines d'extraction d'air:

VII.6.5.1.Méthode des frottements égaux:

La perte par frottement dans les gaines sera fixée à 0,65 Pa/m (0,08 in w/100ft) pour le dimensionnement des gaines. Le débit d'air dans la gaine principale d'extraction de la première roue de récupération est de 3873 L/s et celle de la deuxième 3300 L/s. Le tableau suivant illustre les vitesses de l'air recommandées par ASHRAE pour chaque type de bâtiment.

TABLE 8.11 SUGGESTED VELOCITIES IN LOW VELOCITY AIR CONDITIONING SYSTEMS

Designation	Recommended Velocities, FPM			Maximum Velocities, FPM		
	Residences	Schools, Theaters, Public Buildings	Industrial Buildings	Residences	Schools, Theaters, Public Buildings	Industrial Buildings
Outside air intakes ^a	500	500	500	800	900	1200
Filters ^a	250	300	350	300	350	350
Heating coils ^a	450	500	600	500	600	700
Air washers	500	500	500	500	500	500
Suction connections	700	800	1000	900	1000	1400
Fan outlets	1000-1600	1300-2000	1600-2400	1700	1500-2200	1700-2800
Main ducts	700-900	1000-1300	1200-1800	800-1200	1100-1600	1300-2200
Branch ducts	600	600-900	800-1000	700-1000	800-1300	1000-1800
Branch risers	500	600-700	800	650-800	800-1200	1000-1600

Tableau VII-8: Vitesses recommandées pour les systèmes de climatisation

L'abaque suivant d'ASHRAE donnera le diamètre de la gaine circulaire principale pour la première roue.

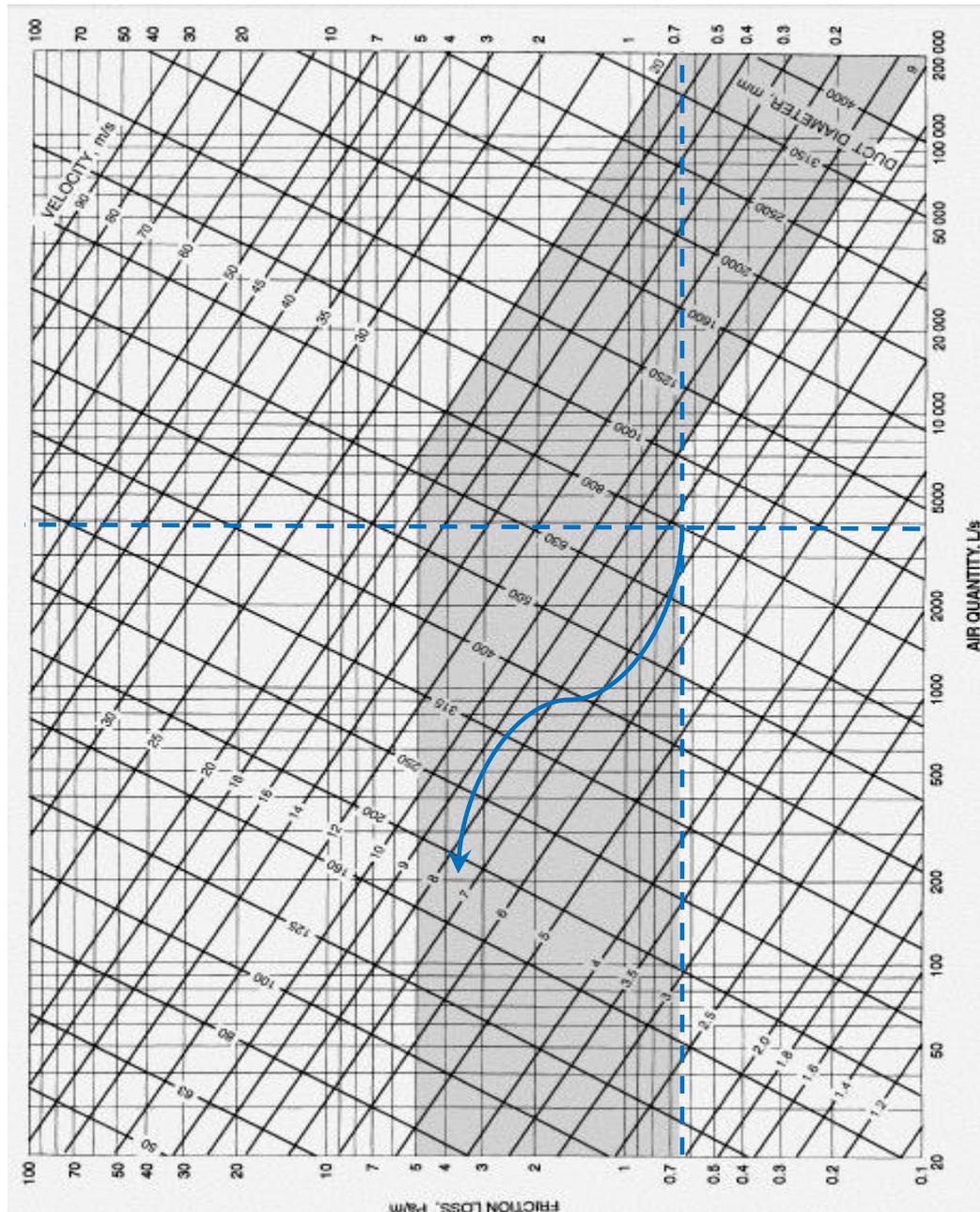


Figure VII-10: Abaque de dimensionnement des gaines

On constate que la vitesse de l'air approximative est de 7,5 m/s (1476 FPM) est qui reste dans l'intervalle acceptable recommandé par ASHRAE (1100-1600 FPM). Le diamètre de la gaine circulaire est d'environ 810 millimètres. Pour trouver les dimensions des gaines rectangulaires équivalentes aux circulaires, on utilisera le tableau si dessous. Une gaine de dimensions 800 x 700 mm² sera choisi.

Table 2 Circular Equivalents of Rectangular Duct for Equal Friction and Capacity^a

L _{gth} Adj. ^b	Length of One Side of Rectangular Duct (a), mm																			
	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
	Circular Duct Diameter, mm																			
100	109																			
125	122	137																		
150	133	150	164																	
175	143	161	177	191																
200	152	172	189	204	219															
225	161	181	200	216	232	246														
250	169	190	210	228	244	259	273													
275	176	199	220	238	256	272	287	301												
300	183	207	229	248	266	283	299	314	328											
350	195	222	245	267	286	305	322	339	354	383										
400	207	235	260	283	305	325	343	361	378	409	437									
450	217	247	274	299	321	343	363	382	400	433	464	492								
500	227	258	287	313	337	360	381	401	420	455	488	518	547							
550	236	269	299	326	352	375	398	419	439	477	511	543	573	601						
600	245	279	310	339	365	390	414	436	457	496	533	567	598	628	656					
650	253	289	321	351	378	404	429	452	474	515	553	589	622	653	683	711				
700	261	298	331	362	391	418	443	467	490	533	573	610	644	677	708	737	765			
750	268	306	341	373	402	430	457	482	506	550	592	630	666	700	732	763	791	820		
800	275	314	350	383	414	442	470	496	520	567	609	649	687	722	755	787	818	847	875	
900	289	330	367	402	435	465	494	522	548	597	643	686	726	763	799	833	866	897	927	984
1000	301	344	384	420	454	486	517	546	574	626	674	719	762	802	840	876	911	944	976	1037
1100	313	358	399	437	473	506	538	569	598	652	703	751	795	838	878	916	953	988	1022	1086
1200	324	370	413	453	490	525	558	590	620	677	731	780	827	872	914	954	993	1030	1066	1133
1300	334	382	426	468	506	543	577	610	642	701	757	808	857	904	948	990	1031	1069	1107	1177
1400	344	394	439	482	522	559	595	629	662	724	781	835	886	934	980	1024	1066	1107	1146	1220
1500	353	404	452	495	536	575	612	648	681	745	805	860	913	963	1011	1057	1100	1143	1183	1260
1600	362	415	463	508	551	591	629	665	700	766	827	885	939	991	1041	1088	1133	1177	1219	1298
1700	371	425	475	521	564	605	644	682	718	785	849	908	964	1018	1069	1118	1164	1209	1253	1335
1800	379	434	485	533	577	619	660	698	735	804	869	930	988	1043	1096	1146	1195	1241	1286	1371
1900	387	444	496	544	590	633	674	713	751	823	889	952	1012	1068	1122	1174	1224	1271	1318	1405
2000	395	453	506	555	602	646	688	728	767	840	908	973	1034	1092	1147	1200	1252	1301	1348	1438
2100	402	461	516	566	614	659	702	743	782	857	927	993	1055	1115	1172	1226	1279	1329	1378	1470
2200	410	470	525	577	625	671	715	757	797	874	945	1013	1076	1137	1195	1251	1305	1356	1406	1501
2300	417	478	534	587	636	683	728	771	812	890	963	1031	1097	1159	1218	1275	1330	1383	1434	1531
2400	424	486	543	597	647	695	740	784	826	905	980	1050	1116	1180	1241	1299	1355	1409	1461	1561
2500	430	494	552	606	658	706	753	797	840	920	996	1068	1136	1200	1262	1322	1379	1434	1488	1589
2600	437	501	560	616	668	717	764	810	853	935	1012	1085	1154	1220	1283	1344	1402	1459	1513	1617
2700	443	509	569	625	678	728	776	822	866	950	1028	1102	1173	1240	1304	1366	1425	1483	1538	1644
2800	450	516	577	634	688	738	787	834	879	964	1043	1119	1190	1259	1324	1387	1447	1506	1562	1670
2900	456	523	585	643	697	749	798	845	891	977	1058	1135	1208	1277	1344	1408	1469	1529	1586	1696

Tableau VII-9 : Tableau de conversion des gaines circulaires

Pour le dimensionnement des gaines restantes dans le bâtiment, on utilisera un simple logiciel nommé "DUCTULATOR". Voici le dimensionnement de la même gaine principale en utilisant le programme déjà mentionné. On obtiendra une vitesse de 7,38 m/s et un diamètre pour la gaine circulaire de 818 millimètres. Si on fixe un côté de la gaine rectangulaire équivalente de 800 millimètres, on obtiendra le deuxième côté de 700 millimètres. Pour ne pas dépasser les limites du bruit acceptable, le dimensionnement des conduits se fait de sorte à ce que la longueur ne dépasse en aucun cas le quadruple de la largeur.

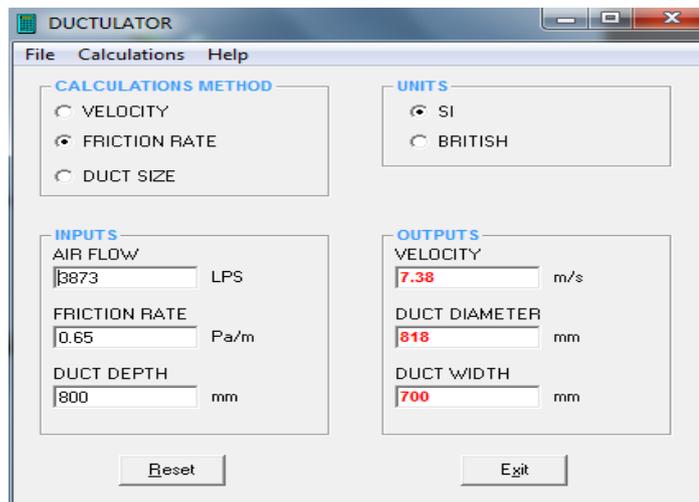


Figure VII-11 : Dimensionnement de la gaine principale en utilisant DUCTULATOR

VII.6.6. Dimensionnement des grilles et des diffuseurs:

Pour la classe type de 40 m² on a trouvé que le débit d'air extrait est de 117 L/s (248CFM). On fixera le critère du bruit à 30 (NC= 30) d'après le tableau 12 si dessous. La sélection des grilles et des diffuseurs sera faites d'après le tableau 11. On obtiendra pour le cas de cette classe type, une grille d'évacuation d'air de dimensions 300 mm x 150 mm (12" x 6").

Pour la ventilation des toilettes, le débit doit être 25L/s/WC ou par urinoir. Ce débit impose l'utilisation d'une grille carrée de dimensions 150 mm x 150 mm.

Ce même tableau sera utilisé pour la sélection des diffuseurs de climatisation d'une pièce. Le débit d'air, sa vitesse de circulation et le niveau sonore du bruit acceptable par les occupants de la pièce sont à la base du choix de ces registres.

CFM	Ak	NECK SIZE															
		10" x 6"	12" x 6"	10" x 8"	12" x 8"	18" x 6"	12" x 12"	16" x 12"	18" x 12"	20" x 12"	24" x 12"	18" x 18"	20" x 18"	20" x 20"	24" x 18"		
100	Nk Vel Ps	.240 .007	.270 .005														
150	Nk Vel Ps	.360 .016	.300 .011	.270 .009	.225 .006	.200 .005											
200	Nk Vel Ps	.480 .029	.400 .020	.360 .016	.300 .011	.267 .009	.200 .005										
250	Nk Vel Ps	.600 .046	.500 .032	.450 .026	.375 .018	.333 .014	.250 .008										
300	Nk Vel Ps	.720 .066	.600 .046	.540 .037	.450 .026	.400 .020	.300 .011	.225 .006	.200 .005								
350	Nk Vel Ps	.840 .089	.700 .062	.630 .050	.525 .035	.467 .028	.350 .016	.263 .009	.233 .007	.210 .006							
400	Nk Vel Ps		.800 .081	.720 .066	.600 .046	.533 .036	.400 .020	.300 .011	.267 .009	.240 .007	.200 .005						
450	Nk Vel Ps		.900 .103	.810 .083	.675 .058	.600 .046	.450 .026	.338 .014	.300 .011	.270 .009	.225 .006	.200 .005					
500	Nk Vel Ps				.750 .071	.667 .056	.500 .032	.375 .018	.333 .014	.300 .011	.250 .008	.222 .006	.200 .005				
550	Nk Vel Ps				.825 .086	.733 .068	.550 .038	.413 .022	.367 .017	.330 .014	.275 .010	.244 .008	.220 .006				
600	Nk Vel Ps				.900 .103	.800 .081	.600 .046	.450 .026	.400 .020	.360 .016	.300 .011	.267 .009	.240 .007	.216 .006	.200 .005		
650	Nk Vel Ps					.867 .095	.650 .054	.488 .030	.433 .024	.390 .019	.325 .013	.289 .011	.260 .009	.234 .007	.217 .006		
700	Nk Vel Ps						.700 .062	.525 .035	.467 .028	.420 .022	.360 .016	.311 .012	.280 .010	.252 .008	.233 .007		
750	Nk Vel Ps						.750 .071	.563 .040	.500 .032	.450 .026	.375 .018	.333 .014	.300 .011	.270 .009	.250 .008		
	NC			40			35		30				25				

