

GUIDE

MAITRISE DE L'ENERGIE POUR LES BATIMENTS DE SANTE

Support de sensibilisation



AGENCE NATIONALE POUR
LA MAITRISE DE L'ÉNERGIE
ANME

Un engagement durable et renouvelable



PEEB

PROGRAMME FOR
ENERGY EFFICIENCY
IN BUILDINGS



PROMOTION DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT EN TUNISIE



LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS

ANME : Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie
AEP : Audit énergétique sur plan
APS : Avant-projet sommaire
APD : Avant-projet définitif
BAD : Banque Africaine de Développement
BIRD : Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement
BERD : Banque Européenne pour la Reconstruction et le Développement
CETIME : Centre Technique des Industries Mécaniques et Electrique
CES : Chauffe-Eau Solaire
CSB : Centres de Soins de Base
CSP : Centrale solaire a concentration
DT : Dinars Tunisien
DAO : Dossier d'appel d'offres
EE : Efficacité Energétique
ER : Energies renouvelables
EPS : Etablissements Publics de Santé
ECO-BAT : Label de performance énergétique des bâtiments en Tunisie
ECS : Eau Chaude Sanitaire
FTE : Fonds de Transition Energétique
GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié
GIZ : Coopération Allemande
GN : Gaz Naturel
GTC : Gestion technique centralisée
HT : Haute Tension
HC : Hôpitaux de circonscription
KTEP : Kilos Tonne Equivalent Pétrole
kWh : Kilo Wattheure
kW : Kilo Watt
LBC : Lampe Basse Consommation
MTEP : Million de Tep Equivalent Pétrole
MEHAT : Ministère de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire
MDP : Mécanismes de Développement Propre
MSP : Ministère de la Santé Publique
MT : Moyenne Tension
MW : Méga watt
ONE : Observatoire National de l'Energie
ONU : Organisation des Nations Unies

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
PROMO-ISOL : Programme de promotion de l'isolation Thermique
PROSOL : Programme de promotion de l'utilisation des chauffe eaux solaires thermiques
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PROSOL-ELEC : Programme de Promotion du Solaire Photovoltaïque
PV : Photovoltaïque
PST : Plan Solaire Tunisien
R&D : Recherche et Développement
STEG : Société Tunisienne d'Electricité et du Gaz
STEG-ER : STEG-Energies Renouvelables
SICAR : Société d'Investissement à Capital Risque
TEP : Tonne Equivalent Pétrole
TUV : Organisation Allemande de Certification
TVA : Taxe sur la Valeur Ajouté
ZT1 : Zone Thermique 1 : Les plateaux du Nord Est
ZT2 : Zone Thermique 2 : Les plaines du Nord Est
ZT3 : Zone Thermique 3 : Les plaines du Centre Est

Bibliographie

1. **ANME**, Le décret gouvernemental N°983 du 26 juillet 2017.
2. **ANME**, Guide Bat Santé 2005.
3. **ONE**, l'énergie, ONE : Observatoire National pour l'Energie.
4. **ANME**, Rapport de cartographie du secteur des bâtiments en Tunisie 2020.
5. **Ministère de la Santé**, Santé Tunisie en Chiffres 2018.

LISTE DES FIGURES

Figure n°1 : Ressources, consommation d'énergie et solde énergétique	15
Figure n°2 : Prévion de la demande d'énergie primaire	15
Figure n°3 : Organisation institutionnelle du secteur de l'électricité en Tunisie	27
Figure n°4 : Schéma de financement des énergies renouvelables	28
Figure n°5 : Compacité de la forme architecturale d'un bâtiment	32
Figure n°6 : Course du soleil en été et en hiver	32
Figure n°7 : Vitrage capteur d'énergie et vitrage à réflexion énergétique	33
Figure n°8 : Disposition des divers espaces du bâtiment en fonction de son orientation	33
Figure n°9 : Implantation et volumétrie du bâtiment par rapport au soleil	35
Figure n°10 : Implantation du bâtiment par rapport au voisinage	39
Figure n°11 : Implantation du bâtiment par rapport à la couverture végétale	39
Figure n°12 : Implantation du bâtiment par rapport à la topographie du terrain	39
Figure n°13 : Les sas d'entrée	50
Figure n°14 : Les espaces tampons	50
Figure n°15 : Les patios	51
Figure n°16 : L'orientation	51
Figure n°17 : L'inertie et l'isolation	52
Figure n°18 : La zone de confort thermique	53
Figure n°19 : Le confort visuel	54
Figure n°20 : Echanges thermiques du corps humains	55
Figure n°21 : L'inertie thermique	57
Figure n°22 : Le principe de conception bioclimatique	60
Figure n°23 : Les déperditions thermiques et l'isolation	60
Figure n°24 : Les ponts thermiques	61
Figure n°25 : Les moisissures	61
Figure n°26 : Les pertes de chaleur par les ponts thermiques	62
Figure n°27 : La transmission lumineuse	65
Figure n°28 : Les vitrages claires	66
Figure n°29 : Les vitrages absorbants	66
Figure n°30 : Les vitrages réfléchissants	66
Figure n°31 : Caractéristiques techniques de la transmission lumineuse selon le type de vitrage	67
Figure n°32 : Photo infrarouge d'un bâtiment pour l'identification des déperditions thermique d'un bâtiment	68
Figure n°33 : La menuiserie et son influence sur les déperditions thermiques	69
Figure n°34 : La jonction du cadre avec le mur	70
Figure n°35 : Taux des baies vitrées faibles	73
Figure n°36 : Taux des baies vitrées moyen	74
Figure n°37 : Taux des baies vitrées élevé	74
Figure n°38 : Taux des baies vitrées très élevé	74
Figure n°39 : Les valeurs du coefficient de masque architectural des surfaces vitrées	75
Figure n°40 : Les matériaux utilisés en façade du bâtiment	77
Figure n°41 : Isolation thermique des parois extérieures	80
Figure n°42 : Les protections solaires fixes du bâtiment	84
Figure n°43 : Les avancées de poutre	85
Figure n°44 : Les écrans et claustras	86
Figure n°45 : La protection du bâtiment par la végétation	87
Figure n°46 : Les arbres à feuilles persistantes	87
Figure n°47 : Les plantations au sol	87
Figure n°48 : Les plantations au sol	88
Figure n°49 : Les plantations en toiture	88
Figure n°50 : Hiérarchie des textes réglementaires	90
Figure n°51 : Principe de la réglementation thermique des bâtiments neufs	91
Figure n°52 : Niveau de la performance thermique de la construction	92
Figure n°53 : Zone de confort thermique	103
Figure n°54 : Ventilation naturelle, écart de température en fonction de l'écart de hauteur et du débit d'air	118
Figure n°55 : Ventilation naturelle, unilatéral ou transversale, calcul des ouvertures	118
Figure n°56 : Exemple de calcul des ouvertures en ventilation naturel transversale	119
Figure n°57 : Typologie de la ventilation mécanique	120
Figure n°58 : Les trois impératifs pour maitriser le risque infectieux	122
Figure n°59 : Domaine d'application de la norme NFS 90-351	123
Figure n°60 : Volume définit autour de l'emplacement destiné au patient	125
Figure n°61 : Processus de refroidissement : retrait de chaleur et augmentation de l'humidité relative	135
Figure n°62 : Processus de déshumidification: diagramme h, x	135
Figure n°63 : Processus d'humidification : diagramme h, x	135
Figure n°64 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à compression	136
Figure n°65 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à absorption	137
Figure n°66 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à gaz froid	137
Figure n°67 : Installation frigorifique thermoélectrique	138
Figure n°68 : Schéma de principe d'un générateur de froid à vortex	138
Figure n°69 : Principe d'une machine frigorifique simple à compression mécanique	141

Figure n°70 : Condenseur à air forcé	144
Figure n°71 : Principe de fonctionnement d'un condenseur évaporatif	145
Figure n°72 : Condenseur à l'eau multitubulaire	147
Figure n°73 : Pose de canalisation pour eau de rafraîchissement/condensation	147
Figure n°74 : Schéma d'un aérorefroidisseur	148
Figure n°75 : Schéma de principe d'une tour de refroidissement à circuit ouvert	149
Figure n°76 : Batterie froide pour refroidissement d'air	150
Figure n°77 : Evaporateur noyé	150
Figure n°78 : Evaporateur à détente sèche	150
Figure n°79 : Groupe de production d'eau glacée à condenseur à l'eau	151
Figure n°80 : Ventilateurs centrifuges montés sur tour de refroidissement	153
Figure n°81 : Série de pompes montées sur un système de refroidissement	153
Figure n°82 : Schéma d'un cycle d'absorption à simple effet utilisant de l'eau comme frigorigène et du bromure de lithium comme ab	154
Figure n°83 : Cycles comparés d'un système à compression et d'un système à absorption	156
Figure n°84 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur air/air	157
Figure n°85 : Centrale de traitement d'air	160
Figure n°86 : Coupe schématique d'une chaudière	161
Figure n°87 : Différent mode de récupération d'énergie	162
Figure n°88 : Caractéristiques d'un nodule avec mélange eutectique	167
Figure n°89 : Cuve de stockage	167
Figure n°90 : Cuves de stockage à échangeur interne	168
Figure n°91 : Accumulateur de glace à échangeurs verticaux	168
Figure n°92 : Exemple de besoins frigorifiques entièrement couverts en journée par le déstockage	169
Figure n°93 : Exemple de répartition des charges en mode production directe plus déstockage	170
Figure n°94 : Principe du Free Cooling	174
Figure n°95 : Principe du Free Cooling	175
Figure n°96 : Principe du Free Cooling	175
Figure n°97 : Free Cooling à eau - direct	176
Figure n°98 : Free Cooling à eau - indirect	176
Figure n°99 : Refroidissement adiabatique de l'air neuf	176
Figure n°100 : Installation d'un caisson de refroidissement adiabatique direct en toiture	178
Figure n°101 : Les grandeurs photométriques	183
Figure n°102 : Mode opératoire pour un projet d'éclairage	191
Figure n°103 : Mode opératoire simplifié d'un projet éclairage	192
Figure n°104 : Composition d'un ascenseur	200
Figure n°105 : Courbe de fonctionnement d'un ascenseur	201
Figure n°106 : Station de traitement d'eau potable	206
Figure n°107 : Traitement des eaux d'appoints	207
Figure n°108 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées	208
Figure n°109 : Raccordement sur un réseau radial MT: simple dérivation	212
Figure n°110 : Raccordement sur deux câbles MT en parallèle?: double dérivation	212
Figure n°111 : Schéma d'installation Gaz GPL	217
Figure n°112 : Schéma d'alimentation gazoil d'une chaufferie	218
Figure n°113 : Réseau d'alimentation d'eau potable	218
Figure n°114 : Schéma type d'une installation de cogénération	219
Figure n°115 : Bilan d'une centrale de cogénération	220
Figure n°116 : Bilan d'un système conventionnel	220
Figure n°117 : Exemple d'un champ photovoltaïque	228
Figure n°118 : Exemple d'un onduleur string	229
Figure n°119 : Exemple d'un onduleur central	229
Figure n°120 : Câble mono conducteur spécifique au PV	230
Figure n°121 : Câble U100R2V de type 3G	230
Figure n°122 : Connecteurs MC4 mâle et femelle	230
Figure n°123 : Intérieur d'un coffret de protection courant continu	231
Figure n°124 : Intérieur d'un coffret de protection courant alternatif	232
Figure n°125 : Principe de mise en œuvre de l'équipotentialité des modules photovoltaïques	232
Figure n°126 : Les étapes principales d'un projet d'autoconsommation avec transport d'électricité	234
Figure n°127 : Les différents régimes à poste horaire de la STEG	239
Figure n°128 : Schéma simplifié d'une installation solaire collective de production d'eau chaude	248
Figure n°129 : Capteur plan sans vitrage	248
Figure n°130 : Capteur plan vitré	249
Figure n°131 : Capteur à tube sous vide	249
Figure n°132 : Rendement énergétique d'un capteur solaire	250
Figure n°133 : Chauffe-eau-eau solaires individuels (CESI)	253
Figure n°134 : Fonctionnement d'une installation autovidangeable	254
Figure n°135 : Principe d'une méthode de calcul simplifié	255

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Subventions accordées par le FTE pour les investissements matériels	17
Tableau n°2 : Subventions accordées par le FTE pour les investissements immatériels	18
Tableau n°3 : Répartition du parc des établissements de santé de premier niveau	20
Tableau n°4 : Liste des départements et des services dans un établissement hospitalier	22
Tableau n°5 : Evolution du nombre des structures sanitaires dans les secteurs public et privé	23
Tableau n°6 : Répartition de la capacité hospitalière publique et privée par gouvernorat en 2017 et 2018	24
Tableau n°7 : Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur public de la santé (2014-2017)	25
Tableau n°8 : Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur privé de la santé (2014-2017)	25
Tableau n°9 : Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé et public de la santé en 2017	26
Tableau n°10 : Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé de la santé par zone climatique (2017)	26
Tableau n°11 : Organisation institutionnelle du secteur de l'électricité en Tunisie	27
Tableau n°12 : Variation des morphologies pour un immeuble disposant d'une même superficie de plancher et d'un même volume et impact sur la performance énergétique	37
Tableau n°13 : Spécificité des locaux de services dans un établissement hospitalier et incidence sur le bâti	48
Tableau n°14 : Besoins d'éclairage pour les zones intérieures d'un bâtiment de santé selon les usages et les activités	54
Tableau n°15 : Recommandations générales pour la conception des établissements hospitaliers	56
Tableau n°16 : Recommandations générales pour la conception des établissements hospitaliers dans certaines régions climatiques particulières de la Tunisie	56
Tableau n°17 : Identification de la classe d'inertie d'un bâtiment en fonction des saisons et de son usage	58
Tableau n°18 : Nature des parois de l'enveloppe d'un bâtiment en fonction de sa classe d'inertie	59
Tableau n°19 : Principales fonctions d'une paroi vitrée, les aspects positifs et négatifs	64
Tableau n°20 : Les caractéristiques techniques et la transmission lumineuse des différents types de vitrage	67
Tableau n°21 : Caractéristiques techniques des différents types de menuiseries des fenêtres	69
Tableau n°22 : Caractéristiques techniques des différents types de cadres pour fenêtres	70
Tableau n°23 : Les exigences techniques minimales de la réglementation thermique pour l'enveloppe du bâtiment en fonction du zonage climatique et du taux de vitrage pour les bâtiments publics et privés	72
Tableau n°24 : Exemple de calcul du taux global des baies vitrées d'un bâtiment et du taux relatif des baies vitrées selon une orientation donnée	73
Tableau n°25 : Variation des performances thermiques d'un bâtiment en fonction de la qualité du vitrage, des types de protection du vitrage et du taux de vitrage	75
Tableau n°26 : Impact de la qualité du vitrage sur les économies d'énergies réalisées et le niveau de confort visuel et thermique à l'intérieur du bâtiment	76
Tableau n°27 : Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des différents matériaux de façade d'un bâtiment	78
Tableau n°28 : Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des différents revêtements de façade d'un bâtiment	79
Tableau n°29 : Les matériaux isolants d'origine minérale	82
Tableau n°30 : Recommandations concernant l'emploi de protection solaire	89
Tableau n°31 : Les paramètres de confort thermique des bâtiments	102
Tableau n°32 : Les différentes zones de confort et d'inconfort humain en relation avec la température et l'humidité relative du milieu	104
Tableau n°33 : Les conditions intérieures de température et d'hygrométrie destinées pour le dimensionnement des équipements de chauffage et de refroidissement	104
Tableau n°34 : Température de base à considérer pour le dimensionnement des équipements de chauffage selon l'occupation des locaux et la classe d'inertie de l'enveloppe	105
Tableau n°35 : La masse surfacique utile selon la classe d'inertie thermique de la paroi d'un bâtiment	106
Tableau n°36 : La masse surfacique utile selon la nature de la paroi des planchers d'un bâtiment	106
Tableau n°37 : La masse surfacique utile selon la nature des murs extérieurs d'un bâtiment	106
Tableau n°38 : La masse surfacique utile selon la nature des cloisons intérieures d'un bâtiment	107
Tableau n°39 : La masse surfacique utile selon la nature des parois verticales mitoyennes du bâtiment	107
Tableau n°40 : Exemple de détermination de la classe d'inertie thermique à utiliser dans le choix des températures de base de chauffage	107
Tableau n°41 : Température de base à prendre en considération pour le calcul de refroidissement	108
Tableau n°42 : Coefficient de calcul des températures horaires de base en fonction de l'heure solaire	109
Tableau n°43 : Bilan thermique de chauffage	113
Tableau n°44 : Bilan thermique de climatisation	115
Tableau n°45 : Le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients des systèmes de ventilation mécanique	121
Tableau n°46 : Les classes de propreté de l'air des salles propres	122
Tableau n°47 : Les classes de propreté microbiologiques	123
Tableau n°48 : Les valeurs guides de performance au repos selon le niveau de risque	124
Tableau n°49 : Les valeurs guides de performance en veille selon le niveau de risque	124
Tableau n°50 : Les classes de risque en fonction du type d'activité	125
Tableau n°51 : Les débits d'air minimum par occupant de locaux à pollution non spécifique	126
Tableau n°52 : Critères et normes de conception des systèmes à vocation particulière	127
Tableau n°53 : Les caractéristiques techniques des différents types de compresseurs	142
Tableau n°54 : Technologies utilisées dans l'assemblage des groupes	152
Tableau n°55 : Performances des groupes d'eau glacée en fonction du type de compresseur	152

Tableau n°56 : Principales étapes du cycle d'une machine à absorption	155
Tableau n°57 : Applications possibles des machines à absorption en fonction des puissances	156
Tableau n°58 : PAC les plus courantes, leurs régulations et gammes de puissances homologuées en Europe	158
Tableau n°59 : Récapitulatif de quelques méthodes de stockage de l'eau glacée	165
Tableau n°60 : Typologies de refroidissement adiabatique	177
Tableau n°61 : Avantages et inconvénients des différentes typologies de refroidissement adiabatique	180
Tableau n°62 : Synthèse des grandeurs photométriques	183
Tableau n°63 : Résumé des caractéristiques des lampes utilisées dans l'éclairage professionnel	186
Tableau n°64 : Classement des luminaires chirurgicaux et d'examen suivant la norme EN 60601-2-4	187
Tableau n°65 : Les éclairages recommandés suivant la norme EN 12454 (Éclairage de postes de travail)	189
Tableau n°66 : Comparaison entre une étude statique et dynamique	194
Tableau n°67 : Outil d'analyse du coût global d'éclairage	196
Tableau n°68 : Comparaison des différentes solutions d'éclairage	196
Tableau n°69 : Exemple de caractéristique d'un ascenseur	201
Tableau n°70 : Exemple de tarification STEG électrique	212
Tableau n°71 : Tarification gaz de la STEG	216
Tableau n°72 : Les bonnes pratiques pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments existants	225
Tableau n°73 : Evaluation des potentiels solaires des systèmes photovoltaïques	237
Tableau n°74 : Evolution des consommations électriques annuelles	238
Tableau n°75 : Répartition mensuelles des consommations par postes horaires	238
Tableau n°76 : Résumé des ensembles de données les plus applicables à l'échelle mondiale	241
Tableau n°77 : Schéma de financement d'un projet à présenter au niveau des études	244
Tableau n°78 : Tableau de synthèse de projet pour un auto producteur	245
Tableau n°79 : Le choix des capteurs solaire thermique en fonction des températures de sortie à l'utilisation	251
Tableau n°80 : Variation des coefficients européens saisonniers	255

SOMMAIRE

Chapitre 01: INTRODUCTION GENERALE	13
1. Présentation générale du guide technique	14
2. Contexte énergétique, cadre réglementaire et institutionnel	15
2.1. Rétrospective énergétique en Tunisie	15
2.2. Prévision de la demande d'énergie primaire	15
2.3. Le Fond de transition énergétique (FTE)	16
2.4. Accords internationaux relatifs à la protection climat et au développement durable.	18
3. Présentation du secteur des bâtiments à usage hospitalier et des typologies de bâtiments dans ce secteur	20
3.1. Structures de santé en Tunisie	20
3.2. Activité dans les établissements hospitaliers	22
4. Le parc existant et les tendances d'évolution du parc des bâtiments à usage hospitalier	23
4.1. Evolution du nombre des structures sanitaires dans les secteurs public et privé	23
4.2. Capacité hospitalière totale (secteur public et privé)	24
4.3. Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur public de la santé « 2014 - 2017 »	25
4.4. Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur privé de la santé « 2014 - 2017 »	25
4.5. Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé et public (gt) de la santé en 2017	26
4.6. Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé de la santé par zone climatique en 2017	26
5. Organisation institutionnelle du secteur de l'électricité en Tunisie	27
6. Le secteur privé et les institutions financières	28
7. Exemple de schémas de financement des ENR	28
8. Procédure d'audit énergétique sur plan	28
Chapitre 02 : ENVELOPPE DU BATIMENT	29
1. Démarche pour une conception adéquate	30
1.1. Objectif de la démarche	30
1.2. Les phases de conception usuelles :	30
1.3. Nécessité du travail de groupe dans la conception d'un bâtiment (architecte, ingénieurs spécialisés, experts auditeurs sur plan etc.)	31
2. Impacts des choix conceptuels de base sur les coûts d'investissement et d'exploitation d'un projet	32
2.1. Compacité de la forme architecturale	32
2.2. Orientation et nature des parois extérieures	32
2.3. Taux de vitrage des diverses parois extérieures et nature du vitrage et protection solaire envisagée	33

2.4. Disposition des divers espaces dans le projet	33
2.5. Système de chauffage et/ou climatisation envisagé	33
2.6. Systèmes d'éclairage envisagé	34
2.7. Des solutions intégrées	34
3. Implantation d'un bâtiment sur une parcelle donnée	35
3.1. Implantation et volumétrie externe par rapport au soleil	35
3.2. Implantation et volumétrie externe par rapport aux déperditions de chaleur	37
3.3. Implantation et volumétrie externe par rapport au vent	38
3.4. Implantation et volumétrie externe par rapport à la couverture végétale	39
3.5. Implantation et volumétrie externe par rapport à la topographie du terrain	39
4. Orientation et organisation des espaces intérieurs	40
4.1. Typologie des locaux dans les hôpitaux	40
4.2. Les conditions d'occupation des locaux et les incidences sur le bâti	48
4.3. Organisation de l'espace : les mesures économisantes : modularité des espaces	49
4.4. Recommandations	53
5. Architecture thermique de l'enveloppe	57
5.1. Rôle des parois opaques et de l'inertie thermique	57
5.2. Les déperditions thermiques et l'isolation	60
5.3. Les ponts thermiques	61
5.4. Les moisissures	62
5.5. Rôle des parois vitrées	64
5.6. Technologies de l'enveloppe	77
5.7. Protections solaires et occultations	83
6. Simulation énergétique du bâtiment	90
6.1. La réglementation thermique des bâtiments neufs en Tunisie	90
6.2. Aperçu sur L'arrêté relatif aux bâtiments à usage de bureaux et assimilé	92
Chapitre 03 : LOTS TECHNIQUES	97
1. Le chauffage, climatisation, ventilation des locaux :	98
1.1. Exigence sur la conception d'un CVCA pour maintenir la qualité de l'Air dans un établissement de santé	98
1.2. Le confort thermique des bâtiments	102
1.3. Les conditions climatiques de base pour le dimensionnement des systèmes CVCA	105
1.4. Le bilan thermique des bâtiments	112
1.5. La ventilation	117
1.6. La climatisation	134
1.7. Le chauffage	160
1.8. La récupération d'énergie	162
1.9. Systèmes de stockage de froid	164
1.10. Le free Cooling	171
1.11. Le refroidissement adiabatique	176
2. L'Eclairage Artificiel	181
2.1. Notion de base sur l'éclairage	182
2.2. Les différents types de luminaires et lampes	184
2.3. Niveau d'éclairement exigé selon l'activité	187
2.4. Normes appliqués aux luminaires	189
2.5. Démarche de calcul et de conception	190
2.6. L'étude du coût global d'un projet d'éclairage	195

3. Les aspects énergétiques des installations techniques annexes :	198
3.1. Les Appareils de levage	198
3.2. La station de production des fluides médicaux	202
3.3. La Buanderie	203
3.4. La cuisine et les chambres froides	204
3.5. La station de surpression d'eau	205
3.6. La station de traitement des Eaux potables	206
3.7. La station d'épuration : STEP	208
4. Alimentation énergétique de l'établissement	211
4.1. L'alimentation électrique :	211
4.2. L'alimentation gaz naturel, GPL , Gazoil	216
4.3. L'alimentation eau potable	218
4.4. La Cogénération – la tri génération	219
5. Le Management de l'énergie dans l'établissement	221
5.1. Les compétences minimales du responsable de l'énergie	221
6. La gestion technique centralisée : GTB	222
7. Les bonnes pratiques pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments existants	225
Chapitre 04 : AUTO PRODUCTION PHOTOVOLTAIQUE	227
1. Composition d'une Installation solaire Photovoltaïque	228
1.1. Générateur photovoltaïque	228
1.2. Les onduleurs	229
1.3. Système de pose au sol ou sur toiture	230
1.4. Câbles électriques	230
1.5. La sécurité des installations électriques	231
1.6. Comptage électrique	232
1.7. Supervision	233
1.8. Normes	233
2. Processus de développement des projets d'énergies renouvelables	233
2.1. Projet sous le régime de l'autoconsommation (MT/HT) sans transport	233
2.2. Projet sous le régime de l'autoconsommation (MT/HT) avec transport d'électricité (sur site déporté)	235
3. Outils de calcul d'une installation Photovoltaïque :	237
3.1. Bilan de puissance	237
3.2. Courbes de charges	237
3.3. Etude faisabilité	239
Chapitre 05 : PRODUCTION DU SOLAIRE THERMIQUE	247
1. Composition d'une installation solaire thermique	248
1.1. Les différents types de Capteurs	248
1.2. Ballon de stockage et échangeur	252
1.3. Dispositif d'appoint	252
1.4. Le Circuit de distribution	252
1.5. La régulation	252
1.6. Le système de suivi à distance des performances	252
1.7. Configurations types	253
1.8. Systèmes sous pression et autovidangeable	254
2. dimensionnement d'une installation solaire thermique	254
2.1. Dimensionnement des besoins énergétiques	254
2.2. Calcul des performances d'une installation solaire	255

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce guide pour qu'il soit simple, convivial et utile en terme d'amélioration des capacités du personnel technique du Ministère de la Santé et du Ministère de l'Équipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire en Tunisie.

Ce guide est destiné à concevoir de bâtiments de santé durables et énergétiquement performants afin de réduire leurs factures énergétiques tout en intégrant les technologies des énergies renouvelables. Nos remerciements sont destinés notamment au bureau de conception, au bureau d'études et à la commission nationale de supervision de l'élaboration et la conception du guide de santé dont les noms sont indiqués ci-dessous :

Document élaboré par

Le B.E. ASSELEC :

M. Mohamed Ali REGHINI - Ingénieur Conseil et Expert Auditeur énergétique

M. Néjib KRID - Architecte

M. Mehdi KRID - Architecte

Conception graphique :

Agora Graphic - M. Melken SLIMANE

Commission de supervision de la conception du guide :

Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie :

M. Samir AMARA - Ingénieur

M. Imed TRIKI - Ingénieur

Ministère de la Santé :

M. Ramy SGHARI - Ingénieur en Chef - Chef service à la Direction des Bâtiments

Mme Amira GADER - Architecte en chef

Mme Karima BADRI - Hygiéniste

Ministère de l'équipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire :

M. Ahmed BEN OTHMANE - Ingénieur

GIZ - PEEB :

Mme Rym NAFTI - Coordinatrice du projet,

Mme Helen NASER

M. Mounir BAHRI - Consultant

INTRODUCTION





CHAPITRE 01

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU GUIDE TECHNIQUE :

Ce guide technique a été développé pour couvrir le secteur des bâtiments à usage hospitalier, et ce pour atteindre les objectifs stratégiques de la Tunisie en terme de maîtrise d'énergie dans les bâtiments tertiaires et la réduction des gaz à effet de serre.

Ce guide est composé d'une introduction générale et de deux modules. Chaque module est composé de deux parties et chaque partie comporte plusieurs chapitres comme suit :

1.1. L'introduction générale couvre les généralités relatives au :

- La présentation du guide
- Le contexte énergétique
- Les plans d'action de maîtrise d'énergie
- Aperçu sur les bâtiments à usage hospitalier
- Les acteurs institutionnels
- Les institutions financières et les schémas de financement

1.2 Module 1

Partie1 : Traite de l'enveloppe du bâtiment et de l'importance des différents rôles que joue l'enveloppe d'un bâtiment dans sa relation avec son environnement physique. Les différents chapitres traitent :

- La démarche conceptuelle pour l'obtention d'un bâtiment performant
- Des liens certains entre architecture et thermique de l'enveloppe, et explore d'une manière assez exhaustive ces rapports.
- Les différentes technologies de l'enveloppe qui sont disponibles et traite aussi bien des éléments de l'enveloppe concernés que des matériaux utilisés.
- Les recommandations et critères prescriptifs (synthèse) relatifs aux éléments de l'enveloppe.
- La simulation énergétique du bâtiment.

Partie2 : traite des installations techniques dans le bâtiment hospitalier, notamment:

- **Un chapitre sur le chauffage, la climatisation et la ventilation.** La méthode de réalisation d'un bilan thermique d'un bâtiment, la présentation des critères de conception des installations de chauffage, de climatisation et de ventilation, et Les différents types d'installations de chauffage, climatisation ainsi que l'aspect de récupération.
- **Un chapitre sur l'éclairage.** Qui traite la méthode de calcul d'un éclairage efficace, la technologie LED, la régulation et la gestion technique d'éclairage.
- **Un chapitre sur les installations techniques annexes** en termes de l'aspect technologique et l'aspect économie d'énergie tel que les appareils de lavage, les équipements de cuisine, buanderie, fluides médicaux et la surpression d'eau.
- **Un chapitre sur les alimentations énergétiques du Bâtiment** qui traite l'aspect contractuel vis-à-vis les fournisseurs d'énergie et d'eau.
- **Un chapitre sur l'architecture du système de management** de l'énergie et l'architecture de la GTC et son impact sur la maîtrise d'énergie.
- **Un chapitre sur l'amélioration des performances énergétiques** des bâtiments existants.

1.3. Module 2

Partie1 : Traite de l'architecture d'une installation solaire PV, les différents régimes d'autoconsommation, et de l'étude de faisabilité d'une Installation PV.

Partie2 : Traite de l'architecture d'une installation solaire thermique, la conception d'une installation solaire thermique, ainsi que le choix optimal des équipements solaires.

2. CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE, CADRE RÉGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL

2.1- Rétrospective énergétique en Tunisie :

Le paysage énergétique tunisien est marqué par une augmentation continue de la demande d'énergie devant une baisse des ressources nationales. Il s'ensuit un déficit énergétique structurel de plus de 45% actuellement et qui va en s'accroissant pour atteindre probablement 80% en 2030, si la situation actuelle se prolonge.

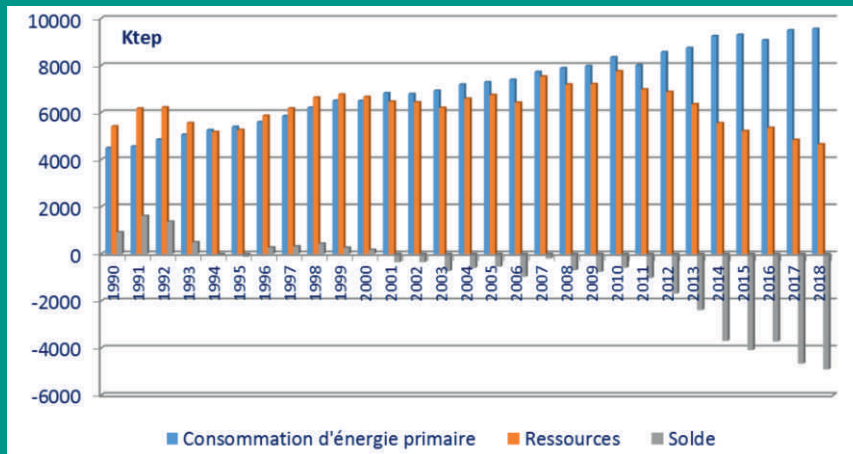


Figure 1 : Ressources, consommation d'énergie et solde énergétique

Source : ONE

Le déclin des ressources énergétiques s'est manifesté par la baisse des ressources des énergies primaires de plus de 6% par an durant la période 2010 – 2017 pour passer de 7,8 MTEP en 2010 à 4,8 MTEP en 2017. Alors que les ressources sont en baisse, les besoins ne cessent d'augmenter.

Les augmentations des besoins en énergies primaires ont évolué de plus de 2% durant la période 2010 – 2017 pour passer de 8,3 MTEP en 2010 à 9,6 MTEP en 2017.

Cette situation de dépendance énergétique impose à la Tunisie des défis majeurs liés à la sécurité de son approvisionnement énergétique et la compétitivité de son économie. Il est à noter dans ce cadre que l'augmentation des importations des produits énergétiques, pour faire face à ce déficit, affecte de plus en plus la situation de la balance commerciale nationale et les recettes en devises du pays.

2.2.- Prédiction de la demande d'énergie primaire :

Sans la politique nationale de Maîtrise de l'énergie, la demande d'énergie primaire pourra avoir une tendance asymptotique à l'horizon de 2030, mais avec la Maîtrise de l'énergie on pourra stabiliser la demande en énergie primaire et préserver les réserves naturelles pour la génération future.

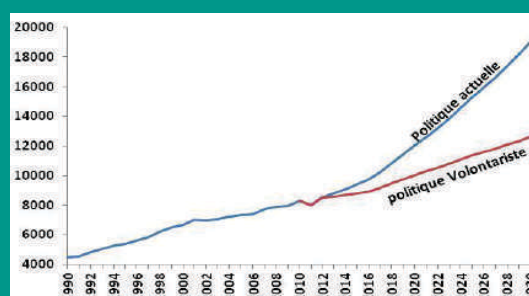


Figure 2 : Prédiction de la demande d'énergie primaire (1)

Source : ONE

Conscient de l'évolution future des ressources nationales et de la consommation énergétique nationale, l'état tunisien, a mis en place depuis l'année 1985 une structure de base à travers la création de l'Agence de Maîtrise de l'Energie (AME) en vue de mettre en place une stratégie nationale de maîtrise de l'énergie en Tunisie et sa gestion à travers la promulgation du décret-loi n°85-8 du 14 septembre 1985 créant l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (dénommée alors Agence de Maîtrise de l'Energie) et fixant le caractère et la mission de cette institution. Ce décret-loi, ratifié par la Loi n°85-92 du 22 novembre 1985, a fixé également les aides financières directes octroyées aux investissements relatifs à la maîtrise de l'énergie ainsi que les avantages fiscaux accordés lors de l'acquisition des équipements économiseurs d'énergie.

Ce cadre réglementaire a connu une évolution dans le temps pour s'adapter à l'évolution de la situation énergétique du pays pour affirmer une volonté politique ambitieuse de soutien aux investissements en la matière et confirmant l'intérêt accordé à la maîtrise de l'énergie en tant qu'axe prioritaire de la politique énergétique nationale.

La Tunisie a adopté une stratégie de transition énergétique qui repose sur deux axes dont notamment :

- L'utilisation rationnelle de l'énergie, avec l'objectif de réduire de 30% sa consommation d'énergie primaire à l'horizon 2030,
- Une politique de diversification de son mix énergétique qui repose essentiellement sur le développement des énergies renouvelables. Il vise à porter la part des énergies renouvelables dans la production totale d'électricité à 30% en 2030.

2.3. Le Fond de Transition Énergétique (FTE) :

Dans le cadre du changement d'échelle au niveau de la concrétisation de la stratégie nationale de transition énergétique, l'état tunisien a mis en place une nouvelle stratégie de transition énergétique avec un nouveau Fonds de Transition Energétique (FTE). Ce nouveau fonds va permettre l'élargissement des mesures à travers l'introduction des nouvelles actions prévues dans le cadre du plan d'action de maîtrise de l'énergie 2016-2020, avec un renforcement de ses ressources à travers la mise en application de la taxe spécifique sur la consommation d'énergie et le financement par la coopération internationale (financement climat, etc.).

Le nouveau fonds FTE devra être intégré dans les instruments de financement existants pour maximiser son effet de levier pour travailler en synergie avec les instruments financiers existants (les banques pour les crédits et les SICAR pour la fonction fonds d'investissement).

Le fond de transition énergétique objet du décret 983/2017 du 26 juillet 2017 se caractérise par :

- Des subventions à l'investissement
- Des lignes de crédit avantageuses
- Bonification des crédits
- Garantie des crédits



Selon l'article 5 du décret 983/2017 le crédit total (FTE + Banque) ne doit pas dépasser 50% de l'investissement et le crédit FTE doit être inférieur ou égale au crédit bancaire.

Selon l'article 6 du décret 983/2017 le fond propre pour un nouveau projet y compris la dotation de la FTE doit être supérieur ou égale à 40% de l'investissement et le fond propre pour une extension de projet y compris la dotation de la FTE doit être supérieur ou égale à 30% de l'investissement

Les subventions relatives aux projets de maîtrise d'énergie dans le secteur tertiaire et hospitalier sont les suivants :

Les investissements matériels :

INVESTISSEMENT MATERIEL		
PROJET	SUBVENTION	CRÉDIT
Projet Pilote	50% x Investissement Plafond : 100 000 DT	Plafond 200 000 DT sur 7ans (2ans grâce) et Taux 5%
Monitoring (gestion d'énergie)	40% x Investissement Plafond : 100 000 DT	Plafond 80 000 DT sur 7ans (2ans grâce) et Taux 5%
Efficacité énergétique dans le bâtiment (équipements performants,...)	30% x Investissement Plafond : 200 000 DT	Plafond 400 000 DT sur 7ans (2ans grâce) et Taux 5%
Chauffe eaux solaire collectif	30% x Investissement Plafond : 250 DT/m ²	
Production du Biogaz	30% x Investissement Plafond : 50 000 DT	Plafond 100 000 DT sur 7ans (2ans grâce) et Taux 5%
Stockage du Froid	30% x Investissement Plafond : 100 000 DT	Plafond 200 000 DT sur 7ans (2ans grâce) et Taux 5%
Production du froid par le gaz naturel	30% x Investissement Plafond : 100 000 DT	Plafond 200 000 DT sur 7ans (2ans grâce) et Taux 5%
Tout autre projet matériel	20% x Investissement Plafond : 200 000 DT	

Source : décret 983-2017 du 26 Juillet 2017 (FTE)

Tableau 1 : Subvention accordées par le FTE pour les investissements matériels



Pour les nouveaux projets et les projets d'extension d'autoproduction photovoltaïque, raccordé au réseau STEG MT, le FTE peut intervenir au fond propre selon deux modes :

- a - Crédit ne dépassant pas 60% du fond propre selon article 6 du décret 983/2017 remboursable sur 12 ans dont 5ans de période de grâce et taux 3%.
- b - Une participation du FTE au fond propre avec un taux inférieur à 60% et une participation de la SICAR au fond propre avec un taux supérieur à 10%. Et avec un autofinancement supérieur à 10%.

La dotation ou la participation du FTE au fond propre ne peut être réalisé que pour un nouveau projet dont l'investissement ne dépassant pas 4 000 000 DT ou un projet d'extension dont l'investissement ne dépassant pas 3 000 000 DT.

Les investissements immatériels :

INVESTISSEMENT IMMATERIEL	
MISSION	SUBVENTION
Audit énergétique d'un bâtiment existant	70% du coût de l'audit ; Plafond : 30 000 DT
Audit énergétique sur Plan d'un nouveau projet ou d'une extension	70% du coût de l'audit ; Plafond : 30 000 DT
Etude faisabilité d'un projet PV, Cogénération, Solaire thermique, Biogaz,...	70% du coût de l'étude ; Plafond : 30 000 DT
Assistance et Accompagnement à la mise en place du projet de maîtrise de l'énergie	70% du coût de la mission d'accompagnement Plafond : 70 000 DT
Tout autre investissement immatériel	70% x Investissement Immatériel Plafond : 70 000 DT

Source : décret 983-2017 du 26 Juillet 2017 (FTE)

Tableau 2 : Subventions accordées par le FTE pour les investissements immatériels

2.4. Accords internationaux relatifs à la protection du climat et au développement durable :

La Tunisie est signataire de l'accord de Paris de 2015 sur le climat. L'Etat s'est ainsi engagé au niveau de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN) à réduire ses émissions de gaz à effet de serre dans tous les secteurs (énergie, procédés industriels, agriculture, forêt et autres utilisations des terres, et déchets) de manière à baisser son intensité carbone de 41% en 2030 par rapport à l'année de base 2010. La réduction spécifiquement visée en 2030 pour le secteur de l'énergie est de 46%. Cette réduction de l'intensité carbone passe notamment par le recours aux projets d'énergies renouvelables, lequel est encadré par le Plan Solaire Tunisien.

Par ailleurs, la Tunisie a adhéré depuis 2016 aux Objectifs du Développement Durable (ODD 2030) des Nations Unies. Ces objectifs prévoient en particulier de garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, à un coût abordable (objectif 7).

2.4.1. Le Plan Solaire Tunisien (PST)

Le Plan Solaire Tunisien (PST) est le programme national devant permettre d'atteindre les objectifs de la stratégie de développement des énergies renouvelables.

A l'horizon 2030, l'objectif du Plan Solaire Tunisien est d'installer des moyens de productions d'électricité ENR pour fournir une puissance installée additionnelle de 3815 MW. La répartition entre les différentes technologies se fait comme suit:

- 1510 MW pour l'énergie solaire PV,
- 1755 MW pour l'éolien,
- 450 MW pour le solaire CSP, et
- 100 MW à travers les centrales valorisant les ressources de biomasse.

Le détail du plan solaire tunisien est présenté dans le guide des énergies renouvelables établies par l'ANME et la GIZ.