Tableau VII-10: Tableau de sélection des grilles et registres

TABLE 10.3 RANGES OF INDOOR DESIGN GOALS FOR AIR CONDITIONING SYSTEM SOUND CONTROL					
Type of Area	Range of A-Sound Levels, Decibels	Range of NC Criteria Curves	Type of Area	Range of A-Sound Levels, Decibels	Range of NC Criteria Curves
RESIDENCES			CHURCHES AND SCHOOLS (Con't.)		
Private homes (rural and suburban)	25-35	20-30	Laboratories	40-50	35-45
Private homes (urban)	30-40	25-35	Recreation halls	40-55	35-50
Apartment houses, 2- and 3-family units	35-45	30-40	Corridors and halls	40-55	35-50
			Kitchens	45-55	40-50
HOTELS			PUBLIC BUILDINGS		
Individual rooms or suites	35-45	30-40	Public libraries, museums, courtrooms	35-45	30-40
Ballrooms, banquet rooms	35-45	30-40	Post offices, general banking areas, lobbies	40-50	35-45
Halls and corridors, lobbies	40-50	35-45	Washrooms and toilets	45-55	40-50
Garages	45-55	40-50			
Kitchens and laundries	45-55	40-50	RESTAURANTS, CAFETERIAS, LOUNGES		
			Restaurants	40-50	35-45
HOSPITALS AND CLINICS			Cocktail lounges	40-55	35-50
Private rooms	30-40	25-35	Nightclubs	40-50	35-45
Operating rooms, wards	35-45	30-40	Cafeterias	45-55	40-50
Laboratories, halls and corridors					
Lobbies and waiting rooms	40-50	35-45	STORES, RETAIL		
Washrooms and toilets	45-55	40-50	Clothing stores		
			Department stores (upper floors)	40-50	35-45
OFFICES			Department stores (main floor)		
Boardroom	25-35	20-30	Small retail stores	45-55	40-50
Conference rooms	30-40	25-35	Supermarkets	45-55	40-50
Executive office	35-45	30-40			
Supervisor office, reception room	35-50	30-45	SPORTS ACTIVITIES, INDOOR		
General open offices, drafting rooms	40-50	35-45	Coliseums	35-45	30-40
Halls and corridors	40-55	35-50	Bowling alleys, gymnasiums	40-50	35-45
Tabulation and computation	45-65	40-60	Swimming pools	45-60	40-55
			TRANSPORTATION (RAIL, BUS, PLANE)		
AUDITORIUMS AND MUSIC HALLS			Ticket sales offices	35-45	30-40
Concert and opera halls			Lounges and waiting rooms	40-55	35-50
Studios for sound reproduction	20-30	15-25			
Legitimate theaters, multipurpose halls	30-35	25-30	EQUIPMENT ROOMS		
Movie theaters, TV audience studios			8 hr/day exposure	<90	
Semi-outdoor amphitheaters	35-45	30-35	3 hr/day exposure	<97	
Lecture halls, planetarium			(or per OSHA requirement)		
Lobbies	40-50	35-45			
CHURCHES AND SCHOOLS					
Sanctuaries	25-35	20-30			
Libraries	35-45	30-40			
Schools and classrooms	35-45	30-40			

Tableau VII- 11: Les critères du bruit pour les systèmes de climatisation

VII.6.7. Perte de charges dans la gaine principale d'évacuation d'air:

La longueur du chemin le plus long pour l'évacuation de l'air à travers la première roue de récupération d'énergie étant de 71mètres. Les pertes de charge singulières à travers les coudes et les tés de conduite seront considérer de 25 % de la perte totale linéaire. La perte de charge à travers les autres équipements est de:

- 3 amortisseurs de volume (VD) + clapet coupe-feu (FD) = 40 Pa
- 1 Diffuseur = 50 Pa
- 1 Grille d'évacuation d'air = 5 Pa

Un facteur de sécurité de 10 % sera pris dans le calcul de la perte totale de charge

La perte de pression dans les gaines d'extraction d'air sera de:

$$\begin{aligned} \text{Perte} &= [(71 \text{ m} \times 0,65 \text{ Pa/m} \times 1,25) + 40 \text{ Pa} + 50 \text{ Pa} + 5 \text{ Pa}] \times 1,1 \\ &= 168 \text{ Pa} \end{aligned}$$

De même on obtient une perte de charge de 151 Pa dans les gaines de la deuxième roue de récupération.

VIII- Chapitre 8:

Confort thermique et climatisation solaire

VIII.I. Quelques propriétés physiques de l'air:

L'air ambiant d'un local, quel qu'il soit, contient une certaine quantité d'eau, présente sous forme de vapeur. On a par conséquent affaire à un mélange binaire d'air sec et de vapeur d'eau (Air humide = air sec + vapeur d'eau). Dans un bâtiment, cette quantité de vapeur est variable suivant les pièces et leur occupation.

VIII.1.1. La température sèche de l'air (T_{DB}):

C'est la température indiquée par un thermomètre ordinaire à l'abri du rayonnement solaire (température du bulbe sec). Elle est généralement mesurée avec un thermomètre à mercure ou à alcool.

VIII.1.2. La température humide de l'air (T_{WB}):

C'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une gaze mouillée, balayé par de l'air en mouvement et protégé du rayonnement. A la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau se vaporise. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air.

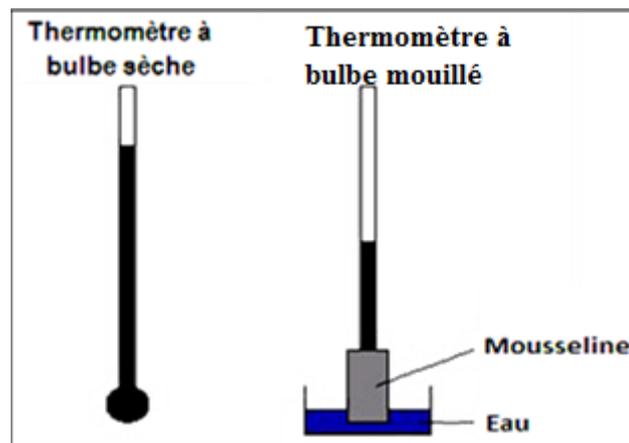


Figure VIII-1: Thermomètre à bulbe sèche et mouillé

VIII.1.3. La température de rosée:

On définit la température de rosée, la température à partir de laquelle, la vapeur d'eau, contenue dans un air humide que l'on refroidit à pression constante, commence à se condenser (apparition de gouttelettes d'eau). Si la température de surface de la vitre est inférieure à la température de rosée de

l'air humide ,alors il y a condensation de la vapeur d'eau, présente dans l'air humide, sur la vitre. Cette température de rosée dépend uniquement de la teneur en eau de l'air du local considéré.

VIII.1.4. La teneur de l'air en eau:

La teneur en eau de l'air d'un local est également appelée l'humidité absolue ou encore humidité spécifique de l'air de ce local. Il s'agit du rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec.

VIII.1.5. Le degré hygrométrique:

Le degré hygrométrique de l'air d'un local est également appelé humidité relative. On compare en fait la teneur en eau d'un air ambiant à la teneur en eau qu'il aurait s'il était saturé.

VIII.2. Confort thermique humain:

"Le confort thermique peut être défini comme une sensation complexe produite par un système de facteurs physiques, physiologiques et psychologiques, conduisant l'individu à exprimer le bien être de son état". (Baruch Givoni)

L'appréciation du confort thermique dépend des personnes. Cependant, en jouant sur des paramètres essentiels comme la température, la vitesse de l'air et l'humidité, un équilibre satisfaisant peut être trouvé comme l'isolation thermique du bâtiment

Le corps humain possède un mécanisme de régulation qui adapte ses pertes de chaleur aux conditions thermiques de l'ambiance. Ce mécanisme d'autorégulation laisse apparaître une zone où la variation de sensation de confort thermique est faible : c'est la zone dite de confort thermique. La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon divers mécanismes par conduction, convection et rayonnement. Or on peut constater que:

- Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau).
- Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %).
- Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

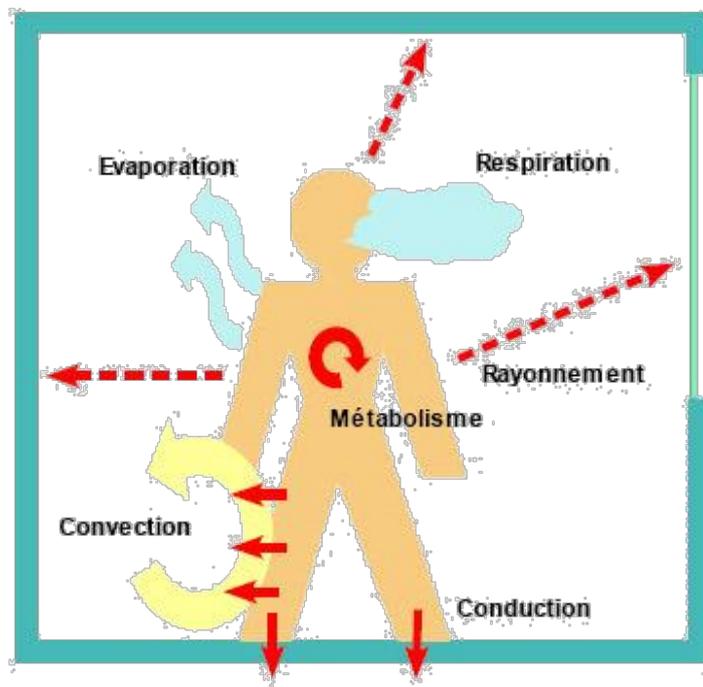


Figure VIII-2: Pertes thermiques du corps humain

Par conséquent, le confort thermique intérieur se divise en trois parties distinctes. Ces trois parties sont :

- Le confort en fonction de la température à l'intérieur.
- Le confort en fonction de l'humidité à l'intérieur.
- Le confort en fonction de la vitesse de l'air à l'intérieur. [30]

VIII.2.1. Le confort en fonction de l'humidité:

L'humidité relative ambiante influence la capacité de notre corps à éliminer une chaleur excédentaire. L'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans son bureau. L'inconfort n'apparaît que dans des situations extrêmes :

- soit une humidité relative inférieure à 30 %,
- soit une humidité relative supérieure à 70 %

C'est ce qu'indique le diagramme ci-dessous, précisant la plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique.[30]

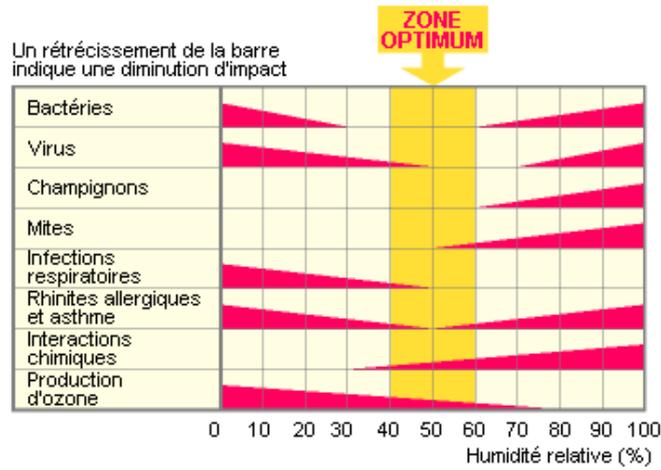


Figure VIII-3: Zone optimale pour l'humidité

VIII.2.1. Le confort en fonction de la température:

Compte tenu de son importance dans l'intensité des échanges thermiques, il est naturel de s'intéresser à la température qui caractérise l'ambiance du bâtiment. La plupart des personnes considèrent que 20 °C en hivers, et 26 °C en été, sont les températures d'air associées à une appréciation de confort.

VIII.2.2. Le confort température-humidité:

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, on peut dès lors recommander que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 65 %. Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant :

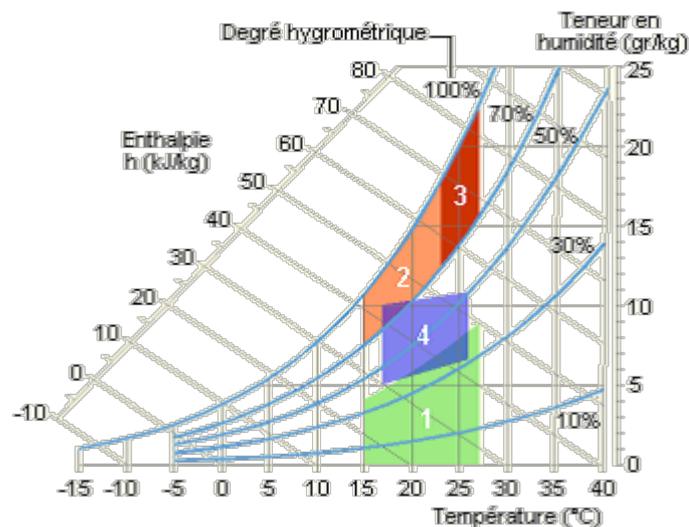


Figure VIII-4: Zone de confort hygrothermique

1 - Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.

2 et 3 Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.

3 - Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.

4 - Polygone de confort hygrothermique.

VIII. 2.3.Le confort en fonction de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s. Or le mouvement de l'air abaisse la température du corps, facteur recherché en été mais pouvant être gênant en hiver (courants d'air).

VIII.3.La climatisation du bâtiment:

Un système de climatisation doit maintenir un climat, pour offrir un confort thermique et une qualité acceptable de l'air intérieur quelles que soient les perturbations thermiques et chimiques, extérieures et intérieures.

Le calcul des charges de la climatisation (refroidissement et chauffage) sur un bâtiment est l'étape la plus importante dans la détermination de la taille et le type du système nécessaire pour maintenir des conditions confortables de l'air intérieur. On utilisera le logiciel "Hourly Analysis Program 4.4" (HAP 4.4) pour des données qui doivent être remplis afin de calculer la charge de chauffage et de refroidissement.

VIII.3.1 Les paramètres de conception:

La charge thermique nécessaire pour un système de climatisation se divise en deux parties: La charge thermique sensible et la charge thermique latente.

La chaleur sensible est issue de :

- La radiation solaire et les transferts de chaleur par les fenêtres et les murs transparents.
- Les transferts à travers l'enveloppe opaque du bâtiment.
- La production de chaleur interne (personnes, éclairage, appareils,..)
- Les transferts de chaleur entre l'environnement et le bâtiment par les infiltrations et la ventilation.

La charge thermique latente:

Elle est généralement générée dans le bâtiment par différents sources de vapeurs d'eau comme le corps humain, les plantes internes et les piscines internes. En réalité, Un corps humain émet jusqu'à 50 grammes de vapeur d'eau par heure et une plante jusqu'à 20 grammes par jour.

VIII.3.1.1. Transfert à travers le vitrage:

Une partie de la radiation solaire est absorbée par le vitrage du bâtiment (fenêtres et murs transparents) et est transmise à l'intérieur du bâtiment. La résistance des fenêtres dans le bâtiment après rénovation sera de $1,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (vitre double à haut rendement à argon "4mm/16mm/4mm").

La résistance thermique du châssis en bois est de $1,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

La formule qui permet le calcul du coefficient global de la fenêtre (U_w) est la suivante :[33]

$$U_w = [(U_g \times \text{surface du vitrage}) + (U_f \times \text{surface du cadre}) + (\Psi_g \times \text{périmètre du vitrage})] / \text{surface totale de la fenêtre.}$$

Où : U_g = coefficient de transmission du vitre

U_f = coefficient de transmission du cadre (châssis)

Ψ_g = coefficient de transmission linéique des liaisons ou jonctions entre cadre et vitrage.

Dans le cas du bâtiment, le coefficient de transmission linéaire des liaisons sera pris de $0,06 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Le coefficient global d'une fenêtre du bâtiment sera de $1.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ après application de la formule précédente.

Valeur Ψ_g de vitrages avec intercalaire thermiquement amélioré (acier inoxydable, synthétique)		
Matériau du cadre	Valeur Ψ_g en W/mK	
	Double ou triple vitrage sans film sélectif $U_g = 1,9 \text{ à } 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$	Double ou triple vitrage avec film sélectif $U_g = 0,5 \text{ à } 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
Bois ou PVC	0,05	0,06
Métallique avec rupture de ponts thermiques	0,06	0,08
Métallique sans rupture de ponts thermiques	0,01	0,04

Figure VIII-5: Valeurs des coefficients linéaires suivant le matériel

TYPES DE VITRAGES	U_{vc} (vitrage) [w/m²K]	MATÉRIEAUX DE CHÂSSIS						ALU OU AUTRES MÉTAUX					
		BOIS	PUR	PVC		ALU		ALU		ALU		LIAISONS	
	U_{ch} (châssis) [w/m²K]			PLUSIEURS CHAMBRES SANS RENFORT	PLUSIEURS CHAMBRES AVEC RENFORT	UNE CHAMBRE SANS RENFORT	UNE CHAMBRE AVEC RENFORT	SANS COUPURE THERMI.	AVEC COUPURE THERMI.	AVEC COUPURE THERMI.	AVEC COUPURE THERMI.	AVEC COUPURE THERMI.	MÉTAL PONCT. DISTANTES + de 200mm
		1,80	2,90	1,50	1,70	2,80	3,00	6,00	4,20	3,90	3,80	3,50	4,80
DOUBLE VITRAGE ordinaire	2,80	2,65	2,98	2,56	2,62	2,95	3,01	3,6 ⁽¹⁾	3,30	3,23	3,20	3,13	3,45
TRIPLE VITRAGE lames d'air	2,30	2,30	2,63	2,21	2,27	2,60	2,66	3,23	2,93	2,85	2,83	2,75	3,08
DOUBLE VITRAGE "haut rendement"	1,10	1,52	1,85	1,43	1,49	1,82	1,88	2,33	2,09	2,01	1,99	1,91	2,24

Figure VIII-6: Valeurs des coefficients globaux des fenêtres suivant le type

Les données des fenêtres du bâtiment seront introduites dans le logiciel HAP 4.4 comme le montre la figure suivante:

The screenshot shows the 'Window Properties - [Double vitrage]' dialog box. It contains the following fields and values:

- Window Details:**
 - Name: Double vitrage
 - Detailed Input:
 - Height: 1.20 m
 - Width: 1.38 m
 - Frame Type: [Dropdown]
 - Internal Shade Type: [Dropdown]
 - Overall U-Value: 1.600 W/m²/K
 - Overall Shade Coefficient: 0.350
- Glass Details:**

Glazing	Glass Type	Transmissivity	Reflectivity	Absorptivity
Outer Glazing	[Dropdown]			
Glazing #2	[Dropdown]			
Glazing #3	[Dropdown]			

 - Gap Type: [Dropdown]

Buttons: OK, Cancel, Help

Figure VIII-7: Introduction des propriétés des fenêtres dans HAP 4.4

VIII.3.1.2. Les transferts à travers l'enveloppe opaque du bâtiment:

Les transferts de chaleur à travers l'enveloppe opaque du bâtiment dépendent de la radiation solaire absorbée est qui est fonction de l'orientation des murs et de la couleur des surface, ainsi que la conductivité thermique des matériaux.

Les murs extérieurs:

Pour le bâtiment étudié, les murs extérieurs possèdent une couleur moyenne, et sont formés par deux couches de béton de masse volumique élevée et d'épaisseur 15 millimètres situées entre bloc de béton de masse volumique élevée et d'épaisseur 200 millimètres.

Le coefficient d'échange superficiel global sur la face intérieure étant de $8\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (Résistance = $0,125\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$) et le coefficient global d'échange superficiel sur la face extérieure de $23\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (Résistance = $0,04349\text{ m}^2\cdot\text{K/W}$). Ces données sont introduites dans le logiciel HAP 4.4 et on aura un coefficient de transmission globale pour l'enveloppe de $2,641\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Wall Properties - [Mur extérieur]

Wall Assembly Name: **Mur extérieur**

Outside Surface Color: Medium Absorptivity: **0.675**

Layers: Inside to Outside	Thickness mm	Density kg/m³	Specific Ht. kJ/kg/K	R-Value m².K/W	Weight kg/m²
Inside surface resistance	0.000	0.0	0.00	0.12500	0.0
15mm HW concrete	15.000	2242.6	0.84	0.00867	33.6
200mm HW concrete bloc	200.200	977.1	0.84	0.19279	195.6
15mm HW concrete	15.000	2242.6	0.84	0.00867	33.6
Outside surface resistance	0.000	0.0	0.00	0.04349	0.0
Totals	230.200			0.38	262.9

Overall U-Value: **2.641 W/m²/K**

OK Cancel Help

Figure VIII-8: Données du mur extérieur introduites dans HAP 4.4

La toiture:

La toiture est formée par des tuiles en terre cuite d'épaisseur 16 millimètres. Une isolation en Polystyrène extrude d'épaisseur 176 millimètres sera appliquée pour atteindre un taux d'isolation optimal (les détails expliqués dans le chapitre 3). On obtiendra une résistance totale pour le toit de 6 m².K/W. ($U_{\text{toiture}} = 0,167 \text{ W/m}^2.\text{K}$).

Roof Properties - [Toiture]

Roof Assembly Name: **Toiture**

Outside Surface Color: Medium Absorptivity: **0.675**

Layers: Inside to Outside	Thickness mm	Density kg/m³	Specific Ht. kJ/kg/K	R-Value m².K/W	Weight kg/m²
Inside surface resistance	0.000	0.0	0.00	0.12500	0.0
Tuile de terre cuite	16.000	1922.2	0.84	0.01120	30.8
Polystyrène extrude	176.000	8.0	0.84	5.82032	1.4
Outside surface resistance	0.000	0.0	0.00	0.04348	0.0
Totals	192.000			6.00	32.2

Overall U-Value: **0.167 W/m²/K**

OK Cancel Help

Figure VIII-9: Données du toit introduites dans HAP 4.4

VIII.3.1.3. La production de chaleur interne :

Les gains de chaleur interne sont souvent la raison majeure des surchauffes. Le corps humain lui-même émet un flux de chaleur entre 100 W et 250 W dans le cas de forte activité. Les grands nombres d'appareils caractéristiques du bâtiment contribuent aussi à la charge interne. Une bonne utilisation de la lumière du jour ainsi que des lampes efficaces et de LED peut réduire la charge de manière significative.

Les personnes:

L'être humain émet de la chaleur à travers son corps de deux types. Une chaleur sensible de 67,4 W et une chaleur latente de 35,2 W si ce dernier ne fait aucune activité forte (sédentaire). Pour une classe de 30 élèves et une activité faible, on constate que la chaleur dégagée peut atteindre facilement 3078 W.

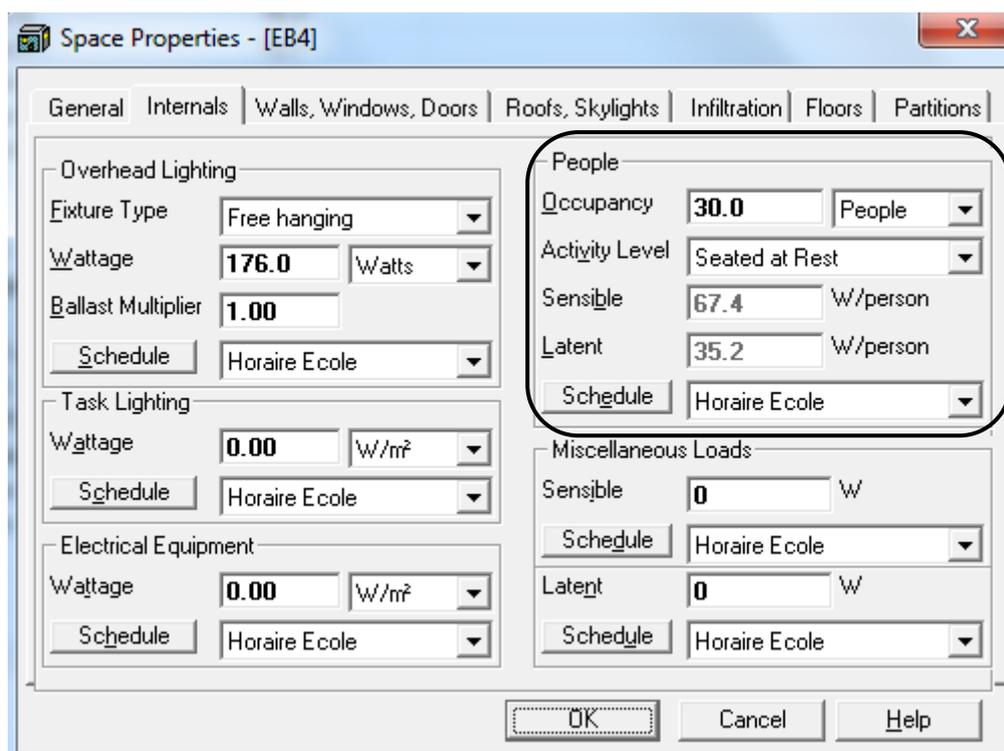


Figure VIII-10: Taux d'occupation et chaleur générée par personne

L'éclairage:

Dans le bâtiment étudié, on va changer les tubes fluorescents par des tubes à LED (Explication de la démarche dans le chapitre 3). Ce remplacement de type de lampes, a abaissé la puissance électrique totale de l'éclairage dans le bâtiment et par conséquent, l'échauffement interne causé par cette puissance. La puissance d'un tube à LED étant de 22 W, donc pour une chambre de 8 tubes, la puissance totale pour l'éclairage sera de 176 W. La figure suivante montre l'éclairage dans une classe.

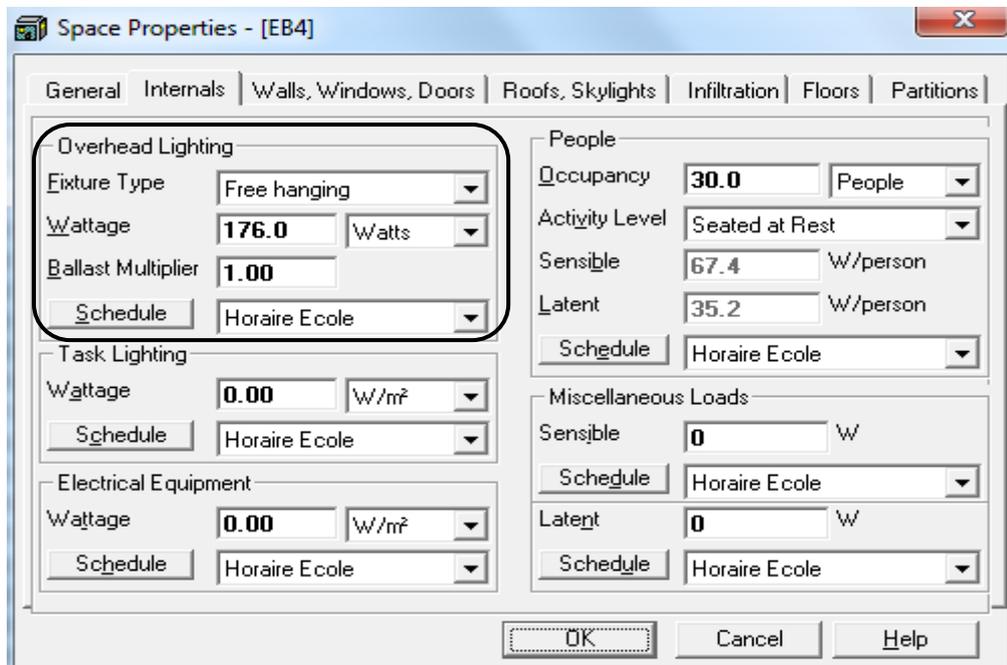


Figure VIII-11: Eclairage dans une classe

Equipements électriques:

Les équipements électriques jouent un grand rôle dans le réchauffement du bâtiment ci ils sont nombreuses comme dans le cas du parc informatique du bâtiment. Ce parc comprend 20 ordinateurs, 4 imprimantes, 2 photocopieurs et deux télécopieurs. La puissance électrique de cet ensemble d'équipements électrique atteint les 5100 W. Cette puissance doit être introduite dans le logiciel HAP 4.4 pour calculer la chaleur gagnée.

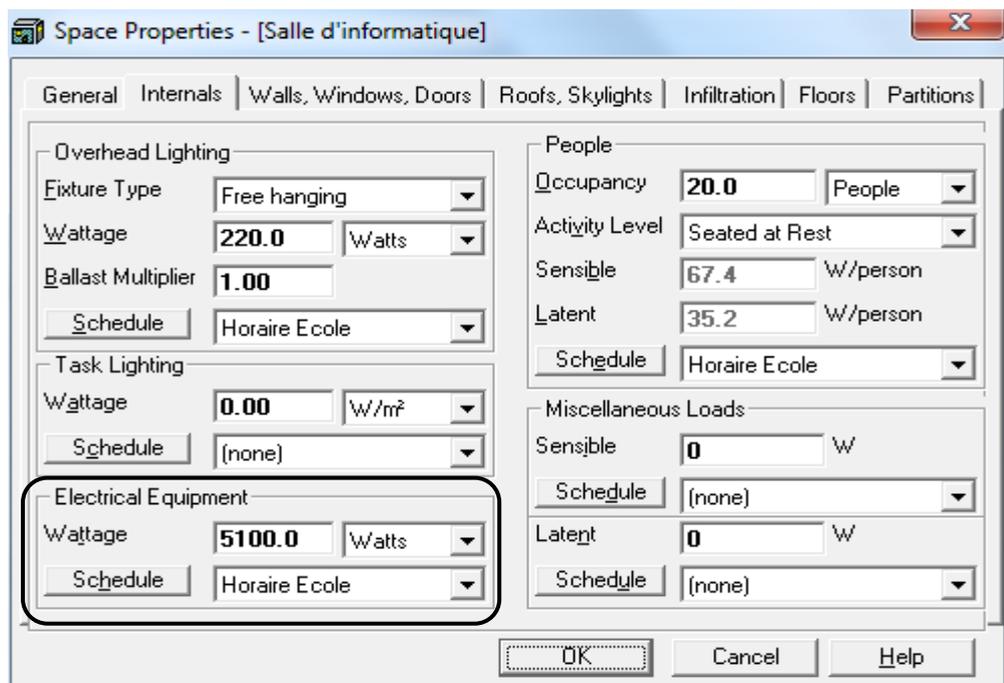


Figure VIII-12: Puissance électrique des équipements

VIII.3.1.4. Les Cloisons (partitions):

Les cloisons ou partitions sont les murs qui répartissent un étage de bâtiment en un nombre des appartements ainsi que les appartements en un nombre de chambres. Les cloisons peuvent être installées avec des épaisseurs différentes selon les espaces qui doivent être séparées.