2.4.2. Les incitations pour l'importation des composants dans le domaine des ENR

En application du Décret n° 2018-234 du 12 mars 2018 & Décret n° 2017-191 du 25 janvier 2017, les matières premières, les produits semi-finis et les équipements utilisés dans le domaine des énergies renouvelables («Composants ENR» dans ce qui suit) bénéficient d'avantages fiscaux lors de leur acquisition sur le marché local ou lors de leur importation. Ces avantages consistent en :

- L'application de droits de douane minimum et du taux minimum de la TVA pour les «Composants ENR» n'ayant pas de similaires fabriqués localement;
- L'application du taux minimum de la TVA pour les «Composants ENR» fabriqués localement.

TVA

La liste détaillée des équipements pouvant bénéficier de ces avantages est annexée au Décret gouvernemental n° 2018-234 du 12 mars 2018 modifiant et complétant le Décret gouvernemental n° 2017-191 du 25 janvier 2017. Un tableau récapitulatif des principaux composants des secteurs solaires photovoltaïques et éoliens bénéficiant de ces incitations, ainsi que la démarche d'obtention de ces avantages, sont présentés dans le paragraphe suivant.

2.4.3. Procédure pour l'obtention des avantages

L'application des avantages pour les équipements fabriqués localement est faite automatiquement lors de leur acquisition sur le marché tunisien.

Les avantages fiscaux pour l'importation des composants n'ayant pas de similaires fabriqués localement sont accordés sur la base d'une attestation délivrée par l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie après qu'une demande a été effectuée par l'importateur de ces composants.

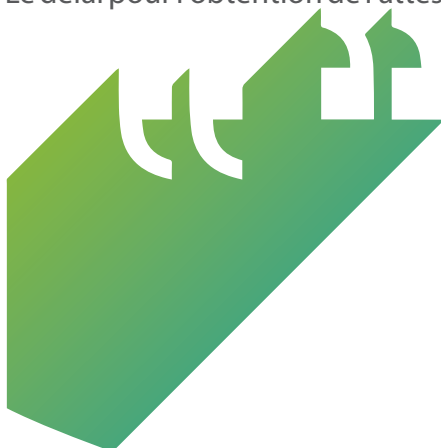
Afin de bénéficier de cette incitation, le promoteur doit fournir un dossier à l'ANME avec les éléments suivants* :

Une demande au nom du Directeur Général de l'ANME ;

- Une copie de la carte d'identification fiscale de la société importatrice de l'équipement en question ;
- La documentation technique détaillée de l'équipement objet de la demande ;
- Les certificats de performance et de qualité du produit ;
- Une facture pro-forma ou une facture d'importation.

En cas d'importation des onduleurs solaires PV, le demandeur devra inclure dans son dossier une autorisation de raccordement de l'équipement, délivrée par les services techniques de la STEG.

Le délai pour l'obtention de l'attestation s'élève à 15 jours.



3. PRÉSENTATION DU SECTEUR DES BÂTIMENTS À USAGE HOSPITALIER ET DES TYPOLOGIES DE BÂTIMENTS DANS CE SECTEUR

Aux termes de la loi n° 91-63 du 29 juillet 1991, relative à l'organisation sanitaire et du décret n°2002-846 du 17 avril 2002 fixant les critères de classement des structures sanitaires publiques, on entend par «Etablissements Publics de Santé» une catégorie juridique de structures sanitaires publiques qui se distingue des Etablissements Publics à Caractère Industriel et commercial (EPIC) et des Etablissements Publics Administratifs ou Non Administratifs

3.1. Structures de santé en Tunisie :

Le système de santé en Tunisie est un système pluraliste : Public, privé et para-public. Beaucoup d'intervenants assurent sa gestion : Ministère de la Santé, Ministère des affaires sociales, caisses de sécurité sociale, Ministère de la défense etc. La régulation du secteur est assurée par le gouvernement, les caisses sociales et les organisations professionnelles (ordres et syndicats).

Le secteur public – Ministère de la Santé :

Le système de soins comprend trois niveaux, répartis comme suit :

1^{ère} ligne Premier niveau

C'est le niveau des soins de base. En 2018, il comprend les établissements suivants

ETABLISSEMENT	CENTRE DE SANTÉ DE BASE	HÔPITAL DE CIRCONSCRIPTION	CENTRE D'HÉMODIALYSE	GROUPEMENT DE SANTÉ DE BASE	DIRECTION RÉGIONALE
Nombre	2161	110	51	28	24

Source : Santé Tunisie En Chiffres 2018

Tableau 3 : Répartition du parc des établissements de santé de premier niveau

Le nombre de lits total de ce niveau est de 3 019 lits, soit 14,14% environ de la capacité totale du secteur public.

2^{ème} ligne Deuxième niveau

Il est constitué de 35 hôpitaux régionaux (non universitaires), généralement situés aux chefs lieu de gouvernorat. Ils disposent de 8 139 lits, soit 30,11% environ de la capacité totale du secteur public.

Actuellement il y a plusieurs hôpitaux régionaux en cours de constructions dont nous citons :

- Hôpital régional de Jelma (Sidi Bouzid)
- Hôpital régional de Haffouz (Kairouan)
- Hôpital régional de Ghardimaou (Jendouba)
- Hôpital régional de Makthar (Siliana)



3^{ème}
ligne

Troisième niveau

Il s'agit du pôle universitaire, composé de : 23 Etablissements Publics de santé (EPS) et 9 centres spécialisés. Le nombre de lits total de ce niveau est de 10 198 lits, soit 47,75% environ de la capacité totale du secteur public.

Le secteur public – autre que celui du Ministère de la Santé :

Le Ministère de la défense dispose de 3 Hôpitaux militaires avec une capacité de 800 lits et des infirmeries- dispensaires.

Le Ministère de l'intérieur dispose d'un Hôpital des forces de Sûreté à la Marsa et des infirmeries- dispensaires.

Le secteur para public :

C'est un secteur assez développé, mais secondaire comparé au secteur public. Il comprend :

- Les Six Polycliniques de soins ambulatoires de la CNSS (2 à Tunis, 1 à Bizerte, 1 à Sousse, 1 à Sfax et 1 à Métlaoui) ;
- Les Six centres d'hémodialyses ;
- Les services Médicaux autonomes de certaines entreprises nationales (SONEDE, STEG, SNCFT, TUNIS AIR).
- Les services médicaux de médecine du travail à vocation préventive.

Structure Privée

En 2018, l'infrastructure du secteur privé comprend :

- **102 cliniques** avec une capacité de 6 370 lits ;
- **544 laboratoires** répartis comme suit :
 - * **486** laboratoires d'analyses de biologie médicale ;
 - * **55** laboratoires d'anatomie et de cytologie pathologique ;
 - * **3** laboratoires cytogénétiques ;
- **115 centres** d'hémodialyse ;
- **2 127 Officines.**



Source : Santé Tunisie En Chiffres 2018

3.2. Activité dans les établissements hospitaliers

Les activités qu'abritent les établissements hospitaliers sont extrêmement variées et la liste des services qu'ils abritent est souvent sans commune mesure avec les autres bâtiments rencontrés, tant les services sont nombreux: voir tableau ci après.

Les départements et les services décrits ci-dessous nécessitent des conditions sanitaires très particulières, de même que des ambiances spatio-temporelles différentes, sans oublier que dans le secteur des soins de santé, il s'agit bien souvent de lieux d'hébergement occupés 24 heures sur 24, nécessitant des conditions climatiques souvent au-delà des conditions habituelles et généralement admises.

Dans les bâtiments à usage hospitalier, le confort devrait théoriquement être complet: hydrothérapie, visuel, acoustique et physique. Les bâtiments requièrent donc une approche conceptuelle et collégiale bien intégrée.

Accueil et administration	Oncologie
Archives	Ophthalmologie
Bloc opératoire	Pathologie
Cafétéria	Pharmacie
Cardiologie	Pneumologie
Centrale de distribution et de stérilisation	Pouponnières
Centre de biomédecine	Radiologie
Centre de recherche	Recherche biomédicale
Clinique de médecine familiale	Service ambulatoire
Clinique externe	Service de diététique
Échographie	Service de soutien
Endoscopie	Service d'exploitation des immeubles
Enseignement médical	Service informatique
Ergothérapie	Service social
Hématologie	Services aux employés
Hémodialyse	Services d'entretien
Hémodynamique	Soins infirmiers
Inhalothérapie	Soins intensifs
Laboratoires	Stérilisation
Microbiologie	Unité coronarienne
Morphologie	Unité de soins
Neurologie	Unité de soins prolongés
Neurophysiologie	Unité dialyse péritonéale
Neuropsychologie	Unité hémodialyse
O.R.L.	Urgence
Obstétrique	

Source : guide Bat Santé 2005

Tableau 4 : Liste des départements et des services dans un établissement hospitalier

4. LE PARC EXISTANT ET LES TENDANCES D'ÉVOLUTION DU PARC DES BÂTIMENTS À USAGE HOSPITALIER

4.1. Evolution du nombre des structures sanitaires dans les secteurs public et privé

Secteur	Etablissements	2014	2015	2016	2017	2018
Secteur Public		2 377	2 391	2 403	2 426	2442
1ère ligne	Directions régionaux de santé	24	24	24	24	24
	Groupements de santé de base	28	28	28	28	28
	Centres de santé de base	2 109	2 123	2 135	2 157	2161
	Hôpitaux de circonscription	108	108	108	108	110
	Les centres d'hémodialyses	41	41	41	42	51
2ème ligne	Hôpitaux Régionaux	35	35	35	31	35
3ème ligne	Etablissements Publics de Santé (EPS)	23	23	23	27	24
	Centres spécialisés	9	9	9	9	9
Secteur Privé		2 584	2 653	2 728	2 762	2888
	Les officines	1 975	2 006	2 038	2 037	2127
	Les laboratoires médicaux	415	445	485	510	544
	Les centres d'hémodialyses	106	111	115	117	115
	Cliniques privées	88	91	90	98	102
Secteur Parapublique		12	12	12	12	12
	Les polycliniques de la CNSS	6	6	6	6	6
	Les centres d'hémodialyses	6	6	6	6	6
Total Général		4 973	5 056	5 143	5 200	5342

Source : Santé Tunisie En Chiffres 2018

Tableau 5 : Nombre des structures sanitaires dans les secteurs public et privé

En 2018

Le nombre total d'établissement hospitalier est de **5342** :

- Établissements publics 45,71%
- Établissements privés 54,06%
- Établissements parapublics 0,22%



4.2. Capacité hospitalière totale (secteur public et privé)

La capacité hospitalière dans les secteurs public et privé est récapitulée dans le tableau suivant :

GOUVERNORAT	NOMBRE DE LITS AUTORISÉS 2017			NOMBRE DE LITS AUTORISÉS 2018		
	SECTEUR PUBLIC	SECTEUR PRIVÉ	TOTAL DES LITS	SECTEUR PUBLIC	SECTEUR PRIVÉ	TOTAL DES LITS
Tunis	4170	2137	6307	4297	2259	6556
Ariana	536	318	854	536	370	906
Ben Arous	353	209	562	353	309	662
Manouba	970	0	970	970	0	970
Grand Tunis	6029	2664	8693	6156	2938	9094
Nabeul	961	148	1109	961	148	1109
Zaghouan	1008	420	1428	1008	514	1522
Bizerte	495	60	555	495	52	547
Nord Est	2464	628	3092	2464	714	3178
Béja	594	102	696	628	102	730
Jendouba	740	66	806	740	66	806
Le Kef	626	15	641	626	15	641
Siliana	391	0	391	391	0	391
Nord Ouest	2351	183	2534	2385	183	2568
Sousse	1472	228	1700	1495	270	1765
Monastir	679	124	803	709	124	833
Mahdia	1203	284	1487	1203	284	1487
Sfax	1798	780	2578	1831	981	2812
Centre - Est	5152	1416	6568	5238	1659	6897
Kairouan	725	143	868	725	143	868
Kasserine	660	24	684	660	24	684
Sidi Bouzid	480	0	480	480	0	480
Centre - Ouest	1865	167	2032	1865	167	2032
Gabes	675	73	748	710	121	831
Médenine	806	529	1335	806	529	1335
Tataouine	259	0	259	269	0	269
Sud - Est	1740	602	2342	1785	650	2435
Gafsa	780	39	819	780	39	819
Tozeur	354	0	354	354	0	354
Kébili	329	20	349	329	20	349
Sud - Ouest	1463	59	1522	1463	59	1522
Tunisie Entière	21064	5719	26783	21356	6370	27726

Source : Santé Tunisie En Chiffres 2018

Tableau 6 : Répartition de la capacité hospitalière publique et privé par gouvernorat en 2017 et 2018

En 2018 le nombre total des lits dans toute la Tunisie est de 27726 lits réparti entre institution public 77% et institution privée 23%.

4.3. Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur public de la santé « 2014 – 2017 »

La capacité hospitalière du secteur public a augmenté de 17,45% entre 2015 et 2017 pour une augmentation de l'énergie primaire de 6%. Soit une intensité énergétique a diminué dans la même période de 9,93%. Ceci montre l'importance de la charge fixe au niveau des hôpitaux publics, d'où on a intérêt d'augmenter la capacité hospitalière des hôpitaux.

CATÉGORIE	ANNÉE	CAPACITÉ EN LITS	ENERGIE ELECTRIQUE		ENERGIE THERMIQUE	ENERGIE TOTALE	INTENSITÉ TOTALE EN ENERGIE
			Finale MWh/an	Primaire TEP/an	TEP/an	Primaire TEP/an	Primaire TEP/lit/ an
PUBLIC	2014	----	107 078	23 754	4 577	28 331	---
	2015	20 488	113 878	25 263	5 657	30 920	1,51
	2016	20 678	114 525	25 406	5 229	30 635	1,48
	2017	24 064	120 995	26 841	5 959	32 800	1,36

Source : Guide Monitoring ANME 2020

Tableau 7 : Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur public de la santé (2014-2017)

4.4. Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur privé de la santé « 2014 – 2017 »

La capacité hospitalière du secteur privée a augmenté de 11,61% entre 2015 et 2017 pour une augmentation de l'énergie primaire de 7,1%. Soit une intensité énergétique a diminué dans la même période de 4%. Ceci montre l'importance de la charge fixe au niveau du secteur privé mais reste inférieure à celle du secteur public.

CATÉGORIE	ANNÉE	CAPACITÉ EN LITS	ENERGIE ELECTRIQUE		ENERGIE THERMIQUE	ENERGIE TOTALE	INTENSITÉ TOTALE EN ENERGIE
			Finale MWh/an	Primaire TEP/an	TEP/an	Primaire TEP/an	Primaire TEP/lit/ an
Privé	2014	----	59 777	13 261	2 194	15 455	----
	2015	5 020	66 913	14 844	2 753	17 597	3,50
	2016	5 138	62 238	13 807	2 568	16 375	3,19
	2017	5603	70 649	15 673	3175	18 848	3,36

Source : Guide Monitoring ANME 2020

Tableau 8 : Evolution de la capacité hospitalière et de la consommation d'énergie du secteur privé de la santé (2014-2017)



4.5. Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé et public de la santé en 2017

L'intensité énergétique totale du secteur hospitalier en Tunisie a atteint 39,92 KTEP/m².an (2017) répartie entre secteur privé 34,6 KTEP/m².an et secteur public 53,61 KTEP/m².an. L'intensité énergétique du secteur privé est plus faible que celle du secteur public.

CATEGORIE	SURFACES HORS OEUVRES M ²	CONSOMMATION ELECTRIQUE		ENERGIE THERMIQUE TEP/AN	CONSOM. TOTAL EN ENERGIE PRIMAIRE [TEP]	INTENSITE TOTALE KTEP/M ² .AN
		E. Finale MWh/an	E. Primaire TEP/an			
Etablissements Privés	545 172	70 649	15 673	3 175	18 848	34,6
Etablissements Publics (GT)	213 037	41 228	9 150	2 271	11 421	53,61
Total	758 209	111 877	24 823	5 446	30 269	39,92

Source : Guide Monitoring ANME 2020

Tableau 9 : Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé et public de la santé en 2017

L'énergie électrique représente 82% de la consommation énergétique des établissements hospitaliers en Tunisie.

4.6. Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé de la santé par zone climatique en 2017

La capacité hospitalière dans la zone ZT1 représente 89,1% de la capacité total de la Tunisie, alors que la consommation énergétique totale de la zone ZT1 représente 89% de la consommation des 3 zones ZT1, ZT2 et ZT3. L'intensité totale en énergie primaire des trois zones ZT1, ZT2 et ZT3 sont semblables autour de 34,6 KTEP/m².an.

ZONE CLIMATIQUE	CAPACITÉ EN LITS	SURFACES COUVERTES HORS ŒUVRE M ²	CONSOMMATION D'ELECTRICITÉ EN MWH	CONSOMMATION D'ELECTRICITÉ EN TEP - PRIMAIRE	CONSOMMATION COMBUSTIBLES EN TEP	CONSOMMATION TOTALE EN ENERGIE PRIMAIRE [TEP]	INTENSITÉ TOTALE EN ENERGIE PRIMAIRE EN KTEP / M ² / AN
ZT1	4 994	485 916	62 948	13 964	2 829	16 793	34,5
ZT2	379	36 877	4 804	1 066	216	1 282	34,8
ZT3	230	22 379	2 897	643	130	773	34,5
TOTAL	5 603	545 172	70 649	15 673	3 175	18 848	34,6

Source : Guide Monitoring ANME 2020

Tableau 10 : Récapitulatif des consommations et ratios énergétiques du secteur privé de la santé par zone climatique en 2017



5. ORGANISATION INSTITUTIONNELLE DU SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ EN TUNISIE

Cette partie présente les principaux acteurs du secteur de l'électricité et des énergies renouvelables en Tunisie. On distingue :

STRUCTURE	DÉSIGNATION
ANME	Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie
Autorité Spécialisée	Autorité spécialisée chargée de l'examen des problématiques relatives aux projets d'énergies renouvelables
CIPIE	Commission Interdépartementale de la Production Indépendante d'Electricité
CTER	Commission Technique de production privée d'électricité à partir des Energies Renouvelables
CSPIE	Commission Supérieure de la Production Indépendante d'Electricité
IPP	Producteurs d'Electricité Indépendants (« Independent Power Producer
STEG	Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz

Tableau 11: Organisation institutionnelle du secteur de l'électricité en Tunisie

Le processus de chaque acteur est récapitulé ci-après :

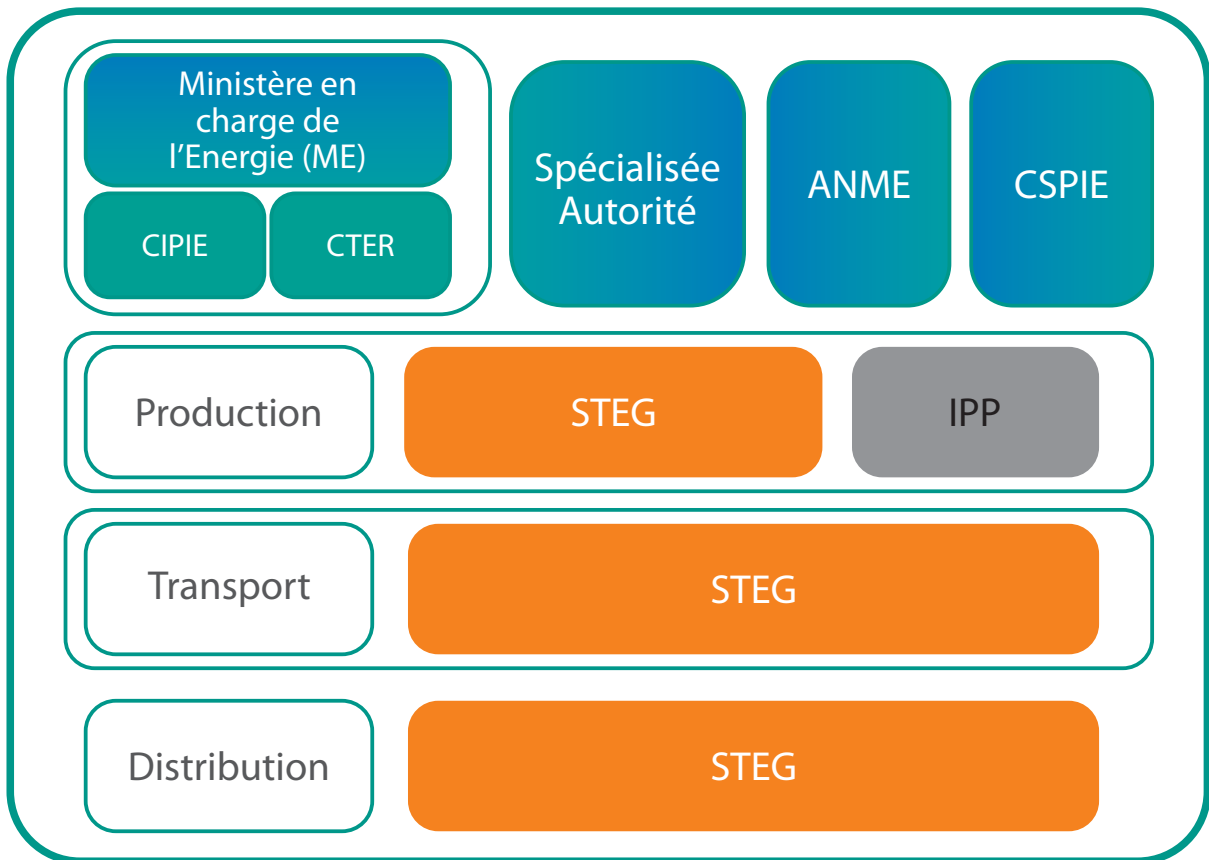


Figure 3 : Organisation institutionnelle du secteur de l'électricité en Tunisie

Note : il n'existe pas à ce jour d'autorité indépendante de régulation du secteur électrique en Tunisie. Cependant, le Ministre en charge de l'Energie a annoncé en 2018 la création prochaine de cette autorité de régulation.

6 . LE SECTEUR PRIVÉ ET LES INSTITUTIONS FINANCIÈRES

Le financement de la maîtrise de l'énergie en termes d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables est inscrit à la stratégie de plusieurs banques tunisiennes. Elles bénéficient pour certaines d'entre elles du soutien d'institutions financières internationales qui ont mis à leur disposition des lignes de crédit pour le financement de projets d'énergie renouvelables (voir la partie 5.2.2). D'autres banques locales proposent également des prêts ou d'autres mécanismes de participation aux projets (notamment via des SICAR (Société d'Investissement en Capital Risque) pour participer dans le capital des entreprises).

Les banques tunisiennes sont représentées au sein de l'Association Professionnelle Tunisienne des Banques et des Etablissements Financiers (APTBEF, www.apbt.org.tn) qui compte 25 banques universelles (publiques et privées), 2 banques d'affaires, 8 compagnies de leasing et 3 sociétés de factoring.

Les principaux bailleurs de fonds internationaux (KfW, BERD, Banque Mondiale, AFD, BAD, GIZ, ...etc.) sont également implantés et actifs en Tunisie.

7 . EXEMPLE DE SCHÉMAS DE FINANCEMENT DES ENR

Le schéma de financement des énergies renouvelables suit le diagramme suivant :

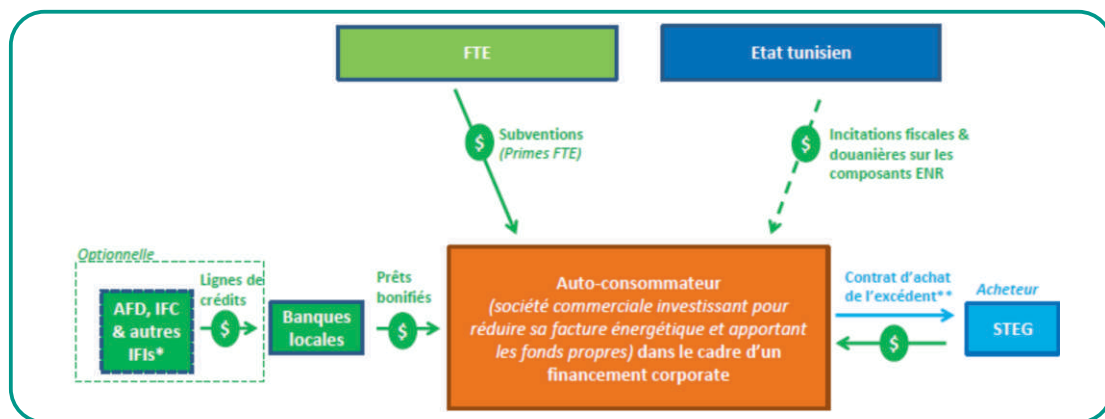


Figure 4 : Schéma de financement des énergies renouvelables

8 .PROCÉDURE D'AUDIT ÉNERGÉTIQUE SUR PLAN :

La procédure d'audit énergétique sur plan est régie par l'arrêté du 23 Juillet 2008 Guide audit sur plan et exécuté selon des rapports modèle ANME selon cinq livrables :

- Rapport AEP phase Programme fonctionnel et APS version F. Août 2014
- Rapport AEP phase APD version F. Août 2014
- Rapport AEP phase ED -DAO version F. Août 2014
- Rapport AEP phase RT & R version F. Août 2014.

Un manuel d'utilisation des rapports types d'AEP et des manuels de vérification de la qualité thermique et énergétique des bâtiments a été mis en place par l'ANME pour faciliter la mission d'AEP.

L'AEP devra être réalisé par un binôme d'expert auditeur :

- Un architecte expert auditeur énergétique agréé par l'ANME
- Un ingénieur Expert auditeur énergétique agréé par l'ANME.

Ils seront choisis et consulté parmi la liste des **Experts AEP ANME**

Les honoraires du binôme expert auditeur dépend de deux paramètres :

- Le nombre d'homme-jour travaillé : élaboré et exigé par l'ANME sous forme de tableau et qui dépend de la nature de l'établissement à auditer (hôpital, clinique, hôtel, bâtiment administratif)
- Le coût de l'homme jour doit être compris dans un intervalle de 350 DT ± 75 DT selon la règle ANME.



CHAPITRE 02

ENVELOPPE DU BÂTIMENT

1. DÉMARCHE POUR UNE CONCEPTION ADÉQUATE :

1.1. Objectif de la démarche :

Le but de la démarche proposée dans la conception d'un bâtiment est d'aboutir à un bâtiment médical et socio sanitaire à la fois fonctionnel, agréable, confortable et sécurisant et énergétiquement performant ; le meilleur que nous puissions obtenir par rapport à l'investissement que nous sommes prêts à déboursier.

Cette formulation implique la nécessité d'un processus d'optimisation dans la démarche conceptuelle et sous-entend un effort de collaboration réel entre les différents intervenants tout au long des différentes phases d'élaboration du projet.

Pour atteindre ces objectifs, il est recommandé de se conformer au :

- Décret N°78-71 du 26 Janvier 1978, et les missions d'études qui leur sont associées sont aussi régies par le même Décret. Ce décret définit la démarche conceptuelle de conception d'un bâtiment.
- Arrêté du ministre de l'industrie, de l'énergie et des petites et moyennes entreprises du 11 juin 2007, portant approbation du cahier des charges relatif à l'audit énergétique sur plan dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Ce cahier des charges a été mis en place dans le cadre de la stratégie nationale de maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment afin de produire des bâtiments énergétiquement performants en intégrant des mesures d'économie d'énergie en concertation avec les concepteurs du projet à travers les différentes étapes de conception et de construction du bâtiment.

1.2. Les phases de conception usuelles :

Le travail de conception d'un projet de bâtiment se fait en général en quatre (4) phases. Sur le territoire tunisien, pour les bâtiments civils, ces phases sont clairement définies par le Décret N°78-71 du 26 Janvier 1978, et les missions d'études qui leur sont associées sont aussi régies par le même Décret.

- La phase du Programme Fonctionnel
- La phase Avant Projet Sommaire (APS)
- La phase Avant Projet Détaillé (APD)
- La phase Études Définitives et Préparation des dossiers d'appel d'offres (PDE)

Lors de la réalisation des différentes phases de conception d'un projet de bâtiment, tel que décrites ci-dessus, plusieurs intervenants sont impliqués dans l'élaboration des études relatives au projet en question. Le noyau de base est formé par les intervenants suivants L'architecte, souvent désigné comme maître d'œuvre pour le projet, dont l'intervention commence à partir de la phase APS décrite ci-dessus.

- L'ingénieur de structure
- L'ingénieur de fluides
- L'ingénieur d'électricité

L'article 6 de l'Arrêté du ministre de l'industrie, de l'énergie et des petites et moyennes entreprises du 11 juin 2007, portant approbation du cahier des charges relatif à l'audit énergétique sur plan dans les secteurs résidentiel et tertiaire, oblige les experts auditeurs agréés (architecte et ingénieur) à élaborer un rapport d'audit énergétique sur plan à travers les différentes étapes de conception du bâtiment en vue de proposer des actions d'amélioration des performances énergétique du bâtiment.

D'autres spécialités selon les besoins du projet : architecte d'intérieur/décorateur, paysagiste, éclairagiste, acousticien, etc.



1.3. Nécessité du travail de groupe dans la conception d'un bâtiment (architecte, ingénieurs spécialisés, experts auditeurs sur plan...etc.):

Les démarches usuelles de conception, y compris celles définies par le décret cité ci-dessus, ne font intervenir les ingénieurs spécialisés et autres spécialistes qu'en amont de la phase "Avant Projet Détaillé d'architecture", c'est-à-dire après que les choix presque achevés de toutes les options fonctionnelles, spatiales et architecturales aient été complétées.

Cette situation crée un certain déphasage dans l'évolution de la conception du projet, entre les différentes composantes à prévoir, et risque de ne pas prendre en considération l'impact des choix du parti architectural sur le comportement énergétique du bâtiment et sur son exploitation ultérieure.

En effet, le bâtiment constituant de nos jours, un assemblage complexe d'une multitude de composantes fonctionnant d'une manière de plus en plus interdépendante, il est impératif de prendre en considération l'ensemble des éléments et composantes en interaction dès les premières étapes de la démarche conceptuelle d'un projet.

Il est à noter qu'au démarrage de l'étude, de nombreuses possibilités sont envisageables pour répondre aux exigences du programme fonctionnel. Mais au fur et à mesure de l'avancement du projet, des choix irréversibles sont opérés, choix qui restreignent inévitablement le champ des options envisageables lors des stades ultérieurs. Habituellement, les choix sont faits un par un, concernant tout d'abord les plans d'architecture, puis, la structure, les lots techniques, la seconde œuvre et enfin, les finitions. De ce fait, il est indispensable d'envisager divers scénarios et simulations dès la phase "Avant-projet Sommaire" (APS). À partir de ces différentes solutions envisageables, des estimations et des approches de rentabilités peuvent être dégagées. Cette démarche permet d'identifier les différents éléments nécessaires pour assurer des choix rationnels au niveau des diverses options à retenir.

Il est donc primordial de regrouper la quasi-totalité des membres de l'équipe de concepteurs dès le démarrage de la phase APS, et d'impliquer les différents intervenants de cette équipe le plus tôt possible dans la démarche conceptuelle, et ce dans le cadre d'une synergie de groupe permettant d'identifier les approches les plus souhaitables pour le projet: langage architectural, options structurales, considérations énergétiques, appréciation globale des besoins des occupants et des différents systèmes permettant de les satisfaire, etc. Cette démarche est pratiquement la seule à pouvoir engendrer un projet doté d'une certaine cohérence entre ses divers aspects et dont les diverses options retenues émanent d'un processus rationnel d'évaluation.

2. IMPACTS DES CHOIX CONCEPTUELS DE BASE SUR LES COÛTS D'INVESTISSEMENT ET D'EXPLOITATION D'UN PROJET

Le choix du parti architectural conditionne les orientations particulières d'un projet, les formes et matériaux de l'enveloppe du bâti, ainsi que la disposition des divers espaces par rapport aux ressources naturelles du site et leurs interactions avec ses conditions climatiques : ensoleillement, éclairage naturel, exposition aux vents dominants, etc.

Il est clair qu'à chaque solution architecturale envisageable, correspond un ensemble d'éléments, intrinsèques à cette solution, qui conditionne considérablement l'ampleur des coûts d'investissement et d'exploitation du projet.

Du point de vue énergétique, les paramètres suivants sont directement liés au parti architectural et se traduisent souvent par un effet notable sur ces coûts :

2.1. Compacité de la forme architecturale :

La compacité de la forme architecturale d'un bâtiment peut être représentée par le rapport des surfaces des parois de l'enveloppe extérieure au volume total utile de ce bâtiment. Il est clair que, pour un même volume utile et un choix particulier de la nature des parois extérieures, plus ce rapport est élevé, plus élevés seront :

- Les coûts relatifs à la construction des parois extérieurs et leur entretien.
- Les coûts relatifs à l'acquisition des installations de chauffage et de climatisation ainsi que leurs frais d'exploitation : Augmentation des puissances installées et des charges de chauffage et de climatisation dues à l'augmentation des parois exposées aux conditions extérieures.

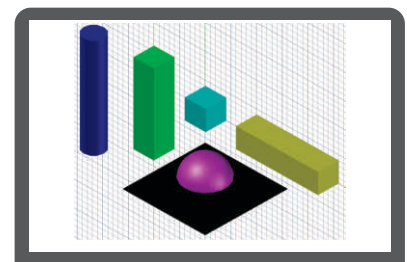


Figure 5 : Compacité de la forme architecturale d'un bâtiment

2.2. Orientation et nature des parois extérieures :

La répartition des parois extérieures d'un bâtiment sur les différentes orientations par rapport à la course du soleil ainsi que la nature de leurs composantes peuvent avoir une incidence sur :

- L'opportunité de certains espaces de bénéficier, ou non, des apports solaires pendant la saison froide. En effet une orientation optimale des parois extérieures d'un bâtiment combiné avec un niveau d'isolation thermique adéquat et un taux de vitrage approprié, peut permettre de satisfaire une bonne partie des besoins de chauffage du bâtiment et par conséquent réduire ses frais d'exploitation.
- Les degrés d'exposition de certains espaces aux apports solaires pendant la saison chaude. En effet une orientation aléatoire des parois extérieures d'un bâtiment, combinée avec un niveau d'isolation thermique inadéquat et un taux de vitrage inapproprié, peut engendrer une augmentation considérable des besoins de refroidissement du bâtiment et par conséquent augmenter ses frais d'exploitation.

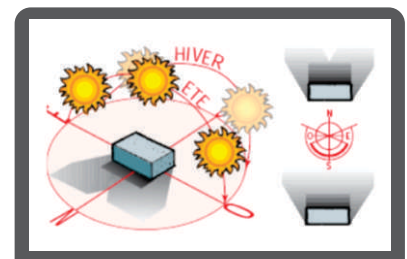


Figure 6 : Course du soleil en été et en hiver

2.3. Taux de vitrage des diverses parois extérieures et nature du vitrage et protection solaire envisagée:

La proportion de vitrage relatif à chaque parois extérieure d'un bâtiment, la nature du vitrage envisagé, et les protections solaires associées, peuvent avoir une incidence sur:

- Les coûts relatifs à la construction des parois extérieures et leur entretien,
- Les coûts relatifs à l'acquisition des installations de chauffage et de climatisation ainsi que leurs frais d'exploitation : augmentation ou réduction des puissances installées et des charges de chauffage et de climatisation,
- Les coûts relatifs aux frais d'exploitation liés à l'éclairage artificiel des locaux.

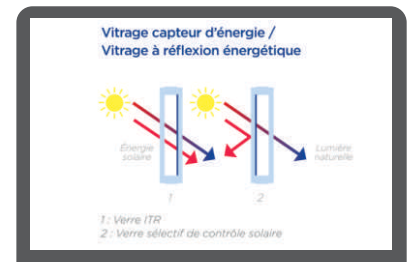


Figure 7 : Vitrage capteur d'énergie et vitrage à réflexion énergétique

2.4. Disposition des divers espaces dans le projet :

La disposition des divers espaces dans le projet peut dans certains cas avoir une incidence sur les coûts relatifs à l'acquisition des installations de chauffage et de climatisation ainsi que leurs frais d'exploitation :

- Une distribution judicieuse des espaces permettant de disposer les volumes non conditionnés en espaces tampons par rapport aux espaces climatisés ou chauffés, permet de réduire les degrés d'exposition de ces espaces aux conditions extérieures. Ce qui permet de réduire en conséquence la taille des systèmes de conditionnement de ces espaces ainsi que leurs dépenses énergétiques.
- Dans le cas d'espaces traités par des systèmes centralisés de chauffage ou de climatisation, la disposition des locaux techniques abritant les équipements de chauffage ou de climatisation à proximité des espaces conditionnés par ces équipements permet de raccourcir les conduits de distribution véhiculant les fluides caloriporateurs et, par conséquent, réduire relativement les coûts relatifs à l'acquisition des installations de chauffage et de climatisation ainsi que leurs frais d'exploitation.

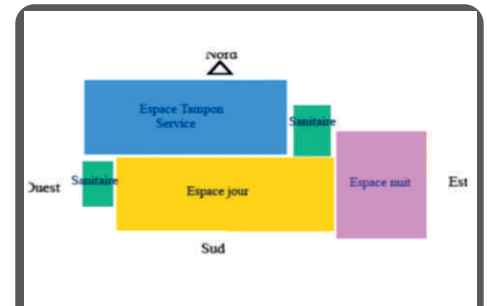


Figure 8 : Disposition des divers espaces du bâtiment en fonction de son orientation

2.5. Système de chauffage et/ou climatisation envisagé :

Le type de système de chauffage ou climatisation retenu, aura une incidence directe sur :

- Les coûts relatifs à l'acquisition de ces installations, leurs frais d'entretien et d'exploitation, Les coûts relatifs aux besoins en locaux et gaines techniques destinés à abriter les composantes des installations concernées,
- Les coûts relatifs aux aménagements structurels destinés à accommoder certaines des composantes de ces installations (construction de socles pour les équipements lourds, adaptation de certains éléments de la structure au passage des conduits d'air et de la tuyauterie, ...etc.)
- Les coûts relatifs aux aménagements décoratifs destinés à dissimuler certaines des composantes de ces installations (tuyauterie, conduits d'air, ...etc.).

2.6. Systèmes d'éclairage envisagé:

Le type de système d'éclairage retenu, aura une incidence directe sur :

- Les coûts relatifs à l'acquisition de ces installations et leurs frais d'entretien. En effet, ces coûts sont directement liés à la distribution des points lumineux et leurs modes de contrôle, la nature des sources lumineuses adoptées et les luminaires envisagés.
- Les coûts relatifs à l'exploitation de ces installations. Ces coûts sont directement liés aux types de sources lumineuses retenues et leur mode de contrôle. Par ailleurs, l'association de ces systèmes d'éclairage artificiel à des dispositifs d'éclairage naturel permet de réduire ces coûts d'exploitation.

2.7. Des solutions intégrées

Par ailleurs les concepteurs devront demeurer particulièrement sensibles à des solutions techniques intégrées qui offriront une performance théorique supérieure par rapport à d'autres options disponibles :

D'une manière générale, une approche "éco énergétique" rigoureuse tendra à privilégier les stratégies et les recommandations suivantes :

- Impliciter tous les acteurs intervenants sur le projet (administrateurs, gestionnaires de bâtiments, architectes, ingénieurs spécialisés et spécialistes) dès les premières phases de l'étude, et faire intégrer à cette équipe un spécialiste de la maîtrise de l'énergie (si aucun des autres acteurs ne l'est déjà), et ce, afin d'aboutir aux choix adéquats pour la définition du programme fonctionnel, des options relatives à l'enveloppe du bâtiment, aux systèmes de chauffage et climatisation ainsi qu'aux systèmes d'éclairage.
- Pour mener à bien ce travail, il serait intéressant de suivre une approche globale. Cette méthode repose sur une vision globale du projet aussi bien sous ses aspects de réalisation que ceux de l'exploitation. Ainsi cette approche permet d'obtenir un bâtiment doté d'une plus haute efficacité énergétique avec des frais d'exploitation plus réduits.
- Une approche systémique, consistant en une démarche composée d'une série d'étapes permettant d'optimiser pour un ensemble d'objectifs (d'ordre esthétique, fonctionnel, économique, etc.) en présence d'un assortiment de contraintes (réglementations, coûts des installations, temps de réalisation, il ne faut pas oublier que la réussite de l'approche systémique est tributaire d'une concertation et d'une coordination entre les différents acteurs.

Ainsi, les choix pour le programme fonctionnel, la partie architecturale et les types d'installations à retenir seront ceux qui permettent une économie sur le coût global c'est-à-dire le coût d'investissement majoré du coût d'exploitation et qui aboutiront à une maîtrise de l'énergie.

Pour faire les meilleurs choix, l'équipe conceptrice doit tenir compte des critères suivants :

- Le coût global actualisé (CGA)
- Les charges globales d'exploitation (CGE)
- Le taux de rentabilité interne (TRI)
- Le temps de retour brut (TRB)



Voici quelques exemples de solutions intégrées :

- La compacité de la forme architecturale : ce rapport entre la surface des parois de l'enveloppe extérieure au volume total utile du bâtiment ; le rapport s/v doit être bas afin d'assurer des économies d'abord sur les coûts relatifs à l'acquisition des installations de chauffage et de climatisation ainsi qu'à leur coût d'exploitation. Dans ce sens, les constructions à plusieurs niveaux et le jumelage avec les voisins sont deux approches recommandées vivement.
- L'orientation et la nature des parois extérieures : une orientation optimale des parois extérieures peut assurer un apport gratuit d'énergie durant la saison froide et réduire ainsi les frais de chauffage. En contrepartie, l'exposition prolongée de certaines parois au soleil durant la saison chaude a pour conséquences l'augmentation des frais de climatisation.
- La surface des ouvertures dans les parois extérieures, le type de vitrage, et l'utilisation des protections solaires ont une incidence sur les charges de chauffage et de climatisation ainsi que sur frais d'éclairage.
- L'orientation générale des espaces doit également être considérée : aménager les espaces non conditionnés et qui n'ont pas besoin d'éclairage, tel les espaces tampons, peut diminuer les déperditions. Disposer les locaux techniques à proximité des espaces conditionnés diminue la facture des installations.
- Les systèmes : le choix des systèmes de chauffage, de climatisation, de ventilation et d'éclairage naturel et artificiel doivent permettre des économies tant en matière de coûts d'installation, d'entretien et de leur exploitation.



3. IMPLANTATION D'UN BÂTIMENT SUR UNE PARCELLE DONNÉE :

L'implantation d'un bâtiment est dictée par les exigences du cahier des charges du développeur du lotissement, lequel lotissement répond au plan et au schéma du plan d'aménagement urbain.

3.1. Implantation et volumétrie externe par rapport au soleil

On peut diminuer les besoins en chauffage et en climatisation en intervenant sur la composition et la configuration de l'enveloppe du bâtiment afin que celle-ci garde la chaleur à l'intérieur et le froid (ou la chaleur l'été) à l'extérieur. Il faut particulièrement assurer un haut niveau d'isolation et d'étanchéité des murs extérieurs. À ces fins, il convient notamment d'utiliser des matériaux denses comme le béton, la pierre et la brique, lesquels conservent la chaleur et contrôlent les écarts de température entre le jour et la nuit et d'isoler les murs et le sol de fondation des sols environnants.

La localisation et l'orientation du bâtiment ou du logement sur le terrain sont un facteur stratégique pour la consommation énergétique à des fins de chauffage et de climatisation. Optimiser l'exposition solaire des pièces de jour et faire jouer le rôle à certaines pièces d'espaces tampons contre les vents d'hiver et les chaleurs d'été représentent de bonnes stratégies pour toutes les pièces qui nécessitent peu ou pas de chauffage et de lumière naturelle.

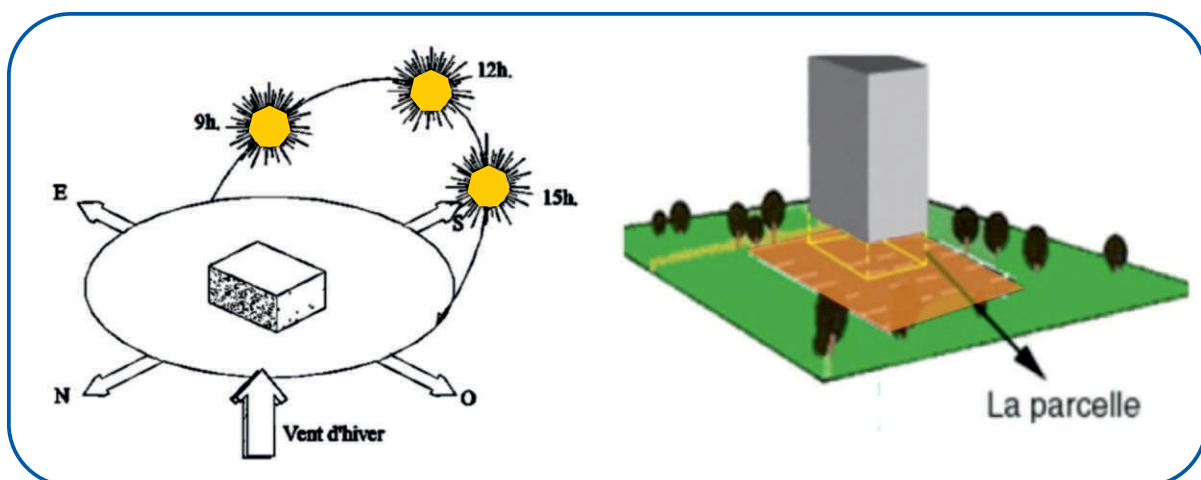


Figure 9 : Implantation et volumétrie du bâtiment par rapport au soleil

Dans le cas de bâtiments hospitaliers, pour prendre en compte le mieux possible l'apport solaire et le microclimat, il est souhaitable de :

- Localiser les chambres d'hospitalisation et les bureaux au Sud ; et les salles de soins, les locaux de service, les blocs sanitaires au nord, à l'est ou à l'ouest.
- Éviter de localiser les accès au bâtiment, surtout ceux réservés au public sur les façades situées au nord, à l'ouest ou au sud-ouest et prévoir des sas pour chaque entrée.
- L'implantation d'un bâtiment doit tenir compte de la géométrie du volume construit et des orientations des ouvertures par rapport à la course du soleil.

Sur le plan conceptuel, l'architecte est tenu de prendre en compte l'incidence d'un ensoleillement direct qui pourrait nuire aux activités à l'intérieur des différents locaux du bâtiment.

Bien que l'ensoleillement constitue un apport appréciable d'énergie gratuite, il est dans la plupart des cas, gênant pour des expositions prolongées liées à des activités, tels que : l'attente, l'examen des malades, les soins, ...etc.

Pour ce fait la connaissance de la trajectoire du soleil (altitude et azimut) est très utile pour l'élaboration du projet architectural.

Des abaques et des logiciels spécifiques fournissent des informations fort utiles pour la détermination des masques du ciel. L'orientation Nord-Sud favorise un ensoleillement idéal pour une meilleure économie d'énergie hiver comme été.

Dans le cas des espaces intérieurs :

- Localiser les espaces d'entreposage, de service et les pièces qui n'ont pas besoin de lumière au nord, à l'ouest ou au sud-ouest, pour agir comme espace tampon.
- Localiser les espaces de jour (attente, chambres d'hospitalisation, bureaux) au sud.

3.2. Implantation et volumétrie externe par rapport aux déperditions de chaleur

Outre l'orientation, un facteur à considérer dans la conception de bâtiments prenant en compte la consommation énergétique est le rapport entre la surface extérieure et le volume de l'immeuble. Les formes les plus efficaces sont celles dont le rapport surface de l'enveloppe/volume est le plus petit, c'est-à-dire dont la surface permettant d'enclorre un volume donné est la plus petite. Concrètement, il est plus facile d'évaluer le rapport entre la surface extérieure et la surface de plancher (lequel est identique au rapport surface de l'enveloppe/volume si les planchers couvrent toute la surface de l'immeuble).

Dans le tableau ci après sont détaillée comme exemple, la différence entre des immeubles d'une même superficie de plancher et d'un même volume mais dont la forme et le nombre d'étages diffèrent. Les formes plus compactes offrent un rapport plus petit entre la surface de l'enveloppe et le volume que celles dont le plan est plus grand. Aussi, le cube offre le meilleur

FORME	SURFACE DE PLANCHER	VOLUME	SURFACE DE L'ENVELOPPE	SURF. ENVEL. / SURF. PLANCHER	TAUX DE GAIN D'ÉNERGIE DE CHAUFFAGE ET CLIM PAR RAPPORT SOLUTION BASE	TAUX DE GAIN D'ÉNERGIE CHAUFF. ET CLIM PASSAGE D'UN ÉTAGE À DEUX ÉTAGES
Plan rectangulaire de : 7m x 14m x 1 étage (3m)	98m ²	294 m ³	322 m ²	3,3	Sol base 1 étage	15%
Plan rectangulaire de : 5m x 9,8m x 2 étages (6m)	98m ²	294 m ³	275,6 m ²	2,8	Sol base 2 étages	
Plan rectangulaire de : 9,9m x 9,9m x 1 étage (3m)	98m ²	294 m ³	314,8 m ²	3,2	3%	21,8%
Plan rectangulaire de : 7m x 7m x 2 étage (6m)	98m ²	294 m ³	243 m ²	2,5	10,7%	

Tableau 12 : Variation des morphologies pour un immeuble disposant d'une même superficie de plancher et d'un même volume et impact sur la performance énergétique

Plus la forme la plus compacte offre une déperdition thermique minimale à travers la paroi extérieure.

La tendance actuelle en matière de construction hospitalière va dans le sens de bâtiments qui adoptent une volumétrie de plus en plus compacte, et de ce fait ont de meilleures performances énergétiques.

Outre l'aspect énergétique pour la forme compacte, elle est surtout dictée par des impératifs d'adaptation à une technicité grandissante de la médecine qui a imposé une rationalisation des circuits, de l'exploitation des locaux et du matériel.

Le modèle pavillonnaire qui permettait une construction progressive au fur et à mesure des besoins et des moyens, mais avec un surcoût en frais de construction et surtout d'exploitation y compris énergétique, a été abandonné progressivement.

Les hôpitaux à construire suivant ce modèle ont l'avantage fonctionnel de réduire considérablement les circuits et d'être thermiquement beaucoup moins déperditives que les formes éclatées.

3.3. Implantation et volumétrie externe par rapport au vent

En été, un vent sec et de faible vitesse demeure bénéfique. Au contraire, si le vent est chargé d'humidité, il sera lourd.

En hiver, si le vent est humide et de faible vitesse, il demeure confortable.

Un bâtiment s'oppose au vent et constitue un obstacle à plusieurs facettes. Chacune d'elles est soumise soit à une surpression soit à une dépression en fonction de son orientation. De ce fait une surface s'opposant au vent est en surpression et son endos est en dépression.

Au cas où les étanchéités des menuiseries ne seraient pas parfaites, la situation de dépression ou de surpression des façades entraînerait des déperditions énergétiques importantes qui créeraient des situations d'inconfort assez prononcées pour le personnel et surtout pour les malades hospitalisés qui auraient à les subir en permanence.

Le vent dominant en Tunisie est le nord-ouest. Pour éviter les désagréments dus au vent il faut :

- Mettre les murs pignons dans l'axe du vent.
- Éviter d'implanter les bâtiments (au cas où il y en aurait plusieurs) trop près les uns des
- Autres en laissant des couloirs face au vent.



3.4. Implantation et volumétrie externe par rapport à la couverture végétale

La couverture végétale a une influence directe sur les conditions micro climatiques des bâtiments, car cette couverture végétale interagit lorsqu'elle reçoit les reflets des rayons solaires, l'absorbant et humidifiant par ailleurs l'air ambiant. La volumétrie externe d'un bâtiment peut bénéficier de la plantation d'arbres et d'arbustes pour avoir de l'ombre sur les façades, dévier les brises vent et de l'autre, entretenir la fraîcheur au sol.

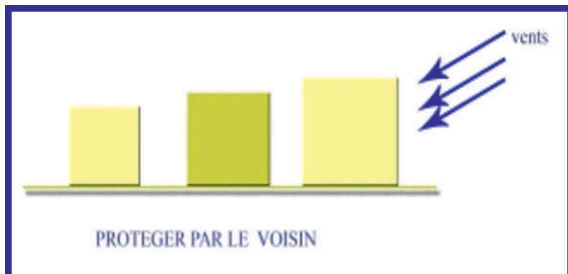


Figure 10 : Implantation du bâtiment par rapport au voisinage



Figure 11 : Implantation du bâtiment par rapport à la couverture végétale

De plus, le choix des éléments végétaux peut avantageusement contribuer à la mise en valeur de certains volumes construits, d'éléments architectoniques, de certains détails spécifiques dont l'effet sera renforcé par la présence de la plante.

La volumétrie externe associée à une végétation étudiée en regard de sa couleur, de sa forme et de la saison de floraison, adoucissent les ambiances visuelles, sans oublier qu'elles apportent un confort hygrothermique, acoustique et olfactif à l'environnement bâti.

3.5. Implantation et volumétrie externe par rapport à la topographie du terrain

La topographie du terrain pourra permettre à un bâtiment de bénéficier de murs extérieurs enfouis ou semi enfouis et enfin d'autres dégagés, selon le besoin ou non de lumière naturelle des locaux qu'il abrite.

Si la rue se trouve en aval, la possibilité d'enterrer une grande partie du bâtiment existe pour autant que cette approche soit acceptable et permettra d'avoir le moins de déperditions thermiques à travers ses proies adossées au terrain naturel, inévitablement les locaux adossés à ces murs auront aussi moins d'éclairage naturel et de bruit.

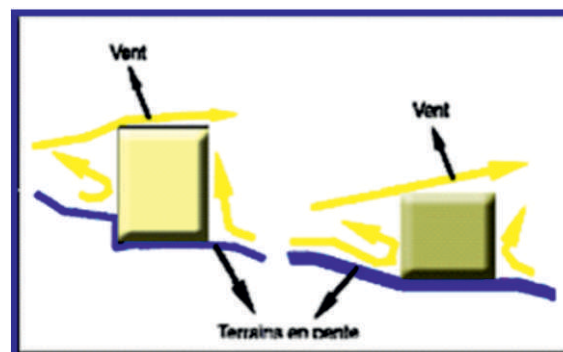


Figure n°12 : Implantation du bâtiment par rapport à la topographie du terrain

Si la rue se trouve en amont, il y aura possibilité de créer un sous sol complet ou partiel qui se révélera simultanément un rez-de-chaussée jardin en aval. Une telle approche réduira le nombre d'heures d'ensoleillement pour les façades les plus basses, subissant l'ombre projetée par les immeubles voisins.



4. ORIENTATION ET ORGANISATION DES ESPACES INTÉRIEURS :

La construction d'un bâtiment hospitalier représente une opération complexe en raison de la diversité et de la particularité des fonctions qui doivent être juxtaposées et abritées sous le même toit.

Il s'agit en effet de concevoir un bâtiment qui permettra :

- D'accueillir
- D'orienter
- De diagnostiquer
- De soigner
- D'héberger
- D'administrer

Tout en répondant aux besoins de chacun tout en respectant les normes d'hygiène, de sécurité et des règlements d'urbanisme.

4.1. Typologie des locaux dans les hôpitaux

La typologie architecturale des établissements hospitaliers est sous trois formes :

- **L'hôpital pavillonnaire** : permettant une construction progressive (au fur et à mesure de l'évolution des besoins) bénéfique en terme d'aération naturelle et simplicité de la lecture architecturale, mais il occupe une importante occupation foncière.
- **L'hôpital monobloc** : le compact, qui répond mieux à la technicité grandissante de la médecine et à la nécessité de rationaliser les circuits et l'exploitation des locaux et du matériel. Soit une meilleure surveillance du patient avec optimisation du plateau technique, mais il est certes défaillant de point de vue extensibilité et un risque énorme de contamination.
- **L'hôpital poly bloc** : c'est la tendance actuelle, son organisation spatiale est claire, le risque de contamination est réduit et son intégration dans le site est humanisé et c'est un choix idéal pour une typologie appropriée de l'établissement de santé.

4.1.1. Diagramme Spatiale et fonctionnel d'un établissement de santé :

Le choix architectural d'un hôpital, fondé sur un modèle pavillonnaire au détriment de l'hôpital bloc, a sans doute autant pour objectif de respecter les règles d'hygiénisme que de l'intégrer à la ville.

Les cinq grands secteurs qui composent un établissement de santé sont :

- Les services médicaux techniques (plateau technique)
- L'hébergement
- Le service logistique
- Le service administratif
- Le service technique du bâtiment



L'établissement de santé est construit de sorte que le visiteur le découvre en trois temps :

Les bâtiments de première ligne :

Situés sur le même alignement que la barrière de contrôle des entrées, correspondent au domaine administratif et financier, dont la direction générale.

Payer, gérer les soins (admission), gérer l'hôpital (administration), aider les patients (aide sociale) sont la vocation de ces bâtiments.

Bien que situés à l'entrée, ils ne deviennent visibles aux visiteurs qu'à la sortie, en raison de leurs fonctions et de leur intervention tardive au cours de l'itinéraire hospitalier. Ils semblent contrôler les mouvements tant vers l'intérieur que vers l'extérieur au terme du circuit d'hospitalisation

Les bâtiments de deuxième ligne :

Une fois la barrière de contrôle passée (première ligne), le patient se dirige vers les premiers bâtiments visibles (2ème ligne). Cette progression semble obligatoire. L'agencement du site est organisé pour limiter la déviation du regard, comme la présence de murets de part et d'autre du bâtiment. Une partie accueille les services de consultation et une partie, le service des urgences. Ils sont reliés par le bloc opératoire limité d'un côté par le laboratoire et de l'autre l'imagerie médicale. Sur le même alignement, cette forme géométrique est prolongée par des bâtiments de part et d'autre. Ainsi, vers le nord, les bâtiments seront occupés par les unités destinées aux patients, et vers le sud, se trouvent les unités de réanimation et chirurgicale. Ces constructions se situent au cœur de la cour et le cheminement naturel des visiteurs les conduit vers eux. Par ailleurs, la proximité relative des services vise à limiter les déplacements du personnel imposés par l'éparpillement des constructions et les larges couloirs de circulation.

Les bâtiments de troisième ligne :

Enfin, en troisième ligne, au fond de la cour de l'hôpital se trouvent les bâtiments destinés à accueillir les patients touchés par les maladies infectieuses, l'entrepôt pharmaceutique et les services de logistique. La position relativement excentrée de cette unité thérapeutique correspond à l'image que revêt encore l'hôpital, celui d'un lieu source de risque.

L'urbanité de l'hôpital est mise en évidence par la recherche d'un accès facilité, par la volonté de diriger les flux, organiser le repos des visiteurs et faciliter les rencontres. L'établissement est structuré de façon à prendre toutes les étapes de l'itinéraire thérapeutique hospitalier en charge.

L'organisation de l'espace hospitalier s'appuie sur plusieurs structures : une succession de lieux accessibles à tous, organisés de sorte à plus ou moins limiter les mouvements, et de lieux non accessibles reliés par des lignes (les couloirs) chargées d'orienter les déplacements. Ces lieux sont à la fois issus de choix architecturaux et de la relation de pouvoir existant entre les personnes exerçant au sein de la structure et les patients. Ce paysage hospitalier est ponctué de constructions à la charge symbolique et qui participent à l'impact thérapeutique des aménagements sur les patients.

Les bâtiments hospitaliers se distinguent par la taille et la fonction. Cela va du simple centre de soins au centre hospitalo-universitaire.

Cependant, pour les bâtiments grands consommateurs d'énergie qu'ils représentent et qui sont visés par ce guide, le partage des établissements en différents services peut se présenter ainsi :

- Une zone d'accueil, d'urgence du public et de consultations médicales.

- Un plateau technique (salles de Radio, laboratoires, bloc opératoire, etc.).

L'hospitalisation (hébergement).

Ces différents blocs ont des spécificités fonctionnelles et de confort différents. Leur combinaison les uns par rapport aux autres peut varier selon le parti architectural adopté. Cependant pour les bâtiments sis en périphérie urbaine, la disponibilité foncière permet une grande liberté de composition et un éclatement des différents blocs que l'implantation en zone urbaine ne permet pas.

Les mesures d'économie d'énergie liées à l'implantation des blocs fonctionnels, à leurs orientations par rapport à l'ensoleillement et aux vents dominants sont généralement possibles dans le premier cas et difficilement réalisable dans le second cas. Pour les bâtiments implantés dans un tissu urbain dense, des mesures d'adaptation peuvent être prévues en cas de configuration énergétiquement défavorable.



4.1.2. La zone d'accueil et de consultation

C'est la zone qui connaît l'activité la plus intense dans un bâtiment hospitalier. Elle est en liaison directe avec l'extérieur.

Le service de consultations externes et ses annexes (salles de soins, hôpital de jour, etc.) sont proches et directement accessibles de l'espace accueil et sont en général la première étape franchie par le visiteur dans l'hôpital et souvent la seule. C'est là que le public y est reçu et traité dans la grande majorité des cas (consultations et salles de soins).

De par son fonctionnement et en raison des clientèles concernées (nombreux visiteurs et travail intermittent du personnel d'accueil) la zone peut être complètement dissociée de l'hôpital et avoir une gestion énergétique indépendante. Les conditions de travail y sont moins draconiennes et les horaires plus réguliers.

Des ambiances agréables sont souhaitables dans les zones d'attente pour apaiser le stress et l'angoisse des patients. Généralement, le concepteur privilégie le recours :

- L'éclairage naturel avec des vues sur l'extérieur (vue dégagée, espaces verts) tout en évitant un ensoleillement direct qui pourrait gêner les personnes en attente.
- Les espaces de circulation et d'attente connaissent des volumes importants de visiteurs. Vu le nombre de personnes qu'ils reçoivent, l'éclairage et la ventilation naturelle y sont recommandés.

Pour les salles d'examen et de soins, la lumière artificielle est indispensable, même en plein jour, pour avoir une luminosité constante. Une orientation nord est adaptée à ces locaux et laisse les autres orientations disponibles pour les activités qui requièrent un bon ensoleillement.



4.1.3. Zone d'Urgence SU

La situation :

Le SU est fléché, visible et accessible de la porte principale de l'hôpital par un circuit dédié. Son entrée est distincte de celle des services médicaux de l'hôpital. Il est situé sur un même niveau et de plein pied. Les liaisons fortes du SU sont identifiées avant sa conception. Il est implanté à proximité de la radio, du bloc opératoire et si possible à proximité de la réanimation et des laboratoires.

Les circulations :

Le SU n'est traversé par aucun flux étranger à son activité. Les circulations des patients et des accompagnants ne traversent pas les zones de soins. Les portes sont motorisées dans les circulations principales utilisées par les brancards. La surface de circulation doit être calculée de façon spécifique et comprises dans les surfaces utiles.

La sectorisation :

Un SU est réparti en zones fonctionnelles : zone d'accueil, zone de soins, zone technique, zone de service, unité d'hospitalisation de courte durée (UHCD). L'architecture tient compte de la gestion des flux. Selon l'importance de ces flux, la zone de soins peut être divisée en zones secondaires, plutôt qu'organisée en une seule vaste zone. Dans ce cas, l'architecture, l'organisation, l'équipement de chaque zone secondaire permettent de garder un caractère polyvalent, adaptable à l'évolution des besoins. Les malades sont orientés dans ces zones en fonction de leur pathologie et de leur gravité.

La division en zones secondaires ne fait pas l'objet d'un consensus. La sectorisation peut être faite en un circuit léger et un circuit lourd. Le circuit léger (ou ambulatoire) est destiné aux malades consommant peu de temps médical ou paramédical, de ressources et permet un examen rapide. Le circuit lourd correspond aux malades, habituellement couchés en brancard, consommant beaucoup de temps et de ressources. La sectorisation peut être faite aussi en un circuit de traumatologie légère et un circuit non traumatologique. La séparation en secteur médecine/chirurgie n'est pas adaptée à la médecine d'urgence.

La polyvalence des zones :

La polyvalence, la flexibilité et l'adaptabilité est un objectif majeur du fait de l'évolution

rapide de l'environnement. La standardisation et l'uniformité des pièces d'examen facilitent l'ergonomie et la prise en charge des malades.

La sécurité :

La sécurité est envisagée dès le projet. Elle repose sur plusieurs dispositions qui sont rassemblées dans un « plan sécurité ». L'accès à la zone de soins est réservé aux personnes autorisées : malades, accompagnants, personnels, grâce à des portes à ouvertures commandées.

La surveillance et la confidentialité :

Il s'agit parfois d'objectifs contradictoires. L'agencement des locaux doit permettre une surveillance efficace des patients en même temps que la protection (visuelle, acoustique) de leur intimité et de la confidentialité. La séparation par des rideaux, des paravents, des parois incomplètes ou des portes non hermétiques ne permet pas une intimité suffisante ; elles peuvent néanmoins être utilisées dans les zones de surveillance intensive comme les SAUV.

L'attente des familles et des patients :

Le principe des services d'urgences est la prise en charge immédiate des malades. Le dimensionnement des urgences doit donc permettre l'admission directe des malades en zone de soin. Néanmoins, les familles et les malades après le triage et dans certaines conditions peuvent devoir attendre. En plus de la salle d'attente des familles à l'extérieur, il y a des salles d'attentes intérieures : dans le secteur léger, dans le secteur pédiatrique où une attente spécifique est indispensable, dans le secteur de radiologie... Les attentes ne doivent pas être organisées dans les couloirs.

L'informatique et les technologies nouvelles :

Le développement des technologies nouvelles en particulier informatique est prévu avant la construction.

Le stockage :

Le stockage principal est situé en périphérie du SU et évite la pénétration des livreurs (extérieurs ou hospitaliers) dans le service. Il n'y a pas de stockage terminal, c'est-à-dire dans les salles de soins. Il est remplacé par des chariots de soins équipés.

Des données techniques spécifiques aux SU sont précisées :

Les normes de surfaces ne peuvent s'appuyer sur aucune données objectives et n'ont donc pas été fixées. Elles nécessitent une adaptation spécifique aux besoins et aux contextes locaux.

L'éclairage :

L'éclairage en lumière naturelle est favorisé autant que possible.

La signalétique :

Le fléchage est facilement visible, si possible, depuis la ville.

L'ambiance :

Les matériaux (couleur, acoustique, lumière, aspect...) sont choisis pour créer une ambiance susceptible de réduire l'anxiété.

L'hygiène : L'organisation architecturale peut limiter ou faciliter le risque infectieux et la transmission croisée des infections. Elle implique au moins trois moyens : l'organisation du lavage et de la désinfection des mains, des salles d'examen pour un seul malade et éventuellement l'existence d'une chambre d'isolement.



Le traitement des surfaces :

Les matériaux sont choisis pour un usage intensif et un trafic élevé. Ils sont solides et durables.

Le contrôle de la température est assuré dans toutes les circonstances par des dispositifs multiples : protection solaire (stores, film sur les fenêtres), chauffage ou rafraîchissement d'air.

La zone d'accueil :

tous les malades se présentant au SU sont accueillis dans une même zone d'accueil et d'orientation. L'entrée des malades arrivant à pied est séparée, jusqu'à l'infirmier(e) organisateur de l'accueil (IOA), de ceux arrivant en SMUR, ambulance ou accompagnés des pompiers. Cette zone permet à l'infirmière ou au médecin d'accueil, avant l'enregistrement administratif, d'examiner rapidement les malades et d'orienter simultanément plusieurs malades debouts ou couchés, si possible par des circuits spécifiques, vers la zone de soin qui leur correspond.

La zone de soin :

Les salles d'examen et de soins d'un même secteur sont regroupées autour d'un poste central de soin destinés à la gestion médicale et infirmière des malades dans une ambiance calme. Chaque salle de soin comporte une paillasse sèche et humide, un espace informatique, et suffisamment de place pour accueillir si nécessaire la famille. Les salles d'examen ambulatoire ne doivent pas être trop spécifiques et doivent pouvoir accueillir des malades couchés, lors d'un afflux massif de malades. Des zones spécifiques, en particulier pédiatriques et psychiatriques, peuvent permettre la prise en charge dans le calme de ces malades.

Des locaux dédiés à une consultation sans rendez-vous ou à une maison médicale sont distincts des locaux des urgences.

La zone technique :

Les salles de radiologie conventionnelle sont contiguës au service des urgences, soit à l'intérieur du service de radiologie, soit à l'intérieur du service des urgences. Il en est de même pour les salles d'échographie et le scanner. Lorsque le laboratoire est éloigné du service des urgences, les prélèvements sont acheminés par un moyen rapide, fiable et automatique (pneumatique...).

Il n'est pas justifié de prévoir un bloc opératoire dans les locaux des urgences.

La zone de service :

Un nombre suffisant de bureaux pour les médecins permanents et les cadres permettent de travailler dans une zone calme, proche du secrétariat. Une salle de réunion suffisamment vaste est indispensable pour l'enseignement, les réunions du service et sert de centre de crise en cas de plan blanc.

4.1.4. Le plateau technique

Le plateau technique regroupe les locaux de diagnostic et d'intervention médicale. Ce sont les laboratoires, les salles de radiologie et d'imagerie médicale, le bloc opératoire, les salles de soins sceptiques... etc. La plupart de ces espaces doivent être en zone aveugle, vu les conditions très précises de température, de qualité de l'air et d'éclairage qu'elles requièrent.



La sophistication du matériel et la précision des actes nécessitent une ergonomie sans faille : le personnel peut être appelé à travailler sans interruption pendant plusieurs heures sur des sujets requérant une concentration extrême et continue.

L'accès à ces locaux est contrôlé et limité aux seuls intervenants et patients. Les conditions d'asepsie qui sont exigées pour le bloc opératoire et ses annexes, interdit toute ouverture directe sur l'extérieur.

4.1.5. Le bloc opératoire

Tout en étant séparé des autres espaces, le bloc opératoire doit être facilement accessible de l'extérieur à travers les urgences et des locaux d'hospitalisation.

Les conditions très particulières de travail (circuit propre, circuit sale, circuit malade, circuit personnel, éclairage, etc.) en font plus un « outil » qu'un espace de travail. L'accès au bloc se fait par des sas de transfert et l'ensemble des salles d'opération est cintré par des couloirs périphériques



Le fonctionnement en continu ainsi que les contraintes de désinfection et de filtration, les conditions de températures et de taux d'humidité stables font que l'aération et l'éclairage naturels sont proscrits et que tout repose sur des installations techniques et médicales sophistiquées.

4.1.6. L'hospitalisation

L'hospitalisation d'un patient consiste en son hébergement à proximité du plateau technique et des services de soins le temps de son traitement. Les conditions sont semblables à un hébergement hôtelier à la différence, que le malade est consigné dans sa chambre 24 heures sur 24, alors que le touriste ne passe que la nuit dans sa chambre de même qu'une ou deux heures par jour.



Les malades qui séjournent dans une chambre ont un métabolisme amoindri et doivent souvent garder le lit. Une attention particulière doit être observée pour les conditions de confort dans les chambres pour ne pas ajouter à la détresse des personnes hospitalisées des conditions de séjour désastreuses.

Les chambres sont individuelles ou collectives; elles sont en général munies d'une salle d'eau qui sert d'espace tampon avec le couloir. Elles sont réparties de part et d'autre d'un large couloir, ce qui suppose des contraintes très différentes en terme d'ensoleillement et d'échange thermique au niveau des façades d'orientation de protection solaire, de choix des ouvertures de même que des caractéristiques thermiques et acoustiques. Dans certains services, le risque de défenestration des malades est important. Il y'a lieu d'en tenir compte dans la conception des ouvertures et de leurs protections.

Les circulations verticales sont pour des raisons de sécurité incendie, nécessairement cloisonnées; les étages d'hospitalisation peuvent être compartimentés en des zones homogènes et indépendantes pour la climatisation et le chauffage.

4.1.7. Les locaux de service

On définit comme locaux de services, les cuisines, les restaurants, les dépôts, les locaux techniques, les locaux du personnel, les bureaux administratifs, la stérilisation, la morgue, ...etc.

A part des espaces tels que le restaurant du personnel, et quelques bureaux administratifs, ces locaux ne nécessitent pas de lumière naturelle ni de chauffage ni de climatisation. On doit y assurer des conditions de travail confortables pour le personnel surtout dans les zones où le travail est pénible :

- Les cuisines
- La stérilisation
- La blanchisserie

Ces espaces ne présentent pas de particularités liées à leur incorporation dans le bâtiment hospitalier et possèdent donc les mêmes caractéristiques et besoins que des espaces similaires dans des bâtiments d'autre nature.

Ils ne sont accessibles qu'aux membres du personnel et sont en général situés dans les parties résiduelles du bâtiment, à l'arrière ou au sous-sol tout en étant à proximité des différentes zones qu'ils doivent desservir.

Le niveau de confort demandé n'y est pas très élevé, ce qui fait que leur incidence sur le bilan énergétique global du bâtiment, est généralement minime.



4.2. Les conditions d'occupation des locaux et les incidences sur le bâti

Une des complexités rencontrées par les concepteurs de bâtiments hospitaliers est le fait de la juxtaposition de locaux ayant des modes de fonctionnement de même que des besoins très différents, qu'il faut intégrer dans une même enveloppe et faire opérer avec les mêmes installations techniques.

En Tunisie, le niveau de confort hospitalier a beaucoup évolué ces dernières années surtout dans le domaine privé qui a connu un développement important en nombre de lits ayant un standard de confort et un niveau de service de norme européenne.

LOCAUX	OBJECTIFS FONCTIONNELS	CONDITIONS D'OCCUPATION	INCIDENCES SUR LE BÂTI
ACCUEIL ET CONSULTATIONS	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité de l'accueil et de prise en charge des ergonomies des espaces de travail 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne Lumière • Température Stable • Ambiance Accueillante • Bonne Acoustique • Éclairage Spécifique Pour certains Espaces 	<ul style="list-style-type: none"> • Volumes Importants • Vitrages Importants Avec protection Contre l'ensoleillement Direct • Sas Avec L'extérieur Et Avec les Unités Adjacentes • Inertie Forte Des Enveloppes
SERVICES URGENCE	<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité aisé et indépendante • Organisation • Fonctionnelle des espaces et des circuits 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne Lumière • Température Stable • Ambiance Accueillante • Niveau Acoustique Faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitrages importants avec protection contre l'ensoleillement direct • Inertie forte des enveloppes
SERVICES MÉDICAUX	<ul style="list-style-type: none"> • Ergonomie exigeante et spécifique pour chaque espace • Organisation fonctionnelle des espaces et des circuits • Confort des usagers (personnels et patients) 	<ul style="list-style-type: none"> • Température, humidité et renouvellement de l'air (et filtration) dans des conditions particulières à chaque espace • Niveau acoustique faible • Contrôle et filtrage des accès • Occupation permanente et/ou discontinue- 	<ul style="list-style-type: none"> • Sas d'entrée pour chaque unité • Enveloppes à forte inertie • Apports solaires évités ou • Strictement contrôlés
HOSPITALISATION	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité de confort et de prise en charge des malades 	<ul style="list-style-type: none"> • Température Stable • Accès Contrôlés • Éclairage Naturel • Niveau Acoustique faible 	<ul style="list-style-type: none"> • SAS d'entrée • Enveloppes à forte inertie Vitrage sur façades et contrôle de l'ensoleillement • Espaces tampon entre chambres et couloirs et entre hospitalisation • Autres Services
SERVICES GÉNÉRAUX ET SPÉCIALISÉS (administration, cuisines, blanchisserie, stérilisations, morgue, chaufferie, ...)	<ul style="list-style-type: none"> • Productivité du personnel et efficacités des services (personnels et équipements)- 	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions identiques à celles des mêmes espaces dans des bâtiments autres- 	<ul style="list-style-type: none"> • Locaux séparés

Tableau 13 : Spécificité des locaux de services dans un établissement hospitalier et incidence sur le bâti



4.3. Organisation de l'espace : Les mesures économisantes : modularité des espaces

Les parties modulables d'un bâtiment hospitalier sont celles qui abritent plusieurs espaces similaires et répétitifs : l'hospitalisation, l'administration et la consultation sont des espaces qui peuvent être établis selon des trames communes.

Cette approche conceptuelle en modules répétitifs s'est imposée comme règle de construction, de gestion et de maintenance économiquement indispensable pour des bâtiments d'une certaine taille. Cette approche apporte beaucoup de facilité et d'économie dans la construction du bâtiment et dans sa gestion, y compris la consommation énergétique, pendant la durée de son exploitation

4.3.1. Le zonage fonctionnel

Le zonage consiste à placer judicieusement des espaces différents, les uns par rapport aux autres, dans le but d'avoir une gestion énergétique optimale de l'ensemble.

En effet, les besoins thermiques, le mode et les périodes d'occupation des locaux font que des espaces doivent être assemblés ou rapprochés et d'autres isolés. Les espaces de consultation et de soins par exemple où les patients peuvent être complètement ou partiellement nus doivent être groupés et avoir des conditions de confort thermique qui ne sont pas celles de bureaux ou de laboratoires.

Le bloc opératoire et les services de radiographie sont des entités qui opèrent de façon continue et qui exigent des conditions de confort très précises et assez similaires. Assembler ces deux entités, les isoler et les traiter thermiquement de façon appropriée est impératif. Des conditions d'asepsie sont aussi à prendre en considération dans le regroupement ou l'éloignement de certains locaux.

Les différents espaces d'un bâtiment hospitalier peuvent avoir des besoins thermiques similaires ou diamétralement opposés. Regrouper les uns et isoler les autres est une décision à prendre au tout début de la conception du bâtiment (au stade de l'A.P.S). De l'opportunité des choix arrêtés dépendront les économies ou les surcoûts énergétiques dans l'exploitation du bâtiment sa vie durant.



4.3.2. Les espaces tampons

Ces espaces servent à protéger thermiquement et acoustiquement (notion importante en milieu hospitalier) certaines zones du bâtiment de l'extérieur ou d'une autre zone adjacente qui n'a pas les mêmes niveaux de confort thermique. Ils peuvent se présenter sous trois formes :

- Les sas d'entrée
- Les espaces tampons
- Les patios.

4.3.2.1. Les sas d'entrée

Des sas d'entrée doivent être prévus au niveau de tous les accès publics et des accès aux membres du personnel.

Les sas sont d'une grande efficacité contre les déperditions et les infiltrations d'air à condition que les deux portes (intérieures et extérieures) ne soient pas ouvertes en même temps. Prévoir une distance minimale de deux mètres entre les portes, de façon à ce qu'une personne ne puisse pas ouvrir la seconde porte avant que la première ne soit refermée. Cette distance permet aussi le passage de chaises roulantes sans avoir à s'arrêter au milieu du sas.

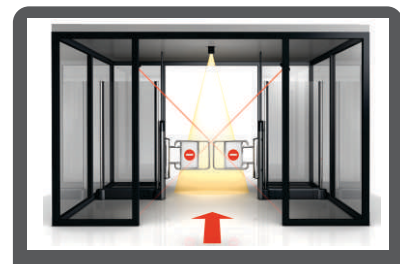


Figure n°13 : Les sas d'entrée

4.3.2.2. Les espaces tampons

Il s'agit d'utiliser certains espaces qui ne nécessitent pas un confort thermique particulier en tant que bouclier et ce afin de protéger une zone sensible des rigueurs extérieures (chaleur ou froid) ou des nuisances (thermiques ou acoustiques) d'une autre zone.

Pour ce qui est des rigueurs extérieures, les orientations particulièrement gênantes en Tunisie sont le Nord Ouest en hiver (vent dominant) et le Sud Ouest et l'Ouest en été (ensoleillement maximum et vent chaud). Placer sur les façades orientées dans ces directions les espaces de services tels que les blocs sanitaires, les circulations, les locaux à faible occupation (archives, dépôts, certains bureaux, etc.) permet d'une part de faire encaisser le choc thermique par des espaces qui y sont peu sensibles et d'autre part de laisser libre les zones privilégiées du bâtiment pour des activités qui en ont besoin.

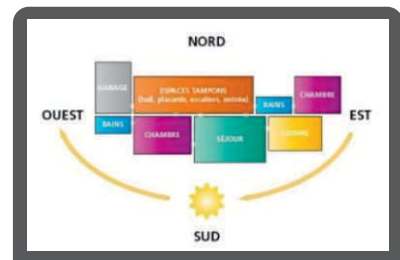
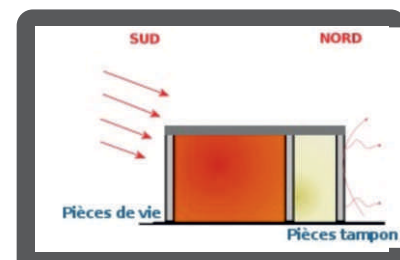
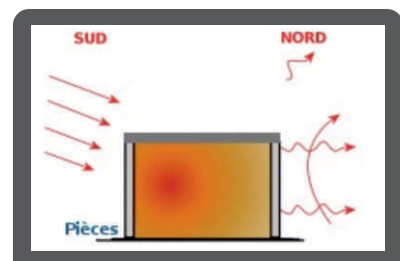


Figure 14 : Les espaces tampons



4.3.2.3. Les patios

Largement utilisés dans l'architecture traditionnelle des pays chauds et en Tunisie tout particulièrement, les patios constituent des espaces de régulation thermique naturelle par excellence.

Cependant, leur efficacité à créer un microclimat de transition entre l'extérieur du bâtiment et l'intérieur des locaux dépend du rapport entre leur dimension et les volumes qui les entourent.

Un patio ne doit être ni un puits ni un espace ouvert à tout vent. Outre son intérêt thermique, il procure un agrément visuel certain et peut être un élément de lutte contre le stress ou l'angoisse des usagers, personnel ou patients d'un bâtiment hospitalier.

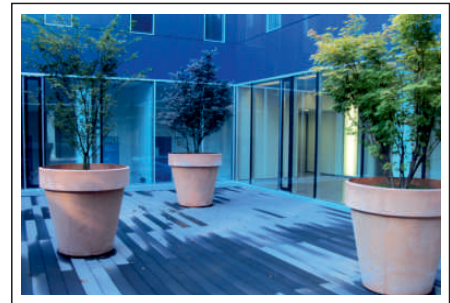


Figure 15 : Les patios

4.3.3. L'orientation

Les orientations des divers espaces d'un bâtiment hospitalier sont très importantes, vu le caractère très spécial et parfois sensible des activités et du matériel qu'ils abritent.

Les activités d'un centre hospitalier sont contenues dans la plupart des cas. Elles ne peuvent s'accommoder d'une orientation et donc d'un ensoleillement gênant ou inadéquat comme c'est le cas pour les locaux commerciaux ou d'habitation.

Si l'ensoleillement direct des laboratoires ou des salles de soins est gênant et doit être proscrit, il n'en est pas de même pour certains locaux tel que les chambres d'hospitalisation, les lieux d'accueil et d'attente, où un ensoleillement contrôlé et une vue directe sur l'extérieur contribue au confort psychique des personnes qui souffrent d'une perte plus ou moins importante de leur capacité physique et morale. Cependant et dans tous les locaux à besoins thermiques stables, les apports solaires qui représentent une source importante de calories doivent être maîtrisés.

Le recours à l'éclairage naturel dans la plus large mesure possible est impératif et contribue à alléger sensiblement la consommation énergétique, surtout dans les locaux occupés à temps plein. S'il est totalement exclu du bloc opératoire et des salles de radiographie, il doit être contrôlé pour des services spécialisés tel que les salles de consultations, les unités de soins, les laboratoires, qui exigent un éclairage constant et de qualité.

L'utilisation de patios et de lanterneaux est un moyen efficace pour apporter de la lumière naturelle à des zones enclavées, qui sont souvent importantes dans des bâtiments hospitaliers de moyenne taille, et ce pour des raisons de fonctionnalités qui sont et resteront la condition première de conception de ces bâtiments.