Dans le cas du bâtiment la valeur du coefficient d'échange thermique global est de 2,181 W/m². K. La température maximale de l'espace non climatisé est de 26°C tandis que et température minimale est de 15,4 °C. La figure suivante illustre les composantes d'un mur intérieur ainsi que la valeur de son coefficient d'échange global.

Layers: Inside to Outside	Thickness mm	Density kg/m ³	Specific Ht. kJ/kg/K	R-Value m ² -K/W	Weight kg/m ²
Inside surface resistance	0.000	0.0	0.00	0.12500	0.0
▶ 20mm LW concrete	20.000	608.7	0.84	0.01156	12.2
100mm LW concrete bloc	101.600	608.7	0.84	0.26683	61.8
20mm LW concrete	20.000	608.7	0.84	0.01156	12.2
Outside surface resistance	0.000	0.0	0.00	0.04349	0.0
Totals	141.600			0.46	86.2

Overall U-Value: 2.181 W/m²/K

Figure VIII-12: Données d'un mur intérieur

VIII.3.1.5. Le plafond/Sol:

Pour le plafond, on obtient un coefficient d'échange thermique global de 0.555 W/m².K comme l'indique la figure ci-dessous.

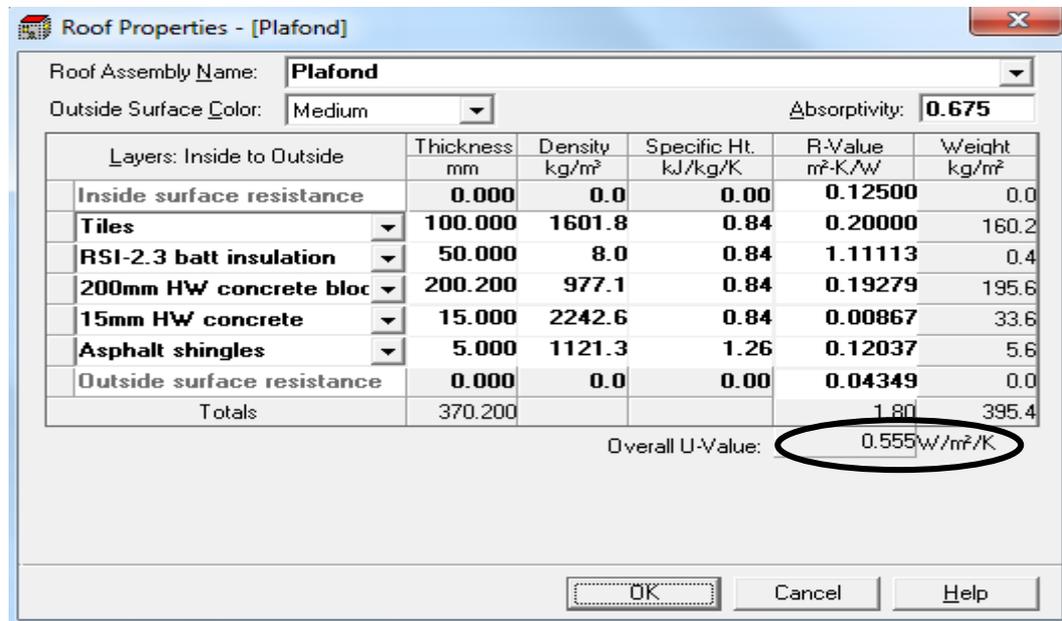


Figure VIII-13: Données du plafond introduites dans HAP 4.4

VIII.3.1.6. Les infiltrations et la ventilation:

Les infiltrations ainsi que la ventilation mécanique forcée jouent un grand rôle sur la charge totale de climatisation du bâtiment. Ces facteurs doivent être introduits dans le logiciel HAP 4.4 pour avoir des estimations de la charge totale presque exactes. Le renouvellement de l'air dans une chambre du bâtiment est déjà expliqué dans le chapitre 7. La figure suivante illustre le besoin d'air nouveau par personne et par mètre carré, pour une classe de 30 élèves et une superficie de 40 m².

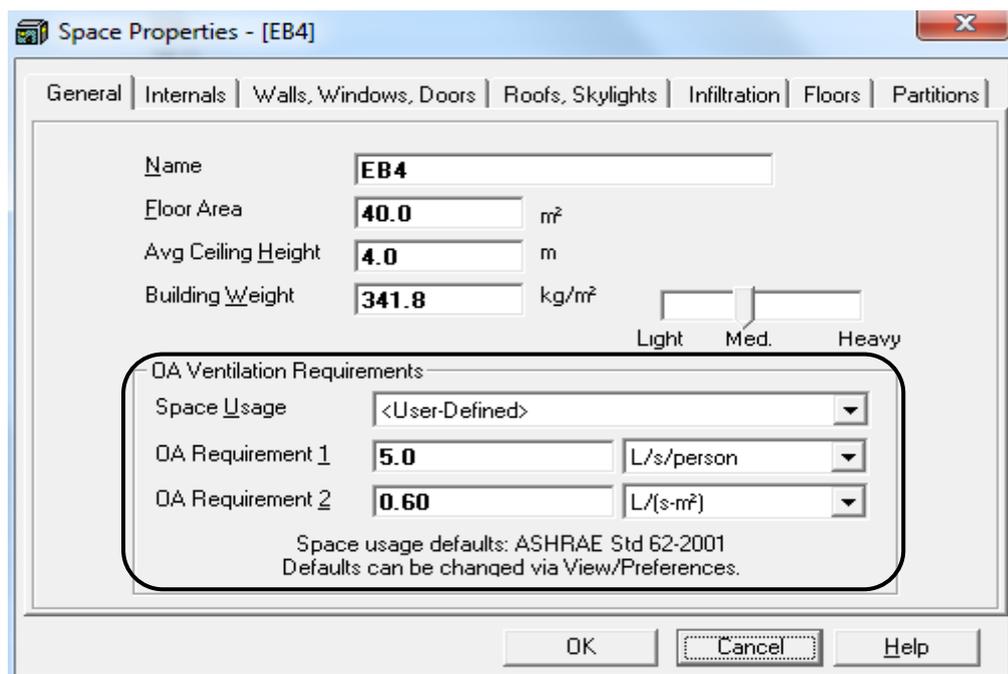


Figure VIII-14: Taux de ventilation dans une classe

VIII.3.2. Conditions de Conception:

Orientation du Site (Bâtiment): Latitude : Nord 34° 02' 00"

Longitude : Est 35° 42' 00"

Altitude : 700 mètres

Températures: En été : Température de l'air extérieurs (T_{DB})= 32 °C

Condition d'intérieur en été : Température (T_{DB}) = 23°C

Humidité = 50%

En hiver : Température de l'air extérieurs (T_{DB}) = 5 °C

Condition d'intérieur en été : Température (T_{DB})= 21°C

Humidité = 50%

VIII.3.3 Calcul des Charges:

La charge de refroidissement et de chauffage est la quantité d'énergie thermique pour être retirée ou ajoutée d'un bâtiment par l'équipement de climatisation pour le maintenir à la température de conception intérieure lorsque la température de conception extérieure maximale est vécue. Il ya deux types de charges de:

- La charge sensible
- la charge latente

La charge sensible se réfère à la température sèche de l'immeuble et la charge latente se réfère à la température humide de l'immeuble.

Le calcul des capacités des charges se fait à l'aide du programme HAP 4.4. Pour une classe de ce bâtiment de superficie 40 m² et un taux d'occupation de 30 élèves, on obtient les résultats suivants:

Air System Sizing Summary for EB7			
Project Name: Besancon BLD		08/02/2012	
Prepared by: Chady SAYED		02:09PM	
Air System Information			
Air System Name	EB7	Number of zones	1
Equipment Class	UNDEF	Floor Area	40.0 m²
Air System Type	SZCAV	Location	kfour, Lebanon
Sizing Calculation Information			
Zone and Space Sizing Method:			
Zone L/s	Sum of space airflow rates	Calculation Months	Jan to Dec
Space L/s	Individual peak space loads	Sizing Data	Calculated
Central Cooling Coil Sizing Data			
Total coil load	6.0 kW	Load occurs at	Jun 1400
Sensible coil load	3.6 kW	OA DB / WB	32.0 / 25.5 °C
Coil L/s at Jun 1400	246 L/s	Entering DB / WB	25.3 / 19.4 °C
Max block L/s	246 L/s	Leaving DB / WB	12.2 / 11.8 °C
Sum of peak zone L/s	246 L/s	Coil ADP	10.8 °C
Sensible heat ratio	0.591	Bypass Factor	0.100
m ² /kW	6.6	Resulting RH	56 %
W/m ²	150.8	Design supply temp.	12.0 °C
Water flow @ 5.6 °K rise	0.26 L/s	Zone T-stat Check	1 of 1 OK
		Max zone temperature deviation	0.0 °K

Central Heating Coil Sizing Data

Max coil load **1.9kW**
 Coil L/s at Des Htg **246L/s**
 Max coil L/s **246L/s**
 Water flow @ 11.1 °K drop **0.04L/s**

Load occurs at **Des Htg**
 W/m² **46.9**
 Ent. DB / Lvg DB **18.2 / 25.0 °C**

Supply Fan Sizing Data

Actual max L/s **246L/s**
 Standard L/s **226L/s**
 Actual max L/(s-m²) **6.14L/(s-m²)**

Fan motor BHP **0.13BHP**
 Fan motor kW **0.10kW**

Return Fan Sizing Data

Actual max L/s **246L/s**
 Standard L/s **226L/s**
 Actual max L/(s-m²) **6.14L/(s-m²)**

Fan motor BHP **0.13BHP**
 Fan motor kW **0.10kW**

Outdoor Ventilation Air Data

Design airflow L/s **174...L/s**
 L/s/person **5.80 L/s/person**

Tableau VIII-1: Résumé du dimensionnement du system de climatisation pour une classe

L'introduction de toutes les données nécessaires pour le calcul des charges dans le logiciel HAP 4.4 donnera pour la machine de climatisation une puissance totale de 308,2 KW (87,9 Tons)

Cooling Plant Sizing Summary for Plant	
Project Name: Besancon BLD	08/02/2012
Prepared by: Chady SAYED	02:43PM
1. Plant Information:	
Plant Name	Plant
Plant Type	Generic Chilled Water
Design Weather	kfour, Lebanon
2. Cooling Plant Sizing Data:	
Maximum Plant Load	308.2 kW
Load occurs at	Aug 1400
m ² /kW	9.1 m²/kW
Floor area served by plant	2801.4 m

3. Coincident Air System Cooling Loads for Aug 1400

Air System Name	Mult.	System Cooling Coil Load (kW)
1	1	39.3
2	1	76.0
3	1	67.4
4	1	43.7
5	1	81.8

Tableau VIII-2: Puissance de la machine de climatisation

Tous distribution d'air aura lieu en utilisant des conduits, qui sont conçus pour fournir de l'air conditionné à chaque zone le plus économiquement possible.

Pour la conception du système de conduits on prend en considération:

1-Espace de la disponibilité

2-Niveaux sonores (doit être inférieur à 27 dB)

Le dimensionnement du conduit d'air est calculé par l'intermédiaire du logiciel "Ductulator" déjà expliqué dans le chapitre 7.

La figure suivante montre le flux du réfrigérant à travers les batteries froides et chaudes dans un FCU (fan coil unit).

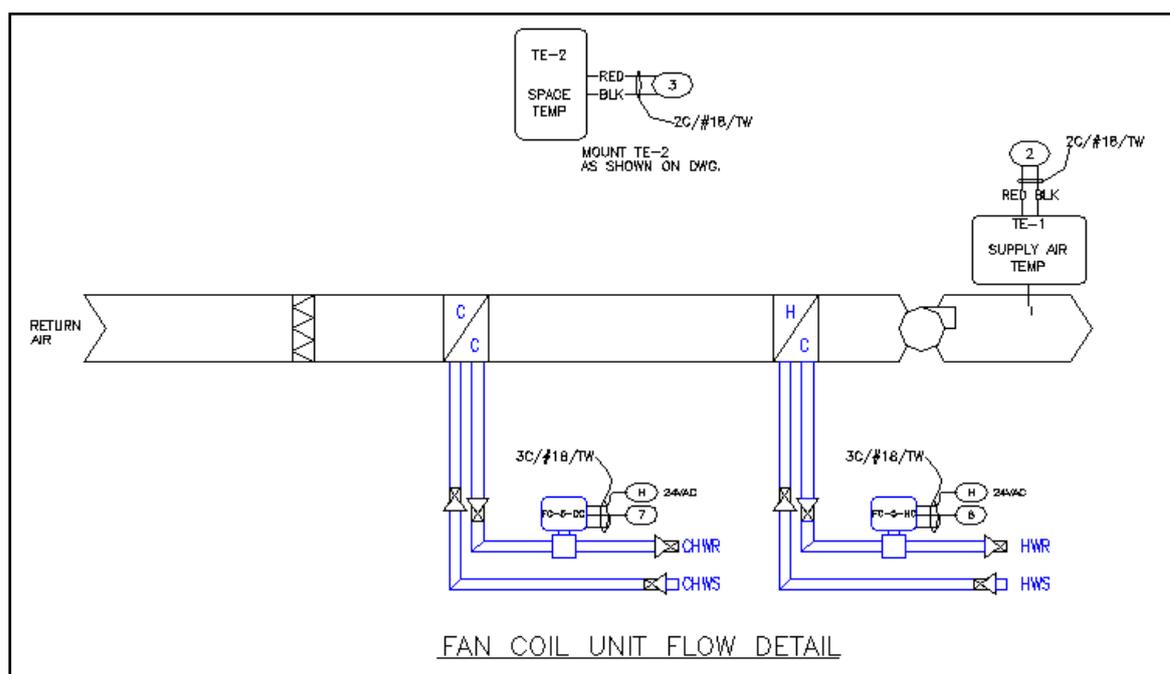


Figure VIII-15: Flux du réfrigérant à travers les batteries

VIII.4. Une solution de climatisation renouvelable:

La climatisation dévore beaucoup d'énergie souvent produite à partir de sources d'énergie polluante. Les fluides frigorigènes utilisés dans les cycles thermodynamiques frigorifiques utilisant une compression mécanique sont de redoutables gaz à effet de serre. Ces produits commercialisés sont classés en groupes selon leur composition chimique.

On distingue les CFC (R 12, R 11, R 502...), les HCFC (R 22...), les HFC (R 134 A, R 410 A) (Les CFC et les HCFC ont un rôle important dans la destruction de la couche d'ozone).

Deux principaux indicateurs existent pour caractériser l'impact environnemental d'un fluide frigorigène :

- Le Potentiel de réchauffement global (PRG): Cet indicateur est expliqué dans le premier chapitre de cette mémoire.
- L'ODP (Ozone Depletion Potential) : C'est le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Il caractérise les dommages causés à l'atmosphère par le fluide considéré. Sa valeur est relative à l'ODP du R-11 qui est un CFC maintenant interdit et dont la valeur référence d'ODP a été arbitrairement prise égale à 1.

VIII.4.1. Machine de climatisation à compression mécanique:

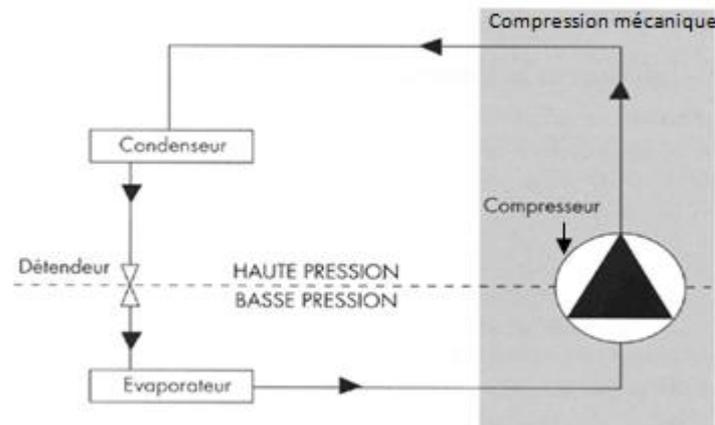


Figure VIII-16: machine à compression mécanique

La machine frigorifique se compose au minimum des 4 éléments suivants :

- **Compresseur** : Il permet d'augmenter la pression et la température du fluide frigorigène qui est à l'état gazeux
- **Condenseur** : Le fluide frigorigène surchauffé et à haute pression (gaz) s'y condense en cédant de l'énergie à la source chaude.
- **Détendeur** : Il permet de diminuer la pression et la température du fluide frigorigène.
- **Evaporateur** : Le fluide frigorigène refroidi et à basse pression s'y évapore en soutirant de l'énergie au milieu à refroidir (Source froide). [32]

Les COP_{froid} pour des machines frigorifiques à compression mécanique dépendent de nombreux paramètres dont le type de compresseur employé et la technologie qu'il utilise. Sa formule est la suivante: $COP_{\text{froid}} = \text{Puissance frigorifique} / \text{Puissance absorbée}$

$$= Q_{\text{évaporateur}} / W_{\text{compresseur}}$$

Par exemple un compresseur à piston a un COP_{froid} entre 2 et 4,7 et une puissance frigorifique allant de 10 kW à 500 kW.

Pour un compresseur à vis, son COP_{froid} est entre 2 et 7 avec une puissance frigorifique allant de 300 kW à 2000 kW.

VIII.4.2. Machine de climatisation solaire à absorption:

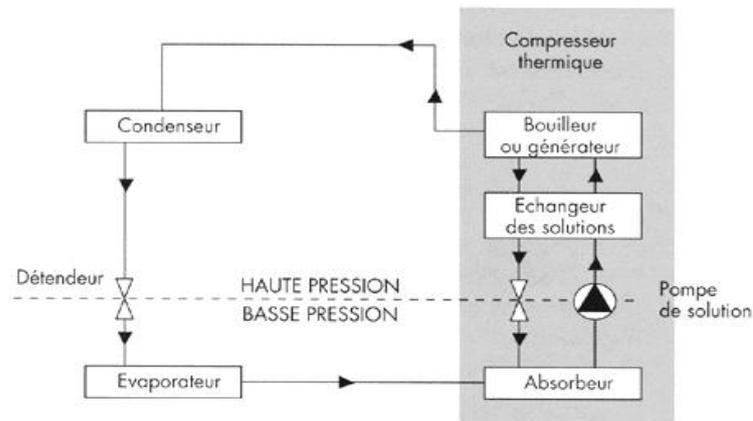


Figure VIII-17: Machine à compression thermique

Un système à absorption comprend tout d'abord, comme les machines à compression mécanique, un ensemble condenseur/détendeur/évaporateur, dans lequel ne transite que le frigorigène pur. La différence réside dans le moyen de comprimer le fluide calorifique. Elle est une compression thermochimique dans le cas de la machine à absorption.

Les machines frigorifiques à absorption liquide fonctionnent grâce à la faculté de certains liquides, d'absorber (réaction exothermique) et de désorber (réaction endothermique) une vapeur. Elles utilisent également le fait que la solubilité de cette vapeur dans le liquide dépend de la température et de la pression. Ainsi, ces machines utilisent comme fluide de travail un mélange binaire, dont l'un des composants est beaucoup plus volatil que l'autre, et constitue le fluide frigorigène. [32]

Deux couples sont principalement utilisés:

Eau + Bromure de Lithium $H_2O/LiBr$ (l'eau étant le fluide frigorigène)

Ammoniac + Eau NH_3/H_2O (l'ammoniac étant le fluide frigorigène)

VIII.4.3. Description du cycle d'une machine à absorption $H_2O/LiBr$:

Dans l'évaporateur, le réfrigérant (ici de l'eau) est pulvérisé dans une ambiance à très faible pression (vide poussé ≈ 7 mb). L'évaporateur est parcouru par un circuit à eau. En s'évaporant, le réfrigérant soustrait sa chaleur à cette eau qui est ainsi refroidie et peut ensuite alimenter des ventilateurs, une batterie froide de centrale de traitement d'air ou un plafond rayonnant.

La vapeur d'eau créée dans l'évaporateur est amenée à l'absorbeur. Il contient la solution absorbante (LiBr) qui est continuellement pompée dans le fond du récipient pour y être pulvérisée. Le LiBr

absorbe la vapeur d'eau hors de l'évaporateur et y maintient ainsi la basse pression nécessaire à la vaporisation du réfrigérant.

La solution est donc régénérée dans le désorbeur ou le bouilleur. Elle est réchauffée, par une batterie à eau chaude ou un brûleur à gaz (environ 85°C) et une partie de l'eau s'évapore. La solution régénérée retourne à l'absorbeur.

Enfin, la vapeur d'eau extraite du bouilleur est amenée dans le condenseur, où elle est refroidie par une circulation d'eau froide. L'eau condensée retourne à l'évaporateur et le cycle frigorifique peut recommencer. Le fluide chaud sortant du bouilleur qui retourne à l'absorbeur préchauffe le fluide qui va vers le bouilleur grâce à l'échangeur de chaleur, économisant ainsi une partie de l'énergie nécessaire pour chauffer le fluide à régénérer.

Le COP d'une machine à absorption est calculé de la manière suivante:

$$\text{COP}_{\text{froid}} = \text{Puissance frigorifique} / \text{Puissance apportée}$$
$$= Q_{\text{évaporateur}} / (Q_{\text{Bouilleur}} + W_{\text{circulateur}})$$

Le COP_{froid} d'une machine à absorption généralement rencontrés est entre 0,5 et 0,7. Il existe cependant des machines à absorption double effet dont le COP_{froid} est amélioré et peut atteindre 1,3 mais ces dernières nécessitent des températures d'eau au bouilleur entre 140°C et 160°C.[32]

On note tout de suite que la valeur du COP_{froid} d'une machine à absorption est très inférieure à celui d'une machine à compression mécanique traditionnelle. Cependant, la valeur du COP_{froid} est essentiellement fonction de l'énergie apportée au bouilleur or dans le cas d'une machine frigorifique solaire à absorption cette énergie apportée au bouilleur est en majeure partie gratuite car venant de l'eau chaude solaire.

VIII.4.3. Conclusion:

Les solutions de climatisation solaire comme l'absorption contribuent au respect de l'environnement dans le secteur du bâtiment pour les raisons suivantes:

- Une économie considérable d'énergie primaire.
- Une diminution des émissions de CO₂.
- Une diminution des demandes sur le réseau électrique.
- Le non recours à des réfrigérants dangereux pour l'environnement.
- Un fonctionnement moins bruyant et moins vibrant que les machines traditionnelles.

Il est donc important d'encourager le développement de cette technologie.

CONCLUSION

Le bilan Carbone du bâtiment Besançon sera réduit énormément grâce aux rénovations recommandées dans cette mémoire. En réalité, sans prendre en considération le refroidissement du bâtiment ancien et nouveau ainsi que la ventilation proposée, on peut constater que la réduction en émissions d'équivalent Carbone attend presque les 22 tonnes dans le secteur de l'énergie interne consommée par le bâtiment. Cette réduction vaut 52,36 % des émissions de ce secteur. Le tableau suivant groupe chaque réduction au poste de rénovation.

Rénovation	Réduction Emissions (TeC)
Fenêtres et vitrage	3,646081
Toit	10,74889368
Lampes	3,3752
Photovoltaïque	0,815
Capteurs solaires thermiques	3,127
Total	21,71217468

Tableau C-1: Réduction des émissions par type de rénovation

Le graphe suivant illustre l'émission provenant de l'énergie interne avant et après rénovation:

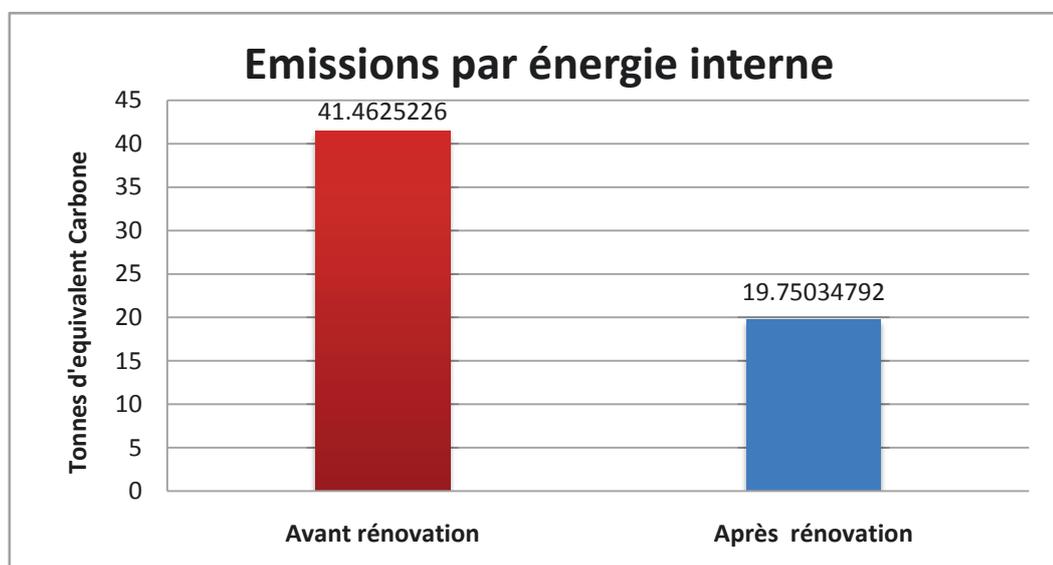


Figure C-1: Emissions avant et après rénovation de l'énergie interne

Pour atteindre un niveau de confort acceptable dans le bâtiment, un système de climatisation maîtrisé est proposé, ainsi qu'une ventilation adéquate performante et économe. Lors de l'introduction de ces deux systèmes mécaniques (climatisation et ventilation) le bilan Carbone du bâtiment ainsi que les émissions globales vont être augmentés. Mais le système de ventilation traité dans cette mémoire peut réduire les émissions causées par le groupe climatisation-ventilation jusqu'à 140 tonnes d'équivalent Carbone, ce qui est un nombre significatif pour l'environnement.

De plus à la réduction en émissions des gaz nocifs, on a économisé un volume supérieur à 553 000 Litres d'eau chaque année par le système de récupération de l'eau de pluie et une masse approximative de 3 Kg de mercure chaque année grâce au remplacement des tubes fluorescents par des tubes à LED.