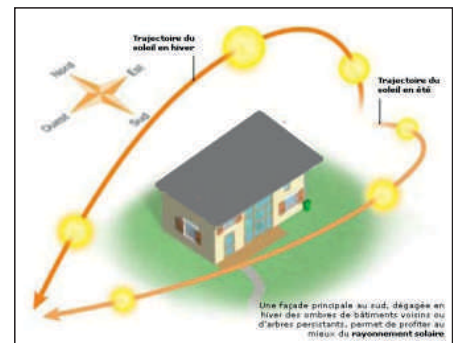


Figure 16 : L'orientation

4.3.4. L'inertie et l'isolation

Les bâtiments hospitaliers comprennent d'une part, des locaux à occupation continue (chambres d'hospitalisation, salles de gardes, etc.) et d'autre part, des locaux à occupation discontinue. Une stratégie de base est de regrouper les locaux du même type d'occupation, les uns et les autres autant que possible, tout en respectant les contraintes de fonctionnalité. Il s'agit d'une des premières mesures à prendre au niveau de la conception du bâtiment pour avoir une gestion énergétique rationnelle.

On peut réaliser des économies d'énergie de l'ordre 15 à 20% dans les locaux à occupation discontinue (bureaux administratifs, salles de consultation, etc.) lorsqu'ils ne sont pas traités.

Thermiquement quand ils sont inoccupés et ce, à condition que les enveloppes soient efficaces thermiquement.

Par contre, les locaux à occupation continue exigent une ambiance thermique stable. Ils représentent la majorité des espaces dans les bâtiments hospitaliers et des économies d'énergie non négligeables sont obtenues en prévoyant pour ces locaux des enveloppes à forte inertie.

Dans l'hypothèse où ces locaux seront directement exposés à l'air, et plus particulièrement à l'Ouest ou au dernier étage du bâtiment, ils auront à subir beaucoup plus que les autres les rigueurs du climat.

Si le froid n'est pas très excessif en Tunisie, la chaleur à l'inverse, peut l'être et durer plusieurs mois. L'ensoleillement des toitures terrasses et des façades orientées Sud-Ouest et Ouest est très important et les apports thermiques qui en résultent peuvent causer une gêne pour les usagers si les enveloppes ne constituent pas une barrière thermique suffisante, ayant une forte inertie.

Vu les procédés et matériaux de construction actuels, la masse est devenue difficile d'intégrer au niveau des enveloppes extérieures. Le recours au rajout de matière isolante s'est donc imposé, la facilité de la mise en œuvre et le coût relativement faible de l'opération.

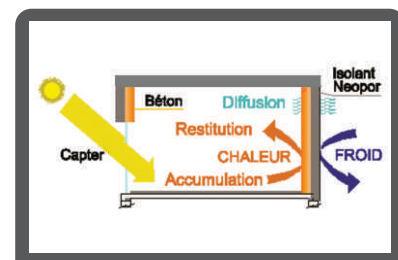


Figure 17 : L'inertie et l'isolation

4.4 .Recommandations

4.4.1. Implantation et orientation

Afin de donner une performance maximale aux différents espaces d'un bâtiment hospitalier, il est recommandé de tenir compte des facteurs suivants :

4.4.1. 1 Confort thermique:

Le confort thermique est une sensation de bien-être lorsqu'on est exposé à une ambiance intérieure. Le confort thermique ne dépend pas exclusivement de la température mais également des conditions d'humidité de l'air intérieur, des éventuels courants d'air, du niveau de respirabilité de l'air ou de qualité d'air intérieure (QAI).

La température à elle seule dépend d'une température résultante sèche, sorte de moyenne des températures intérieures et rayonnées par les différents corps et parois. A titre d'exemple, le confort thermique ne peut être atteint à 22°C de température sèche intérieure avec des murs froids alors qu'à 18°C soit 4 degrés en moins, il est atteint et de plus de manière plus satisfaisante, avec un rayonnement homogène des corps en présence, y compris l'individu qui ressent les différents rayonnements. Autre sensation analogue, en montagne alors que l'air est à +10°C, avec un bon rayonnement du soleil, le confort thermique peut être atteint facilement.

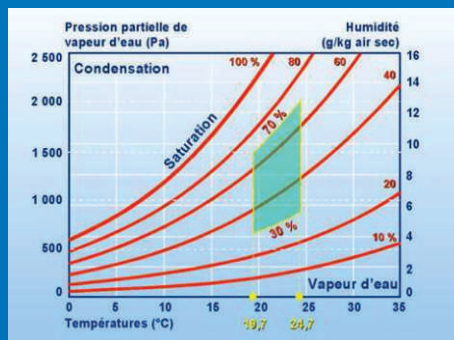


Figure 18:
La zone de confort thermique

L'objectif de la réglementation thermique des bâtiments neufs est de produire de nouveaux bâtiments avec des performances thermiques minimales de l'enveloppe, avec moyennant des surcoûts acceptables (inférieurs à 10% du coût du bâtiment), en vue d'améliorer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment et par conséquent réduire les besoins en chauffage et en refroidissement. Cette objectif est réalisable étant donné que la Tunisie dispose d'un climat relativement modéré qui permet l'utilisation de matériaux et des techniques de construction qui contribuent à la réduction des besoins énergétique du bâtiment moyennant une conception architecturale réfléchie et adaptée aux régions climatiques locales.



4.4.1.2. Confort visuel:

Veiller à assurer un éclairage naturel de niveau approprié pour chaque type d'activités. L'ensoleillement direct doit permettre un apport énergétique en hiver sans pour autant affecter négativement les espaces liés aux activités de soins, de diagnostic, etc. De ce fait, le choix des dimensions des ouvertures, des protections et des types de menuiserie et de vitrerie peut contribuer au confort intérieur tout en économisant de l'énergie.

L'éclairage moyen à maintenir sur la surface de référence conformément au tableau des niveaux d'éclairage recommandés par la norme européenne EN 12464-1. Elles sont valables pour des conditions visuelles normales et tiennent compte des facteurs de confort visuel, du bien être, des tâches visuelles et d'ergonomie, de sécurité, d'économie et des conditions réelles du bâtiment :



Figure 19 : Le confort visuel

BESOIN D'ÉCLAIRAGE POUR LES ZONES INTÉRIEURES D'UN BÂTIMENT DE SANTÉ SELON LES USAGES ET LES ACTIVITÉS	
TYPE D'INTÉRIEUR DE TÂCHE OU D'ACTIVITÉ	NORME RECOMMANDÉE (LUX)
Zones de circulation et de couloirs	100
Cantines	200
Salles d'exercices physiques	300
Salles de soins	500
Salles des matériels, salles de commutations ou distribution	200
Télex, local courrier, tableau de distribution (standards)	500
Réception	300
Secrétariat	500
Eclairage général	500
Examen et traitement	1000
Salles d'opération de préparation et de réveil	500
Salles d'opérations	1000

Tableau 14 : Besoins d'éclairage pour les zones intérieures d'un bâtiment de santé selon les usages et les activités

4.4.1.3. Confort tactile :

Il concerne le confort hygrothermique des occupants, qui lui-même dépend des conditions climatiques extérieures (soleil, vent, humidité relative) et des activités des usagers. Le concepteur doit tenir compte à la fois de l'apport de l'énergie solaire gratuite en hiver et de la protection contre l'éblouissement et enfin du rayonnement solaire direct en été (occasionnant les surchauffes).

Le concepteur veillera à la réduction des infiltrations de l'air frais à travers les défauts des menuiseries ou encore la mauvaise disposition et orientation des ouvertures, en hiver.

Le concepteur favorisera toujours le renouvellement de l'air par de l'air frais et humidifié en hivers.

De ce fait, il est judicieux d'exploiter le phénomène de la surpression et de la dépression du vent sur les diverses parois de l'enveloppe architecturale ou encore du phénomène de dilatation de l'air causée par l'échauffement de l'air.

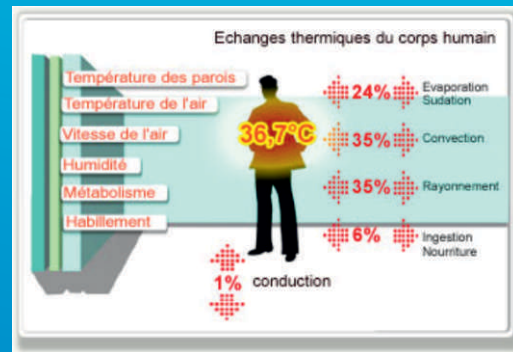


Figure 20 : Echanges thermiques du corps humains

4.4.1.4. Confort olfactif :

Il est assurée par le phénomène d'extraction des odeurs et des fumées par les différences de pressions entre les différentes parois de l'enveloppe. Il est recommandé que le renouvellement de l'air des pièces "polluantes" (ex: fumoirs) et des salles d'eau ne traverse pas les autres espaces. Le concepteur doit donc réfléchir au bon emplacement et au dimensionnement des ouvertures extérieures et/ou au bon emplacement des ouvertures de ventilation et d'évacuation.

4.4.1.5. Confort Sonore :

Il concerne la maîtrise des ondes de propagation. Les ondes aériennes peuvent être amorties par la composition et l'effet de masse de l'enveloppe (murs et fenêtres). Les ondes d'impacts peuvent être amorties par le choix et l'épaisseur des matériaux à mettre sous le carrelage (construction d'étage). Les murs mitoyens entre voisins seront doublés de préférence.

Le niveau de pression acoustique normalisé en France, du bruit engendré dans un local d'hébergement par un équipement du bâtiment extérieur à ce local ne doit pas dépasser 30 dB(A) en général et 35 dB(A) pour les équipements hydrauliques et sanitaires des locaux d'hébergement voisins.

Le niveau de pression acoustique normalisé, du bruit transmis par le fonctionnement d'un équipement collectif du bâtiment ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

Dans les salles d'examen et de consultations, les bureaux médicaux et soignants, les salles d'attente : 35 dB(A) ;

Dans les locaux de soins : 40 dB(A) ;

Dans les salles d'opérations, d'obstétrique et les salles de travail : 40 dB(A).

4.4.2. Recommandation générale pour les établissements hospitaliers

Ce chapitre a permis de dresser un portrait global de multiples aspects à considérer en matière de composition générale des espaces d'un bâtiment hospitalier et des mesures d'économie d'énergie y afférant.

D'une manière générale, une approche énergétique rigoureuse tendra à privilégier les stratégies et recommandations suivantes :

N°	ACTIONS
1	Concevoir un bâtiment massif le plus compact possible.
2	Implanter le bâtiment suivant un axe Est-ouest : façades principales au Nord et au Sud, les façades latérales (murs pignons) à l'Est et à l'Ouest
3	Utiliser si possible une trame régulière pour l'ensemble du bâtiment et moduler les Espaces et les ouvertures
4	Assembler les zones à ambiances thermiques similaires
5	Prévoir le bloc opératoire, les salles de radiographie en zone aveugle
6	Prévoir les laboratoires, la consultation, les espaces d'accueil et d'attente au Nord
7	Prévoir les locaux de services et à faible occupation comme espaces tampons à l'Ouest et au Nord
8	Prévoir des sas pour tous les accès extérieurs et à l'entrée de chaque unité spatiale thermiquement différente
9	Limiter les vitrages à l'Ouest et les protéger
10	Protéger les vitrages au Sud quand ils dépassent 10% de la surface du local
11	Incorporer un isolant dans les toitures terrasses et les murs Ouest

Tableau 15 : Recommandations générales pour la conception des établissements hospitaliers

Pour certaines régions climatiques particulières de la Tunisie, à savoir les zones centrales (à plus de 50 Km de la côte) et le Sud, on nuancera la stratégie de la façon suivante :

N°	ACTIONS
1	Intégrer des patios dans la volumétrie de l'ensemble construit
2	Réduire et protéger les vitrages sur les façades ensoleillées
3	Dédoubler l'inertie par un isolant dans tous les murs extérieurs et les toitures terrasses

Tableau 16 : Recommandations générales pour la conception des établissements hospitaliers dans certaines régions climatiques particulières de la Tunisie



5. ARCHITECTURE THERMIQUE DE L'ENVELOPPE :

5.1. Rôle des parois opaques et de l'inertie thermique

5.1.1. L'inertie thermique :

L'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage lié aux caractéristiques physiques, dimensionnelles et environnementales de la paroi de stockage. Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante.

Les deux propriétés qui caractérisent l'inertie thermique d'une paroi sont :

- La masse volumique de la paroi exprimée en Kg/m^3 .
- La chaleur spécifique de la paroi exprimée en $\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$ appelée également chaleur massique.

L'inertie thermique est la capacité d'un bâtiment, d'une pièce ou d'une paroi à cumuler des calories et à les restituer au moment venu. Il existe plusieurs classes d'inertie :

- Très légère
- Légère
- Moyenne
- Lourde
- Très lourde

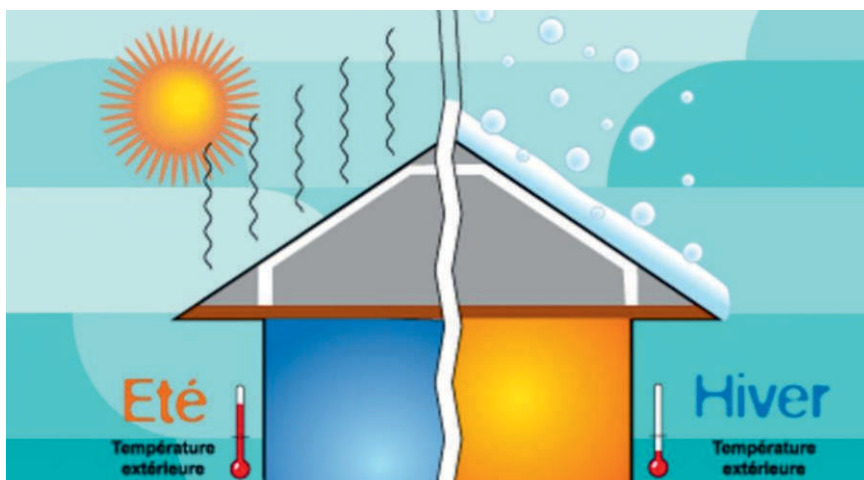


Figure 21 : L'inertie thermique

Il est important d'identifier la classe d'inertie à cibler selon l'usage que l'on fait du bâtiment :









CLASSE D'INERTIE	APPLICATIONS
Très léger à léger	 Hiver : Paroi réactive, sa température monte vite lorsqu'on chauffe la pièce. La pièce est confortable rapidement. N'a pas la capacité de stocker les calories, donc un arrêt du chauffage fait baisser rapidement la température de la paroi et donc la température ressentie dans la pièce.
	 Eté : N'est pas capable de gérer le surplus de calories, il y a risque de surchauffe et même en mi-saison si la paroi le rayonnement solaire.
	 Utilisation : Paroi réactive mais peu économique en terme de besoins de chauffe. Convient aux pièces utilisées temporairement type : chambre d'appoint, petite salle de réunion.
Moyen	 Hiver : Paroi qui allie une montée en température relativement rapide et une capacité à emmagasiner les calories. Elle permet de maintenir une température agréable dans la pièce lorsque le chauffage est éteint en restituant ses calories. Peut recevoir le rayonnement solaire et lisser les apports sur la journée.
	 Eté : Permet de stocker le surplus de calories en saison chaude ou en mi-saison et d'éviter ainsi les surchauffes. En saison chaude, il faut rafraîchir la paroi la nuit par un système de surventilation pour lui permettre de se décharger de ses calories et de gérer ainsi les surchauffes du lendemain.
	 Utilisation : Paroi confortable en été et en hiver et économique en besoins de chauffage. Convient aux pièces utilisées régulièrement et recevant du monde : habitat, bureaux, salle de classe et salle de réunions.
Lourd à très lourd	 Hiver : Paroi peu réactive, mais beaucoup de temps à monter en température mais garde très longtemps les calories et les restituent sur plusieurs jours soit un besoin de chauffage très limité. Lisse sur plusieurs jours les apports solaires.
	 Eté : Très propice à garder la fraîcheur. Lisse généralement les fluctuations de température.
	 Utilisation : Occupation continue, doit recevoir directement les apports énergétique (rayonnement solaire, poêle...). A associer avec des parois d'inertie moyenne. Très économique en besoins de chauffage sauf si la pièce est utilisée de manière ponctuelle.

Tableau 17 : Identification de la classe d'inertie d'un bâtiment en fonction des saisons et de son usage

PLANCHER BAS	PLANCHER HAUT	PAROI VERTICALE	CLASSE D'INERTIE
Lourd	Lourd	Lourde	Très lourde
-	Lourd	Lourde	Lourde
Lourd	-	Lourde	Lourde
Lourd	Lourd	-	Lourde
-	-	Lourde	Moyenne
-	Lourd	-	Moyenne
Lourd	-	-	Moyenne
-	-	-	Très légère

Tableau 18 : Nature des parois de l'enveloppe d'un bâtiment en fonction de sa classe d'inertie

On constate que la réduction des besoins en énergie grâce aux apports solaires repose sur le travail combiné de l'effet de serre des vitrages (piège à chaleur) et de l'inertie (stockage). Le stockage direct est un processus par lequel le rayonnement solaire, irradiant un matériau, est partiellement absorbé par celui-ci, transformé en chaleur et accumulé en son sein. La capacité d'accumulation d'un matériau dépend de sa chaleur spécifique, de sa conductivité thermique et de son poids volumique

Une paroi peut aussi s'échauffer en absorbant la chaleur rayonnée par d'autres parois ayant une température supérieure. De même, si l'air est plus chaud que la paroi, celle-ci peut gagner des calories par convection. Ce type de stockage est alors indirect.

5.1.2. Influences de l'inertie thermique en hiver dans les bâtiments contemporains :

Avantages :

- Climat intérieur plus stable.
- Meilleure utilisation des gains (solaires et internes) d'où une réduction proportionnelle aux besoins en chauffage.
- Possibilité de diminuer la puissance installée de l'équipement du chauffage (réduction des demandes de jointe).
- Possibilité de chauffer par « à coups » sans influence notable sur le confort (chauffage à bois par exemple).

Inconvénients :

Durée et puissance de remise en température sont requises si le bâtiment est froid, faisant suite à un arrêt prolongé du système de chauffage (utilisation occasionnelle, week-end, etc.).

5.1.3. Influences de l'inertie thermique en été:

En été un bâtiment massif ne présente pas que des avantages : à isolation égale une structure lourde permet un déphasage de près de 12h des gains de chaleur au travers des parties opaques (toits plats, murs extérieurs), dès lors il n'y a plus de simultanéité entre les gains directs (par les fenêtres) et les gains indirects (par les murs et dalles).

En été, on peut à l'inverse, utiliser la capacité thermique de la structure afin de stocker de la fraîcheur ». Il suffit pour cela de ventiler suffisamment le bâtiment durant les heures les plus fraîches de la nuit (de 22h à 6h du matin).

Cette ventilation peut être naturelle (« free cooling ») en tirant profit de l'effet cheminée

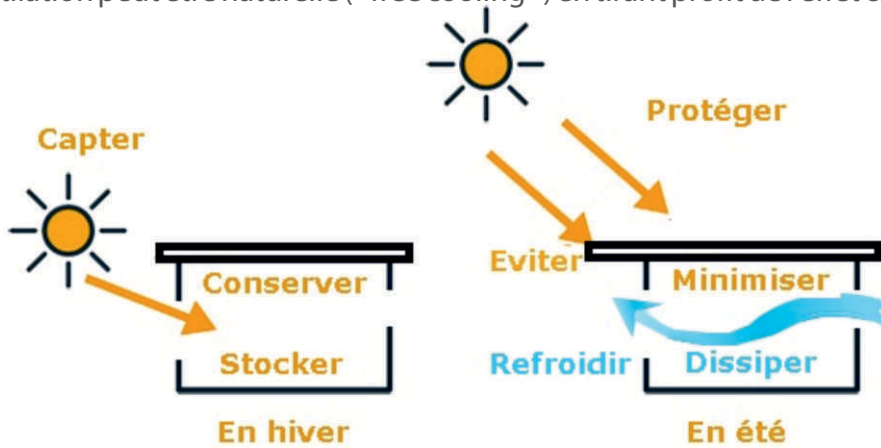


Figure 22 : Le principe de conception bioclimatique

5.2. Les déperditions thermiques et l'isolation :

Le rôle de l'isolation thermique est de préserver le confort en réduisant les échanges thermiques avec l'ambiance extérieure : si celle-ci est froide, l'isolation garde la chaleur ; si celle-ci est chaude, l'isolation en préserve la fraîcheur.

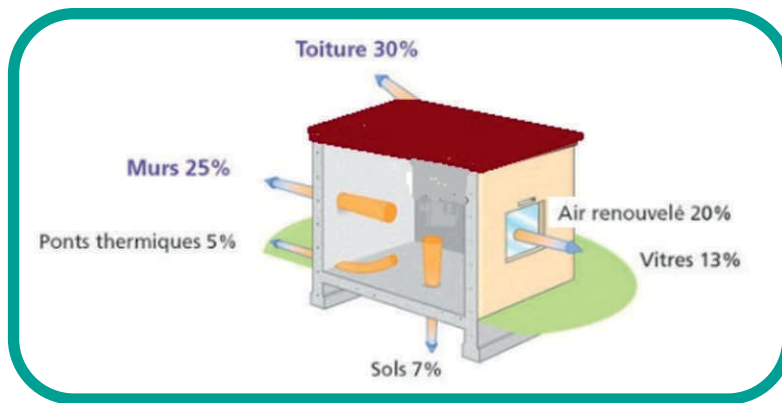
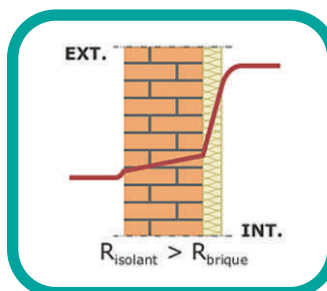
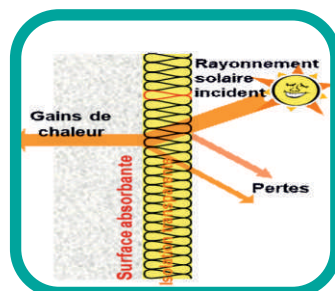


Figure 23 : Les déperditions thermiques et l'isolation



impact de l'isolation des parois sur la réduction des déperditions

L'isolant peut se placer de diverses manières dans un mur (à l'extérieur, en sandwich ou à l'intérieur) sans influencer la qualité d'isolation thermique de la paroi. Cependant, sa position modifie l'inertie de la paroi ainsi que le risque de condensation. Un pare-vapeur doit donc être placé du côté chaud de l'isolation pour éviter les problèmes de condensation.

Le pouvoir isolant d'un matériau est exprimé par sa conductivité thermique (λ). Les facteurs influençant le plus la conductivité thermique d'un matériau sont le poids volumique, la teneur en eau, la taille des pores d'air et la nature du solide les renfermant.

Les déperditions thermiques par conduction au droit de l'enveloppe représentent plus des deux tiers des déperditions totales. Une bonne isolation est un facteur essentiel à considérer pour une maîtrise énergétique appropriée du bâtiment.

Il n'y a pas à rechercher une isolation maximale mais une isolation optimale qui tienne compte des besoins en énergie pour un climat déterminé, des possibilités constructives et d'un investissement optimal qui met en relation le coût de construction avec le coût de l'énergie.

5.3. Les ponts thermiques :

Les ponts thermiques sont des défauts dans la conception et/ou dans la réalisation de l'enveloppe isolante. Les ponts thermiques sont responsables de problèmes d'inconfort, de consommation énergétique supplémentaire et de dégradations éventuelles des matériaux et assemblages de construction.

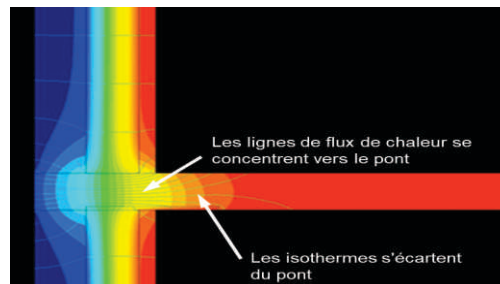


Figure 24 :
Les Ponts thermiques

Le pont thermique constitue une rupture totale ou partielle de l'isolation. En cet endroit de la construction, le flux de chaleur y est particulièrement dense : il n'est plus perpendiculaire à la surface des murs (flux surfacique).

Plusieurs problèmes sont occasionnés par les ponts thermiques :

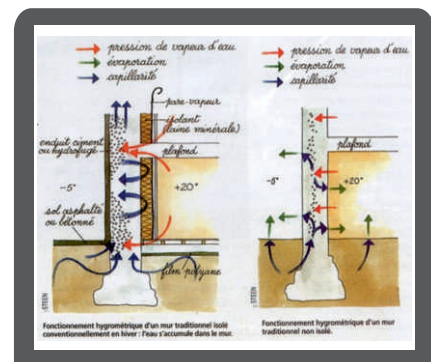
Les moisissures

Se développent sur les zones où se produit la condensation. Ces moisissures inesthétiques, présentent un risque sanitaire (asthme, etc.). Elles dégradent également tous les états de surface (peintures, plafonnage). L'humidité engendrée par la condensation, modifie les caractéristiques d'isolation de la paroi pour en réduire la performance thermique.

Les surfaces à proximité des ponts thermiques se caractérisent par une température de paroi inférieure à la température moyenne des parois, ce qui engendre une sensation de paroi froide et par conséquent une situation d'inconfort.



Figure 25: Les moisissures



Phénomène Capillaire dans les parois du bâtiment

La perte de chaleur supplémentaire,

Provoquée par les ponts thermiques, est à considérer de manière relative. Pour un bâtiment moyennement isolé, elle peut constituer 10 % des déperditions totales. Par contre, plus le bâtiment est isolé, plus les défauts d'isolation induisent des déperditions relatives importantes, qui peuvent représenter jusqu'à 25 % du total.

À l'inverse, le gain de chaleur supplémentaire, proposé par les ponts thermiques, est également à considérer, pour les mêmes raisons, et ce en regard de la climatisation, ou tout simplement en regard du confort d'été.

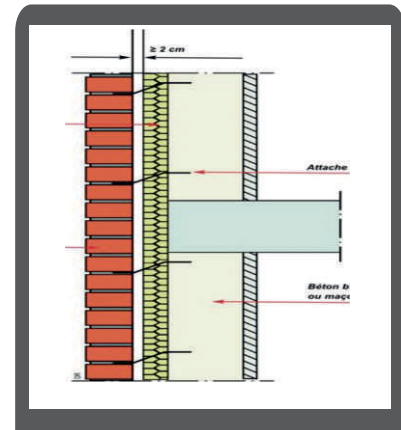


Figure 26 : Les pertes de chaleur par les ponts thermiques

5.4. Les moisissures:

Les moisissures font partie de notre environnement et sont impliquées dans de nombreux processus de décomposition organique. Elles deviennent malsaines si leurs spores sont présentes en grand nombre et sont inhalées. Il en résulte des réactions allergiques et un risque accru de maladies et d'infections respiratoires. Les maladies existantes des voies respiratoires, telles que l'asthme, sont également aggravées par la moisissure. Fièvre, maux de tête et douleurs aux membres, problèmes de concentration, tous ces symptômes peuvent être le résultat d'une exposition excessive aux moisissures. Il existe différents types de moisissures : noires, rouges, vertes et jaunes. On dit que la moisissure noire est la plus dangereuse. Cependant, il n'existe pas de preuve fiable à cet égard, la règle de base est la suivante : quelle que soit la couleur de la moisissure, vous devez absolument l'éliminer.

Les spores de moisissure se trouvent partout, y compris dans le sol et dans l'air. Elles peuvent survivre longtemps, même dans des conditions sèches. Cependant, le facteur décisif pour la croissance des moisissures est l'humidité. Avec l'oxygène et la chaleur, le microorganisme se développe rapidement si on lui ajoute un milieu de culture. Cela peut être n'importe quoi : de la pâte à papier peint, de la peinture et des tapis à la simple poussière de maison. La moisissure est particulièrement fréquente dans la salle de bains, notamment sur le rideau de douche.

5.4.1. Phénomène favorisant les moisissures :

Comme déjà mentionné : la chaleur, l'oxygène et l'humidité sont les trois principaux facteurs de croissance des moisissures. On a besoin d'air, et si possible il doit être agréable et chaud. Il reste donc de l'humidité. Voici quelques points (faibles) dans les locaux dont vous devriez être conscient :

- **Assèchement insuffisant des bâtiments :** Cela signifie qu'il faut emménager dans les locaux avant même que le bâtiment ne soit bien sec. En tant que propriétaire du bâtiment, vous devez vous assurer que l'ensemble de la structure est sec avant que les premiers occupants n'emménagent. Les sècheurs professionnels de bâtiment ou les déshumidificateurs d'air sont très utiles à cet égard.
- **Fissures dans la maçonnerie :** En raison des forces capillaires, l'eau pénètre même dans les plus fines fissures de la maçonnerie. Les articulations sont particulièrement menacées ici après quelques années. Lorsque vous les réparez, veillez à utiliser un mortier de jointoiement ou un coulis "résistant au gel". Certains composants dissipent la chaleur plus rapidement que les pièces qui les entourent. Ces composants se refroidissent donc plus rapidement. La différence de température par rapport aux éléments de construction adjacents entraîne la formation de condensation, qui favorise à son tour la croissance de moisissures.
- **Commun :** les ponts thermiques ne sont pas visibles à l'œil nu, c'est pourquoi une caméra thermique est nécessaire. Une isolation professionnelle permet d'éliminer ces ponts

thermiques. L'humidité de l'air se dépose sur les murs, le plafond ou les fenêtres, créant ainsi des conditions idéales pour les moisissures. Qu'il s'agisse de gouttières cassées, de tuyaux de descente, de la charpente du toit ou des tuiles, partout où l'eau (de pluie) peut s'infiltrer dans la maison sans être dérangée, le risque de moisissure augmente.

- **Inondation** : Que ce soit à cause de fortes pluies, d'un refoulement d'eau provenant de la canalisation d'égout ou d'un tuyau éclaté, après un dégât des eaux, vous devez absolument vous assurer que les zones touchées sont suffisamment sèches.

5.4.2. Mode d'élimination des moisissures :

Pour l'élimination des moisissures, il y a des remèdes domestiques efficaces, des remèdes chimiques et une élimination mécanique des moisissures. Les moisissures peuvent également être combattues par des moyens tangibles. Cependant, les fils fongiques sont souvent si profonds que seule l'élimination complète du matériau infesté aide. Mais avant cela, vous devez fixer les spores avec de la laque pour cheveux ou de la colle en aérosol. Si vous vous contentez de frotter avec une brosse ou d'enlever mécaniquement le matériau de support, vous risquez de répandre les spores de moisissure.

En principe, malheureusement, ce n'est pas parce que vous ne pouvez plus voir les taches de moisissure que la moisissure a disparu.

Il faut éclairer les pièces à risques. Les champignons préfèrent les endroits sombres, donc si nous laissons entrer la lumière du soleil dans les locaux, nous brisons les conditions nécessaires au développement des moisissures.

Maintenez un rythme de nettoyage fréquent. La saleté augmente les risques d'apparition de champignons, puisqu'ils s'en nourrissent. Au moins une fois par semaine, il est nécessaire de nettoyer les carreaux avec un désinfectant. Vérifiez les installations, et le fait que le réseau d'eau ne fuit pas. Cela peut être l'une des principales raisons de l'apparition de moisissures. Si c'est le cas, solutionnez le plus rapidement possible ces dégâts :

5.4.2.1. Les produits naturels:

- **Le bicarbonate de soude** : est l'un des nettoyants ménagers les plus populaires. Il a la propriété d'absorber l'humidité, donc il éloigne les champignons. Dissoudre une cuillère à soupe de ce produit dans un verre d'eau. Vous avez deux façons de l'appliquer, avec un spray ou directement avec la brosse. Appliquez le mélange sur le moule et frottez avec une petite brosse.

- **Le vinaigre** : étant un acide naturel, il tuera immédiatement le champignon de manière écologique. Il est préférable de ne pas le diluer avec de l'eau pour le rendre plus puissant. Vaporisez le vinaigre sur les taches de moisissure, laissez agir et frottez

5.4.2.2. Les produits chimiques:

- **L'acide borique ou borax** : est un minéral commercialisé comme produit de nettoyage. C'est le principal composant des poudres déodorantes pour les pieds et les chaussures. Il a un grand pouvoir antifongique, c'est-à-dire qu'il empêche le développement des champignons. Il faut dissoudre un verre de poudre de borax dans un litre d'eau, appliquer sur le moule et laisser agir pendant un moment. Ensuite, rincez et la moisissure ne réapparaîtra pas de si tôt. Il a également un grand effet désodorisant et élimine l'odeur d'humidité.

- **Le peroxyde d'hydrogène** : tue les bactéries et aussi les champignons sans produire de fumées toxiques. Il pulvérise toutes les taches de moisissure et laisse agir son pouvoir nettoyant pendant au moins dix minutes. Il faut frotter avec une brosse jusqu'à ce que les carreaux redeviennent blancs. Vous pouvez répéter le processus autant de fois que nécessaire.

- **l'eau de Javel ou l'ammoniaque** : se sont des produits plus agressifs, mais tous deux désinfectent, tuent les champignons et blanchissent les joints, mais ils présentent un gros inconvénient, qu'est de défaire le plâtre entre les carreaux. C'est pourquoi il est conseillé de les utiliser en très faibles proportions dans l'eau et de ne jamais les mélanger.

5.5. Rôle des parois vitrées

Une paroi vitrée est un élément complexe à plus d'un titre : car si elle est appelée à remplir différentes fonctions importantes, à chacune de ces fonctions est lié un effet non souhaité comme le montre le tableau suivant :

PRINCIPALES FONCTIONS D'UNE PAROI VITRÉE, ASPECTS POSITIFS ET NÉGATIFS		
Fonction	But recherché	Effet non souhaité
Vue	Contact avec l'extérieur	Perte de privacité
Lumière	Eclairage naturel	Eblouissement
Chaleur	Gains solaires	Surchauffes
Aération	Apport d'air neuf	Pertes par ventilation

Tableau 19 : Principales fonctions d'une paroi vitrée, les aspects positifs et négatifs

Dès lors l'optimisation du confort résulte d'un compromis qui nécessite une bonne connaissance de la physique de la fenêtre, de ses différentes composantes et des phénomènes qui leur sont liés.

5.5.1. Le facteur Solaire :

Le facteur solaire FS représente le pourcentage d'énergie solaire incidente, transmise au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local. Le choix du facteur solaire influence les économies d'énergie car plus le vitrage ne contrôle le rayonnement entrant, plus les frais de climatisation et les risques de surchauffe sont réduits. Inversement, le bénéfice des gains solaires en hiver sera diminué.

La transmission énergétique totale, et donc les gains solaires au travers d'un élément transparent, sont fonction de l'angle d'incidence des rayons du soleil avec le vitrage. Les paramètres importants à considérer sont par conséquent :

- La latitude et la saison (pour la position du soleil) ;
- L'orientation et l'Inclinaison de la paroi (pour la géométrie du bâtiment) ;
- Les propriétés du vitrage utilisé.

Pour des incidences supérieures à 60° indépendamment du type de vitrage utilisé (simple, double ou triple), on remarque la diminution rapide du facteur solaire.

5.5.2. La transmission lumineuse :

La transmission lumineuse (TL) correspond au pourcentage de lumière transmis au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local. Par conséquent, plus le coefficient TL est élevé, plus grande est la quantité de lumière qui pénètre dans le bâtiment et moins l'éclairage artificiel sera nécessaire en journée.

Comme pour le facteur solaire (FS), il est possible de définir la transmission lumineuse pour trois types de vitrages : clairs, absorbants et réfléchissants. Pour un vitrage clair, 90 % de l'intensité lumineuse est transmise, alors que 8% sont réfléchis et 2 % sont dégradés en chaleur au sein du matériau.

Plus le facteur de lumière du jour est élevé, plus le temps d'utilisation des locaux avec la lumière naturelle est élevé, limitant ainsi la consommation d'éclairage artificiel.

Les valeurs nécessaires varient d'un cas à l'autre : de nombreux facteurs interviennent tels la profondeur du local, le pourcentage de surface vitrée, l'orientation du local... Le graphique ci-dessous illustre l'influence du coefficient de transmission lumineuse sur la consommation d'éclairage artificiel pour une façade vitrée à 50 %, en fonction de l'orientation du bâtiment.

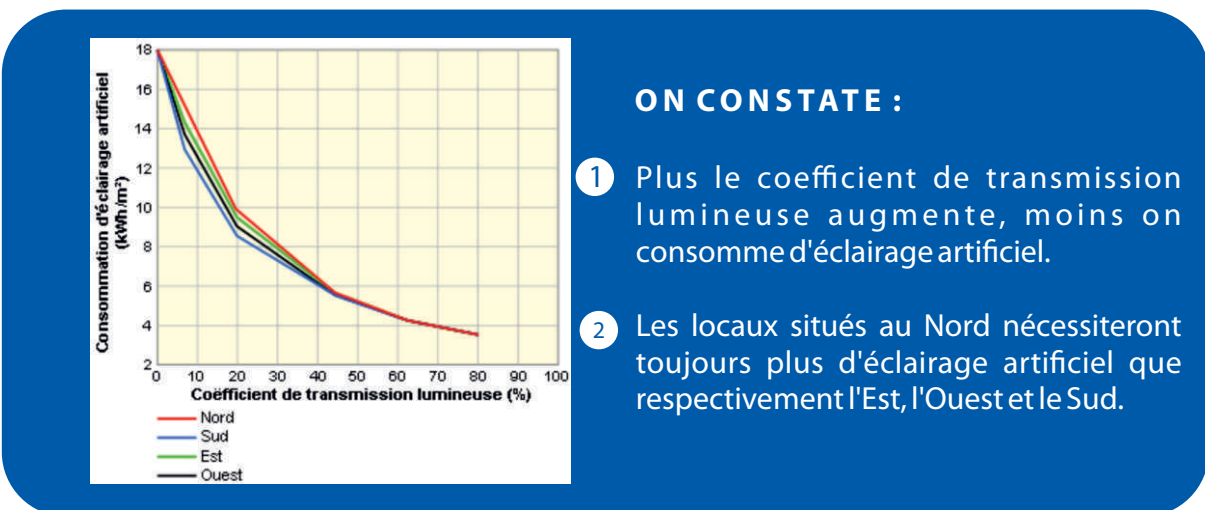


Figure 27 : La transmission lumineuse



5.5.2.1. Les vitrages clairs

Sont connus pour leur haute capacité à laisser pénétrer la lumière. Ils sont fabriqués à partir de silice, de chaux et de soude, mélangés et fondus. Le verre fondu est étalé sur un bain d'étain en fusion. Les deux matériaux ne se mélangent pas et leur surface de contact est parfaitement plane et lisse. Pour un simple vitrage FS = 0,86 et pour des doubles vitrages clairs neutres (6 cm - 12 cm - 6 cm), la valeur du facteur solaire varie entre 0,65 et 0,76.

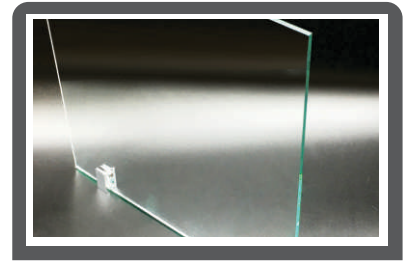


Figure 28 : Les vitrages clairs

5.5.2.2. Les vitrages absorbants

Sont teintés dans la masse par des oxydes métalliques. Ceux-ci permettent au verre de diminuer la fraction transmise du rayonnement solaire au profit de la fraction absorbée. L'énergie absorbée sera alors réémise sous forme de rayonnement infrarouge des deux côtés du vitrage, suivant un rapport qui dépend de la vitesse du vent et des conditions de température intérieure et extérieure. La réduction réelle de la quantité d'énergie solaire transmise est donc liée à la fraction d'infrarouges réémis vers l'extérieur. L'addition des fractions infrarouges, directement transmises et réémises vers l'intérieur constitue la transmission totale FS. Pour un simple vitrage, on obtient une valeur de facteur solaire FS = 0,58 et pour les doubles vitrages absorbants, la valeur du facteur solaire varie entre 0,46 et 0,67.

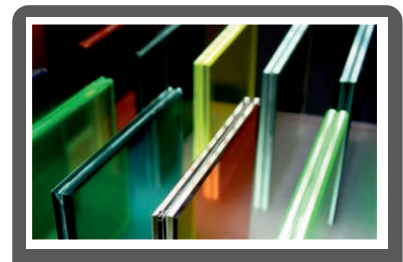


Figure 29 : Les vitrages absorbants

5.5.2.3. Les vitrages réfléchissants

Sont caractérisés par la présence d'une très fine couche métallique réfléchissante et transparente, qui accroît la part du rayonnement solaire réfléchi et diminue donc la fraction infrarouge transmise. Le choix des métaux ou des oxydes détermine la teinte du vitrage : bleu, vert, or, etc.). Ces verres sont utiles pour réduire les gains solaires indésirables, notamment dans les bâtiments de bureaux. Pour un simple vitrage, on obtient une valeur de facteur solaire FS = 0,49 et pour des doubles vitrages réfléchissants, la valeur du facteur solaire varie entre 0,10 et 0,63.