On souhaite que ce projet soit établie tant que possible, dans la plupart de ces branches et le bâtiment Besançon sera un modèle type unique dans la région de kfour qui ouvrera la porte des rénovations à but environnemental ainsi que l'âme de l'HOMME face aux dangers de l'environnement et la nécessité de les remédier , même avec des minuscules gestes.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Vue de l'espace du bâtiment Besançon d'après "2012 GeoEye".....	6
Figure I-1: Les périmètres du bilan Carbone.....	8
Figure I-2: Emissions énergie interne.....	14
Figure I-3: Emissions par catégories.....	15
Figure I-4: Emissions Transports.....	19
Figure I-5: Emissions matériaux entrants.....	20
Figure I-6: Emissions cuisine.....	21
Figure I-7: Emissions déchets directs	22
Figure I-8: Emissions amortissements.....	24
Figure I-9: Emissions globales.....	25
Figure II-1: Les zones de déperdition.....	28
Figure II-2: Propagation par conduction.....	30
Figure II-3: propagation par conduction.....	30
Figure II-4: propagation par rayonnement.....	31
Figure II-5: Schéma électrique équivalent d'un simple vitre.....	32
Figure II-6: Une fenêtre type du bâtiment.....	35
Figure II-7: Trajets d'un rayon solaire à travers un vitre.....	36
Figure II-8: Schéma d'un double vitrage.....	36
Figure II-9: Schéma d'un double vitrage avec couche "basse émissivité" cas chauffage.....	37
Figure II-10: Schéma d'un double vitrage avec couche "basse émissivité" cas refroidissement.....	37
Figure II-11: Schéma électrique équivalent d'un double vitrage à argon.....	38
Figure II-12: les émissions par genre de vitres utilisés pour le chauffage.....	41
Figure III-1: Spécifications des luminaires TMS028 Philips.....	46
Figure III-2: Graphe de l'éclairage en fonction de la température des couleurs.....	48
Figure III-3: Les données introduites dans le programme DIALux (tube fluorescent).....	50
Figure III-4: Les niveaux d'éclairage (lux) dans la classe type.....	50
Figure III-5: Schéma d'une diode électroluminescente.....	51
Figure III-6: Schéma d'un tube à LED.....	52
Figure III-7: Les données introduites dans le programme DIALux (tube à LED).....	54
Figure III-8: Répartition de l'éclairage (lux) dans la classe type avec des tubes à LED.....	54
Figure III-9: Remplacement des tubes dans un luminaire à ballast ferromagnétique.....	55
Figure III-10: Remplacement des tubes dans un luminaire à ballast électronique.....	55
Figure III-11: Emissions d'équivalent Carbone par genres de tubes lumineux.....	57

Figure IV-1: Les spectres de la lumière.....	61
Figure IV-2: Une cellule photovoltaïque.....	62
Figure IV-3: Association en série des modules photovoltaïques	64
Figure IV-4: Association en parallèle des modules photovoltaïques.....	64
Figure IV-5: Système photovoltaïque autonome.....	66
Figure IV-6: Irradiation globale par mois	67
Figure IV-7: Irradiation globale annuelle.....	67
Figure IV-8: Graphe des irradiances directes et diffusées.....	67
Figure IV-9: Irradiations sans masque.....	68
Figure IV-10: Irradiation avec masque.....	68
Figure IV-11: Positions des masques proches.....	68
Figure IV-12: Besoins totaux annuels dans le parc informatique.....	69
Figure IV-13: Dimensionnement du système photovoltaïque.....	70
Figure IV-14: Résultats de production.....	70
Figure IV-15: Production et besoin d'énergie par mois	71
Figure IV-16: Besoins totaux annuels dans la cantine.....	72
Figure IV-17: Production et besoin d'énergie par mois dans la cantine.....	73
Figure IV-18: Diagramme des phases de production d'un système monocristallin.....	75
Figure V-1: Capteur plan vitré.....	78
Figure V-2: Schéma d'un système solaire thermique.....	79
Figure V-3: Abaque de dimensionnement des capteurs solaires plans.....	86
Figure V-4: Graphe des émissions avant et après introduction des capteurs solaire.....	87
Figure VI-1: Les étapes d'un système de récupération d'eau de pluie.....	90
Figure VI-2: Plan horizontal de la superficie du toit pour calculer la surface de captage.....	91
Figure VI-3: Graphe en bâtons des écoulements mensuels moyens du toit.....	93
Figure VI-4: Graphe de l'écoulement et la demande cumulées en eau.....	94
Figure VI-5: Diagramme de distribution de l'eau de pluie récupérée.....	96
Figure VI-6: Système de chasse d'eau traditionnel.....	97
Figure VI-7: Chasse d'eau a double flux réglable.....	98
Figure VI-8: Mode de fonctionnement d'un flotteur à ouverture différée.....	99
Figure VI-9: Graphe de l'écoulement et la nouvelle demande cumulées en eau.....	102
Figure VI-10: Abaque de dimensionnement pour tuyau en acier.....	104
Figure VII-2: Plan de pression neutre.....	110
Figure VII-3: Types de ventilation mécanique.....	112
Figure VII-4: Ventilation double flux avec échangeur.....	113
Figure VII-5: Système de ventilation.....	114

Figure VII-6: Schéma d'une fenêtre du bâtiment.....	118
Figure VII-7: Ventilation d'une classe.....	119
Figure VII-8: Résultat pour la première roue.....	120
Figure VII-9: Résultats pour la deuxième roue.....	121
Figure VII-10: Abaque de dimensionnement des gaines.....	123
Figure VII-11 : Dimensionnement de la gaine principale en utilisant DUCTULATOR.....	124
Figure VIII-1: Thermomètre à bulbe sèche et mouillé.....	127
Figure VIII-2: Pertes thermiques du corps humain.....	129
Figure VIII-3: Zone optimale pour l'humidité.....	130
Figure VIII-4: Zone de confort hygrothermique.....	130
Figure VIII-5: Valeurs des coefficients linéaires suivant le matériel.....	132
Figure VIII-6: Valeurs des coefficients globaux des fenêtres suivant le type	132
Figure VIII-7: Introduction des propriétés des fenêtres dans HAP 4.4.....	133
Figure VIII-8: Données du mur extérieur introduites dans HAP 4.4.....	134
Figure VIII-9: Données du toit introduites dans HAP 4.4.....	134
Figure VIII-10: Taux d'occupation et chaleur générée par personne.....	135
Figure VIII-11: Eclairage dans une classe	136
Figure VIII-12: Puissance électrique des équipements	136
Figure VIII-12: Données d'un mur intérieur	137
Figure VIII-13: Données du plafond introduites dans HAP 4.4	138
Figure VIII-14: Taux de ventilation dans une classe.....	138
Figure VIII-15: Flux du réfrigérant à travers les batteries	141
Figure VIII-16: machine à compression mécanique.....	142
Figure VIII-17: Machine à compression thermique	143
Figure C-1: Emissions avant et après rénovation de l'énergie interne.....	145
Figure A-1: Abaques de dimensionnement des tuyaux d'eau.....	168

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Répartition de personnes.....	11
Tableau I-2 : Liste des personnes sources	11
Tableau I-3 : Emissions du fioul domestique.....	13
Tableau I-4 : Émissions de CO2 par kWh d'électricité et de chaleur d'après la Source IEA.....	13
Tableau I-5 : Emissions électricité de réseau au Liban.....	14
Tableau I-6 : Emissions par catégories	15
Tableau I-7 : Moyen de locomotion domicile-école.....	16
Tableau I-8 : Distance parcourue par passager en autobus.....	16
Tableau I-9: Distance de séparation domicile-écoles	17
Tableau I-10: Emissions transport domicile-école	17
Tableau I-11: Emissions déplacements sorties scolaires.....	18
Tableau I-12: Distances parcourues par les fournisseurs.....	18
Tableau I-13: Emissions déplacements des fournisseurs	18
Tableau I-14: Emissions matériaux entrants.....	19
Tableau I-15: Emissions viandes et poissons.....	20
Tableau I-16: Emissions autres produits alimentaires.....	21
Tableau I-16: Emissions déchets directs	22
Tableau I-17: Emissions mobilier.....	23
Tableau I-18: Emissions matériel informatique	23
Tableau I-19: Emissions par poste	24
Tableau II-1: répartition des fenêtres dans le bâtiment.....	32
Tableau II-2: Les pertes de chaleur à travers les vitres simples.....	33
Tableau II-3: Valeurs moyennes de U pour les châssis	34
Tableau II-4: Perte de chaleur a travers le vitrage à haut rendement	40
Tableau II-5: Amélioration d'émissions en équivalent Carbone grâce au changement des vitres.....	40
Tableau II-6: Amélioration des émissions en équivalent Carbone grâce à l'isolation du toit.....	42
Tableau III-1: Disposition et durées de fonctionnement des tubes fluorescent par étage.....	46
Tableau III-2: La consommation annuelle d'énergie électrique des tubes fluorescents.....	47
Tableau III-3: Les températures de couleurs en fonction du type de local.....	48
Tableau III-4: Éclairage moyen recommandé sur le plan de travail	49
Tableau III-5: Tableau comparatif entre tube à LED et tube fluorescent.....	52
Tableau III-6: Consommation annuelle d'énergie électrique des tubes à LED	56
Tableau III-7: Les économies cumulées.....	58

Tableau IV-1: Besoins annuels d'énergie dans le parc informatique par appareil	69
Tableau IV-2: Les indicateurs de validité du système dimensionné	71
Tableau IV-3: Besoins annuels d'énergie dans la cantine par appareil.....	72
Tableau IV-4: Diminution des émissions équivalent Carbone pour chaque type d'électricité.....	74
Tableau IV-5: Coût du système photovoltaïque dimensionné en détails.....	74
Tableau IV-6: Durée de remboursement du système photovoltaïque dimensionné.....	74
Tableau IV-7: Quantité d'énergie consommée par phase industrielle.....	76
Tableau V-1: Répartition des éléments de plomberie	82
Tableau V-2: Demande d'eau chaude par type d'élément et type de bâtiment	83
Tableau V-3: Consommation d'eau par type d'établissement	85
Tableau V-4: Prix par élément du système solaire	88
Tableau VI-1: Précipitations et écoulements mensuels moyens de l'eau de pluie.....	92
Tableau VI-2: Demandes mensuelles en eau pour les chasses d'eau des toilettes du bâtiment.....	93
Tableau VI-3: La demande et l'écoulement mensuel moyen cumulé de l'eau.....	94
Tableau VI-3: Les demandes cumulées pour toilettes et l'arrosage	101
Tableau VI-4: Equivalence des accessoires de plomberie en pouce.....	105
Tableau VI-5: Listes des accessoires et leurs longueurs équivalentes.....	105
Tableau VII-1: Concentrations maximales de contaminations dans un endroit fermé.....	108
Tableau VII-1: Taux de ventilation minimaux dans les zones de respiration.....	115
Tableau VII-2: Taux de ventilation minimaux dans le bâtiment.....	116
Tableau VII-3: Débit d'évacuation dans le bâtiment.....	116
Tableau VII-4 :Débit d'air minimal évacué.....	117
Tableau VII-5 : Infiltration par type de fissures et fenêtres.....	118
Tableau VII-6: Débits d'air par étage.....	119
Tableau VII-7: Débits d'air par roue.....	120
Tableau VII-8: Vitesses recommandées pour les systèmes de climatisation.....	122
Tableau VII-9 : Tableau de conversion des gaines circulaires.....	124
Tableau VII-10:Tableau de sélection des grilles et registres.....	125
Tableau VII- 11: Les critères du bruit pour les systèmes de climatisation.....	125
Tableau VIII-1: Résumé du dimensionnement du system de climatisation pour une classe.....	140
Tableau VIII-2: Puissance de la machine de climatisation.....	140
Tableau C-1: Réduction des émissions par type de rénovation.....	145
Tableau A-1: valeurs de charge assignées aux appareils.....	162
Tableau A-2: Demande en eau chaude par type de bâtiment.....	162
Tableau A-3: Taux de ventilation minimum dans les zones de respiration.....	163
Tableau A-4: Gain de chaleur recommandée par équipements.....	164

Tableau A-5: Propriétés thermiques des quelques matériaux (1).....	165
Tableau A-6: Propriétés thermiques des quelques matériaux (2).....	166
Tableau A-7: Taux d'échappement d'air minimum.....	167

BIBLIOGRAPHIE ET SITOGRAPHIE

1. www.geoeye.com
2. www.philips.com
3. www.ademe.fr
4. ANSI/ASHRAE Standard 62.1
5. ANSI/ASHRAE Standard 90.1
6. ASHRAE Handbook 2005-Fundamental
7. ASHRAE Handbook 2007-Application
8. ASHRAE Handbook 2008-System and Equipments.
9. International Plumbing Code-2009
10. American Society of Plumbing Engineers-ASPE 2004
11. Fiches actions- Mars 2011
12. Le bilan carbone, outil de réduction des émissions de CO₂ (Rise 2010)
13. International Energy Agency (IEA)
14. www.energieplus-lesite.be
15. La norme européenne EN 12464-1
16. www.almee.org
17. Etude du développement de l'énergie solaire en Rhone -Alpes.
18. Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
19. Guide de conception des installations collectives (ADEME)
20. Calculs pratiques de plomberie sanitaire. Editions Parisiennes
21. Source EDF : Eau chaude électrique Résidentiel et Tertiaire – Mars 1987
22. Référentiel destiné au Maître d'ouvrage(Xavier Meersseman, Bernard Huberlant 2004)
23. Guide des facteurs d'émission Version 5.0 (ADEME)
24. www.siamp.co.uk
25. La collecte de l'eau de pluie à usage domestique (Série Agrodok No. 43)
26. Climate risk, vulnerability&adaptationassessment (Final report Lebanon)
27. www.kingspanwater.com
28. Lebanese Science Journal, Vol.11, No. 2, 2010 (Lapluiométrie moyenne annuelle au Liban)
29. Air conditioning principles and systems (Edward G.Pita)
30. Le confort thermique (Bureau d'étudesthermographiques et physique du bâtiment)
31. Carrier handbook of air conditioning system design
32. FICHE OX "Climatisation à absorption" (ADEME)
33. Fiche techniquefenêtre(SuisseEnergie)
34. Manuel pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives (ADEME)

RÉSUMÉ

La protection planétaire consiste à prendre des mesures pour limiter ou supprimer l'impact négatif des activités de l'homme sur son environnement. Il s'agit de comprendre le fonctionnement systémique planétaire de l'environnement, d'identifier les actions humaines qui l'endommagent au point de porter préjudice aux générations actuelles ou futures et de mettre en place les actions de correction. Le vieux bâtiment "Besançon" sera analysé suivant ses émissions en gaz nocifs et puis rénové d'une manière à atteindre les recommandations énergétiques récentes. L'isolation au niveau de son enveloppe et ses fenêtres, l'adaptation de l'éclairage efficace, le confort des habitants et la production de l'énergie par les sources durables sont quelques critères à suivre dans ce type de bâtiments énergivores qui sera un exemple type de la lutte contre l'impact négatif de l'homme sur son environnement et model à suivre.

Mots-clés: Equivalent Carbone, réduction, économie, renouvelable, potentiel de réchauffement planétaire, performance.

ABSTRACT

Planetary protection is to take steps to minimize or eliminate the negative impact of human activities on the environment. It is to understand the functioning of the global systemic environment, identify human actions that damage to the point of harm to present and future generations and to implement the corrective actions. The old building "Besancon" will be analyzed according to its emissions of harmful gases and then will be renovated in a way to achieve the recent energy recommendations. The insulation at the envelope and windows, the adaptation of effective lighting, the comfort of the inhabitants and the production of energy from sustainable sources are few criteria to be followed in this type of energy eater building and it will become a typical example for the fight against the negative impact of human activity on the environment and a model to follow.

Keywords: Equivalent Carbon, reduction, economy, renewable, global warming potential, performance.