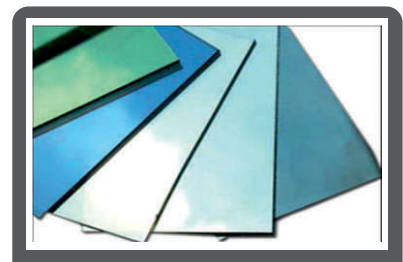


Figure 30 : Les vitrages réfléchissants



De point de vue transmission lumineuse, ci après quelque comparatif entre les différents types de vitrage :

TYPE DE VITRAGE		CARACTÉRISTIQUE	TRANSMISSION LUMINEUSE
Les vitrages clairs	Simple vitrage	sont connus pour leur haute capacité à laisser pénétrer la lumière.	TL = 0,90
	Double vitrage		0,78 < TL < 0,81
Les vitrages absorbants	Simple vitrage	permettent au verre de diminuer la fraction transmise du rayonnement solaire au profit de la fraction absorbée	TL = 0,41
	Double vitrage		0.36 < TL < 0,65
Les vitrages réfléchissants	Simple vitrage	sont caractérisés par un accroissement de la part de rayonnement solaire réfléchi et une diminution de la fraction transmise.	TL = 0,32
	Double vitrage		0,07 < TL < 0,66

Tableau 20 : Les caractéristiques techniques et la transmission lumineuse des différents types de vitrage

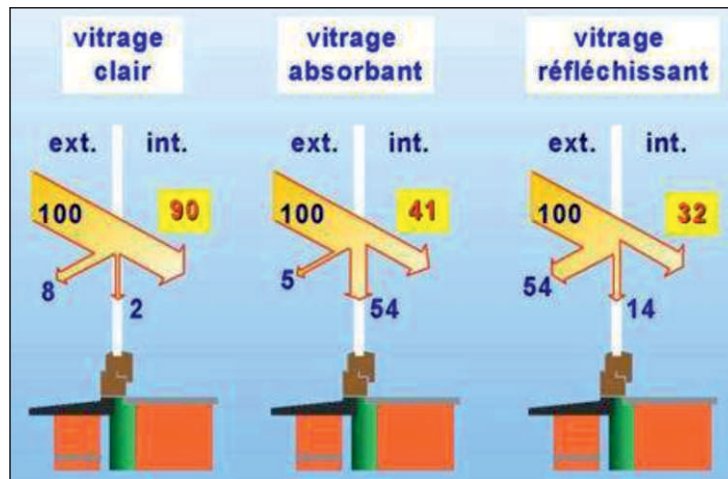


Figure 31 : Caractéristiques techniques de la transmission lumineuse selon le type de vitrage

Il ne faut pas perdre de vue que le choix de vitrages réfléchissants risque de modifier l'environnement immédiat d'un bâtiment : éblouissement pour les occupants des bâtiments voisins et pour les passants, surchauffe des sols environnants, voire même des bâtiments touchés par les rayonnements réfléchis, etc.

Le choix du facteur TL dépend de la quantité de lumière souhaitée dans le bâtiment. Il faut considérer que l'éclairage naturel disponible varie de manière dynamique sur une échelle très large : de 5 000 lux par ciel couvert à près de 100 000 lux en plein soleil en été, soit un rapport de 1 à 20. Le risque d'éblouissement est d'autant plus important que les conditions de nébulosité varient rapidement. Une transmission lumineuse apparemment basse (0,50) modifie peu les conditions d'éclairage par ciel couvert mais peut contribuer significativement à limiter l'inconfort visuel par ensoleillement direct.

5.5.3. Les déperditions thermiques des vitrages :

Les vitrages représentent les points faibles de l'isolation thermique du bâtiment, mais leurs performances ne cessent de s'améliorer. Grâce aux différents assemblages et traitements aujourd'hui disponibles, les vitrages peuvent mieux jouer leur rôle en assurant une bonne isolation thermique et un bon affaiblissement acoustique et en garantissant la sécurité des biens et des personnes.

Plus le vitrage utilisé est isolant (coefficient K faible), plus les déperditions thermiques à travers sa surface sont réduites en hiver et plus le vitrage est chaud sur sa face intérieure. Il s'ensuit que la température de l'air ambiant doit être moins élevée pour assurer le confort de l'occupant (définition de la température de confort ressentie).

Différents moyens ont été mis en œuvre pour réduire la transmission thermique au droit des vitrages. Le premier a été de diminuer les pertes par conduction en intercalant entre deux vitrages, un excellent isolant, transparent, disponible et gratuit : l'air immobile et sec. L'air présente, en effet, offre une grande résistance thermique pour autant que les mouvements de convection ne soient empêchés. La capacité d'isolation des double vitrages dépend de l'épaisseur de la lame d'air : plus celle-ci sera épaisse, plus le vitrage sera isolant (au-delà de 20 mm, des courants de convection apparaissent et le gain d'isolation disparaît). Les valeurs K de ces vitrages sont comprises entre 2,76 et 3,59.

Sur le même principe, on a conçu les triples vitrages. Les valeurs K sont alors comprises entre 1,90 et 2,61.

Une autre voie consiste à agir sur les caractéristiques de surface du verre. Le vitrage à basse émissivité est recouvert d'une mince couche d'oxyde métallique parfaitement transparent, qui permet de réduire considérablement l'émission des infrarouges vers l'extérieur. Les vitrages peuvent disposer d'une ou de deux couches à basse émissivité, mais on peut également

remplacer la couche d'air par un gaz rare (argon, krypton) dont la conductivité thermique est plus faible que l'air. Ces gaz sont non toxiques et ininflammables. Les valeurs K de ces vitrages sont comprises entre 1,13 et 2,40 W/m²K.

De nombreux matériaux expérimentaux permettent aujourd'hui d'atteindre des valeurs K comprises entre 0,3 et 0,7, comparables à celles des parois isolées. Citons pour mémoire les "super fenêtres" (triple couche, basse émissivité, gaz rare), les "vacuum Windows" (vide maintenu entre les deux vitrages), ainsi que les fenêtres à aérogel (mousse microporeuse transparente et isolante), les "Smart Windows". Ces dernières consistent en un film de cristaux liquides, intercalé dans le vitrage. Un champ électrique suffit à orienter les cristaux pour que le vitrage devienne transparent.

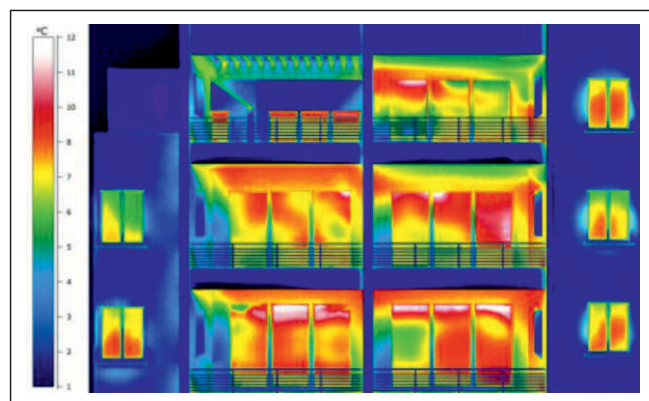


Figure 32 : Photo infrarouge d'un bâtiment pour l'identification des déperditions thermiques d'un bâtiment

TYPES DE FENÊTRE	Valeurs de K (U) [W/m ² .K]	Valeurs de SHGC	Valeurs de VT
Simple vitrage clair avec cadre en aluminium	7.20	0.76	0.74
Double vitrage clair avec cadre en aluminium	3.69	0.62	0.62
Double vitrage clair avec cadre en bois	2.80	0.56	0.58
Double vitrage clair avec une couche à faible émissivité et un cadre en bois	2.05	0.52	0.53
Triple vitrage clair avec deux couches à faible émissivité et un cadre en bois	1.03	0.39	0.49

Tableau 21 : Caractéristiques techniques des différents types de menuiseries des fenêtres

5.5.4. Pertes par transmission :

Lorsque l'on veut calculer les pertes de chaleur au travers d'une fenêtre, il faut prendre en considération le comportement thermique de quatre (4) zones distinctes :

- La partie centrale du vitrage.
- Le pourtour du vitrage.
- Le cadre (tête, joues et tablettes).
- L'intégration au mur extérieur.

5.5.4.1. Pertes par le vitrage (partie centrale non perturbée)

La valeur k d'un vitrage simple se calcule de la même manière que celle d'un mur, il suffit d'additionner les résistances thermiques, puis de prendre l'inverse de la résistance totale.

5.5.4.2. Pourtour du vitrage

Du fait de la présence du profil d'écartement, il subsiste un pont thermique sur le pourtour d'un vitrage dont l'effet se fait sentir jusqu'à plusieurs centimètres du bord, $K = 3W/m^2K$.

Globalement l'effet de ce pont thermique sera d'autant plus important que la surface vitrée sera plus petite, pour cette raison l'architecte évitera de trop découper une surface vitrée, en particulier des éléments longs et étroits sont à proscrire.

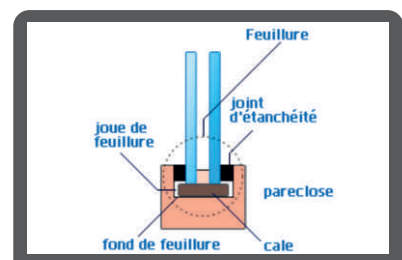
5.5.4.3. Le cadre et son influence :

Le cadre est également un élément important, puisqu'il représente 20 à 30% de la surface totale de la fenêtre. Le tableau présente les coefficients de déperditions thermiques typiques atteints avec des cadres standards.

On notera que si pour les simples et doubles vitrages usuels, il est aisé de trouver des cadres présentant une valeur k relativement semblable, la situation étant différente lorsqu'on utilise des vitrages de plus haute qualité.



Figure 33 : La menuiserie et son influence sur les déperditions thermiques



Type de cadre	Type d'intercalaire	Facteur U (W/(m ² .k)) – orientation verticale		
		Fenêtre ouvrante (double verre)	Fenêtre fixe (double verre)	Mur rideau (double verre)
Aluminium sans bris thermique	Tous	12,89	10,22	16,81
Aluminium avec bris thermique	Métal	5,22	6,42	9,94
	Isolé	5,00	5,91	9,26
Bois recouvert d'aluminium	Métal	3,29	2,90	-
	Isolé	3,12	2,73	-
Bois / plastique	Métal	2,90	2,73	-
	Isolé	2,78	2,38	-
Fibre de verre	Métal	1,87	1,87	-
	Isolé	1,82	1,82	-
Verre structural	Métal	-	-	7,21
	Isolé	-	-	5,79

Tableau n°22 : Caractéristiques techniques des différents types de cadres pour fenêtres

5.5.4.4. Jonction du cadre avec le mur

Toutefois, il ne suffit pas de s'arrêter au cadre, il faut également considérer son raccordement à la maçonnerie. Des données récentes permettent d'évaluer l'effet du pont thermique périphérique entre 0.08 et 0.17 W/m K selon le type de mur et le mode d'application du cadre.

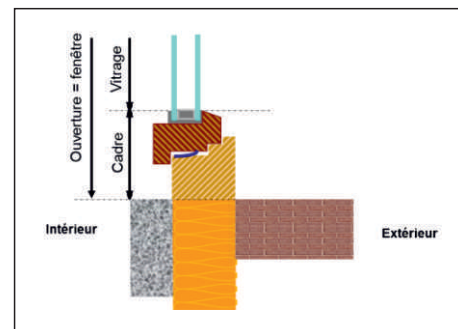
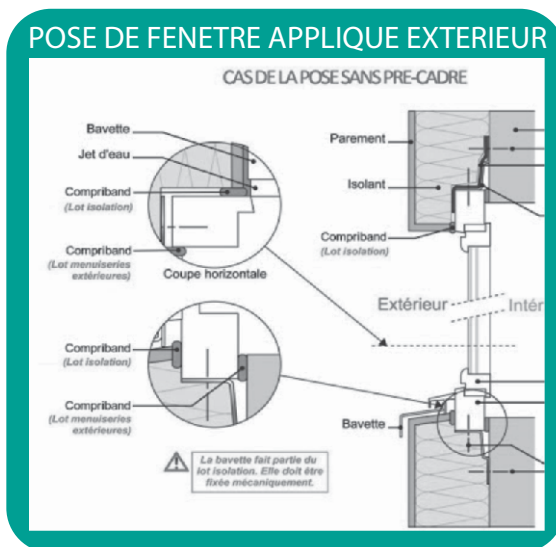


Figure 34 : La jonction du cadre avec le mur

EN RÉSUMÉ

Si l'on veut calculer avec précision les pertes thermiques d'une fenêtre, ou mieux encore, réduire les pertes thermiques, il y a lieu de s'intéresser aux quatre (4) parties distinctes à la fenêtre :

- La partie centrale non perturbée du vitrage.
- Le pourtour du vitrage.
- Le cadre.
- La jonction du cadre avec le mur.

Plus proches seront les caractéristiques thermiques de ces différentes parties de la fenêtre, plus faibles seront les risques de condensation, et conséquemment les dégâts de toutes sortes: cloquage des surfaces de peinture, traces brunâtres, moisissures, champignons, détérioration de la qualité intrinsèque au point de nécessiter un remplacement, ...etc.

5.5.5. Fenêtres et confort :

L'utilisation de surfaces vitrées importantes pose le problème du confort. Celui-ci est toutefois parfaitement maîtrisable à condition de respecter un certain nombre de règles simples et de satisfaire aux exigences qui leur sont liées.

La fenêtre a une influence sur plusieurs paramètres qui déterminent le confort thermique.

Température de surface intérieure du vitrage :

Des températures peu confortables (inférieures à 15°C ou supérieures à 30°C) sont atteintes en hiver avec un vitrage double normal ou en été lorsque le rayonnement dépasse 100W/m². Dès lors, pour des surfaces vitrées importantes on utilisera :

- Au moins un vitrage double sélectif.
- Une protection solaire extérieure efficace.

Mouvements d'air :

Vitesse de l'air à proximité de la fenêtre, en fonction de la différence de température entre l'air de la pièce et la face intérieure de la fenêtre, et ceci pour différentes hauteurs de fenêtre. Pour des raisons de confort cette vitesse ne devrait pas dépasser 0,25 m/sec, dès lors on est amené à :

- Choisir des vitrages de qualité suffisante : $k < 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Limiter la hauteur de la fenêtre à 1.30m.
- Installer un corps de chauffe sous la fenêtre si une de ces deux conditions ne peut être remplie.

Rayonnement direct près de la fenêtre :

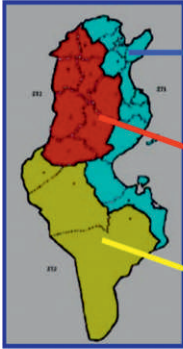
Le rayonnement direct sur les occupants devient très vite insupportable du fait de l'échauffement qu'il produit. Des protections solaires adéquates s'avèrent donc indispensables en toute saison.



5.5.6. Exigences réglementaires de la réglementation thermique tunisienne :

Les performances thermiques du bâtiment varient en fonction des caractéristiques climatiques de la zone où sera implanté le bâtiment.

Les différentes zones climatiques réglementaires de la Tunisie sont dans le tableau ci-dessous :



Bâtiments privés		Taux des baies vitrées	U des toitures exposées (W/m².K)	U des murs extérieurs (W/m².k)	U des vitrages (W/m².k)	SC+ des vitrages
Zone climatique réglementaire ZT1	Faible		≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 6,20	≤ 0,95
	Moyen		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,70
	Elevé		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,60
	Très élevé		≤ 0,75	≤ 0,80	≤ 6,20	≤ 0,70
Zone climatique réglementaire ZT2	Faible		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,95
	Moyen		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,70
	Elevé		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 1,90	≤ 0,50
	Très élevé		≤ 0,75	≤ 0,80	≤ 3,20	≤ 0,60
Zone climatique réglementaire ZT3	Faible		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,95
	Moyen		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,60
	Elevé		≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 1,90	≤ 0,50
	Très élevé		≤ 0,55	≤ 0,80	≤ 3,20	≤ 0,60
			≤ 0,75	≤ 0,60	≤ 1,90	≤ 0,50
			≤ 0,55	≤ 0,80	≤ 1,90	≤ 0,50

Bâtiments Publics		Taux des baies vitrées	U des toitures exposées (W/m².K)	U des murs extérieurs (W/m².k)	U des vitrages (W/m².k)	SC+ des vitrages
Zone climatique réglementaire ZT1	Faible		≤ 0,75	≤ 1,1	≤ 6,2	≤ 0,95
	Moyen		≤ 0,75	≤ 1,1	≤ 3,2	≤ 0,60
	Elevé		≤ 0,75	≤ 1,1	≤ 1,9	≤ 0,50
Zone climatique réglementaire ZT2	Faible		≤ 0,55	≤ 0,6	≤ 3,2	≤ 0,80
	Moyen		≤ 0,55	≤ 1,1	≤ 1,9	≤ 0,50
	Elevé		L'approche prescriptive n'est pas admise pour cette configuration.			
Zone climatique réglementaire ZT3	Faible		≤ 0,55	≤ 1,1	≤ 3,2	≤ 0,60
	Moyen		≤ 0,55	≤ 0,8	≤ 1,9	≤ 0,50
	Elevé		L'approche prescriptive n'est pas admise pour cette configuration.			

Tableau 23 : Les exigences techniques minimales de la réglementation thermique pour l'enveloppe du bâtiment en fonction du zonage climatique et du taux de vitrage pour les bâtiments publics et privés

Les performances thermiques du bâtiment dépendent également du taux global des baies vitrées des espaces chauffés et/ou refroidis ainsi que de la distribution de ces baies vitrées sur les différentes orientations.

Les spécifications techniques minimales exigées par la réglementation thermique tunisienne sont tributaires du zonage climatique et également du taux de vitrage prévisionnel de l'enveloppe du bâtiment à construire :

- Taux des baies vitrées faible.
- Taux des baies vitrées Moyen.
- Taux des baies vitrées Elevé.
- Taux des baies vitrées Très Elevé.

La définition des taux des baies vitrées par la réglementation thermique tunisienne est donnée comme suit :

Taux des baies vitrées faible :

TBV « faible »

}

TGBV est ≤ à 15%

(TGBV /EST + TGBV /OUEST) (±45°) est ≤ à 10%

Le taux des baies vitrées pour un bâtiment donné est défini comme « faible » lorsque le TGBV est inférieur ou égal à 15% et lorsqu'il remplit en même temps la condition suivante sur sa distribution :

- La somme des taux relatifs des baies vitrées sur les orientations « Est » plus ou moins 45° et les orientations « Ouest » plus ou moins 45°, est inférieure ou égal à 10%.
- Dans le cas où cette dernière condition n'est pas remplie, le taux des baies vitrées sera défini comme « moyen ».

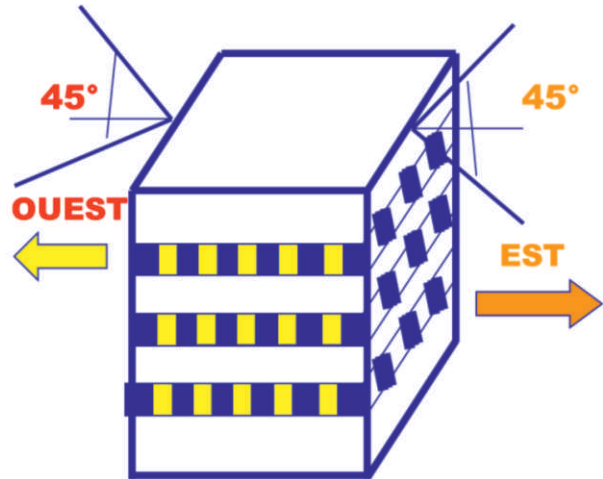


Figure 35 : Taux des baies vitrées faibles

TGBV =

$$\frac{\text{Surface totale des baies vitrées des différents murs extérieurs}}{\text{Surface totale brute de l'ensemble des murs extérieurs}}$$

TRBV =

$$\frac{\text{Surface totale des baies vitrées des murs extérieurs d'une orientation donnée}}{\text{Surface totale brute de l'ensemble des murs extérieurs}}$$

EXEMPLE DE CALCUL

TGBV : Taux Global des Baies Vitées					
	Façade Nord	Façade Sud	Façade Est	Façade Ouest	Surface totale (m2)
Surface des Baies Vitrées (m2)					Σ(SBV)
Surface Totale Brute (m2)					Σ(STB)
Taux Global des Baies Vitrées (TGBV)					$\frac{\Sigma(SBV)}{\Sigma(STB)}$

TRBV/O : Taux Relatif des Baies Vitrée / Orientation donnée					
	Façade Nord	Façade Sud	Façade Est	Façade Ouest	Surface totale (m2)
Surface des Baies Vitrées pour une surface (m2)	Σ(SBV/N)	Σ(SBV/S)	Σ(SBV/E)	Σ(SBV/O)	
Surface Totale Brute (m2)					Σ(STB)
Taux Relatif des Baies Vitrées (TRBV/O)	$\frac{\Sigma(SBV/N)}{\Sigma(STB)}$	$\frac{\Sigma(SBV/S)}{\Sigma(STB)}$	$\frac{\Sigma(SBV/E)}{\Sigma(STB)}$	$\frac{\Sigma(SBV/O)}{\Sigma(STB)}$	

Tableau 24 : Exemple de calcul du taux global des baies vitrées d'un bâtiment et du taux relatif des baies vitrées selon une orientation donnée

Taux des baies vitrées Moyen :

TBV « moyen » { $15\% < TGBV \leq 25\%$
 $(TBVR/EST + TBVR/OUEST) (\pm 45^\circ) \text{ est } \leq \text{à } 15\%$

Le taux des baies vitrées pour un bâtiment donné est défini comme « moyen » lorsque le TGBV est supérieur à 15% et inférieur ou égal à 25% et lorsqu'il remplit en même temps la condition suivante sur sa distribution :

- La somme des taux relatifs des baies vitrées sur les orientations « Est » plus ou moins 45° et les orientations « Ouest » plus ou moins 45°, est inférieure ou égal à 15%;
- Dans le cas où cette dernière condition n'est pas remplie, le taux des baies vitrées sera défini comme « élevé ».

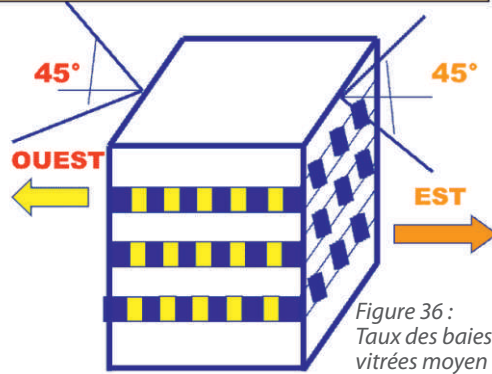


Figure 36 : Taux des baies vitrées moyen

Taux des baies vitrées Elevé :

TBV « élevé » { $25\% < TGBV \leq 35\%$
 $(TGBR/EST + TBVR/OUEST) (\pm 45^\circ) \text{ est } \leq \text{à } 25\%$

Le taux des baies vitrées pour un bâtiment donné est défini comme « élevé » lorsque le TGBV est supérieur à 25% et inférieur ou égal à 35% et lorsqu'il remplit en même temps la condition suivante sur sa distribution :

- La somme des taux relatifs des baies vitrées sur les orientations « Est » plus ou moins 45° et les orientations « Ouest » plus ou moins 45°, est inférieure ou égal à 25%.
- Dans le cas où cette dernière condition n'est pas remplie, le taux des baies vitrées sera défini comme « très élevé ».

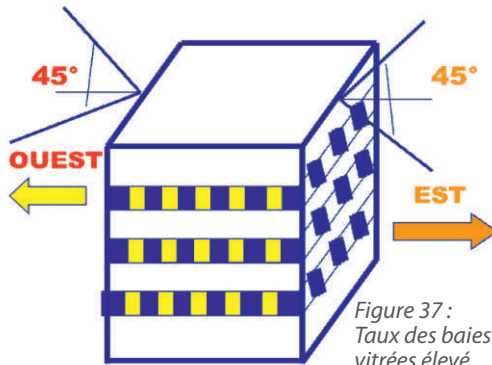


Figure 37 : Taux des baies vitrées élevé

-Taux des baies vitrées Très Elevé :

TBV « très élevé » { $35\% < TGBV \leq 45\%$
 $(TBVR/EST + TBVR/OUEST) (\pm 45^\circ) \text{ est } \leq \text{à } 35\%$

Le taux des baies vitrées pour un bâtiment donné est défini comme « très élevé » lorsque le TGBV est supérieur à 35% et inférieur ou égal à 45% et lorsqu'il remplit en même temps la condition suivante sur sa distribution :

- La somme des taux relatifs des baies vitrées sur les orientations « Est » plus ou moins 45° et les orientations « Ouest » plus ou moins 45°, est inférieure ou égal à 35%.

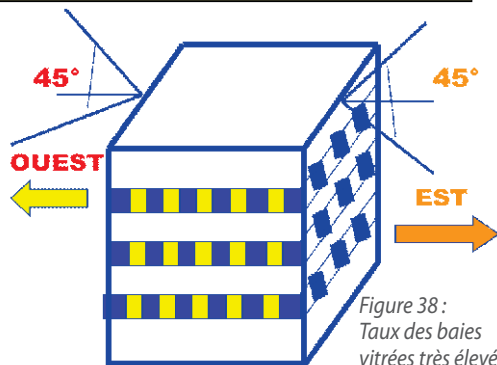


Figure 38 : Taux des baies vitrées très élevé

Les performances thermiques des bâtiments dépendent directement de la qualité thermique du vitrage et du type de protection de la surface vitrée qui varient en fonction du taux des baies vitrées du bâtiment comme le montre le tableau suivant :

Bâtiments privés		Taux des baies vitrées	U des toitures exposées (W/m².K)	U des murs extérieurs (W/m².k)	U des vitrages (W/m².k)	SC* des vitrages
Zone climatique réglementaire ZT1	Faible	≤ 0,75	≤ 1,20	≤ 6,20	≤ 0,95	
	Moyen	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,70	
	Elevé	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,60	
	Très élevé	≤ 0,75	≤ 0,80	≤ 6,20	≤ 0,70	
Zone climatique réglementaire ZT2	Faible	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,95	
	Moyen	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,70	
	Elevé	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 1,90	≤ 0,50	
	Très élevé	≤ 0,75	≤ 0,80	≤ 3,20	≤ 0,60	
Zone climatique réglementaire ZT3	Faible	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,95	
	Moyen	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 6,20	≤ 0,60	
	Elevé	≤ 0,75	≤ 1,10	≤ 1,90	≤ 0,50	
	Très élevé	≤ 0,55	≤ 0,80	≤ 3,20	≤ 0,60	
		≤ 0,75	≤ 0,60	≤ 1,90	≤ 0,50	
		≤ 0,55	≤ 0,80	≤ 1,90	≤ 0,50	

Tableau 25 : Variation des performances thermiques d'un bâtiment en fonction de la qualité du vitrage, des types de protection du vitrage et du taux de vitrage

Il est à remarquer que plus le taux des baies vitrées est important plus il faut améliorer le coefficient de transmission solaire thermique équivalent du vitrage.

La réglementation thermique des bâtiments neufs en Tunisie définit le coefficient de transmission solaire thermique équivalent d'un vitrage (SC*) comme un coefficient de transmission solaire thermique du vitrage (SC) corrigé par le coefficient de masque architectural (Fma). Il est déterminé par la formule suivante :

$$SC^* = \frac{\sum_i (SC_i \cdot BV_i \cdot Fma_i)}{\sum_i BV_i}$$

Avec :

- **Sci** : Coefficient de transmission solaire thermique (SC) de la baie vitrée « i » des locaux conditionnés.
- **Bvi** : Surface de la baie vitrée « i » des locaux conditionnés.
- **Fmai** : Coefficient de masque architectural de la baie vitrée « i » des locaux conditionnés.

La sommation sur les baies s'effectue sur toutes les baies vitrées du bâtiment à l'exception des baies orientées au Nord plus au moins 30.

Le coefficient de transmission solaire thermique (SC) des baies vitrées orientées au Nord plus ou moins 30 doit être inférieur ou égal au plus grand SCi utilisé.

Le coefficient de masque architectural des surfaces vitrées est donné dans le tableau suivant :

Type de masque	F m a
Pas de masque	1,00
Débord de toit, pare-soleil, balcon loggia ou auvent orienté au Sud plus au moins 45° : Facteur de projection, 0,15 < FP ≤ 0,25	0,85
Débord de toit, pare-soleil, balcon loggia ou auvent orienté au Sud plus au moins 45° : Facteur de projection, 0,25 < FP ≤ 0,35	0,75
Débord de toit, pare-soleil, balcon loggia ou auvent orienté au Sud plus au moins 45° : Facteur de projection FP > 0,35	0,70
Valeur par défaut pour toute orientation autre que Sud plus au moins 45° quelque soit le type de masque.	1,00

Le Facteur de projection est donné par :

$$FP = A / B$$

A : Largeur du débord horizontal du masque architectural.

B : Distance entre le débord horizontal du masque architectural et la partie inférieure de la surface vitrée.

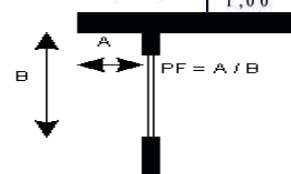


Figure n°39 : Les valeurs du coefficient de masque architectural des surfaces vitrées

IL EST À RETENIR QUE :

QUALITÉ DU VITRAGE	ECONOMIE D'ÉNERGIE	CONFORT VISUEL ET THERMIQUE
<ul style="list-style-type: none"> Plus le vitrage laisse passer de la lumière, c'est à dire plus son facteur de transmission lumineuse TL est grand. 	<ul style="list-style-type: none"> Moins grande est la consommation d'éclairage électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus l'éclairage est naturel et le contact visuel avec l'extérieur agréable. Mais par contre, plus grand sont les risques d'éblouissement si aucun dispositif de protection solaire n'est prévu.
<ul style="list-style-type: none"> Plus le vitrage est isolant, c'est à dire plus son coefficient de déperdition thermique U est bas. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus les déperditions thermiques seront réduites à travers sa surface en hiver. Plus le vitrage est chaud sur sa face intérieure et donc moins la température de l'air intérieur doit être élevé pour assurer le confort en hiver. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus la surface intérieure du verre est chaude et plus les risques de condensation de surface sont réduits . Plus le confort thermique dans le local est grand en hiver.
<ul style="list-style-type: none"> Mieux le vitrage contrôle le rayonnement solaire entrant, c'est-à-dire plus son facteur solaire est petit. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus les frais de conditionnement d'air en été sont réduits. Mais, par contre moins les apports d'énergie gratuite en hiver sont importants. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus les risques de surchauffe du à l'effet de serre sont diminués. Moins la lumière naturelle pénètre dans le local.

Tableau 26 : Impact de la qualité du vitrage sur les économies d'énergies réalisées et le niveau de confort visuel et thermique à l'intérieur du bâtiment

5.6. Technologies de l'enveloppe

5.6.1. Traitement architectural des façades

La façade d'une réalisation architecturale quelle qu'elle soit, joue un double rôle à savoir :

- **Un rôle esthético-symbolique :**

Cette notion est variable dans le temps et dans l'espace. En effet la façade est la métaphore de l'objet lui même. Elle exprime le temps pendant lequel est édifié le bâtiment et toutes ses composantes, culturelles, sociales, économiques et techniques. Le plus souvent, les expressions communiquées par l'architecte tiennent compte de la nature des activités opérées se déroulant à l'intérieur de l'enveloppe et la façade n'est autre que l'outil de communication (efficace ou non).

De ce fait, généralement, on peut aisément différencier la façade d'un immeuble à usage administratif de celle d'édifice à usage touristique, sportif ou d'habitation. Le langage de l'architecte se déchiffre par sa volumétrie et ses apports architectoniques (éléments de façade, matériaux, texture, couleur).

- **Un rôle protecteur :**

La façade constitue une portion importante de l'enveloppe totale de l'ouvrage. En effet, elle est en contact permanent avec des conditions climatiques. Bien conçue, elle permet un gain journalier en énergie par la maîtrise des principes des déperditions et des apports gratuits. Les conditions d'ambiance climatique dépendent en grande partie du choix de l'enveloppe et de la façade.

5.6.2. Les Matériaux utilisés en façade

Les matériaux de base de construction des maison sont généralement la brique, le béton, la pierre, le bois.

Ces matériaux de façade, sauf le bois, peuvent être recouverts d'un enduit, d'un crépi ou d'une peinture. Chacun de ces types de matériaux de façade et leur finition associée ont des avantages et des inconvénients que nous vous résumons dans un tableau comparatif.



La pierre entre aussi dans la composition de bardage



L'utilisation de la brique pour la toiture



Le cuvelage

Figure 40 : Les matériaux utilisés en façade du bâtiment

MATÉRIAU DE FAÇADE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
BRIQUE	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilité dimensionnelle • Durable • Résiste au feu • Matériau naturel • Recyclable • Pas d'émission nocive lors de la mise en œuvre et dans le temps • Isolation thermique (brique creuse) • Inerte (restitue la nuit la chaleur accumulée le jour) • Poreuse (laisse respirer le mur) 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus cher par rapport au bloc béton, parpaing • Mise en œuvre demandant des compétences • Poreuse, elle n'aime pas les fortes humidités • Les briques anciennes sont gélives et peuvent s'effriter ou éclater sous l'effet du gel
BÊTON	<ul style="list-style-type: none"> • Résistant • Durable • Coloration dans la masse • Insensible aux intempéries • Bonne isolation phonique et thermique • Bonne résistance au feu • Recyclable en fin de vie, peut être utilisé comme remblais • Coût global compétitif par rapport aux autres matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Éclatements/fissurations dues aux infiltrations sur les façades dégradées. • Effet de gel/dégel • Fissuration des enduits due aux joints de dilatation recouverts ou non faits à l'origine du bâtiment • Pollution sur façade non traitée = coulures de couleurs sur la façade • Rouille des aciers contenus dans le béton = coulures de couleurs sur la façade et éclatement partiel du béton entourant les armatures
PIERRE	<ul style="list-style-type: none"> • Le ravalement « imposé » tous les 10 ans n'est pas nécessaire dans la plupart des cas • Grande durée de vie du matériau • Offre à l'édifice un cachet indéniable • Plus-value du bâtiment 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre délicate en cas de remplacement d'une pierre lors du ravalement • Choix du type de nettoyage en fonction du type de pierre et de l'état
BOIS MASSIF	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre du matériau sans délai • Permet de redonner un cachet rapidement à une maison ancienne sans intérêt • Ne demande pas de matériels complexes pour la pose • Permet d'isoler par l'extérieur Sans entretien durant environ 10 ans si bardage traité avec finition • Peut être posé sur tous les types de façade sans contrainte sur le bâtiment d'origine 	<ul style="list-style-type: none"> • Attaques possibles de champignons, d'insectes • Traitement • Entretien

Tableau 27 : Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des différents matériaux de façade d'un bâtiment

MATÉRIAU DE FAÇADE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
BOIS RECONSTITUÉ	<ul style="list-style-type: none"> Tous les avantages du bois massif sans entretien particulier Bonne résistance aux termites Grands choix de couleurs 	<ul style="list-style-type: none"> Peut paraître un peu artificiel. Possibilité de refus sur la couleur ou l'esthétique de la façade par les PLU (Plans Locaux d'Urbanisme)
ENDUIT	<ul style="list-style-type: none"> Uniformise le support Protège le support Décore le support 	<ul style="list-style-type: none"> Si relief = plus salissant Application généralement réservée aux professionnels
CRÉPI	<ul style="list-style-type: none"> Application possible par un particulier 	<ul style="list-style-type: none"> Demande un fond parfaitement sain, propre, sec et compatible
PEINTURE	<ul style="list-style-type: none"> Application possible par un particulier Coût raisonnable 	<ul style="list-style-type: none"> Demande un fond parfaitement préparé = sain, sec, compatible, sans défauts importants

Tableau 28 : Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des différents revêtements de façade d'un bâtiment

5.6.3. Matériaux utilisés pour la composition des parois de l'enveloppe

Les différents matériaux constituant parois sont récapitulés dans les tableaux suivant :
Composition des Murs : de l'extérieur vers l'intérieur →

	U (W/m ² .°C)	Alucaban 3cm	lame air 7cm	Mortier ciment 2,5cm	Brique à trous 20cm	pierres 1/2 fermes 20cm	lame air 4cm	Béton cellulaire 4cm	Polystyrène exp 6cm	Polystyrène exp 4cm	Polystyrène exp 2cm	Brique plâtrière 6,5cm	Mortier bâtard 2cm	enduit plâtre 2cm	lame air 4,5cm	Brique à trous 20cm	lame air 4cm	Brique plâtrière 6,5cm	Mortier bâtard 2cm
Dble clois BétCell 4	1.0319			X	X			X				X	X						
Dble clois lame air 4	1.1081			X	X		X					X	X						
Dble clois pierrpolys 4	0.6727			X		X				X		X	X						
Dble clois pierr polys 2	1.0137			X		X					X	X	X						
Dble clois polyst 2	0.7879			X	X						X	X	X						
Dble clois polyst 4	0.5652			X	X					X		X	X						
Dble clois polyst 6	0.4407			X	X			X				X	X						
Dble clason 70 cm	0.6274			X	X		X					X			X	X	X	X	X
Dble cloison 35 cm	0.8803	X	X	X	X		X					X	X						
Dble cloison plâtre 2 cm	0.5528			X	X					X		X		X					

Composition des toits : de l'extérieur vers l'intérieur →

	U (W/m ² .°C)	carrelage 3cm	Mortier de pose 2cm	Produit étanchéité 0,5cm	Mortier ciment 3cm	Béton cellulaire 10cm	Béton plein 10cm	Polystyrène exp 4cm	Polystyrène exp 6cm	Béton armé 5cm	Béton armé 4cm	Hourdis 16cm	Mortier bâtard 2cm
Terrasse BétCell 10	1.1302			X	X	X				X		X	X
Terrasse non isolée	2.1921			X	X		X			X		X	X
Terrasse polyst 4	0.6867			X	X		X	X		X		X	X
Terrasse polyst 6	0.5112			X	X		X		X	X		X	X

5.6.4. Isolation thermique des parois extérieures

La transmission de chaleur à travers les murs et le toit d'un bâtiment s'effectuent principalement par conduction et convection.

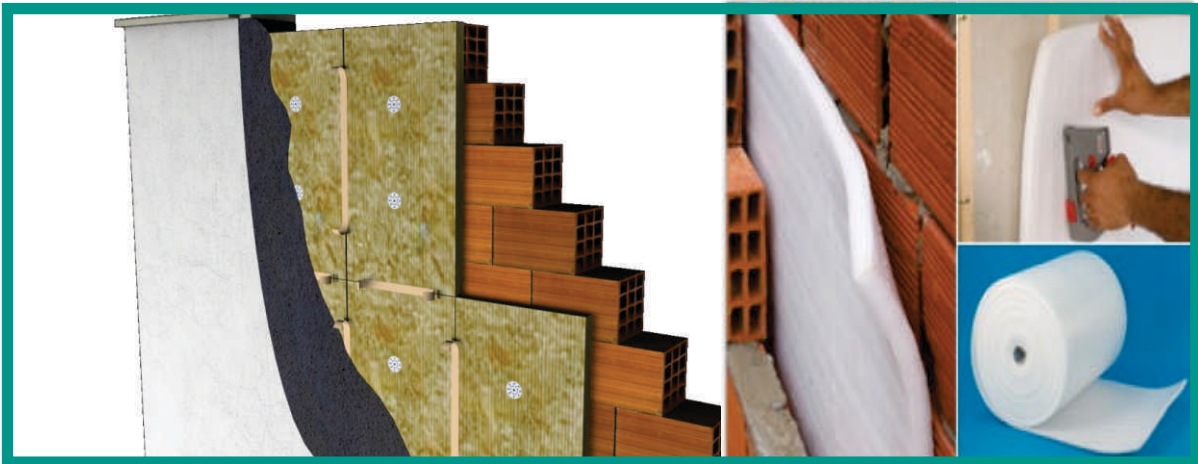


Figure n°41 : Isolation thermique des parois extérieures

Pour caractériser la performance thermique d'une paroi, on détermine une résistance thermique R [$m^2.K/W$] ou conductance thermique U [$W/m^2.K$].

Dans les bâtiments, une paroi ou un toit sont constitués de plusieurs couches de matériaux différents. La performance thermique d'une paroi multicouche se déduit à partir des résistances élémentaires.

Pour réduire la transmission de chaleur des composants de l'enveloppe d'un bâtiment, il faut augmenter les valeurs de la résistance thermique R ou diminuer les valeurs de la conductance thermique U . Pour ce faire, on utilise une isolation thermique à l'intérieur de l'enveloppe d'un bâtiment.

5.6.4.1. Rôle de l'isolation thermique

Un isolant thermique a pour fonction principale de diminuer le transfert de chaleur entre deux ambiances. Le plus souvent, on a recours à un matériau spécifique contenant du gaz (fréquemment de l'air) enfermé dans des cellules ou constitué d'un enchevêtrement de fibres. La conductivité thermique est un premier critère pour la sélection des isolants thermiques. Plus la conductivité thermique est faible, plus le corps s'oppose au transfert de la chaleur.

5.6.4.2. Les différents matériaux isolants et leur utilisation

Selon la norme Française (NF P 75-101, les matériaux isolants doivent comporter les propriétés suivantes:

Le matériau constituant l'isolant thermique doit avoir une conductivité thermique (λ) inférieure ou égale à $0.065 W/m.K$;

- La résistance thermique du produit doit être supérieure ou égale à $0.5 m^2.K/W$. Pour le choix d'un isolant thermique, il y a lieu de tenir compte des cinq (5) aspects suivants:
- Sa compressibilité qui traduit le changement de l'épaisseur sous l'effet de la pression. Il est important de choisir l'isolant le moins compressible si la surface d'appui est parfaitement plane;
- Sa stabilité dimensionnelle sous l'effet de variations de la température, de l'ambiance et de l'humidité;
- Son comportement à l'eau: Il y a lieu de distinguer les matériaux à faible variation d'épaisseur, à faible hygroscopicité, les matériaux non hydrophiles, et les matériaux ayant une imperméabilité élevée;
- Ses caractéristiques mécaniques de cohésion et de flexion;

- Sa perméabilité à la vapeur d'eau, c'est-à-dire la quantité de vapeur d'eau qui peut traverser la paroi par unité de surface et de temps pour une différence de pression entre les deux faces égales à l'unité.

Le pouvoir isolant de certains matériaux peut se dégrader si le matériau absorbe une certaine quantité d'eau, c'est en particulier le cas des laines minérales, du polystyrène expansé et de la vermiculite, de la laine de roche, mais non le cas du polystyrène extrudé.

L'isolant thermique doit avoir un bon comportement au feu. L'adjonction d'un parement constitué de plaques de plâtre peut améliorer le comportement au feu de certains matériaux isolants (ex. isolants styrene expansé et styrene extrudé).

Le pare-vapeur peut améliorer la perméabilité de certains matériaux, mais pourrait dégrader leur résistance au feu.

Les isolants plastiques ou d'origine végétale ne sont utilisables à l'intérieur des locaux qu'en leur ajoutant un parement incombustible tel que des plaques de plâtre.

Les matériaux isolants les plus couramment utilisés dans le bâtiment sont les laines minérales, les laines de roche et les mousses fabriquées par expansion ou extrusion communément connues sous le nom de plastiques alvéolaires. Ces matériaux isolants sont le plus souvent disponibles sous forme de rouleaux ou de panneaux. En dehors des caractéristiques qui viennent d'être citées, un certain nombre de caractéristiques doit être pris en compte lors du choix d'un isolant thermique; il s'agit notamment de la résistance aux rongeurs et aux insectes, la facilité de pose, la résistance à certains produits chimiques telle que les produits d'entretien, de désinfection ou des colles.

Les tableaux apparaissant en page suivante donnent les propriétés des isolants les plus courants.

Sans entrer dans la définition normative des isolants thermiques, certains matériaux possèdent de bonnes qualités thermiques (Ex: mousse de polyuréthane giclé: RSI 0,0416/mm). Les matériaux les plus utilisés sont le béton cellulaire et les briques creuses. Le béton cellulaire présente une conductivité thermique faible entre 0.16 et 0.33 W/mK, en fonction de sa masse volumique, qui est comprise entre 400 et 800 kg/m³. Plus le matériau est dense, plus il est conducteur.

Le béton cellulaire peut être employé au niveau des murs, en toiture et même pour des éléments autoporteurs. Ce matériau permet d'obtenir des parois de composition homogène et une masse isolante continue. Les ponts thermiques peuvent être aussi limités dans ce type de construction. Lorsqu'il est soumis à une humidité prolongée, le béton cellulaire perd sa cohésion.

Les briques creuses en terre cuite ont des coefficients de transmission thermique faibles (RSI = 0,07 m² °C/w). Une construction en double cloison de briques séparées par une lame d'air représente néanmoins une isolation thermique acceptable (RSI = 0,44 m² °C/w). La lame d'air qui sépare les deux cloisons et les alvéoles qui sont à l'intérieur des briques constitue un bon isolant thermique. Les murs construits en briques présentent plusieurs ponts thermiques .

Particulièrement au niveau des liaisons avec la toiture, les poteaux et les poutres ainsi qu'au niveau des fenêtres.

Les briques creuses sont incombustibles, et ne provoquent aucun dégagement gazeux en cas d'incendie. Elles ont un coefficient de diffusion de la vapeur assez élevé, ainsi aucune condensation d'eau n'est à craindre au sein du mur lui-même.

MATÉRIAUX ISOLANTS D'ORIGINE MINÉRALE			
PRODUITS	MASSE VOLUMIQUE [kg / m ³]	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE [W/M.K]	RÉSISTIVITÉ RSI/mm
Laine de verre en panneaux	7à130	0.034 à 0.056	0,0294 à 0.0179
Laine de roche en panneaux	18 à 180	0.038 à 0.047	0,0263 à 0,0213
Verre cellulaire	110 à 140	0.05	0,0200
Plaques à base de vermiculite agglomérée aux silicates	90 à 175	0.065 à 0.08	0,0154 à 0,0125
	200 à 500	0.100 à 0.190	0,0100 à 0,0053
Plaques à base de perlite et de cellulose agglomérée avec un liant bitumineux, avec ou sans ajout de fibres minérales	140 à 200	0.06	0,0167

MATÉRIAUX ISOLANTS CONSTITUÉS DE PLAQUES ALVÉOLAIRES			
PRODUITS	MASSE VOLUMIQUE [kg / m ³]	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE [W/M.K]	RÉSISTIVITÉ RSI/mm
PSE: Polystyrène expansé en panneaux ou en blocs moulés	7à30	0.036 à 0.058	0,0278 à 0,0172
ou en blocs moulés extrudés en panneaux	25à40	0.031 à 0.037	0,0323 à 0,0270
PUR: Polyuréthane en panneaux ou Polyisocyanurate	15 à 100	0.029 à 0.04	0,0345 à 0,0250

MATÉRIAUX ISOLANTS D'ORIGINE VÉGÉTALE			
PRODUITS	MASSE VOLUMIQUE [kg / m ³]	CONDUCTIVITÉ THERMIQUE [W/M.K]	RÉSISTIVITÉ RSI/mm
Liège expansé pur ou en vrac	100 à 150	0.049	0,0204
Cellulose en fibres ou en panneaux (à base de papier recyclé)	50 à 70	0.050	0,02
Fibre de bois avec un liant à base de magnésie, de plâtre ou de ciment	200 à 300	0.060 à 0.067	0,0167 à 0,0149

Tableau 29 : Les matériaux isolants d'origine minérale

5.6.4.3. *Recommandations concernant l'isolation thermique de l'enveloppe*

Lors du choix d'un isolant thermique, les sept (7) caractéristiques suivantes doivent être considérées:

- La conductivité thermique.
- La résistance à l'humidité.
- La résistance au feu.
- La résistance mécanique.
- La résistance aux agents biologiques.
- Le prix.
- Les propriétés acoustiques.

5.7. **Protections solaires et occultations**

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée. Les protections solaires ont pour but de:

- Réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire.
- Améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres.
- Contrôler l'éblouissement. En effet, un ensoleillement excessif peut rendre tout travail impossible.

5.7.1. **Rôle des protections solaires**

L'utilisation des protections solaires peut s'avérer nécessaire tout au long de l'année, leur fonction sera toutefois très différente selon la saison. On distingue trois (3) situations très différentes :

- La saison estivale (juin à septembre) où le soleil est haut et durant laquelle les apports solaires ne sont pas souhaités.
- La saison hivernale (décembre à mars) où les apports de chaleur sont les bienvenus, mais où les occupants et le mobilier doivent pouvoir être protégés du rayonnement direct.
- Les saisons intermédiaires (avril - mai et octobre - novembre) où les apports solaires doivent pouvoir être contrôlés. Durant cette période, pour une même hauteur du soleil, les besoins en chaleur du bâtiment peuvent être très différents.

Dès lors on se rend compte qu'il n'existe pas un type universel de protection solaire qui permet de répondre à toutes ces exigences de façon optimale; dans chaque cas, le concepteur doit trouver le compromis le plus souhaitable.

5.7.2. **Les différents types de protections solaires:**

La première opération destinée à ralentir la montée de la température à l'intérieur d'un local est de s'attaquer à ses causes : la chaleur de l'air environnant et l'ardeur du soleil. L'interception du rayonnement solaire en avant d'une construction (du côté extérieur) abaisse le contenu de chaleur de sa masse thermique et réduit d'autant le rôle de la climatisation.

Des simples moyens passifs suffisent pour assurer un confort acceptable le long de l'année. Le concepteur devra porter son attention sur le choix de la technique appropriée, suivant la durée pendant laquelle la climatisation est nécessaire :

- Quelques heures par journée chaude, quelques jours en période de grandes chaleurs ou d'une façon plus continue tout au long de l'année.
- Les conditions climatiques dominantes, telles que le niveau de sécheresse ou d'humidité de la chaleur ou des vents, indiqueront la direction à prendre.
- Souvent, le regroupement des protections solaires, de la climatisation et de la ventilation permet de suivre et de compenser les variations saisonnières ou journalières du temps.



Figure 42 : Les protections solaires fixes du bâtiment

5.7.2.1. Protections fixes (avant-toits, brise soleil)

De tels éléments doivent être étudiés de manière détaillée en tenant compte des particularités de la course solaire. S'ils sont assez efficaces en été, ils n'offrent pas de possibilité d'adaptation aux mi-saisons et aucune protection en hiver. Ils devront donc obligatoirement être complétés par une protection mobile intérieure. D'autre part, la simple prolongation d'une dalle (balcon) ne conduit pas à l'effet de protection souhaité.

5.7.2.2. Vitrages réfléchissants

Si les verres réfléchissants permettent d'atteindre une assez bonne protection solaire ($0.30 < g < 0.45$), celle-ci s'accompagne souvent de certains désavantages:

- La protection est constante quelle que soit la saison.
- Elle s'accompagne d'une importante réduction de la transmission lumineuse et par suite d'une augmentation des besoins en éclairage artificiel.
- La température du verre intérieur peut attendre des températures relativement élevées en été.

5.7.2.3. Protections mobiles

On notera que si les protections intérieures permettent de résoudre les problèmes d'éblouissement en hiver, elles sont d'un effet très limité en été. On relèvera également, qu'étant donné les caractéristiques de la course solaire, une protection sud est plus efficace qu'une protection est ou ouest. Les plus grands risques de surchauffe apparaissent en été en orientation ouest, lorsque le soleil est bas et que la température extérieure est plus élevée de la journée.

5.7.2.4. Les types de protections permanentes

Avancée de toiture

- Le prolongement d'un versant de toit ou d'une toiture terrasse, en avant d'une bâtisse, est un moyen simple d'intercepter le rayonnement solaire.
En général, dans l'hémisphère nord, les avancées de toiture sont inutiles au-dessus de la façade nord, à l'exception des régions vraiment chaudes où le toit sert de grand parasol projetant son ombre sur toutes les façades et sur le sol autour du bâtiment.
- Les brise-soleil de la façade sud constituent habituellement le moyen le plus efficace pour arrêter les apports solaires en été, bien entendu il faudrait prévoir des formes et des approches différentes à l'est et à l'ouest, selon les conditions locales.
Une avancée fixe de la toiture rend de bons services pendant toute l'année, si sa largeur est optimisée.
- Pour améliorer la protection contre les trop forts apports solaires de l'été, un prolongement rétractable peut être très bénéfique, il peut être coulissant ou pliable. L'utilisation de telles protections peut nuire à l'esthétique du bâtiment. Un effort doit être fait par les architectes pour bien intégrer ces éléments.



Figure 43 : Les avancées de poutre

Avancées de poutres

- Dans les climats tempérés et méditerranéens, il est fréquent de laisser déborder des poutres porteuses ou de construire des poutres en vue de les utiliser comme protections solaires. Une multitude d'objets peuvent alors couvrir ces avancées de poutres ou s'y trouver suspendus pour ombrager les murs et les ouvertures sud, et éviter ainsi la formation excessive de chaleur dans ces façades: plantes grimpantes, cotonnades, branchages, perches, fruits ou légumes à sécher, et bien d'autres objets peuvent constituer cette protection saisonnière facile à mettre en place ou à retirer.
- Les treilles qui recouvrent ces auvents sud forment souvent des pergolas et des tonnelles, et distribuent un ombrage saisonnier presque parfait. Elles perdent cependant leur effet en raison de la chute des feuilles au début de la saison de chauffage.

Lames

- On peut disposer d'une multitude de façons différentes les lames ou lattes pour filtrer la lumière.
Les lames fixes sont une solution dans les endroits où les besoins de vue et d'éclairage tamisé sont permanents. Elles laissent passer l'air mais atténuent les apports et l'éblouissement du soleil.
- Les lames amovibles ou réglables conviennent lorsque des manœuvres quotidiennes ou saisonnières sont nécessaires. Les modèles réglables permettent, à volonté, de laisser entrer ou d'arrêter le rayonnement solaire, ce qui peut être avantageux autant pour les brises ou pour les regards.
- Pour les lames positionnées à l'extérieur, on conseille du métal ou du bois traité, résistant bien au vent, aux ultraviolets, à la pluie, à la sécheresse et à la neige.
- Les lames verticales représentent une bonne approche pour admettre les brises, aménager les vues et interdire le passage du rayonnement solaire à certaines heures de la journée. Mais, dans leur rôle d'écran solaire, on doit les régler de temps à autre.

En montage fixe, les meilleurs résultats concernent les expositions est et ouest.

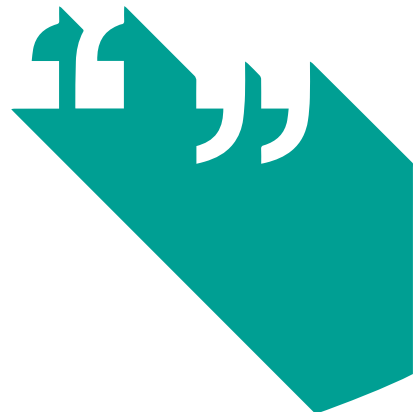
- Les lames horizontales peuvent faire de l'ombre toute la journée en été et laisser libre passage aux mouvements d'air; elles n'empêchent pas non plus la visibilité vers l'extérieur. Leur meilleure utilisation est en façade sud. On peut leur donner n'importe quelle inclinaison entre la verticale et l'horizontale.
- En position de fermeture, les lames isolantes aussi bien horizontales que verticales, freinent les déperditions thermiques des bâtiments.
- Les lames réfléchissantes réfléchissent ou dévient efficacement la lumière naturelle.



Figure 44 : Les écrans et claustras

Écrans et claustras

- Les treillis faits en lattis de bois, en profilés métalliques de même que les claustras en blocs de béton ou en moulages de terre cuite arrêtent efficacement le flux solaire se dirigeant vers une paroi ou une surface. Bien entendu, il faut choisir le matériau de telle sorte qu'il résiste bien aux intempéries.
- Ces écrans, placés en position verticale, horizontale ou oblique, peuvent réduire les apports solaires au niveau désiré si le concepteur en étudie bien la configuration, les degrés d'occultation, les dimensions des éléments (des pleins et des vides), espacement et inclinaison des éléments constitutifs.
- Non seulement ces protections présentent l'intérêt de filtrer les apports solaires, la lumière solaire et naturelle, mais aussi elles permettent d'atténuer l'éblouissement, de laisser libre passage à l'air, d'autoriser ou d'interdire les regards, de projeter des jeux d'ombres, etc.
- Lorsque ces écrans ne sont pas en maçonnerie, on peut les retirer, et les entreposer facilement ou les réaliser là où cela conviendrait le mieux.



5.7.2.5. Plantations

Dans cette volonté de protéger un bâtiment des apports solaires, il est essentiel d'intercepter les rayons du soleil avant qu'ils frappent les vitrages ou les façades car, si on laisse la chaleur pénétrer dans l'enceinte du bâtiment, il faudra ensuite, prendre des dispositions supplémentaires pour l'évacuer au dehors, par le biais de la ventilation ou de la climatisation.

Les plantations d'arbres, de buissons ou de treilles aux endroits appropriés permettent de projeter une ombre bénéfique sur les constructions.

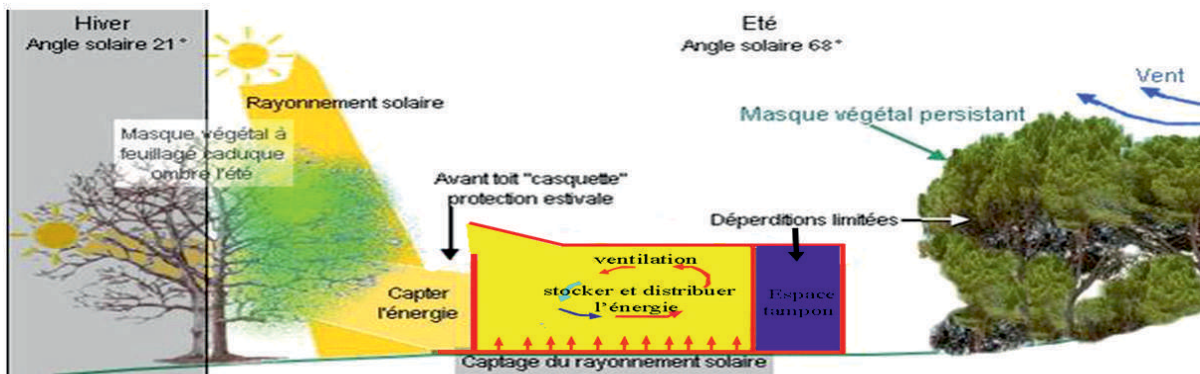


Figure 45 : La protection du bâtiment par la végétation

Les arbres à feuilles persistantes

Plantés au Nord des bâtiments joueront le rôle d'écrans protecteur et arrêteront les tempêtes hivernales, les vents et la neige. Ils peuvent aussi se comporter en humidificateurs et abaissent alors par évaporation la température de l'air circulant entre leurs branches, leurs feuilles ou leurs aiguilles. Les arbres à feuilles persistantes ombragent également le terrain autour des bâtiments évitant ainsi l'accumulation de chaleur dans le sol, ce qui a pour effet de modifier le microclimat du site.

Les allées et les oasis illustrent très bien cette influence du feuillage.

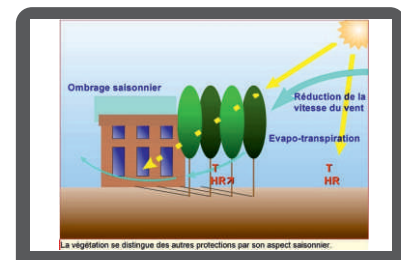


Figure 46 : Les arbres à feuilles persistantes

Plantations au sol

Autour des bâtiments dont on veut préserver les vues, on plantera des arbustes bas, des buissons et on planifiera des pelouses. Cette végétation atténue le rayonnement réfléchi par les routes, les patios, le sable et les étendues d'eau.

Les arbustes, arrosés le matin, rafraîchissent l'air qui les traverse et par leur évapotranspiration, apportent de la fraîcheur dans leur voisinage ; ils ont une influence purificatrice face aux effets polluants du chauffage et des gaz polluants, des poussières qui demeurent en suspension dans l'air.

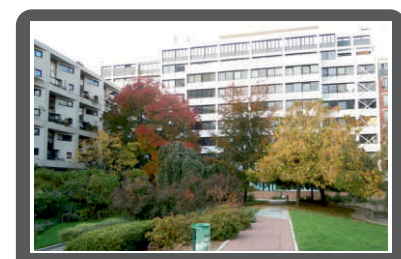


Figure 47 : Les plantations au sol

Les arbres à feuilles caduques,

Qu'ils soient à fruits ou d'ornementation, conviennent particulièrement sur les côtés sud, est et ouest d'un bâtiment, ou dans les cours d'immeubles. Dès le printemps, mais surtout en été et en automne, leur

feuillage intercepte le flux d'énergie solaire avant qu'il n'arrive au sol, ou encore sur les façades et les fenêtres de l'édifice. Ces espèces perdent leurs feuilles à la fin de l'automne et, après la chute des feuilles mortes, les rayons du soleil viennent réchauffer les parois du bâtiment ainsi que le sol autour des constructions, ils permettent l'évaporation de l'eau en surface et accélèrent la fonte de la neige et de la glace si elles existent.

Les treilles et les plantes grimpantes permettent d'ombrager les façades est, ouest et sud. Des bacs à fleurs, placés en bordure du toit et au sommet des murs déversent des écrans de verdure en avant des baies vitrées et des façades. Un lattis ou un treillis jouera le rôle de support aux plantes grimpantes pour constituer un rideau, interceptant le soleil, tout en permettant aussi le passage des brises rafraîchissantes.

Plantations en toiture

Les toitures pelouses ou les terrasses pergolas ont leur intérêt sous nos climats. Une toiture construite selon les règles de l'art, et couverte de terre et de végétation, peut durer très longtemps : la terre protège le complexe d'étanchéité, et supprime les effets destructeurs de la lumière, du vent, de l'alternance du gel et du dégel, de la sécheresse et de la pluie.

Dans les régions au climat sec (centre et sud de la Tunisie, zones continentales), l'arrosage des plantations en toiture permet de rafraîchir une construction par évaporation. Un toit mouillé évacuera vers le ciel nocturne la chaleur absorbée en cours de journée. Il faudra arroser régulièrement la végétation de toiture pour éviter le dessèchement des racines superficielles et le risque correspondant d'incendie.

Les fruits, les fleurs, les plantes vertes et les feuillages contribuent à l'esthétique du bâtiment.



Figure 48 : Les plantations au sol



Figure 49 : Les plantations en toiture



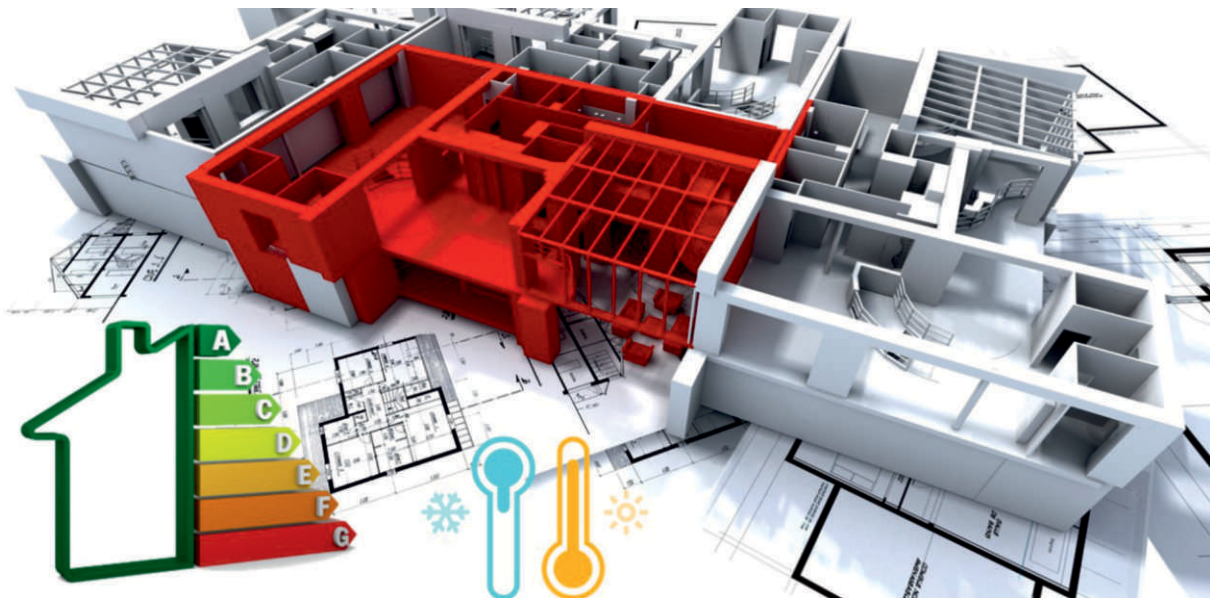
5.7.3. Recommandations concernant l'emploi de protections solaires

Une bonne protection solaire doit intercepter le rayonnement solaire incident mais ne doit pas trop l'absorber pour ne pas elle-même s'échauffer; le rayonnement intercepté doit être principalement réfléchi.

La maîtrise du flux entrant s'apprécie par le facteur solaire de la baie munie de sa protection. Il est égal au rapport du flux pénétrant dans le local au flux du rayonnement solaire incident sur la baie.

ÉQUIPEMENTS	PROTECTION SOLAIRE	GESTION DES APPORTS SOLAIRES	ISOLATION THERMIQUE	VISIBILITÉ ÉCLAIRAGE NATUREL DES LOCAUX
Extérieur à lames orientables en Aluminium	√√√	√√√	√√	√√√
Extérieur: écran textile de verre	√√	√	√	√√√
Extérieur: volet roulant en Aluminium	√√√	√	√√√	√
Intérieur : Écran textile	-	-	-	√√
Verre réfléchissant	√√	-	√√	√√
√√√ : Grande performance √√ : Satisfaisant √ : Acceptable - Inadapté				

Tableau 30 : Recommandations concernant l'emploi de protection solaire



6. SIMULATION ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT :

6.1. La réglementation thermique des bâtiments neufs en Tunisie

L'objectif de la réglementation thermique des bâtiments neufs est de produire de nouveaux bâtiments avec des performances thermiques minimales de l'enveloppe, moyennant des surcoûts acceptables (inférieurs à 10% du coût du bâtiment), en vue d'améliorer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment et par conséquent réduire les besoins en chauffage et en refroidissement. Cet objectif est réalisable étant donnée que la Tunisie dispose d'un climat relativement modéré qui permet l'utilisation de matériaux et de techniques de construction qui contribuent à la réduction des besoins énergétiques du bâtiment moyennant une conception architecturale réfléchie et adaptée aux régions climatiques locales.

La loi de maîtrise de l'énergie n°2009-7 du 9 février 2009 qui modifie et complète la loi n°2004-72 du 2 août 2004 à travers son nouveau article n°10 a instauré l'obligation d'exiger des performances techniques minimales de l'enveloppe des nouveaux bâtiments ainsi que des projets d'extension des bâtiments existants afin de réduire la demande en énergie pour les besoins de chauffage et de refroidissement des locaux du secteur des bâtiments.

Étant donné le mode d'exploitation et la manière de consommer l'énergie et aussi les niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments qui diffèrent d'un type de bâtiment à un autre, la réglementation thermique prévoit la promulgation de 4 arrêtés différents relatifs aux bâtiments à usage de bureaux, bâtiments collectifs résidentiels, bâtiments à usage de santé et d'hôtellerie.

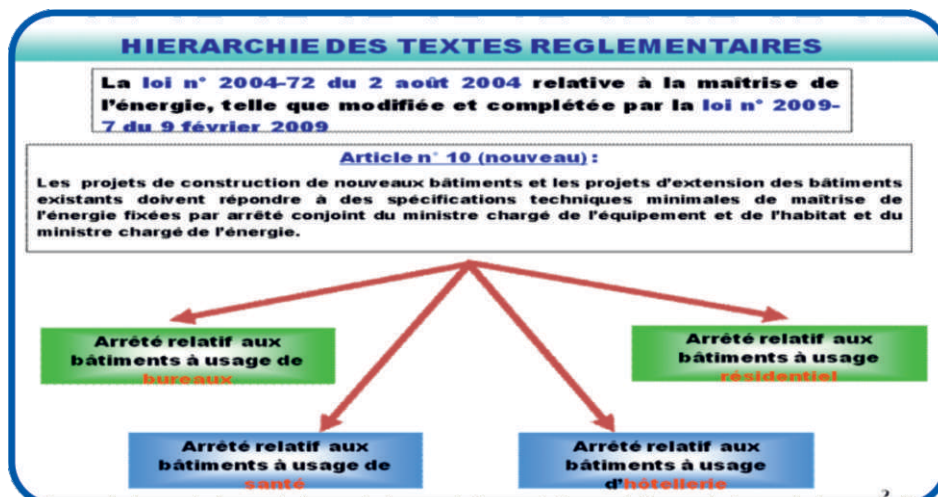


Figure 50 : Hiérarchie des textes réglementaires relatifs à la réglementation thermique des bâtiments

IL EST À NOTER QUE :

La réglementation thermique conditionne l'octroi de l'autorisation de bâtir au respect des exigences techniques minimales demandées par les décrets spécifiques à chaque type de bâtiment.

Le principe de la réglementation thermique des bâtiments neufs en Tunisie est basé sur le calcul des besoins énergétiques annuels du bâtiment liés au confort thermique (besoins en chauffage et en refroidissement) et exprimé en kWh/an/m².

Ces besoins énergétiques sont classés sur une échelle de performances thermiques de 8 classes énergétiques. Sachant que la classe 1 correspond à un bâtiment économe en énergie et la classe 8 correspond à un bâtiment énergivore.

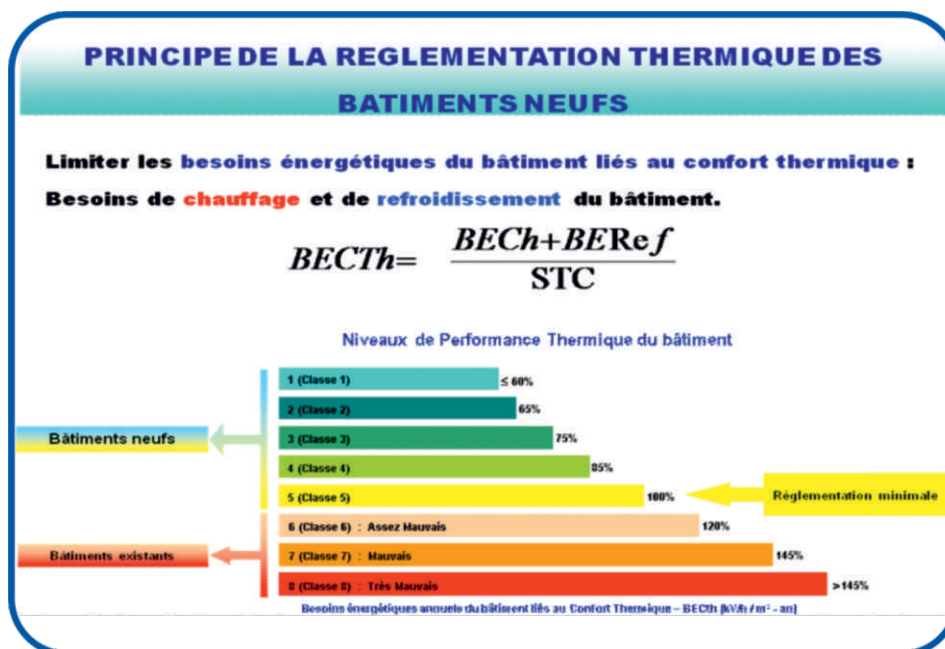


Figure 51 : Principe de la réglementation thermique des bâtiments neufs

Le niveau de performance thermique minimal acceptable ciblé par la réglementation thermique, correspond à la classe énergétique qui présente un niveau de confort thermique acceptable à l'intérieur du bâtiment et à moindre coût ne dépassant pas 10% du coût du bâtiment.

Ces exigences réglementaires imposées par la réglementation thermique vont évoluer vers des exigences plus sévères (en se rapprochant de la classe énergétique 1) en fonction de l'évolution du niveau d'adhésion ainsi que de l'évolution des prix des nouvelles techniques de construction en fonction du développement du marché et qui auront une tendance à la baisse avec l'augmentation de la demande engendrée par l'application de la réglementation thermique. De ce fait avec l'évolution de la réglementation thermique, nous aurons des exigences plus sévères tout en conservant des surcoûts inférieurs au seuil de 10% qui est considéré comme limite à ne pas dépasser pour garantir l'applicabilité de la réglementation thermique.

6.2. Aperçu sur L'arrêté relatif aux bâtiments à usage de bureaux et assimilé

6.2.1. La date d'entrée en vigueur de l'arrêté :

Le texte a été signé le 23 juillet 2008 fixant les spécifications techniques minimales visant l'économie dans la consommation d'énergie des projets de construction et d'extension des bâtiments à usage de bureaux ou assimilés. L'application du texte est entrée en vigueur à partir du premier Août 2008.

6.2.2. Le domaine d'application de l'arrêté :

Les dispositions de cet arrêté ne s'appliquent que pour les bâtiments publics et privés dont la surface totale couverte est supérieure ou égale à 500 m². Cet arrêté a été ensuite actualisé pour couvrir tous les bâtiments quelque soit la surface couverte du projet.

6.2.3. Les approches de contrôle de l'application de l'arrêté :

Deux approches sont préconisées par l'arrêté pour le contrôle de l'application de la réglementation thermique, selon la complexité du projet et le taux de vitrage choisi :

6.2.3.1. Approche performancielle et ses exigences :

Cette approche est destinée pour les bâtiments à configuration complexe et également pour les bâtiments à configuration simple mais qui disposent d'un taux global important des baies vitrées.

Elle consiste à fixer les spécifications techniques minimales en termes de performances thermiques globales du bâtiment à travers le calcul du bilan des besoins énergétiques annuels du bâtiment liés au confort thermique.

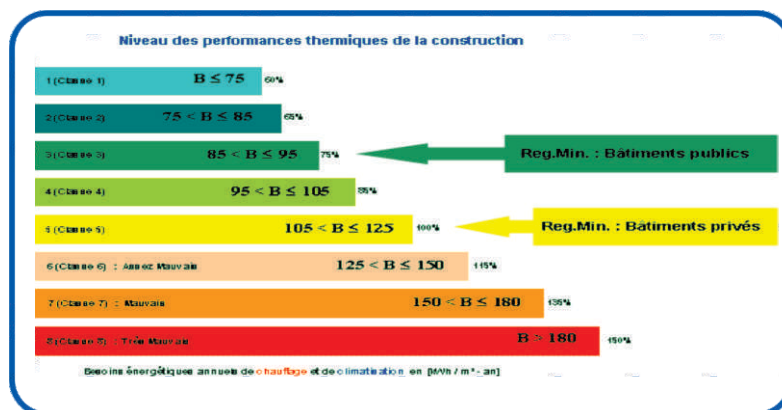


Figure 52 : Niveau de la performance thermique de la construction

L'arrêté exige aux bâtiments à usage de bureaux :

- Les performances thermiques des classes 1 à 3 de l'échelle de performances thermiques de la construction pour les bâtiments publics.
- Les performances thermiques des classes 1 à 5 de l'échelle de performances thermiques de la construction pour les bâtiments privés.

L'arrêté fixe comme seuils d'applicabilité de l'approche performancielle comme suit :

- La surface totale couverte du bâtiment est supérieure ou égale à 1 500 m². Ou bien :
- La surface totale couverte du bâtiment est strictement inférieure à 1 500 m² et le taux global des baies vitrées est :
 - * Supérieur à 35% de la surface des murs extérieurs et sa distribution sur les orientations Est ± 45° et Ouest ± 45° est supérieure à 25% pour les bâtiments à usage public.
 - * Supérieur à 45% de la surface des murs extérieurs et sa distribution sur les orientations Est ± 45° et Ouest ± 45° est supérieure à 35% pour les bâtiments à usage privé

Afin de faciliter l'application de la réglementation thermique, un logiciel simplifié a été élaboré et fourni gratuitement par l'ANME aux concepteurs.

Les avantages du logiciel simplifié :

- Il dispose d'une même base de données des matériaux de construction avec les performances thermo physiques communément utilisées par tous les intervenants afin de limiter les sources d'erreurs.
- Les compilations sont très rapides et les résultats sont instantanés encourageant les concepteurs à réaliser plusieurs variantes pour proposer des solutions aux promoteurs.



6.2.3.2. Approche prescriptive et ses exigences :

Cette approche est destinée pour les bâtiments à configuration simple.

Elle consiste à fixer les spécifications techniques minimales en termes de propriétés thermo physiques de l'enveloppe du bâtiment (toiture, mur extérieur, surface vitrée) en tenant compte de la zone climatique où sera implanté le projet et en fonction du taux global des baies vitrées et sa répartition sur les différentes orientations voir paragraphe ci dessus.

6.2.3.3. Aperçu sur le logiciel CLIP :

- Rôle et caractéristiques de CLIP :

Pour entrer dans une phase opérationnelle, la réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs dans le secteur tertiaire doit disposer d'outils d'utilisation et d'évaluation simples par les professionnels et les agents de contrôle.

CLIP calcule plusieurs choses :

* Le besoin de chauffage de l'immeuble, son besoin de climatisation et fait la somme de ces besoins. Peu importe si l'immeuble est réellement chauffé ou climatisé : ce sont les énergies qu'il faudrait apporter pour que le confort soit assuré. Plus ces valeurs sont faibles, plus on pourra se passer de chauffage et climatisation. Ces valeurs illustrent les qualités thermiques de l'enveloppe. C'est sur la valeur annuelle des besoins thermiques qu'est fondée le label.

* Les consommations énergétiques pour faire fonctionner l'immeuble et, éventuellement, le chauffer ou le climatiser. Ces valeurs sont exprimées en énergie primaire, par saison et annuellement.

- * La quantité de CO2 produite annuellement par le fonctionnement de l'immeuble.
- Buts du développement de l'outil informatique simplifié
La réalisation de l'outil (appelé CLIP) a deux buts principaux :
 - * Disposer d'un outil informatique simplifié qui permet à l'administration de procéder à la labellisation des bâtiments du secteur tertiaire en fonction de leurs performances thermique et énergétique.
 - * Disposer d'un outil informatique simplifié qui permet d'aider les concepteurs (architectes et ingénieurs thermiciens) dans leur travail de mise au point des améliorations relatives à la qualité thermique et énergétique du bâtiment.
- Avantages de l'outil informatique simplifié
Réduire le nombre de paramètres à saisir au niveau de l'évaluation des performances thermique et énergétique du bâtiment à étudier.
Garantir une rapidité d'exécution des calculs nécessaires pour l'évaluation des performances thermique et énergétique du bâtiment à étudier.
Assurer une bonne fiabilité au niveau des résultats des calculs.
Avoir un outil de travail convivial, ne nécessitant aucun apprentissage, utilisable par des personnes non spécialisées, mais cependant utile aux spécialistes.
Permettre la comparaison des différentes variantes du projet, au cours de son évolution.
Offrir une présentation permettant d'avoir, sur 6 pages maximum, imprimable sur papier ou en PDF, toutes les données et résultats afin de monter rapidement le dossier du projet.

Remarque : il ne faut pas attendre de CLIP une précision égale à celle qu'on peut espérer de logiciels lourds comme TRNSYS ou DOE-2.

- Éléments caractéristiques de CLIP
 - * Documents de base
L'outil informatique simplifié s'appuie sur les éléments suivants :
la météorologie des dix régions climatiques de la Tunisie,
les consommations énergétiques forfaitaires pour l'éclairage, l'eau chaude sanitaire, etc. de chaque type de bâtiment :
 - les besoins et consommations de référence, correspondants à la réglementation minimale actuelle, pour chaque bâtiment. Ces valeurs servent de point de comparaison pour établir le label.
 - Les règles d'attribution des différents niveaux de label pour chaque type de bâtiment et chaque région.
 - * Caractéristiques de l'outil informatique simplifié CLIP
L'outil CLIP doit définir où se situe la performance du bâtiment envisagé par rapport à la réglementation thermique et énergétique minimale en usage en Tunisie. De cette analyse doit découler l'attribution d'un label de performances thermique portant sur l'année entière. Deux aspects sont pris en compte :

Les performances de l'enveloppe, par l'estimation séparée des besoins en chauffage et des besoins en climatisation. Pour les bâtiments non chauffés et (ou) non climatisés, ces valeurs permettront de voir si le bâtiment est apte à apporter le confort thermique souhaité et sa capacité à être ultérieurement équipé.

Les performances du bâtiment complet, avec ses équipements, à travers les consommations (en énergie primaire) de chauffage, climatisation et

consommations annexes (éclairage, eau chaude sanitaire, etc.). On obtient également la performance de l'immeuble en termes de production annuelle de gaz à effet de serre, en kilogrammes d'équivalents Co2.

Les estimations des besoins et les consommations sont exprimées en kWh/m².an. La surface considérée est celle conditionnée.

Le label est présenté sous une forme analogue à celle utilisée pour les réfrigérateurs en Tunisie.

L'outil sera utilisé par les concepteurs comme aide à l'amélioration du projet à étudier. Il leur permet donc d'apprécier les améliorations apportées successivement au projet, par rapport à la version initiale. Il donne aussi le label des performances thermique et énergétique atteint après chaque amélioration.

Pour chaque modification apportée, on peut apprécier son impact sur les besoins, les consommations et la production de CO₂, ce qui signifie que les résultats sont détaillés par postes de consommation.

L'outil peut s'appliquer à plusieurs types de bâtiments. La liste minimum de bâtiments concernés comprend :

- Les bâtiments à usage de bureaux (administrations, banques, assurances, ...).
- Les bâtiments à usage hôtelier (hôtels, ...).
- Les bâtiments à usage hospitalier (hôpitaux, dispensaires, cliniques).
- Les bâtiments à usage d'enseignement (Ecoles, Lycées, Foyers universitaires, ...).
- Les bâtiments à usage de commerce (commerces, centres commerciaux, ...).
- Les bâtiments à usage d'habitation (Logements sociaux, économiques et standing).

Ces bâtiments peuvent être situés dans une des dix régions climatiques recensées par l'ANME. L'outil informatique simplifié CLIP peut s'appliquer dans ces dix régions.

L'outil CLIP peut être utilisé sur les ordinateurs compatibles PC.

CLIP permet de décomposer le bâtiment en zones plus petites. Par exemple, on peut traiter en deux fois un bâtiment dont le rez-de-chaussée est composé de commerces et les étages d'appartements. Un outil complémentaire (fourni avec CLIP) permet d'assembler ces deux parties. Cette décomposition peut aussi être utilisée si on souhaite étudier un bâtiment partie par partie, pour avoir une vue plus fine des résultats.

CLIP permet à l'utilisateur, par l'introduction d'un nombre restreint de données, l'évaluation des performances thermique et énergétique du bâtiment tertiaire à traiter.

CLIP comprend une base de données pour tous les éléments de l'enveloppe (matériaux, film d'air, etc.) utilisés dans le secteur tertiaire. Il permet à l'utilisateur l'accès à des listes de choix pour la sélection d'un type de mur déterminé, d'un type de fenêtre déterminé, d'un type de porte déterminé, etc. L'utilisateur peut enrichir ces bases de données par des valeurs personnelles autres que celles fournies avec CLIP.

CLIP comprend une base de données météorologiques des différentes régions climatiques de la Tunisie (10 régions). En effet, l'outil permet, par la sélection de la région climatique, l'activation de la base de données correspondante.

CLIP calcule les coefficients U des murs, par façade plutôt que globalement, ainsi que les calculs de déperdition. Certains utilisateurs peuvent proposer d'isoler certaines parois et



pas d'autres. Les compositions de murs peuvent également changer pour différentes façades en fonction des choix de l'utilisateur. Cette flexibilité est essentielle dans ledit outil.

CLIP permet le traitement de différents types de planchers et de différents types de toitures.

CLIP permet la saisie de type de portes, de type de fenêtres et de pare-soleil différents, et pour chaque façade du bâtiment. Il est en effet possible que des utilisateurs veuillent utiliser un type de fenestration seulement sur quelques orientations et un autre type sur d'autres.

CLIP permet de récapituler les différentes options envisagées par rapport au bâtiment de référence, grâce à un outil complémentaire (fourni avec CLIP).

L'outil permet à l'utilisateur de sauvegarder les calculs du projet à évaluer dans une base de données résultat. Il lui permet aussi l'identification du projet par son nom, son adresse, le nom de son promoteur, etc.



CHAPITRE 03

LOTS TECHNIQUES



1. LE CHAUFFAGE, CLIMATISATION, VENTILATION DES LOCAUX:

Le présent chapitre expose les principes, les règles de l'art et les exigences générales applicables à la conception d'un bâtiment procurant à ses occupants une bonne qualité de l'air intérieur (QAI). On y traite principalement de la conception des systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air (CVCA).