ANNEXE

**TABLE E103.3(2)
LOAD VALUES ASSIGNED TO FIXTURES^a**

FIXTURE	OCCUPANCY	TYPE OF SUPPLY CONTROL	LOAD VALUES, IN WATER SUPPLY FIXTURE UNITS (wefu)		
			Cold	Hot	Total
Bathroom group	Private	Flush tank	2.7	1.5	3.6
Bathroom group	Private	Flush valve	6.0	3.0	8.0
Bathtub	Private	Faucet	1.0	1.0	1.4
Bathtub	Public	Faucet	3.0	3.0	4.0
Bidet	Private	Faucet	1.5	1.5	2.0
Combination fixture	Private	Faucet	2.25	2.25	3.0
Dishwashing machine	Private	Automatic	-	1.4	1.4
Drinking fountain	Offices, etc.	3/8" valve	0.25	-	0.25
Kitchen sink	Private	Faucet	1.0	1.0	1.4
Kitchen sink	Hotel, restaurant	Faucet	3.0	3.0	4.0
Laundry trays (1 to 3)	Private	Faucet	1.0	1.0	1.4
Lavatory	Private	Faucet	0.5	0.5	0.7
Lavatory	Public	Faucet	1.5	1.5	2.0
Service sink	Offices, etc.	Faucet	2.25	2.25	3.0
Shower head	Public	Mixing valve	3.0	3.0	4.0
Shower head	Private	Mixing valve	1.0	1.0	1.4
Urinal	Public	1" flush valve	10.0	-	10.0
Urinal	Public	3/4" flush valve	5.0	-	5.0
Urinal	Public	Flush tank	3.0	-	3.0
Washing machine (8 lb)	Private	Automatic	1.0	1.0	1.4
Washing machine (8 lb)	Public	Automatic	2.25	2.25	3.0
Washing machine (15 lb)	Public	Automatic	3.0	3.0	4.0
Water closet	Private	Flush valve	6.0	-	6.0
Water closet	Private	Flush tank	2.2	-	2.2
Water closet	Public	Flush valve	10.0	-	10.0
Water closet	Public	Flush tank	5.0	-	5.0
Water closet	Public or private	Flushometer tank	2.0	-	2.0

For SI: 1 inch = 25.4 mm, 1 pound = 0.454 kg.

a. For fixtures not listed, loads should be assumed by comparing the fixture to one listed using water in similar quantities and at similar rates. The assigned loads for fixtures with both hot and cold water supplies are given for separate hot and cold water loads and for total load. The separate hot and cold water loads being three-fourths of the total load for the fixture in each case.

Tableau A-1: Valeurs de charge assignées aux appareils

Service Water Heating

49.19

Table 10 Hot Water Demand per Fixture for Various Types of Buildings
(Litres of water per hour per fixture, calculated at a final temperature of 60°C)

	Apartment House	Club	Gymnasium	Hospital	Hotel	Industrial Plant	Office Building	Private Residence	School	YMCA
1. Basin, private lavatory	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6
2. Basin, public lavatory	15	23	30	23	30	45.5	23	-	57	30
3. Bathtub ^c	76	76	114	76	76	-	-	76	-	114
4. Dishwasher ^d	57	190-570	-	190-570	190-760	76-380	-	57	76-380	76-380
5. Foot basin	11	11	46	11	11	46	-	11	11	46
6. Kitchen sink	38	76	-	76	114	76	76	38	76	76
7. Laundry, stationary tub	76	106	-	106	106	-	-	76	-	106
8. Pantry sink	19	38	-	38	38	-	38	19	38	38
9. Shower	114	568	850	284	284	850	114	114	850	850
10. Service sink	76	76	-	76	114	76	76	57	76	76
11. Hydrotherapeutic shower	-	-	-	1520	-	-	-	-	-	-
12. Hubbard bath	-	-	-	2270	-	-	-	-	-	-
13. Leg bath	-	-	-	380	-	-	-	-	-	-
14. Arm bath	-	-	-	130	-	-	-	-	-	-
15. Sitz bath	-	-	-	114	-	-	-	-	-	-
16. Continuous-flow bath	-	-	-	625	-	-	-	-	-	-
17. Circular wash sink	-	-	-	76	76	114	76	-	114	-
18. Semicircular wash sink	-	-	-	38	38	57	38	-	57	-
19. DEMAND FACTOR	0.30	0.30	0.40	0.25	0.25	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40
20. STORAGE CAPACITY FACTOR ^b	1.25	0.90	1.00	0.60	0.80	1.00	2.00	0.70	1.00	1.00

Note: Data sources predate low-flow fixtures and appliances.
^bDishwasher requirements should be taken from this table or from manufacturers' data for model to be used, if known.

^cRatio of storage tank capacity to probable maximum demand/h. Storage capacity may be reduced where unlimited supply of steam is available from central steam system or large boiler plant.
^dWhirlpool baths require specific consideration based on capacity. They are not included in the bathtub category.

Tableau A-2: Demande en eau chaude par type de bâtiment

TABLE 6-1 MINIMUM VENTILATION RATES IN BREATHING ZONE
 (This table is not valid in isolation; it must be used in conjunction with the accompanying notes.)

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate R_p		Area Outdoor Air Rate R_a		Notes	Default Values		Air Class	
	cfm/person	L/s/person	cfm/ft ²	L/s-m ²		Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
						#/1000 ft ² or #/100 m ²	cfm/person L/s/person		
Correctional Facilities									
Cell	5	2.5	0.12	0.6		25	10	4.9	2
Dayroom	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5	1
Guard stations	5	2.5	0.06	0.3		15	9	4.5	1
Booking/waiting	7.5	3.8	0.06	0.3		50	9	4.4	2
Educational Facilities									
Daycare (through age 4)	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Daycare sickroom	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	3
Classrooms (ages 5–8)	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Classrooms (age 9 plus)	10	5	0.12	0.6		35	13	6.7	1
Lecture classroom	7.5	3.8	0.06	0.3		65	8	4.3	1
Lecture hall (fixed seats)	7.5	3.8	0.06	0.3		150	8	4.0	1
Art classroom	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Science laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
University/college laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Wood/metal shop	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Computer lab	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Media center	10	5	0.12	0.6	A	25	15	7.4	1
Music/theater/dance	10	5	0.06	0.3		35	12	5.9	1
Multi-use assembly	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1	1
Food and Beverage Service									
Restaurant dining rooms	7.5	3.8	0.18	0.9		70	10	5.1	2
Cafeteria/fast-food dining	7.5	3.8	0.18	0.9		100	9	4.7	2
Bars, cocktail lounges	7.5	3.8	0.18	0.9		100	9	4.7	2
General									
Break rooms	5	2.5	0.06	0.3		25	10	5.1	1
Coffee stations	5	2.5	0.06	0.3		20	11	5.5	1
Conference/meeting	5	2.5	0.06	0.3		50	6	3.1	1
Corridors	–	–	0.06	0.3		–	–	–	1
Storage rooms	–	–	0.12	0.6	B	–	–	–	1
Hotels, Motels, Resorts, Dormitories									
Bedroom/living room	5	2.5	0.06	0.3		10	11	5.5	1
Barracks sleeping areas	5	2.5	0.06	0.3		20	8	4.0	1
Laundry rooms, central	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	2
Laundry rooms within dwelling units	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	1
Lobbies/prefunction	7.5	3.8	0.06	0.3		30	10	4.8	1
Multipurpose assembly	5	2.5	0.06	0.3		120	6	2.8	1

ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2007

13

Tableau A-3: Taux de ventilation minimum dans les zones de respiration

Table 6 Recommended Heat Gain from Typical Medical Equipment

Equipment	Nameplate, W	Peak, W	Average, W
Anesthesia system	250	177	166
Blanket warmer	500	504	221
Blood pressure meter	180	33	29
Blood warmer	360	204	114
ECG/RESP	1440	54	50
Electrosurgery	1000	147	109
Endoscope	1688	605	596
Harmonical scalpel	230	60	59
Hysteroscopic pump	180	35	34
Laser sonics	1200	256	229
Optical microscope	330	65	63
Pulse oximeter	72	21	20
Stress treadmill	N/A	198	173
Ultrasound system	1800	1063	1050
Vacuum suction	621	337	302
X-ray system	968		82
	1725	534	480
	2070		18

Source: Hosni et al. (1999).

Table 7 Recommended Heat Gain from Typical Laboratory Equipment

Equipment	Nameplate, W	Peak, W	Average, W
Analytical balance	7	7	7
Centrifuge	138	89	87
	288	136	132
	5500	1176	730
Electrochemical analyzer	50	45	44
	100	85	84
Flame photometer	180	107	105
Fluorescent microscope	150	144	143
	200	205	178
Function generator	58	29	29
Incubator	515	461	451
	600	479	264
	3125	1335	1222
Orbital shaker	100	16	16
Oscilloscope	72	38	38
	345	99	97
Rotary evaporator	75	74	73
	94	29	28
Spectronics	36	31	31
Spectrophotometer	575	106	104
	200	122	121
	N/A	127	125
Spectro fluorometer	340	405	395
Thermocycler	1840	965	641
	N/A	233	198
Tissue culture	475	132	46
	2346	1178	1146

Source: Hosni et al. (1999).

Table 8 Recommended Heat Gain from Typical Computer Equipment

	Continuous, W	Energy Saver Mode, W
Computers^a		
Average value	55	20
Conservative value	65	25
Highly conservative value	75	30
Monitors^b		
Small (13 to 15 in.)	55	0
Medium (16 to 18 in.)	70	0
Large (19 to 20 in.)	80	0

Sources: Hosni et al. (1999), Wilkins and McGaffin (1994).

^aBased on 386, 486, and Pentium grade.

^bTypical values for monitors displaying Windows environment.

Table 9 Recommended Heat Gain from Typical Laser Printers and Copiers

	Continuous, W	1 page per min., W	Idle, W
Laser Printers			
Small desktop	130	75	10
Desktop	215	100	35
Small office	320	160	70
Large office	550	275	125
Copiers			
Desktop	400	85	20
Office	1,100	400	300

Source: Hosni et al. (1999).

Table 10 Recommended Heat Gain from Miscellaneous Office Equipment

Appliance	Maximum Input Rating, W	Recommended Rate of Heat Gain, W
Mail-processing equipment		
Folding machine	125	80
Inserting machine, 3,600 to 6,800 pieces/h	600 to 3300	390 to 2150
Labeling machine, 1,500 to 30,000 pieces/h	600 to 6600	390 to 4300
Postage meter	230	150
Vending machines		
Cigarette	72	72
Cold food/beverage	1150 to 1920	575 to 960
Hot beverage	1725	862
Snack	240 to 275	240 to 275
Other		
Bar code printer	440	370
Cash registers	60	48
Check processing workstation, 12 pockets	4800	2470
Coffee maker, 10 cups	1500	1050 sens., 450 latent
Microfiche reader	85	85
Microfilm reader	520	520
Microfilm reader/printer	1150	1150
Microwave oven, 28 L	600	400
Paper shredder	250 to 3000	200 to 2420
Water cooler, 30 L/h	700	350

significantly with occupancy. The proper diversity factor for an office of mail-order catalog telephone operators is different from that for an office of sales representatives who travel regularly.

ASHRAE research project RP-1093 derived diversity profiles for use in energy calculations (Abushakra et al. 2004; Claridge et al. 2004). Those profiles were derived from available measured data sets for a variety of office buildings, and indicated a range of peak weekday diversity factors for lighting ranging from 70 to 85% and for receptacles (appliance load) between 42 and 89%.

Heat Gain per Unit Area. Wilkins and Hosni (2000) and Wilkins and McGaffin (1994) summarized recent research on a heat gain per unit area basis. Diversity testing showed that the actual heat gain per unit area, or load factor, ranged from 4.7 to 11.6 W/m², with an average (normalized based on area) of 8.7 W/m². Spaces tested were fully occupied and highly automated, comprising 21 unique areas in five buildings, with a computer and monitor at every workstation. Table 11 presents a range of load factors with a subjective description of the type of space to which they would apply. Table 12 presents more specific data that can be used to better quantify the amount of equipment in a space and expected load factor. The medium load density is

Tableau A-4: Gain de chaleur recommandée par équipements

Table 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials—Design Values^a (Continued)

Description	Density, kg/m ³	Conductivity ^b (k), W/(m·K)	Conductance (C), W/(m ² ·K)	Resistance ^c (R)		Specific Heat, kJ/(kg·K)
				1/k, (m·K)/W	For Thickness Listed (1/C), (m ² ·K)/W	
Expanded polystyrene, extruded (smooth skin surface) (HCFC-142b exp.) ^b	29-56	0.029	—	34.7	—	1.21
Expanded polystyrene, molded beads.....	16	0.037	—	26.7	—	—
	20	0.036	—	27.7	—	—
	24	0.035	—	28.9	—	—
	28	0.035	—	28.9	—	—
	32	0.033	—	30.2	—	—
Cellular polyurethane/polyisocyanurate ^d (CFC-11 exp.) (unfaced).....	24	0.023-0.026	—	43.3-38.5	—	1.59
Cellular polyisocyanurate ^d (CFC-11 exp.) (gas-permeable facers).....	24-40	0.023-0.026	—	43.3-38.5	—	0.92
Cellular polyisocyanurate ^d (CFC-11 exp.) (gas-impermeable facers).....	32	0.020	—	48.8	—	0.92
Cellular phenolic (closed cell) (CFC-11, CFC-113 exp.) ^k Cellular phenolic (open cell).....	32	0.017	—	56.8	—	—
Mineral fiber with resin binder.....	29-35	0.033	—	30.5	—	—
Mineral fiberboard, wet felted Core or roof insulation.....	240	0.042	—	23.9	—	0.71
Acoustical tile.....	260-270	0.049	—	20.4	—	—
Acoustical tile.....	290	0.050	—	19.8	—	0.80
Acoustical tile.....	340	0.053	—	18.7	—	—
Mineral fiberboard, wet molded Acoustical tile ^l	370	0.060	—	16.5	—	0.59
Wood or cane fiberboard Acoustical tile ^l	12.7 mm	—	4.5	—	0.22	1.30
Acoustical tile ^l	19.0 mm	—	3.0	—	0.33	—
Interior finish (plank, tile).....	240	0.050	—	19.8	—	1.34
Cement fiber slabs (shredded wood with Portland cement binder).....	400-430	0.072-0.076	—	13.9-13.1	—	—
Cement fiber slabs (shredded wood with magnesia oxysulfide binder).....	350	0.082	—	12.1	—	1.30
<i>Loose Fill</i> Cellulosic insulation (milled paper or wood pulp).....	37-51	0.039-0.046	—	25.6-21.7	—	1.38
Perlite, expanded.....	32-66	0.039-0.045	—	25.6-22.9	—	1.09
	66-120	0.045-0.052	—	22.9-19.4	—	—
	120-180	0.052-0.060	—	19.4-16.6	—	—
Mineral fiber (rock, slag, or glass) [§] approx. 95-130 mm.....	9.6-32	—	—	—	1.94	0.71
approx. 170-220 mm.....	9.6-32	—	—	—	3.35	—
approx. 190-250 mm.....	9.6-32	—	—	—	3.87	—
approx. 260-350 mm.....	9.6-32	—	—	—	5.28	—
Mineral fiber (rock, slag, or glass) [§] approx. 90 mm (closed sidewall application).....	32-56	—	—	—	2.1-2.5	—
Vermiculite, exfoliated.....	110-130	0.068	—	14.8	—	1.34
	64-96	0.063	—	15.7	—	—
<i>Spray Applied</i> Polyurethane foam.....	24-40	0.023-0.026	—	43.3-38.5	—	—
Ureaformaldehyde foam.....	11-26	0.032-0.040	—	31.5-24.7	—	—
Cellulosic fiber.....	56-96	0.042-0.049	—	23.9-20.4	—	—
Glass fiber.....	56-72	0.038-0.039	—	26.7-25.6	—	—
<i>Reflective Insulation</i> Reflective material ($\epsilon < 0.5$) in center of 20 mm cavity forms two 10 mm vertical air spaces ^m	—	—	1.76	—	0.57	—
METALS						
(See Chapter 39, Table 3)						
ROOFING						
Asbestos-cement shingles.....	1900	—	27.0	—	0.037	1.00
Asphalt roll roofing.....	1100	—	36.9	—	0.026	1.51
Asphalt shingles.....	1100	—	12.9	—	0.077	1.26
Built-up roofing.....	10 mm	—	17.0	—	0.058	1.46
Slate.....	13 mm	—	114	—	0.009	1.26
Wood shingles, plain and plastic film faced.....	—	—	6.0	—	0.166	1.30
PLASTERING MATERIALS						
Cement plaster, sand aggregate.....	1860	0.72	—	1.39	—	0.84
Sand aggregate.....	10 mm	—	75.5	—	0.013	0.84
Sand aggregate.....	20 mm	—	37.8	—	0.026	0.84

Tableau A-5: Propriétés thermiques des quelques matériaux (1)

Table 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials—Design Values^a

Description	Density, kg/m ³	Conductivity ^b (k), W/(m·K)	Conductance (C), W/(m ² ·K)	Resistance ^c (R)		Specific Heat, kJ/(kg·K)
				1/k, (m·K)/W	For Thickness Listed (1/C), (m ² ·K)/W	
BUILDING BOARD						
Asbestos-cement board.....	1900	0.58	—	1.73	—	1.00
Asbestos-cement board..... 3.2 mm	1900	—	187.4	—	0.005	—
Asbestos-cement board..... 6.4 mm	1900	—	93.7	—	0.011	—
Gypsum or plaster board..... 9.5 mm	800	—	17.6	—	0.056	1.09
Gypsum or plaster board..... 12.7 mm	800	—	12.6	—	0.079	—
Gypsum or plaster board..... 15.9 mm	800	—	10.1	—	0.099	—
Plywood (Douglas Fir) ^d	540	0.12	—	8.66	—	1.21
Plywood (Douglas Fir)..... 6.4 mm	540	—	18.2	—	0.055	—
Plywood (Douglas Fir)..... 9.5 mm	540	—	12.1	—	0.083	—
Plywood (Douglas Fir)..... 12.7 mm	540	—	9.1	—	0.11	—
Plywood (Douglas Fir)..... 15.9 mm	540	—	7.3	—	0.14	—
Plywood or wood panels..... 19.0 mm	540	—	6.1	—	0.16	1.21
Vegetable fiber board						
Sheathing, regular density ^e 12.7 mm	290	—	4.3	—	0.23	1.30
Sheathing intermediate density ^e 19.8 mm	290	—	2.8	—	0.36	—
Sheathing intermediate density ^e 12.7 mm	350	—	5.2	—	0.19	1.30
Nail-base sheathing ^e 12.7 mm	400	—	5.3	—	0.19	1.30
Shingle backer..... 9.5 mm	290	—	6.0	—	0.17	1.30
Shingle backer..... 7.9 mm	290	—	7.3	—	0.14	—
Sound deadening board..... 12.7 mm	240	—	4.2	—	0.24	1.26
Tile and lay-in panels, plain or acoustic..... 290	290	0.058	—	17.	—	0.59
..... 12.7 mm	290	—	4.5	—	0.22	—
..... 19.0 mm	290	—	3.0	—	0.33	—
Laminated paperboard..... 480	480	0.072	—	13.9	—	1.38
Homogeneous board from repulped paper.... 480	480	0.072	—	13.9	—	1.17
Hardboard ^e						
Medium density..... 800	800	0.105	—	9.50	—	1.30
High density, service-tempered grade and service grade..... 880	880	0.82	—	8.46	—	1.34
High density, standard-tempered grade..... 1010	1010	0.144	—	6.93	—	1.34
Particleboard ^e						
Low density..... 590	590	0.102	—	9.77	—	1.30
Medium density..... 800	800	0.135	—	7.35	—	1.30
High density..... 1000	1000	0.170	—	5.90	—	1.30
Underlayment..... 15.9 mm	640	—	6.9	—	0.14	1.21
Waferboard..... 590	590	0.091	—	11.0	—	—
Wood subfloor..... 19.0 mm	—	—	6.0	—	0.17	1.38
BUILDING MEMBRANE						
Vapor—permeable felt.....	—	—	94.9	—	0.011	—
Vapor—seal, 2 layers of mopped 0.73 kg/m ² felt.....	—	—	47.4	—	0.21	—
Vapor—seal, plastic film.....	—	—	—	—	Negl.	—
FINISH FLOORING MATERIALS						
Carpet and fibrous pad.....	—	—	2.73	—	0.37	1.42
Carpet and rubber pad.....	—	—	4.60	—	0.22	1.38
Cork tile..... 3.2 mm	—	—	20.4	—	0.049	2.01
Terrazzo..... 25 mm	—	—	71.0	—	0.014	0.80
Tile—asphalt, linoleum, vinyl, rubber.....	—	—	113.6	—	0.009	1.26
vinyl asbestos.....	—	—	—	—	—	1.01
ceramic.....	—	—	—	—	—	0.80
Wood, hardwood finish..... 19 mm	—	—	8.35	—	0.12	—
INSULATING MATERIALS						
<i>Blanket and Batt^{f,g}</i>						
Mineral fiber, fibrous form processed						
from rock, slag, or glass						
approx. 75-100 mm.....	6.4-32	—	0.52	—	1.94	—
approx. 90 mm.....	6.4-32	—	0.44	—	2.29	—
approx. 90 mm.....	19-26	—	0.38	—	2.63	—
approx. 140-165 mm.....	6.4-32	—	0.30	—	3.32	—
approx. 140 mm.....	10-16	—	0.27	—	3.67	—
approx. 150-190 mm.....	6.4-32	—	0.26	—	3.91	—
approx. 210-250 mm.....	6.4-32	—	0.19	—	5.34	—
approx. 250-330 mm.....	6.4-32	—	0.15	—	6.77	—
<i>Board and Slabs</i>						
Cellular glass.....	136	0.050	—	19.8	—	0.75
Glass fiber, organic bonded.....	64-140	0.036	—	27.7	—	0.96
Expanded perlite, organic bonded.....	16	0.052	—	19.3	—	1.26
Expanded rubber (rigid).....	72	0.032	—	31.6	—	1.68
Expanded polystyrene, extruded (smooth skin surface) (CFC-12 exp.).....	29-56	—	—	—	—	—

Tableau A-6: Propriétés thermiques des quelques matériaux (2)

TABLE 6-4 Minimum Exhaust Rates

Occupancy Category	Exhaust Rate, cfm/unit	Exhaust Rate, cfm/ft ²	Notes	Exhaust Rate, L/s-unit	Exhaust Rate, L/s-m ²	Air Class
Arenas	—	0.50	B	—	—	1
Art classrooms	—	0.70		—	3.5	2
Auto repair rooms	—	1.50	A	—	7.5	2
Barber shops	—	0.50		—	2.5	2
Beauty and nail salons	—	0.60		—	3.0	2
Cells with toilet	—	1.00		—	5.0	2
Copy, printing rooms	—	0.50		—	2.5	2
Darkrooms	—	1.00		—	5.0	2
Educational science laboratories	—	1.00		—	5.0	2
Janitor closets, trash rooms, recycling	—	1.00		—	5.0	3
Kitchenettes	—	0.30		—	1.5	2
Kitchens—commercial	—	0.70		—	3.5	2
Locker/dressing rooms	—	0.25		—	1.25	2
Locker rooms	—	0.50		—	2.5	2
Paint spray booths	—	—	F	—	—	4
Parking garages	—	0.75	C	—	3.7	2
Pet shops (animal areas)	—	0.90		—	4.5	2
Refrigerating machinery rooms	—	—	F	—	—	3
Residential kitchens	50/100	—	G	25/50	—	2
Soiled laundry storage rooms	—	1.00	F	—	5.0	3
Storage rooms, chemical	—	1.50	F	—	7.5	4
Toilets—private	25/50	—	E	12.5/25	—	2
Toilets—public	50/70	—	D	25/35	—	2
Woodwork shop/classrooms	—	0.50		—	2.5	2

- A Stands where engines are run shall have exhaust systems that directly connect to the engine exhaust and prevent escape of fumes.
- B When combustion equipment is intended to be used on the playing surface additional dilution ventilation and/or source control shall be provided.
- C Exhaust not required if two or more sides comprise walls that are at least 50% open to the outside.
- D Rate is per water closet and/or urinal. Provide the higher rate where periods of heavy use are expected to occur, e.g., toilets in theatres, schools, and sports facilities. The lower rate may be used otherwise.
- E Rate is for a toilet room intended to be occupied by one person at a time. For continuous system operation during normal hours of use, the lower rate may be used. Otherwise use the higher rate.
- F See other applicable standards for exhaust rate.
- G For continuous system operation, the lower rate may be used. Otherwise use the higher rate.

6.4 Design Documentation Procedures. Design criteria and assumptions shall be documented and should be made available for operation of the system within a reasonable time after installation. See Sections 4.3, 5.2.3, 5.17.4, and 6.3.2 regarding assumptions that should be detailed in the documentation.

7. CONSTRUCTION AND SYSTEM START-UP

7.1 Construction Phase

7.1.1 Application. The requirements of this section apply to ventilation systems and the spaces they serve in new buildings and additions to or alterations in existing buildings.

7.1.2 Filters. Systems designed with particle filters shall not be operated without filters in place.

7.1.3 Protection of Materials. When recommended by the manufacturer, building materials shall be protected from

rain and other sources of moisture by appropriate in-transit and on-site procedures. Porous materials with visible microbial growth shall not be installed. Nonporous materials with visible microbial growth shall be decontaminated.

7.1.4 Protection of Occupied Areas

7.1.4.1 Application. The requirements of Section 7.1.4 apply when construction requires a building permit and entails sanding, cutting, grinding, or other activities that generate significant amounts of airborne particles or procedures that generate significant amounts of gaseous contaminants.

7.1.4.2 Protective Measures. Measures shall be employed to reduce the migration of construction-generated contaminants to occupied areas. Examples of acceptable measures include, but are not limited to, sealing the construction area using temporary walls or plastic sheathing, exhausting

Tableau A-7: Taux d'échappement d'air minimum

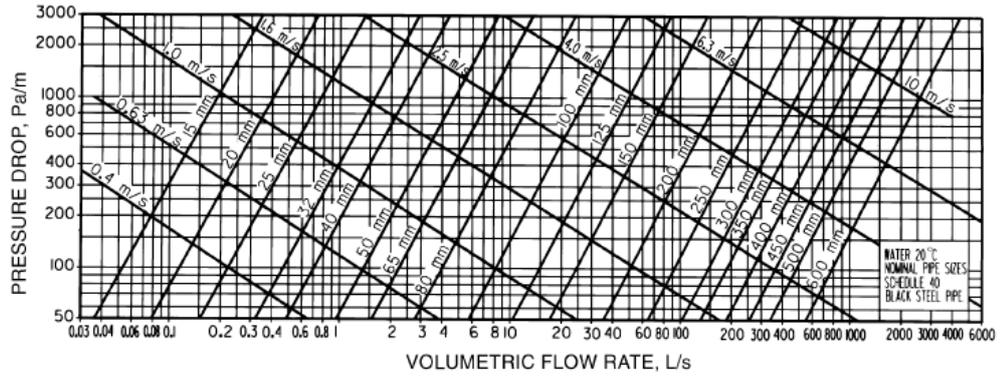


Fig. 4 Friction Loss for Water in Commercial Steel Pipe (Schedule 40)

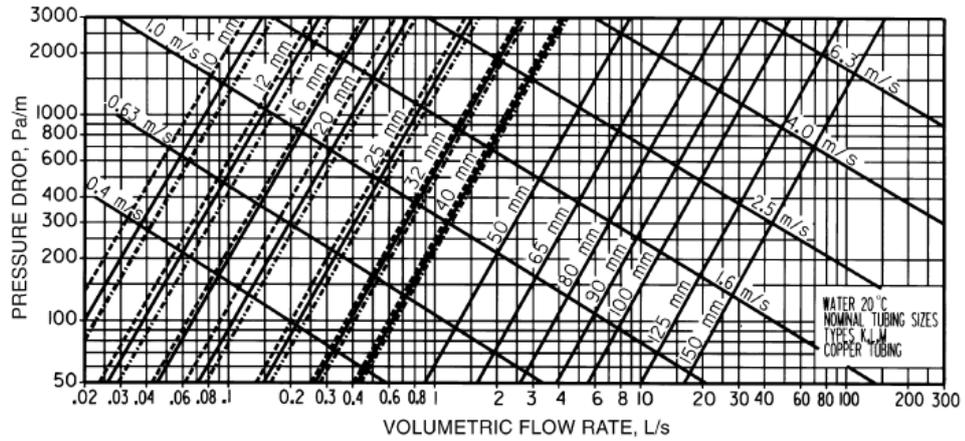


Fig. 5 Friction Loss for Water in Copper Tubing (Types K, L, M)

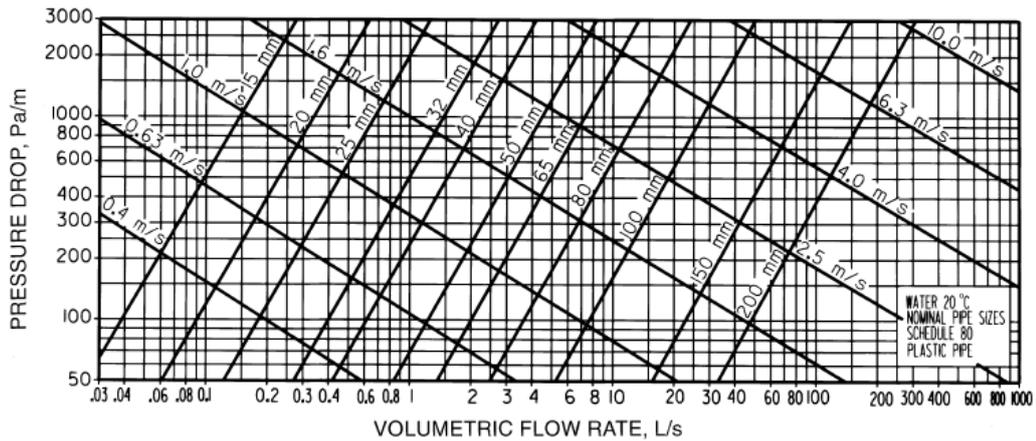


Fig. 6 Friction Loss for Water in Plastic Pipe (Schedule 80)

Figure A-1: Abaqués de dimensionnement des tuyaux d'eau