D'une façon générale, les systèmes CVCA ont pour mission d'assurer aux occupants d'un bâtiment des conditions ambiantes confortables qui satisfont une grande majorité d'entre eux. Le confort est assuré par le contrôle de la température, de l'humidité, des mouvements de l'air et des odeurs désagréables.

1.1. Exigence sur la conception d'un CVCA pour maintenir la qualité de l'Air dans un établissement de santé :

Dans un établissement de santé, plus particulièrement dans un centre hospitalier (CH) ou un centre d'hébergement et de soins de longue durée (CHSLD), les systèmes CVCA jouent les rôles additionnels suivants :

- Contrôle des infections dans un milieu où l'on trouve des patients qui sont vulnérables en raison de leur état.
- Maintien de conditions ambiantes favorables à la guérison, lesquelles constituent en elles-mêmes un traitement.
- Contrôle des substances dangereuses, chimiques ou biologiques, générées par les procédés médicaux et de soutien.

Pour assurer une bonne qualité d'air dans un établissement hospitalier, la conception des systèmes CVCA doivent inclure les notions suivantes :

a - Pression ou mouvement d'air contrôlé

Le mouvement contrôlé de l'air aide à limiter la diffusion des contaminants présents dans l'air.

D'une façon générale, les systèmes CVCA doivent assurer l'écoulement de l'air à partir des zones plus propres vers des zones de niveaux moins élevés de propreté. Certaines pièces, telles que les salles d'opération ou les salles d'isolement protecteur, sont spécialement maintenues sous pression positive par rapport aux espaces adjacents afin de limiter ou d'empêcher l'introduction de pathogènes par voie aérienne (un flux d'air sort de la pièce en permanence par les ouvertures et interstices).

À l'opposé, certaines autres pièces où l'on désire éviter que les contaminants s'échappent, telles que les salles de toilette, les utilités souillées ou les salles d'isolement respiratoire, sont ventilées en pression négative par rapport aux espaces adjacents. Dans de tels cas, un flux

d'air s'introduit en permanence à travers les ouvertures et interstices. Certaines pièces ne nécessitent pas un contrôle continu du mouvement de l'air; cependant, ce fait ne doit en aucun temps favoriser la dissémination aérienne de pathogènes

b- Filtration

La filtration est utilisée dans le but de retirer de l'air la plupart des particules qui s'y trouvent en suspension ainsi que des microorganismes susceptibles de s'y attacher. Le principe de fonctionnement est le suivant : l'air est capté par le système de ventilation où, en plus d'être chauffé, refroidi, humidifié ou déshumidifié, il est filtré. Lorsque l'air passe à travers le filtre, une partie des particules qu'il contient est retenue. L'air qui en ressort de l'autre côté est plus propre. Plus le filtre est efficace, plus la proportion de particules retenue est élevée.

De même, plus l'air passe souvent à travers le filtre, plus il est débarrassé de ses particules en suspension. Donc, le taux de particules en suspension dans l'air intérieur dépend du taux de génération de particules dans la pièce, du niveau d'efficacité du filtre et du taux de recirculation de l'air à travers le filtre.

Dans un filtre, cinq principes physiques peuvent intervenir pour intercepter et retenir les particules:

- **Tamissage:**

Principe de filtration le plus simple où les particules les plus grosses sont arrêtées au passage d'une ouverture plus petite entre les fibres du filtre. Les particules retenues peuvent être observées à la surface du filtre (poussières, peluches, etc.). Le tamissage ne permet pas de retenir les petites particules (< 1 micron), lesquelles sont captées en vertu des quatre autres principes nommés ci-après.

- **Collision (ou inertie) :** Le principe de collision retient les petites particules dont la grosseur et la densité sont néanmoins suffisamment importantes pour qu'elles entrent en collision avec les fibres du filtre, sans pouvoir les contourner en suivant le courant d'air. Les particules adhèrent alors au filtre, notamment en raison de la présence d'une couche visqueuse.

- **Interception :**

Les particules assez petites pour éviter la collision avec les fibres du filtre peuvent néanmoins être arrêtées lorsqu'elles frôlent celles-ci. Elles sont alors retenues par les forces de Van der Waals (interaction électrique de faible intensité entre atomes et molécules).

- **Diffusion :** Le mouvement des très petites particules est rendu erratique par le bombardement des molécules de gaz composant l'air (mouvement brownien). Ces mouvements augmentent la probabilité du passage des particules à proximité des fibres du filtre et leur capture par le principe d'interception.

- **Effets électrostatiques :** Certaines particules électriquement chargées peuvent être fortement attirées et retenues par un filtre dont la charge électrostatique est opposée. Les filtres électrostatiques passifs (sans source d'électricité) peuvent être dotés d'une charge permanente ou se charger par l'effet du passage du flux d'air sec à travers lui.

Les filtres les plus efficaces sont capables de retenir des particules extrêmement petites, y compris la plupart des virus, ce qui est théoriquement idéal pour toutes les situations. Cependant, ces filtres opposent une résistance beaucoup plus grande au passage de l'air, ce qui requiert des ventilateurs plus puissants. Ils sont aussi plus chers; c'est pourquoi leur usage est généralement réservé à certaines applications, comme les salles d'opération. C'est ce qui explique qu'il existe toute une gamme de filtres avec divers niveaux d'efficacité afin de répondre de manière optimale aux différents besoins. Le tableau 1.1, à la fin du présent

chapitre, présente la dénomination et la performance des divers types de filtres. Typiquement, une filtration MERV17 est requise pour une salle d'opération, tandis qu'une filtration MERV 14 convient à la plupart des secteurs de soins d'un CH et qu'une filtration MERV 8 suffit pour les secteurs sans exigence particulière.

MeRV : Minimum efficiency Reporting Value = mesure de l'efficacité des filtres à air telle que définie par la norme aSHRAe 52.2-2007 Method of Testing general Ventilation air-Cleaning Devices for Removal efficiency by Particle Size.

D'autres types de filtres permettent de retirer certains contaminants sous forme gazeuse, sur lesquels les filtres à particules n'ont aucun effet. Les filtres au charbon activé peuvent être utilisés notamment pour atténuer certains problèmes d'odeurs. Ce genre de filtre est peu utilisé dans les établissements de santé, la dilution étant généralement suffisante.

c- Dilution

La dilution consiste à réduire la concentration de contaminants gazeux dans l'air intérieur par l'évacuation, vers l'extérieur du bâtiment, d'une partie de l'air intérieur et son remplacement par un volume égal d'air extérieur, filtré et relativement exempt de contaminants.

L'air intérieur se charge graduellement de contaminants gazeux émanant notamment du bâtiment et du mobilier (colles, peintures, vernis, plastiques, etc.), des personnes (CO₂, odeurs corporelles) et des procédés. Le taux de dilution est donc dicté en partie par la superficie à ventiler pour tenir compte du dégazage des matériaux présents dans l'environnement et en fonction de l'occupation pour tenir compte des personnes et des procédés.

Par exemple, une aire d'entreposage, même si très peu de personnes s'y trouvent, nécessite un apport d'air extérieur pour limiter la concentration de contaminants gazeux émis par le matériel entreposé. En outre, à superficie égale, un auditorium nécessitera généralement un apport d'air frais supérieur à une aire de bureaux individuels en raison de la plus forte densité d'occupation.

La plupart des systèmes CVCA assurent une dilution. Certains bâtiments anciens ou très petits comptent sur la ventilation naturelle (fenêtres ouvrantes, infiltration d'air) pour assurer le changement de l'air.

d-Évacuation

L'évacuation consiste à rejeter à l'extérieur une partie de l'air intérieur. Comme l'air évacué doit nécessairement être remplacé, l'évacuation implique une dilution et vice-versa. Une partie de l'air du bâtiment est généralement évacuée en permanence par l'unité de ventilation principale afin d'assurer la dilution des contaminants. Il arrive aussi que l'air de certains locaux ou de certains appareils soit entièrement et directement évacué vers l'extérieur afin de limiter ou d'empêcher la diffusion des contaminants aériens dans l'environnement intérieur.

Généralement, on évacue vers l'extérieur 100 % de l'air de locaux comme les salles de toilette et les utilités souillées. L'air des hottes chimiques et de la plupart des enceintes de sécurité biologiques est aussi évacué vers l'extérieur pour assurer la santé et la sécurité des personnes.



e- Irradiation ultraviolette germicide

Certains microorganismes présents dans l'air peuvent être détruits à l'aide de rayons ultraviolets d'une longueur d'onde de 200 à 270 nanomètres.

L'irradiation ultraviolette germicide est faite selon trois principales configurations :

- Irradiation de l'air en partie haute de la pièce : Les rayons ultraviolets sont projetés horizontalement dans la partie haute de la pièce, à partir d'un dispositif fixé au plafond ou au mur. Les microorganismes aériens sont irradiés lorsque les mouvements de l'air les transportent en partie haute de la pièce. Les dispositifs sont conçus pour ne pas irradier les occupants.
- Désinfection du flux d'air dans le conduit de ventilation : Les microorganismes présents dans l'air circulant dans le conduit sont irradiés au moment de leur passage devant les lampes ultraviolettes (UV). La proportion de microorganismes détruits dépend entre autres de l'intensité du rayonnement et du temps d'exposition (vitesse de l'air devant les lampes UV).
- Désinfection de la surface de certains composants de l'unité de ventilation : Parce qu'ils agissent un peu comme un filtre qui retient les particules (ailettes rapprochées) et qu'ils sont souvent mouillés, les serpentins de refroidissement sont susceptibles d'abriter une quantité appréciable de microorganismes. L'irradiation de ces serpentins à l'aide de lampes ultraviolettes permet de détruire les microorganismes et de garder les serpentins propres. D'autres surfaces, comme la panne du serpentin et les filtres, peuvent tirer parti de l'irradiation ultraviolette.

f- Contrôle de la température

L'air doit être admis dans les pièces à une température qui permet de maintenir des conditions ambiantes confortables et aptes à favoriser la guérison du patient. En effet, la température ambiante d'un établissement de soins n'est pas uniquement une affaire de confort. Par exemple, certains patients cardiaques peuvent ne pas être capables de maintenir une circulation sanguine suffisante pour évacuer assez de chaleur corporelle; c'est pourquoi les soins intensifs cardiaques doivent être climatisés. À l'inverse, des patients souffrant d'arthrite rhumatoïde peuvent bénéficier de conditions chaudes et sèches.

L'air d'alimentation doit être chauffé ou refroidi selon les besoins de la pièce. Ce procédé est effectué au moyen de serpentins de chauffage et de climatisation pouvant être localisés en divers endroits dans les systèmes CVCA.

g- Contrôle de l'humidité

Tout comme pour la température, le niveau d'humidité relative doit être maintenu à un taux favorable au confort mais aussi à la guérison de certaines affections. Par exemple, une atmosphère trop sèche nuit aux patients atteints d'une maladie pulmonaire chronique, qui ont souvent des sécrétions qui ont tendance à s'épaissir. Cependant, un taux d'humidité

élevé peut favoriser la condensation et la prolifération fongique, qui peuvent causer des affections et des malaises. D'une manière générale, dans un établissement de soins de santé, le taux d'humidité relative doit se situer dans une fourchette de 30 % à 60 % et peut varier selon les saisons. Le taux d'humidité tend naturellement vers une atmosphère plus sèche en hiver et plus humide en été.

● **Humidification :**

En période hivernale, le froid fait en sorte que l'air extérieur contient très peu de vapeur d'eau. Cet air très sec, qui est introduit dans le bâtiment par les différents systèmes de ventilation, doit être humidifié avant d'être diffusé dans les locaux. Pour ce faire, un humidificateur injecte la quantité nécessaire de vapeur d'eau dans l'air traité par le système de ventilation afin de maintenir le taux d'humidité relative désiré dans les pièces.

Les activités intérieures, telles que les bains et les douches, et la respiration humaine procurent une certaine humidification, mais celle-ci est grandement insuffisante dans les bâtiments ventilés mécaniquement, à fortiori dans les établissements de santé, où les exigences minimales d'apport d'air frais sont élevées.

Il existe plusieurs types d'humidificateurs fonctionnant selon des principes différents : injection de vapeur, atomisation d'eau, bassin d'évaporation, etc. L'injection de vapeur est la méthode d'humidification privilégiée dans un établissement de santé.

● **Déshumidification :**

En période estivale, la chaleur fait en sorte que l'air extérieur peut contenir beaucoup de vapeur d'eau. Cet air chargé d'humidité qui est introduit dans le bâtiment par les différents systèmes de ventilation est généralement déshumidifié avant d'être diffusé dans les différents locaux.

La déshumidification de l'air est généralement réalisée en le faisant passer au travers d'un serpentin de refroidissement. Lorsque la température du serpentin de refroidissement est inférieure au point de rosée de l'air traité, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense, réduisant ainsi le taux d'humidité relative dans l'air. Le serpentin doit donc être capable de maintenir une température assez froide pour assécher l'air suffisamment, de façon à maintenir un taux d'humidité relative généralement inférieur à 60% dans la pièce.

Dans le cas d'un bâtiment non climatisé, l'introduction d'air chaud et humide à l'intérieur peut mener à des taux d'humidité relative excessifs dans les endroits naturellement plus frais, comme les sous-sols.

Il existe d'autres procédés de déshumidification de l'air, comme la dessiccation.

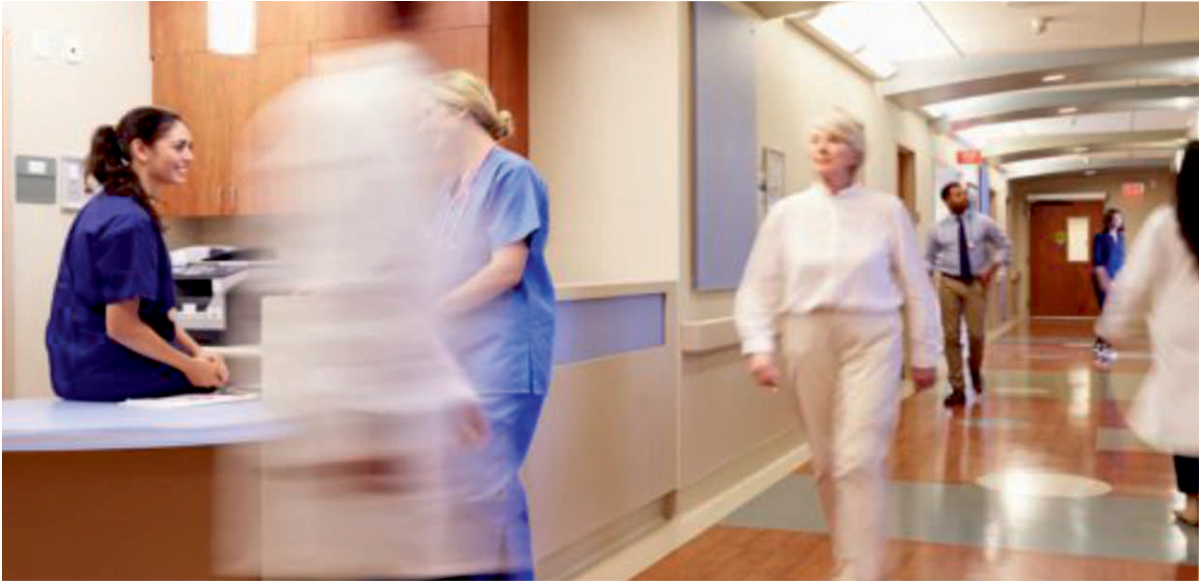
1.2. Le confort thermique des bâtiments:

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. Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort.

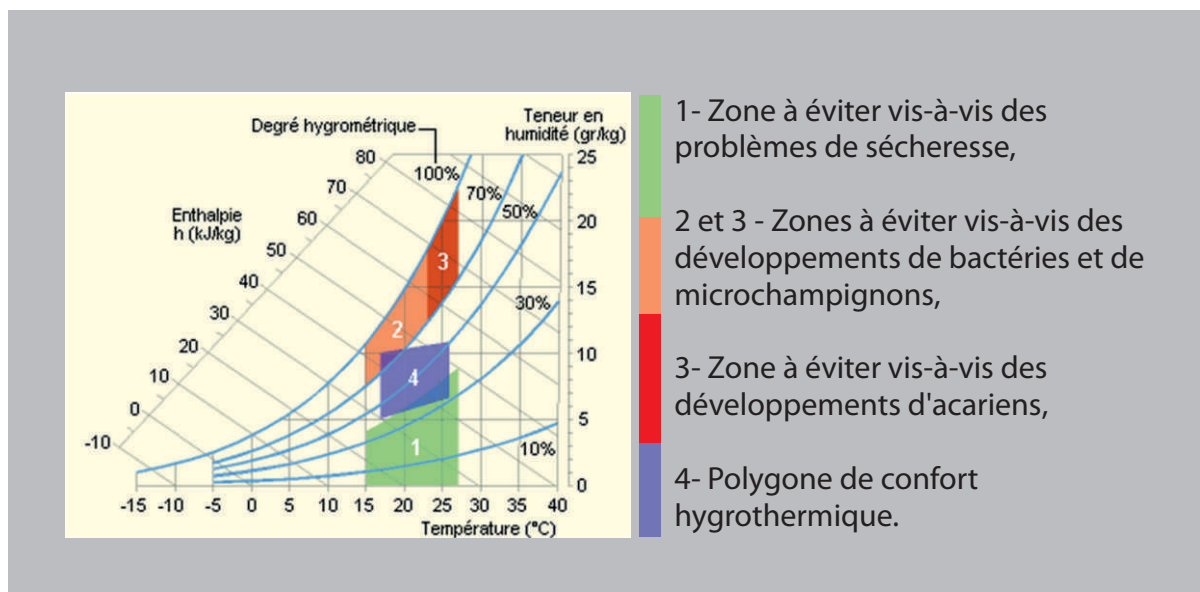
Le confort reste toujours difficilement mesurable et prend diverses formes. Il est plus facile de savoir le moment où l'on se sent confortable que de mesurer exactement les paramètres qui rendent un environnement confortable. Il est plus simple d'évaluer le manque de confort que le confort. La notion de confort est équivalente pour les trois exemples suivants :

TEMPÉRATURE	40°C	32 °c	28 °c
HUMIDITÉ	26%	68%	100 %
VITESSE DE L'AIR	1 m/s	0,1 m/s	0m/s

Tableau 31 : Les paramètres de confort thermique des bâtiments



Etant donné que chaque individu a une sensation de chaleur ou de froid différente, la norme de L'American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) détermine les conditions thermiques qui sont acceptables par au moins 80 % des occupants. Il s'agit de la norme Standard 55-2013 « Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy » (voir Figure 1).



Améliorer le confort dans un lieu de travail où se trouve un groupe de personnes correspond à rechercher des conditions qui seront acceptables pour le plus grand nombre. La norme internationale ISO 7730 considère qu'une situation de confort thermique optimale est celle qui satisfait 90 % des personnes d'un même environnement (6).

Le tableau suivant récapitule les différentes zones de confort et d'inconfort humain en relation avec la température et l'humidité relative du milieu.

Température (°C)	HUMIDITÉ RELATIVE (%)																
	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20
35		58	57	56	54	52	51	49	48	47	45	43	42	41	38	37	
34	58	57	55	53	52	51	49	48	47	45	43	42	41	39	37	36	
33	55	54	52	51	50	48	47	46	44	43	42	40	38	37	36	34	
32	52	51	50	49	47	46	45	43	42	41	39	38	37	36	34	33	
31	50	49	48	46	45	44	43	41	40	39	38	36	35	34	33	31	
30	48	47	46	44	43	42	41	40	38	37	36	35	34	34	31	31	
29	46	45	44	43	42	41	39	38	37	36	34	33	32	31	30		
28	43	42	41	41	39	38	37	36	35	34	33	32	31	29	28		
27	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	28		
26	39	38	37	36	35	34	33	32	31	31	29	28	28	27			
25	37	36	35	34	33	33	32	31	30	29	28	27	27	26			
24	35	34	33	33	32	31	30	29	28	28	27	26	26	25			
23	33	32	32	31	30	29	28	27	27	26	25	24	23				
22	31	29	29	28	28	27	26	26	24	24	23	23					
21	29	29	28	27	27	26	26	24	24	23	23	22					

Tableau 32 : Les différentes zones de confort et d'inconfort humain en relation avec la température et l'humidité relative du milieu

- De 20 à 29 Aucun inconfort attendu
- De 30 à 39 Un certain inconfort; ralentir les activités et hydratation
- De 40 à 45 Beaucoup d'inconfort; éviter les efforts et hydratation régulière
- Supérieur à 45 Danger; probabilité d'un coup de chaleur

Note : pour une activité physique légère et sans chaleur radiante
 Source : Environnement Canada.
 Voir le www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.

1.2.1. Conditions internes de température et d'hygrométrie

Pour le dimensionnement des équipements de chauffage et de refroidissement dans les bâtiments en Tunisie, les conditions intérieures de calcul seront les valeurs de température et d'humidité relative du tableau suivant:

CONDITIONS INTÉRIEURES DE CALCUL : HUMIDITÉ ET TEMPÉRATURE SÈCHE		
Période	Température sèche	Humidité Relative
Été	26°C	60%
Hiver	20°C	55%

Tableau 33 : Les conditions intérieures de température et d'hygrométrie destinées pour le dimensionnement des équipements de chauffage et de refroidissement

1.3. Les conditions climatiques de base pour le dimensionnement des systèmes CVCA:

Le domaine des températures et des humidités extérieures, habituelle en Tunisie est enregistrée dans les données climatiques de base pour le dimensionnement des installations de chauffage et climatisation à l'ANME, mais aussi on peut les trouver sur les sites Météo national ONM et international

La saison de chauffage inclut les mois de décembre, janvier et février (Idem ASHRAE)

La saison de refroidissement inclut les mois de juin, juillet, Août et Septembre (Idem ASHRAE)

1.3.1. Données de base pour le dimensionnement des installations de chauffage:

Ils correspondent aux températures extérieurs de base à prendre en compte pour le calcul des déperditions thermiques des locaux et humidités relatives coïncidentes pour le calcul des équipements d'humidification et ce dans la détermination des puissances de chauffage projetées.

On distingue les cas suivants :

- Les locaux occupés pendant la nuit
- Les locaux occupés uniquement pendant les horaires administratifs de travail

Le tableau suivant récapitule la température de base à prendre pour le calcul de chauffage

	LOCAUX OCCUPÉS PENDANT LA NUIT	LOCAUX OCCUPÉS PENDANT LES HORAIRES ADMINISTRATIFS DE TRAVAIL
Constructions légère à exigences rigoureuses de chauffage	Température correspondante à une fréquence horaire cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de chauffage de 99%.	Température correspondante à une fréquence horaire cumulée entre 7h:00 et 18h:00 sur toute la période de chauffage de 99%.
Constructions avec inertie thermique moyenne	Température correspondante à une fréquence horaire cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de chauffage de 97,5%.	Température correspondante à une fréquence horaire cumulée entre 7h:00 et 18h:00 sur toute la période de chauffage de 97,5%.
Constructions avec inertie thermique importante	Température correspondante à une fréquence horaire cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de chauffage de 95%.	Température correspondante à une fréquence horaire cumulée entre 7h:00 et 18h:00 sur toute la période de chauffage de 95%.

Tableau 34 : Température de base à considérer pour le dimensionnement des équipements de chauffage selon l'occupation des locaux et la classe d'inertie de l'enveloppe

L'évaluation de la classe d'inertie thermique d'un bâtiment, on propose d'utiliser la masse surfacique utile du local ou des locaux concernés. Cette masse surfacique utile est déterminée en calculant la masse totale utile de tous les éléments concernés de la construction et en rapportant cette masse utile à la surface du local ou des locaux concernés. L'approche proposée est une adaptation de la démarche décrite dans les règles Th-G du DTU français. La classe d'inertie thermique en fonction de la masse surfacique est indiquée dans le tableau suivant :

CLASSE D'INERTIE THERMIQUE POUR TEMPÉRATURE DE BASE DE CHAUFFAGE	MASSE SURFACIQUE UTILE (KG/M ² DE PLANCHER)
Constructions légère	< 150
Constructions avec inertie thermique moyenne	150- 500
Constructions avec inertie thermique importante	>500

Tableau 35 : La masse surfacique utile selon la classe d'inertie thermique de la parois d'un bâtiment

Les masses surfaciques utiles pour la détermination de la classe d'inertie thermique des constructions courantes en Tunisie sont le tableau suivant :

NATURE DU PAROIS	MASSE SURFACIQUE UTILE (Kg/m ²)
PLANCHERS	
Plancher haut en dur sans faux plafond	150
Plancher haut en dur avec faux plafond	30
Plancher intermédiaire en dur/revêtement en dur	150
Plancher intermédiaire en dur/revêtement plastique ou moquette	75
Plancher bas en dur/revêtement en dur	150
Plancher bas en dur/revêtement plastique ou moquette	75

Tableau 36 : La masse surfacique utile selon la nature de la paroi des planchers d'un bâtiment

NATURE DU PAROIS	MASSE SURFACIQUE UTILE (Kg/m ²)
MURS EXTERIEURS	
Double cloison en briques creuses avec ou sans isolation thermique	
Epaisseur brique creuse interne ≤ 15cm	90
Epaisseur brique creuse interne ≥ 15cm	150
Mur extérieur en pierre	150
Voile en Béton armé (Epaisseur ≥ 15cm)	150

Tableau 37 : La masse surfacique utile selon la nature des murs extérieurs d'un bâtiment

NATURE DU PAROIS		MASSE SURFACIQUE UTILE (Kg/m ²)
CLOISONS INTERIEURES		
Briques creuses	Cloison de 10 cm	125
	Cloison de 15 cm	150
	Cloison de 20 cm	190
	Cloison de 25 cm	220
Carreaux de Plâtre	Cloison de 7cm	70
	Cloison de 10 cm	100
Voile en Béton armé	Voile de 10 cm	240
	Voile de 15 cm	300
	Voile de 20 cm	300

Tableau n°38 : La masse surfacique utile selon la nature des cloisons intérieures d'un bâtiment

NATURE DU PAROIS		MASSE SURFACIQUE UTILE (Kg/m ²)
PAROIS VERTICALES MITOYENNES		
Briques creuses	Cloison de 10 cm	60
	Cloison de 15 cm	75
	Cloison de 20 cm	85
	Cloison de 25 cm	110
Carreaux de Plâtre	Cloison de 7cm	35
	Cloison de 10 cm	50
Voile en Béton armé	Voile de 10 cm	120
	Voile de 15 cm et plus	150

Tableau n°39 : La masse surfacique utile selon la nature des parois verticales mitoyennes du bâtiment

Exemple de détermination de la classe d'inertie thermique à utiliser dans le choix des températures de base de chauffage

Immeuble de bureaux avec cloison en dur et faux plafond (calcul d'un local type)

	Plancher bas	Plancher haut	Murs extérieurs	Cloisons internes	Parois mitoyennes	Classe d'inertie
Nature de la construction	Plancher bas en dur/ revêtement en dur	Toiture en dur avec faux plafond	Double cloison en briques creuses avec ou sans isolation thermique Ep. brique creuse interne ≤ 15cm	Carreau de plâtre de 7cm	Carreau de plâtre de 10cm	Moyenne
Masse surfacique utile (Kg/m ²)	150	150	90	70	50	
Surface nette (m ²)	16	16	6	85	20	
Total	2400	480	540	560	1000	311Kg/m²

Tableau n°40 : Exemple de détermination de la classe d'inertie thermique à utiliser dans le choix des températures de base de chauffage

Exemple de détermination de la température extérieure pour le dimensionnement chauffage

Donnée:

Ville: Tunis

Local occupée pendant la nuit/ construction avec inertie thermique moyenne

Résultat tiré des tableaux (données climatiques de base): voir annexes

Température extérieurs de base = 5°C

Humidité relative coïncidente = 90%

1.3.2. Données de base pour le dimensionnement des installations de Refroidissement:

Ils correspondent aux températures extérieurs de base et humidités relatives coïncidentes à prendre en compte pour le calcul des apports calorifiques (sensibles et latents) des locaux et ce dans la détermination des puissances des installations de Refroidissement projetées.

On distingue les cas suivants :

- Les locaux avec contrôle usuel de l'humidité relative
- Les locaux avec contrôle rigoureux de l'humidité relative

Le tableau suivant récapitule la température de base à prendre pour le calcul de refroidissement

	LOCAUX AVEC CONTRÔLE USUEL DE L'HUMIDITÉ RELATIVE	LOCAUX OCCUPÉS PENDANT LES HORAIRES ADMINISTRATIFS DE TRAVAIL
Locaux avec exigences rigoureuses de refroidissement	Température correspondante à une fréquence cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de refroidissement de 1% et moyenne des humidités relatives coïncidentes avec cette température.	Locaux avec contrôle rigoureux de l'humidité relative Température correspondante à une fréquence cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de refroidissement de 1% et moyenne des humidités relatives coïncidentes avec cette température, et selon le critère dans le paragraphe humidité.
Locaux refroidis d'une façon discontinue ou locaux occupés pendant les horaires administratifs de travail	Température correspondante à une fréquence cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de refroidissement de 2,5% et moyenne des humidités relatives coïncidentes avec cette température.	Température correspondante à une fréquence cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de refroidissement de 2,5% et moyenne des humidités relatives coïncidentes avec cette température, et selon le critère dans le paragraphe humidité.
Locaux refroidis d'une façon continue	Température correspondante à une fréquence cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de refroidissement de 5% et moyenne des humidités relatives coïncidentes avec cette température.	Température correspondante à une fréquence cumulée pour la journée (24h) sur toute la période de refroidissement de 5% et moyenne des humidités relatives coïncidentes avec cette température, et selon le critère dans le paragraphe humidité.

Tableau 41 : Température de base à prendre en considération pour le calcul de refroidissement

Il est à noter que contrairement au dimensionnement des installations de chauffage qui se base sur une seule valeur de température extérieure, le dimensionnement des installations de refroidissement se base sur des valeurs horaires de température extérieure et d'apport calorifiques (ensoleillement, éclairage artificiel, occupant, équipement, etc.) dans les divers locaux concernés par l'installation.

Les températures extérieures définies ci-dessus sont utilisées comme valeurs maximales de la journée et les valeurs horaires seront déduites à partir de ces valeurs et des amplitudes journalières correspondantes.

Il est bien entendu que seules les heures d'occupation des locaux seront prises en compte pour le dimensionnement des installations.

La température extérieure de base, indiquée pour chaque localité, représente donc la température maximale à prendre en compte pour la journée (Tm).

Les températures correspondantes à chaque heure de la journée de base (Th), nécessaires pour le calcul des charges frigorifiques, doivent être estimées en se basant sur une courbe de distribution standard en fonction de la température maximale (Tm) et de la moyenne saisonnière des amplitudes journalière (AS), indiquées (ces courbes sont disponibles dans les manuels professionnels).

La courbe de distribution suivante est recommandée par l'ASHRAE :

$$Th = Tm - AS * X$$

Avec :

Th : température extérieure de base pour l'heure considérée en °C

Tm : température extérieure de base maximale en °C

AS : Moyenne saisonnière des amplitudes de température en °C

(Tm et AS sont données par les tableaux des données climatiques de base, voir annexes)

X : Coefficient de calcul des températures horaires de base, donné par le tableau suivant :

Heure Solaire	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	0,87	0,92	0,96	0,99	1,00	0,98	0,93	0,84	0,71	0,56	0,39	0,23
Heure Solaire	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
X	0,11	0,003	0,00	0,03	0,10	0,21	0,34	0,47	0,58	0,68	0,76	0,82

Tableau 42 : Coefficient de calcul des températures horaires de base en fonction de l'heure solaire

Exemple de détermination de la température extérieur pour le dimensionnement refroidissement

Donnée :

Ville : Tunis

Local à usage de bureaux (contrôle usuel de l'humidité relative) / bâtiment située à 2Km du bord de la mer.

Résultat tiré des tableaux (données climatiques de base) : voir annexes

Température extérieures de base (Tm) = 35°C

Humidité relative coïncidente (littoral) = 45%

Moyenne saisonnière des amplitudes de température (AS) : 12°C

Le tableau des températures horaires de base (Th) en °C est le suivant :

Heure Solaire	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	24,6	24,0	23,5	23,1	23,0	23,2	23,8	24,9	26,5	28,3	30,3	32,2
Heure Solaire	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
X	33,7	34,6	35,0	34,6	33,8	32,5	30,9	29,4	28,0	26,8	25,9	25,2

L'un des critères de sélection de la température extérieure de base consiste à évaluer le niveau d'exigence concernant le refroidissement du local. Il est évident qu'un refroidissement permettant de réaliser des conditions usuelles de confort ne serait pas classé dans la catégorie exigences rigoureuses de refroidissement. A titre indicatif, nous proposons les cas suivants ou les exigences de refroidissement peuvent être considérées comme rigoureuses :

- Salle d'opération
- Locaux abritant des équipements informatiques ou électroniques particuliers
- Local abritant un process ou des équipements exigeant un seuil maxima de température à respecter strictement (dans le cas où ce seuil de température est utilisé pour déterminer la puissance de refroidissement à installer dans le local).
- Autres applications particulières

1.3.3. Définition des niveaux d'humidité relative retenue pour le dimensionnement des installations de refroidissement:

Selon l'usage de l'installation de refroidissement, on distingue :

- L'humidité relative pour « Littoral » versus « intérieur »
- L'humidité relative coïncidente à utiliser dans le cas de locaux exigeant un contrôle rigoureux de l'humidité relative

1.3.3.1. L'humidité relative pour « Littoral » versus « intérieur »

Selon l'éloignement du site du bord de la mer, on distingue :

- Les zones climatiques donnant sur la mer : on trouve deux valeurs de la moyenne l'humidité relative coïncidente, en fonction de la proximité de mer. Voir tableau en annexes.
- Les bâtiments situés à plus de 10Km du bord de la mer, les valeurs présentées dans les colonnes intitulés « intérieur » sont proposées.
- Les bâtiments situés à moins de 10Km du bord de la mer, les valeurs présentées dans les colonnes intitulés « Littoral » sont proposées.

Ces critères des distances sont similaires aux critères énoncés dans la réglementation thermique française RT. Toute fois, faute de données statistiques sur les variations de l'humidité relative en fonction de ce critère de distance, la détermination de ces valeurs a été réalisée selon les hypothèses suivantes :

- Les valeurs résultantes de l'analyse statistique des données climatiques des différentes localités sont retenues pour les sous-zones « intérieur ».
- Les valeurs correspondantes aux sous-zones « littoral » sont déterminées en fonction des valeurs « intérieur » augmentées de 1,3 fois l'écart type correspondant à chacune des valeurs. Ce multiplicateur présentait un compromis raisonnable permettant d'avoir une valeur de l'humidité relative moyenne coïncidente pour les sous zones « littoral » qui correspond à une augmentation de l'humidité absolue de 3,5 à 5gr/Kg air sec par rapport aux valeurs des sous-zones « intérieur ». Ces valeurs sont comparables à la valeur de 4 gr/Kg d'air sec recommandé dans la réglementation thermique française.

1.3.3.2. L'humidité relative coïncidente à utiliser dans le cas de locaux exigeant un contrôle rigoureux de l'humidité relative

Seules les valeurs indiquées dans les tableaux correspondants aux cas de locaux exigeant un contrôle rigoureux de l'humidité relative a été déterminé en se basant sur les hypothèses suivantes :

- La fréquence cumulée des valeurs observées de l'humidité relative coïncidente peut être représentée par la fréquence cumulée d'une distribution selon une loi normale

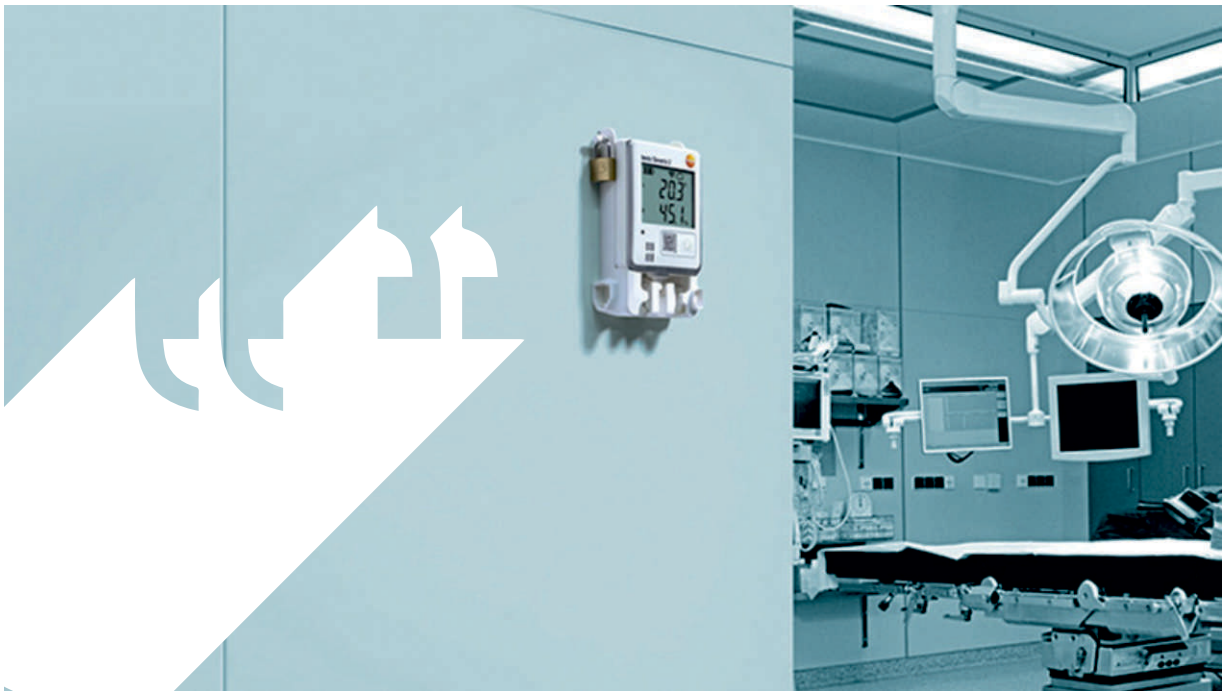
ayant la même moyenne et le même écart type. Cette approximation s'est avérée, en général, assez acceptable pour un certain nombre de données climatiques.

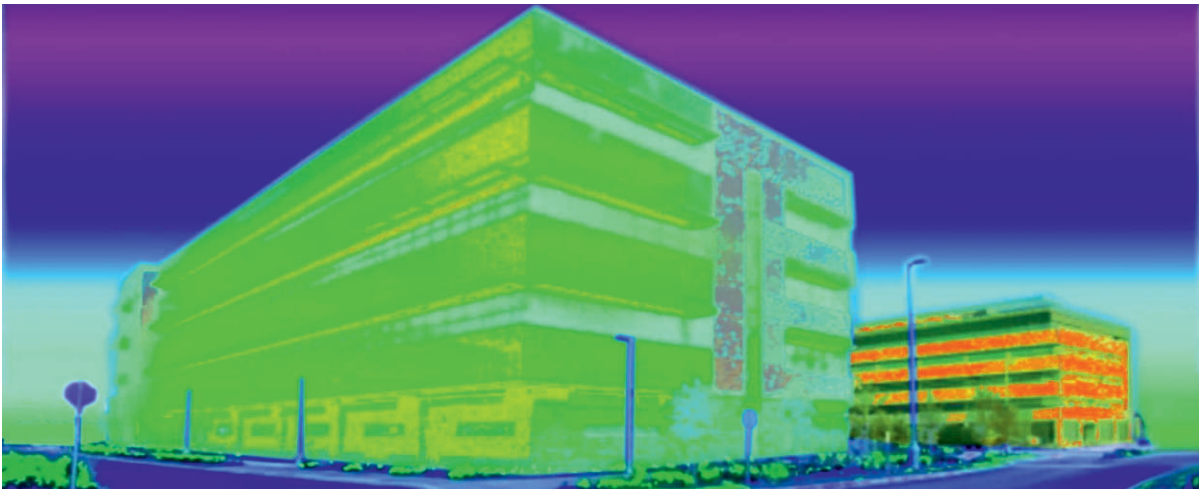
- Pour les bâtiments nécessitant un contrôle rigoureux de l'humidité relative, la valeur proposée comme humidité relative coïncidente, correspond à une valeur dont la fréquence cumulée de la distribution normale est de 2,5 (seulement 2,5% des valeurs des humidités relatives qui peuvent coïncider avec la température de base seraient théoriquement supérieures à cette valeur).
- Concernant les moyennes des humidités relatives coïncidentes retenues pour les sous-zones « littoral », on a retenu un écart type identique aux sous-zones « intérieur »

Le recours au tableau concernant les locaux avec contrôle rigoureux de l'humidité relative est strictement réservé aux applications particulières nécessitant le maintien rigoureux de l'humidité relative au dessous d'un certain seuil.

A titre indicatif, nous proposons les cas suivants ou les exigences de contrôle de l'humidité relative peuvent être considérées comme rigoureuses :

- Salle d'opération
- Locaux abritant des équipements informatiques ou électroniques particuliers
- Local abritant un process ou des équipements exigeant un seuil maxima d'humidité relative.
- Autres applications particulières





1.4. Le bilan thermique des bâtiments:

Afin de faire le bilan thermique d'un bâtiment, il sera utile de préparer tous les données d'entrée au modèle de calcul. En effet, à l'issue de l'étude énergétique préliminaire de l'enveloppe du bâtiment, les données relatives à la nature de la paroi, son orientation, taux vitrage, type de protection solaire, etc. sont supposé déterminée.

Au démarrage de l'étude technique, et afin de déterminer les puissances nécessaires au chauffage et au refroidissement moyennant le bilan thermique, il s'avère que d'autres informations devront être complété tel que, le nombre de personne dans chaque local ou activité, le taux de renouvellement d'air neuf, la nature et la puissance des équipements installée dans le local, la puissance d'éclairage installée, etc.

D'autre part, il est indispensable de déterminer les conditions de confort thermique pour chaque local tel que la température et l'humidité intérieur.

Entre autres les données climatiques de la zone du projet devront être déterminées par la méthode décrite précédemment pour le dimensionnement des installations de chauffage et de refroidissement, (températures et humidité extérieurs).

Chaque local conditionné devra être calculé selon le nombre d'heure de fonctionnement en régime continu ou discontinu.

D'une manière générale, les dispositions qui suivent doivent être prises en considération par les bureaux d'études, les bureaux d'ingénierie et les sociétés de services énergétiques dans leurs opérations de dimensionnement des installations de chauffage, de ventilation et de climatisation.

Le calcul des besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments tertiaires sera conforme aux dispositions de la norme EN 15265, ainsi qu'aux normes EN12831 et ANSI/ASHRAE/ACCA standard 183 - 2007 (CR 2011).

Ces besoins peuvent être calculés par des logiciels de dimensionnement et des outils informatiques simplifiés. Pour cela une multitude de logiciels de calculs existent, dont les plus utilisés en Tunisie sont: TRNSYS, COMFIE, AUTOFLUID, CODYBA, CYPE, ECOTEC, DESIGNBUILDER, CASANOVA, HAP, TAS

Il faut tenir compte des conditions suivantes pour l'évaluation les performances énergétiques d'un bâtiment:

- Conditions intérieures de confort
- Conditions extérieures de calcul
- Renouvellement d'air
- Apports par l'enveloppe du bâtiment
- Apports par l'éclairage
- Autres charges

1.4.1. Bilan de chauffage central

Pour pouvoir garder un niveau acceptable de température et d'humidité en hivers, dans les locaux, il faut prendre en considération les pertes et les apports internes et externes suivants :

- Pertes par transmission à travers une paroi (à travers le mur, les vitres, le plancher, toit) ;
- Pertes par renouvellement et infiltration d'air ;
- Apport divers dû à l'éclairage et aux occupants présents dans la salle.

Le calcul du bilan de chauffage a été réalisé suivant le modèle suivant dont le détail des calculs est spécifié ci-après.

BILAN THERMIQUE CHAUFFAGE

Q1: Apport de chaleur par transmission à travers les parois (KJ)

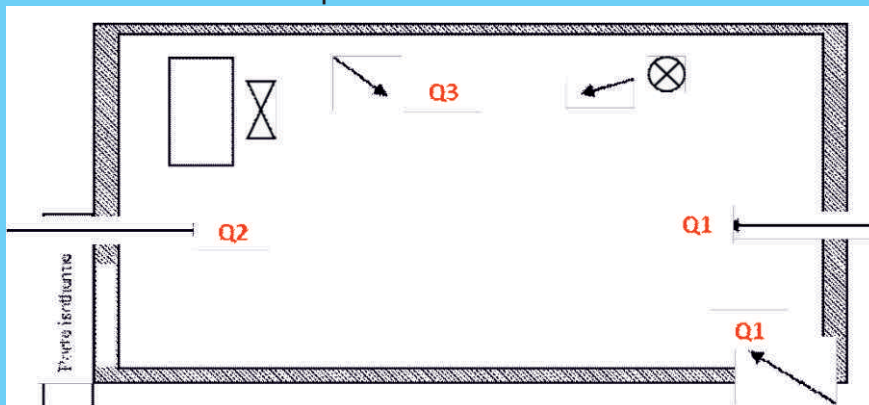
Q2: Apport de chaleur par renouvellement et infiltration d'air (KJ)

Q3: Apport de chaleur divers (KJ) (éclairage, ventilateur, personnels...)

La somme Q_t de tous ces apports journaliers donne la quantité de chaleur à apporté au local,

$$Q_t = Q_1 + Q_2 - Q_3$$

Température extérieure: θ_e
Température intérieure: θ_i



PUISSANCE DE CHAUFFAGE :

$$\Phi_0 = Q_t / (3600 * t)$$

avec : Φ_0 : Puissance de chauffage (KW)

t: Temps de marche de l'installation (h)

APPORT PAR TRANSMISSION À TRAVERS UNE PAROI

Apport à travers les murs :

$$\Phi_{1M} = (K * S + k * l) * \Delta\theta$$

Avec: Φ_1 : Puissance calorifique (W)

K: Coefficient d'échange surfacique global (W/m^2K)

S: Surface extérieure de la paroi (m^2)

k: Coefficient d'échange linéique (W/mK)

l: Longueur intérieure de la liaison (m)

$\Delta\theta$: Ecart de température de part et d'autre de la paroi (K)

Apport de chaleur journalier par transmission à travers les parois (KJ): $Q_{1v} = (3600 * 24 * \Phi_1) / 1000$

Tableau 43 : Bilan thermique de chauffage

Apport à travers les vitres:

$$\Phi_{1v} = (K*S + k*I)*\Delta\theta$$

Avec: Φ_1 : Puissance calorifique (W)K: Coefficient d'échange surfacique global (W/m²K)S: Surface extérieure de la paroi des vitres (m²)

k: Coefficient d'échange linéique (W/m K)

l: Longueur intérieure de la liaison (m)

 $\Delta\theta$: Ecart de température de part et d'autre de la paroi (K)Apport de chaleur journalier par transmission à travers les parois (KJ): $Q_{1M}=(3600*24*\Phi_1)/1000$ *Apport à travers le plancher / toiture*

$$\Phi_{1p} = (K*S + k*I)*\Delta\theta$$

Avec: Φ_1 : Puissance calorifique (W)K: Coefficient d'échange surfacique global (W/m²K)S: Surface extérieure de la paroi de la toiture (m²)

k: Coefficient d'échange linéique (W/m K)

l: Longueur intérieure de la liaison (m)

 $\Delta\theta$: Ecart de température de part et d'autre de la paroi (K)Apport de chaleur journalier par transmission à travers les parois (KJ): $Q_{1M}=(3600*24*\Phi_1)/1000$

$$Q_1=Q_{1M} + Q_{1v} + Q_{1p}$$

APPORT PAR RENOUVELLEMENT ET INFILTRATION D'AIR:

$$Q_2 = N*V*(hi-he)/Ve$$

Avec: Q₂: Apport journalier par renouvellement d'air (KJ)

N: Nombre de renouvellement d'air par jour

V: Volume du local vide (m³)

he: Enthalpie de l'air extérieur (KJ/Kg)

hi: Enthalpie de l'air intérieur (KJ/Kg)

Ve: Volume spécifique de l'air extérieur (m³/Kg)**APPORT DIVERS:***Apport par l'éclairage*

$$Q_E = P*t *3600/1000$$

Avec: Q_E: Apport de chaleur par l'éclairage (KJ)

P: Puissance installée (W)

t: Temps de marche par jour (h)

Apport par les personnes

$$Q_p = P*n*t *3600/1000$$

Avec: Q_p: Apport de chaleur par les personnes (KJ)

P: Puissance dégagée par une personne (W)

n: Nombre de personnes

t: Temps de présence des personnes dans le local par jour (h)

$$Q_3=Q_E+Q_p$$

1.4.2. Bilan de climatisation centrale

Pour pouvoir garder un niveau acceptable de température et d'humidité en été, dans les locaux, il faut prendre en considération les pertes et les apports internes et externes suivants :

- Pertes par transmission à travers une paroi (à travers le mur, les vitres, le plancher, toit) ;
- Pertes par renouvellement et infiltration d'air ;
- Apport divers dû à l'éclairage et aux occupants présents dans la salle.

Le calcul du bilan de climatisation a été réalisé suivant le modèle suivant dont le détail des calculs est spécifié ci-après.

BILAN THERMIQUE CLIMATISATION

Q1: Apport de chaleur par transmission à travers les parois (KJ)

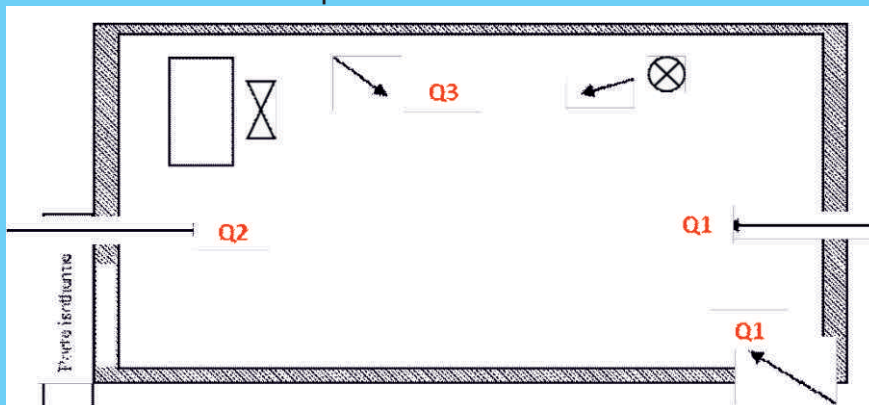
Q2: Apport de chaleur par renouvellement et infiltration d'air (KJ)

Q3: Apport de chaleur divers (KJ) (éclairage, ventilateur, personnels...)

La somme Q_t de tous ces apports journaliers donne la quantité de chaleur à apporté au local.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Température extérieure : θ_e
Température intérieure : θ_i



PUISSANCE DE CHAUFFAGE :

$$\Phi_0 = Q_t / (3600 * t)$$

avec : Φ_0 : Puissance de chauffage (KW)

t : Temps de marche de l'installation (h)

APPORT PAR TRANSMISSION À TRAVERS UNE PAROI

Apport à travers les murs :

$$\Phi_{1M} = (K * S + k * l) * \Delta\theta$$

Avec: Φ_1 : Puissance calorifique (W)

K: Coefficient d'échange surfacique global (W/m^2K)

S: Surface extérieure de la paroi (m^2)

k: Coefficient d'échange linéique ($W/m K$)

l: Longueur intérieure de la liaison (m)

$\Delta\theta$: Ecart de température de part et d'autre de la paroi (K)

Apport de chaleur journalier par transmission à travers les parois (KJ): $Q_{1v} = (3600 * 24 * \Phi_1) / 1000$

Tableau 44 : Bilan thermique de climatisation

Apport à travers les vitres:

$$\Phi_{1v} = (K*S + k*I)*\Delta\theta$$

Avec: Φ_1 : Puissance calorifique (W)K: Coefficient d'échange surfacique global (W/m²K)S: Surface extérieure de la paroi des vitres (m²)

k: Coefficient d'échange linéique (W/m K)

I: Longueur intérieure de la liaison (m)

 $\Delta\theta$: Ecart de température de part et d'autre de la paroi (K)Apport de chaleur journalier par transmission à travers les parois (KJ): $Q_{1v}=(3600*24*\Phi_1)/1000$ *Apport à travers le plancher / toiture*

$$\Phi_{1p} = (K*S + k*I)*\Delta\theta$$

Avec: Φ_1 : Puissance calorifique (W)K: Coefficient d'échange surfacique global (W/m²K)S: Surface extérieure de la paroi de la toiture (m²)

k: Coefficient d'échange linéique (W/m K)

I: Longueur intérieure de la liaison (m)

 $\Delta\theta$: Ecart de température de part et d'autre de la paroi (K)Apport de chaleur journalier par transmission à travers les parois (KJ): $Q_{1p}=(3600*24*\Phi_1)/1000$

$$Q_1=Q_{1M} + Q_{1v} + Q_{1p}$$

APPORT PAR RENOUVELLEMENT ET INFILTRATION D'AIR:

$$Q_2 = N*V*(hi-he)/Ve$$

Avec: Q₂: Apport journalier par renouvellement d'air (KJ)

N: Nombre de renouvellement d'air par jour

V: Volume du local vide (m³)

he: Enthalpie de l'air extérieur (KJ/Kg)

hi: Enthalpie de l'air intérieur (KJ/Kg)

Ve: Volume spécifique de l'air extérieur (m³/Kg)**APPORT DIVERS:***Apport par l'éclairage*

$$Q_E = P*t *3600/1000$$

Avec: Q_E: Apport de chaleur par l'éclairage (KJ)

P: Puissance installée (W)

t: Temps de marche par jour (h)

Apport par les personnes

$$Q_p = P*n*t *3600/1000$$

Avec: Q_p: Apport de chaleur par les personnes (KJ)

P: Puissance dégagée par une personne (W)

n: Nombre de personnes

t: Temps de présence des personnes dans le local par jour (h)

$$Q_3=Q_E+Q_p$$



1.5. La ventilation :

Le renouvellement de l'air intérieur d'un local permet avant tout de satisfaire nos besoins en oxygène et de limiter la pollution intérieure en éliminant les odeurs, les fumées et les substances toxiques.

Renouveler l'air également a également pour fonction d'évacuer la vapeur d'eau produite par les occupants, la cuisine, les appareils sanitaires et ménagers et d'éviter ainsi des condensations et dégradations. Cela permet enfin un fonctionnement normal et sans danger des appareils de combustion, etc.

On distingue deux types de ventilations :

- La ventilation naturelle
- La ventilation mécanique

1.5.1. La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est due à deux effets combinés, dont chacun peut avoir plus ou moins d'importance selon les cas :

- Le tirage, qui apparaît dès qu'il y a des différences de température.
- Le vent qui crée des pressions sur certaines façades, des dépressions sur d'autres.

Ces deux effets ne s'ajoutent pas algébriquement, et se combinent de manière complexe Ceci rend le calcul d'infiltration délicat.

Actuelle pour mieux contrôler parfois les effet néfaste (en hiver, climat trop humides...) , on impose une pression positive intérieure du local ce qui élimine tout risque d'infiltration , par contre pour des raison d'économies d'énergie, et si le climat extérieur le permet , on pratique et on profite de la ventilation naturelle...

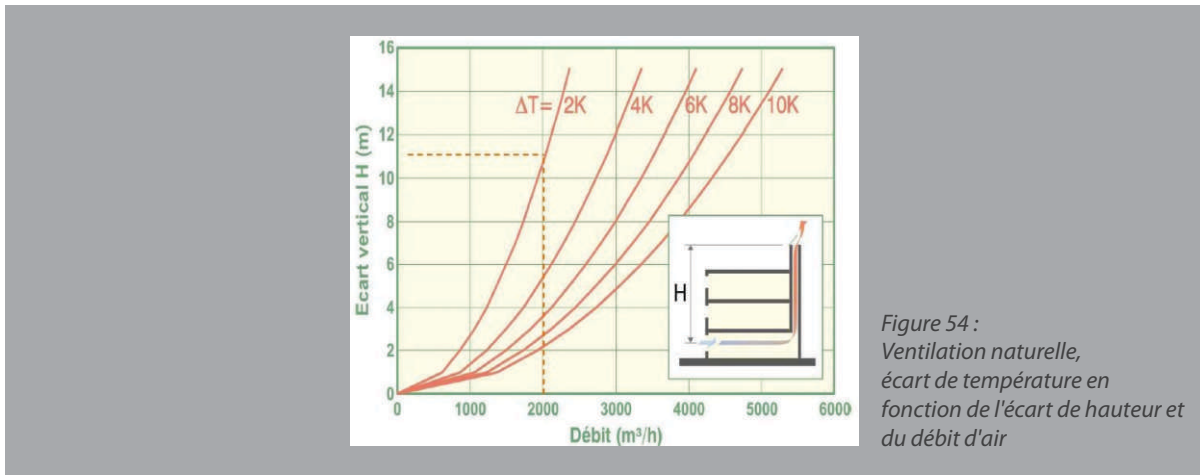
Pour que la ventilation naturelle soit efficace, il faut que le débit d'air soit suffisamment important (5 voir 10 renouvellement horaires).

1.5.1.1. Ventilation transversante entre deux façades ou par une cheminée:

Dans le cas d'une ventilation transversante, le débit dépendra de l'architecture de l'ensemble du bâtiment, il n'est pas possible de donner de règles simples, en effet le régime de vent est fortement influencé par les bâtiments voisins. En ville, si on compte sur la pression due au vent pour introduire une ventilation intensive des essais par soufflerie est nécessaire ou bien par l'utilisation des modélisations numériques telles que le CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC), pour estimer le débit de la ventilation naturelle.

1.5.1.2. Effet cheminée:

L'effet cheminée est le mouvement ascensionnel de l'air dans un bâtiment ou en conduit, du fait que l'air est plus chaud et donc plus léger que l'air ambiant (du fait des charges internes et apports solaires), ce mouvement induit une amenée d'air frais dans le bas du bâtiment et une extraction de l'air chaud par le haut. Ce déplacement d'air est renforcé par l'intensité de l'échauffement et la hauteur du volume où le mouvement se développe (solar chimney), Si on compte sur un effet cheminée, il faut essentiellement veiller à avoir la plus grande distance verticale possible entre les entrées et les sorties d'air. Ceci permettra d'augmenter le débit et/ou de réduire la taille des ouvertures.



Le débit d'air disponible pour deux ouvertures (une fenêtre en bas et une large en haut) de 1 m2 en ventilation transversante en fonction de leur écart vertical et de la différence de température intérieur-extérieur .Par exemple, pour une différence de hauteur de 11m et de température de 2 °C, on dispose d'un débit de ventilation naturelle de 2000 m3/h.

1.5.1.3. Calcul des surfaces des ouvertures :

Le calcul des surfaces des ouvertures d'amenée et d'extraction d'air se fait selon le mode de ventilation naturel : Ventilation unilatérale ou Ventilation transversale et selon les formules indiquées dans la figure suivantes :

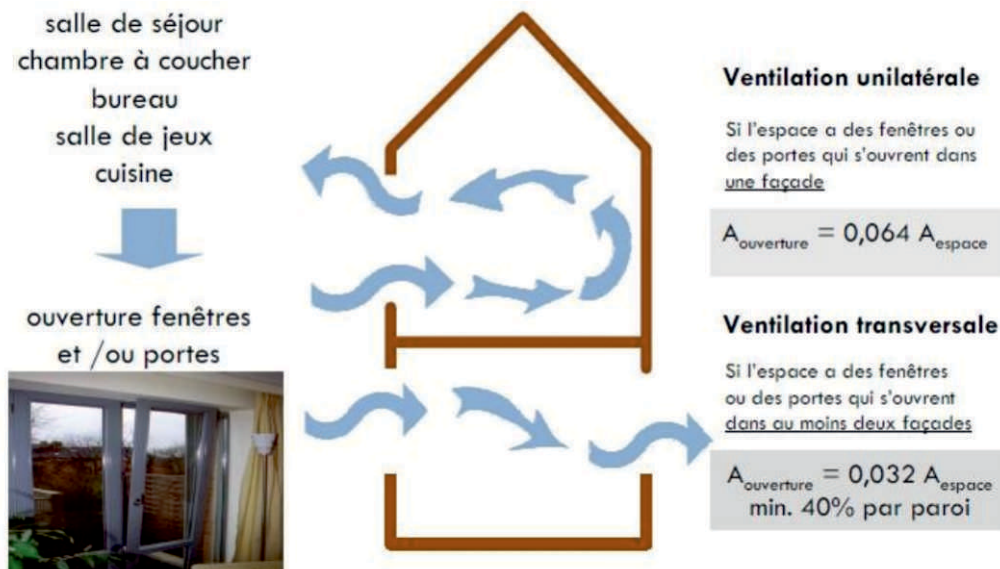


Figure 55 : Ventilation naturelle, unilatéral ou transversale, calcul des ouvertures

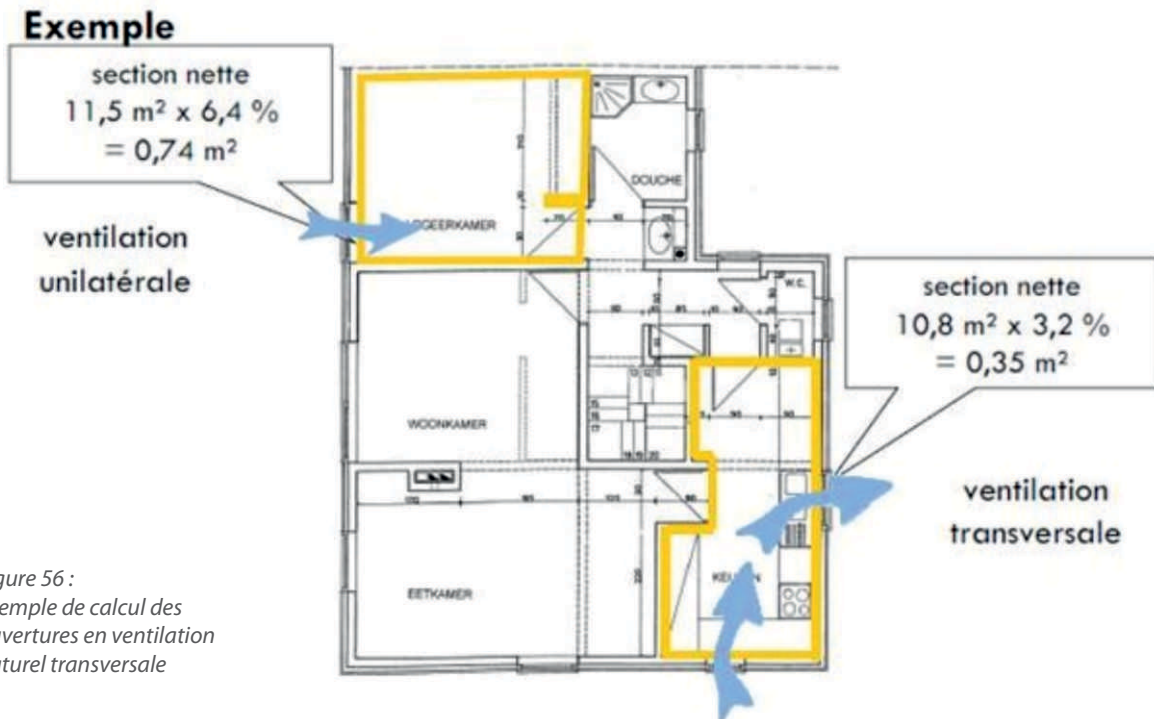


Figure 56 :
 Exemple de calcul des
 ouvertures en ventilation
 naturel transversale

1.5.2. La ventilation mécanique

La ventilation mécanique désignée aussi par la « ventilation mécanique contrôlée » (en abrégé VMC). Dans ce système, l'air neuf est introduit dans les pièces principales (séjour, chambres) et extrait dans les pièces humides (cuisines, salle de bains, WC), l'air balayant le logement pour être extrait dans les locaux où se dégage le maximum de polluant et d'humidité.

Elle est plus précise qu'une ventilation naturelle, ses inconvénients sont évidemment la consommation électrique de ventilateur et le bruit qu'une installation mal conçue peut générer.

On distingue trois types de VMC.

1.5.2.1. VMC simple flux:

Des entrées d'air auto-réglables sont situées dans les pièces principales et l'extraction mécanique de l'air est réalisée dans les pièces de service. Le renouvellement de l'air est constant, et ne tient pas compte de l'humidité ni du nombre d'occupant.

1.5.2.2. VMC hydro-réglable

C'est une VMC simple flux dont les bouches d'entrée modulent le débit de ventilation en fonction de l'occupation et de l'hygrométrie. Le débit d'air varie alors en fonction des besoins réels, d'où des économies d'énergie.

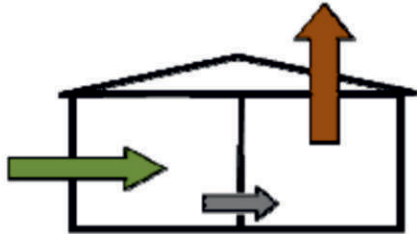
1.5.2.3. VMC double flux

Permet de récupérer le froid (en mode de refroidissement) contenue dans l'air évacué du local, l'air extérieur chaud est partiellement refroidi au moyen d'un échangeur. Cette technique est largement utilisée/très recommandées dans les grands projets, et ceci nécessite une excellente étanchéité à l'air, une gestion centralisée assistée par ordinateur est nécessaire afin de d'augmenter les performances énergétiques.

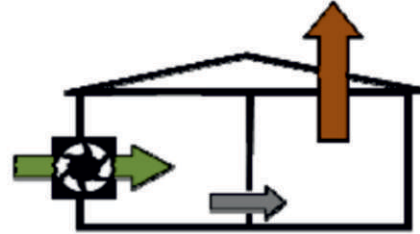
1.5.2.4. Typologie de ventilation mécanique :

On distingue 4 typologies de ventilation mécanique A, B, C et D présentés dans la figure suivantes

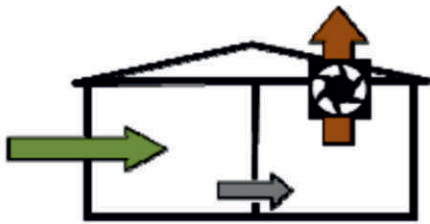
A. alimentation naturelle
+ évacuation naturelle



B. alimentation mécanique
+ évacuation naturelle



C. alimentation naturelle
+ évacuation mécanique



D. alimentation mécanique
+ évacuation mécanique

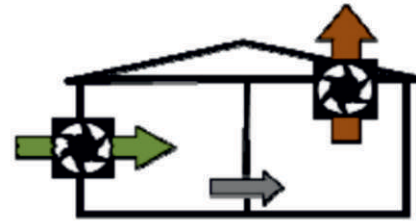


Figure 57 : Typologie de la ventilation mécanique



Le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients de chacune des solutions est présenté dans le tableau suivant :

Type de système	Principe	Avantages	Inconvénients
A Alimentation naturelle + évacuation naturelle	Insufflation: grille réglables dans fenêtres ou murs	<ul style="list-style-type: none"> • Coût peu élevé • Aucune consommation électrique • Peu d'entretien • Réglage grille par grille 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de contrôle des débits • Conduits verticaux et hauteur des débouchés • Réglage manuel et grille par grille • Filtration de l'air entrant • Bruits extérieurs
	Transfert: Fentes sous portes ou grilles dans portes ou murs		
	Extraction: Grilles réglables au départ de conduits verticaux		
B Alimentation mécanique+ évacuation naturelle (ventilation à alimentation mécanique)	Insufflation: Un ventilateur envoie l'air dans les locaux à vivre via des conduits	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne distribution de l'air neuf et contrôle des débits d'air neuf • Diminution des risques de refoulement et d'infiltration • Filtration de l'air neuf (de manière globale) 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommations électriques • Entretien régulier • Favorise la pénétration de l'air humide intérieur dans les parois (bâtiment en surpression) • L'étanchéité à l'air du bâtiment doit être élevée • Conduits verticaux et hauteur des débouchés • Pas de contrôle des débits extraits
	Transfert: Fentes sous portes ou grilles dans portes ou murs		
	Extraction: Grilles réglables au départ de conduits verticaux		
C Alimentation naturelle+ évacuation mécanique (ventilation à extraction mécanique)	Insufflation: grille réglables dans fenêtres ou murs	<ul style="list-style-type: none"> • L'évacuation par des conduits verticaux n'est pas obligatoire • Contrôle des débits d'air extraits • Diminue les risques de problèmes d'humidité dans les murs et dans les toitures. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommations électriques • Entretien régulier • Pas de contrôle des débits d'air amenés • Filtration de l'air entrant • Bruits extérieurs
	Transfert: Fentes sous portes ou grilles dans portes ou murs		
	Extraction: Un ventilateur extrait l'air des locaux humides via des conduits		
D Alimentation mécanique+ évacuation mécanique (ventilation mécanique double flux)	Insufflation: Un ventilateur envoie l'air dans les locaux secs via des conduits	<ul style="list-style-type: none"> • Système très maitrisable quel que soient les conditions climatiques • Très bonne distribution de l'air • Possibilité de commande automatique • Possibilité de récupération de chaleur sur l'air extrait pour préchauffer l'air neuf • Pas de transmission des bruits extérieurs • Filtration de l'air neuf (de manière globale) 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommations électriques • Entretien régulier • Coût élevé • Encombrement des gaines et du groupe • Bruit de l'installation et intérieurs
	Transfert: Fentes sous portes ou grilles dans portes ou murs		
	Extraction: Un ventilateur extrait l'air des locaux humides via des conduits		

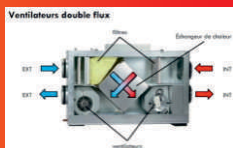


Tableau 45 : Le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients des systèmes de ventilation mécanique

1.5.3. Réglementation sur le traitement de l'air en milieu hospitalier

Le traitement de l'air est fortement réglementé dans le milieu hospitalier. Il existe de nombreuses normes qui permettent de cadrer les méthodes de traitement de l'air:

- Le code du travail
- Le code de la santé publique
- Le règlement sanitaire départemental
- Le code de la construction
- Le code de sécurité

1.5.3.1. La norme NF EN ISO 14644-1 : zone propre "le traitement de l'air en milieu hospitalier"

Une zone propre est un espace dédié dans lequel la concentration des particules en suspension dans l'air est maîtrisée. Et qui est construit et utilisé de façon à minimiser l'introduction, la production et la rétention des particules à l'intérieur de la pièce, et dans lequel d'autres paramètres pertinents, tels que la température, l'humidité et la pression sont maîtrisés comme il convient.

Les origines des microorganismes présents dans l'air de la salle opératoire sont :

- Environnement extérieur
- Locaux voisins
- Personnes présents dans les locaux

Les trois impératifs pour maîtriser le risque infectieux dû à l'environnement sont présentés ci après :

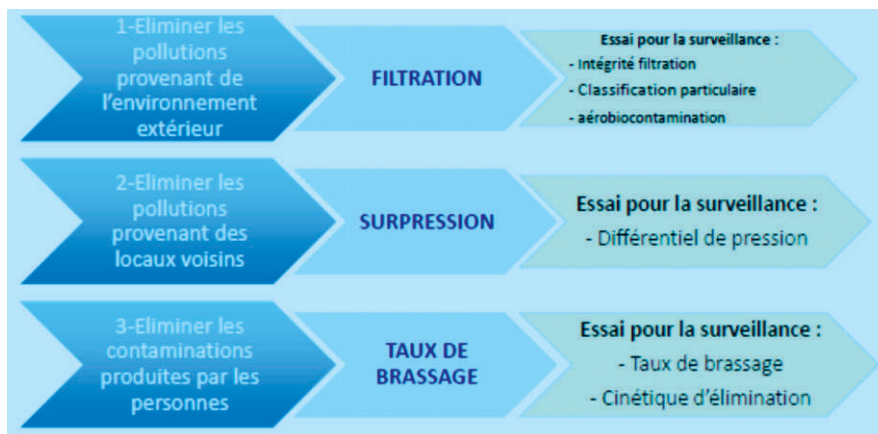


Figure 58 : Les trois impératifs pour maîtriser le risque infectieux

Les classes de propreté de l'Air des salles propres sont récapitulées dans le tableau suivant :

N° de la classification ISO	Concentrations maximales admissibles (particules/m ³ d'air) pour les particules de tailles égales ou supérieures à celles données ci-dessous					
	0,1µ	0,2µ	0,3µ	0,5µ	1µ	5µ
ISO 1	10	-	-	-	-	-
ISO 2	100	24	10	-	-	-
ISO 3	1 000	237	102	35	-	-
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	-
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	-
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7	-	-	-	352 000	83 200	2 930
ISO 8	-	-	-	3 520 000	832 000	29 300
ISO 9	-	-	-	35 200 000	8 320 000	293 000

Tableau 46 : Les classes de propreté de l'air des salles propres

Sachant que le nombre de particules par m3 d'air (diamètre > 0,5μ)

A titre d'exemple voici quelque valeur :

- Ville : 200 millions
- Bureau : 25 millions
- Salle propre : 40 à 4000

Les classes de propreté microbiologique sont récapitulées dans le tableau suivant

Classe de propreté micro biologique	Concentration maximale en nombre de particules viable par mètre cube d air (UFC/M3)
M100	100
M10	10
M1	<1

Tableau 47 : Les classes de propreté microbiologiques

UFC signifie Unité Formant Colonie. Il s'agit du développement de colonies en culture sur un milieu adéquat.

M 10 par exemple signifie qu'il y a une présence de moins de 10 UFC/m3 d'air.

1.5.3.2. La norme NFS 90-351 :

“établissement de santé - Salles propres et environnements maîtrisés apparentés - Exigences relatives pour la maîtrise de la contamination aéroportée”

Cette norme permet de définir les performances des environnements maîtrisés.

Le domaine d'application de la norme **NFS 90-351** s'applique depuis la conception jusqu'à l'utilisation selon le schéma suivant.

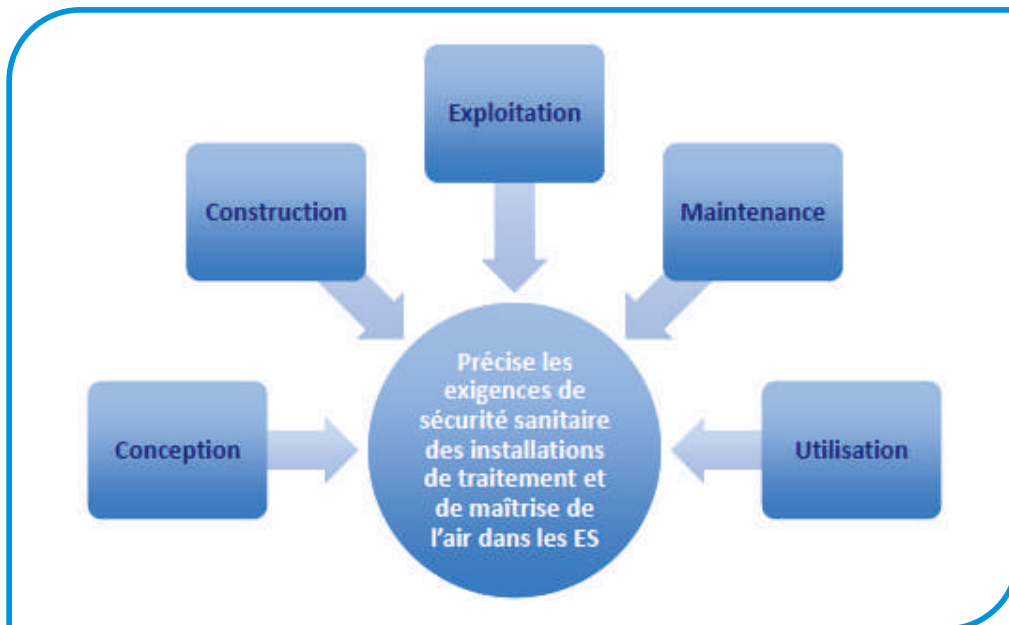


Figure 59 : Domaine d'application de la norme NFS 90-351

Les valeurs guides de performance au repos en fonction du niveau de risque sont récapitulées dans le tableau suivant :

Classe de risque	Classe particulaire	Cinétique d'élimination des particules	Classe Microbiologique	Pression différentielle (+ ou -)	Plage de température	Régime d'écoulement de l'air de la zone à protéger	Taux de brassage de l'air de la zone
4	ISO 5	CP 5	M 1	15 Pa (± 5 Pa)	19 C à 26 C	Flux unidirectionnel	Sous le flux Vitesse d'air de 0,25 m/s à 0,35 m/s Ensemble du local ≥ 6 volumes/heure
3	ISO 7	CP 10	M 10	15 Pa (± 5 Pa)	19 C à 26 C	Flux unidirectionnel ou non	Taux de brassage ≥ 15 volumes/heure
2	ISO 8	CP 20	M 100	15 Pa (± 5 Pa)	19 C à 26 C	Flux non unidirectionnel	Taux de brassage ≥ 10 volumes/heure

Tableau 48 : Les valeurs guides de performance au repos selon le niveau de risque

Les valeurs guides de performance en veille sont récapitulées dans le tableau suivant :

Classe de risque	Classe particulaire	Cinétique d'épuration particulaire	Classe bactériologique	Pression différentielle (+ ou -)	Plage de température	Régime d'écoulement de l'air de la zone à protéger	Taux de brassage de l'air de la zone
4	ISO 8	Non contrôlée	Non contrôlée	15 Pa (± 5 Pa)	15 C à 30 C	Pas de contrainte	.6 vol/h minimum d'air neuf à dimensionner pour obtenir une ΔP de 15 Pa (± 5 Pa) par rapport aux locaux adjacents
3							
2							

Tableau 49 : Les valeurs guides de performance en veille selon le niveau de risque

- **Classification des locaux suivant leur niveau de risques:**
 - * **Zones classées en risque 4** (très haut risque infectieux) Orthopédie, ophtalmologie, immunodéprimés, greffe, grands brûlés, neurologie, cardiologie.
 - * **Zones classées en risque 3** (haut risque infectieux) Obstétrique, réanimation, vasculaire, digestif, endoscopie.
 - * **Zones classées en risque 2** (risque infectieux moyen) Endoscopie, salle de réveil, salle de conditionnement, de stérilisation, urgences, salles de travail, couloir propre.
 - * **Zones classées en risque 1** (risque infectieux nul)

- **Définition des types de flux :**
Il y a deux types de flux : flux unidirectionnel et flux non unidirectionnel, choisi selon la classe de risques.
L'installation d'un flux unidirectionnel ou laminaire permet de limiter le brassage de l'air et d'épandre une contamination à un plus grand volume.

En réponse aux nouvelles exigences de la norme NFS 90-351 , les précautions suivantes ont été prévus:

* **Zone à haut risque infectieux :**

Améliorer la cinétique d'élimination des particules par :

- L'orientation du flux d'air au niveau de la zone opératoire
- Augmenter les débits de soufflage
- Installer une armoire mobile de traitement d'air

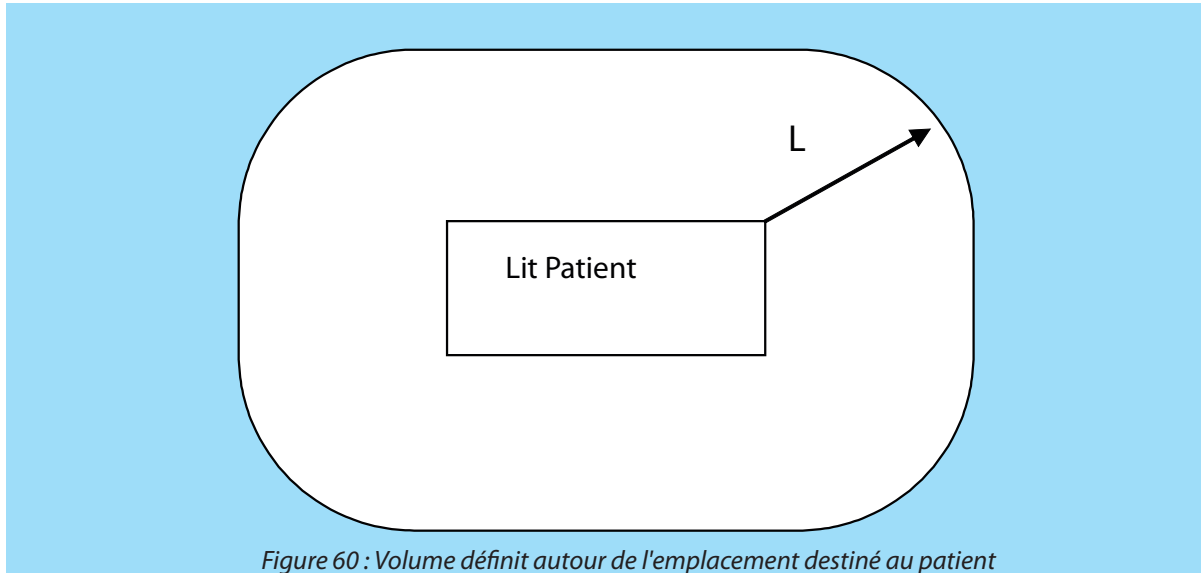
* **Zone à très haut risque infectieux :**

Problématique des plafonds basses vitesses :

- L'obligation d'installer un flux unidirectionnel

La zone d'environnement du patient ou proche environnement du patient est défini comme suit :

- Volume définit autour de l'emplacement destiné au patient et dans lequel l'air ambiant est majoritairement issu de l'équipement terminal de traitement d'air.
- La distance L peut varier entre 0,5 m et 2,5 m



Les classes de risque en fonction du type d'activité sont récapitulés dans le tableau suivant :

Blocs opératoires Types d'activité/acte	Classe de risque	Observation
Salle d'orthopédie prothétique	4*	Pour l'activité avec implant articulaire
Salle polyvalente, d'ORL/OPH et autre orthopédie	3	Pour l'activité sans implant articulaire
Salle de chirurgie digestive et viscérale, urologie	3	Pour l'ensemble de l'activité
Salle de chirurgie cardiovasculaire	3	
Salle de greffe d'organe	4	
Salle d'opération des grands brûlés	4*	Dans le cas d'une utilisation dédiée
Salle de neurochirurgie	3	Pour l'ensemble de l'activité
Salle de chirurgie plastique, esthétique et reconstructrice	3	Pour les actes invasifs
Salle d'obstétrique, gynécologie	3	
Salle d'endoscopie	*	Salle d'endoscopie digestive avec pose d'endoprothèse : classe de risque 1 ou 2
Salle d'arthroscopie	3	Ou 2 selon analyse de risque et appréciation médicale
Salle hémodynamique	3	
Salle de soins près opératoire (SSPO)	2	Si l'établissement de santé juge leur construction ou leur utilisation nécessaire
Salle de soins post interventionnels (SSPI)	2	
Circulation dans les blocs opératoires	2	Concerne la circulation d'accès aux salles d'opération
Stockage dispositif médical stérile	2	
Réanimation types d'activité	Classe de risque	Observation
Chambre polyvalente	2	
Chambre de réanimation néonatale	2	
Chambre patients infectieux	2	Selon analyse de risque et appréciation médicale que la chambre soit conçue pour être maintenue en dépression par rapport à son environnement
Circulation réanimation	2	

Tableau 50 : Les classes de risque en fonction du type d'activité

1.5.3.3. Le code du travail et la réglementation sanitaire départementale

Le code du travail (CT) et la réglementation sanitaire départementale (RSD) cadrent la protection des personnes travaillant dans les locaux hospitaliers et ceux qui n'y travaillent pas (patients et visiteurs) (Keirsbulck, 2006).

Le CT et la RSD définissent deux types de locaux au sein d'un hôpital:

- Les locaux à pollution non spécifique: la contamination est uniquement due à la présence humaine (sauf sanitaires) (exemple: une chambre).
- Les locaux à pollution spécifique: y sont émis des substances dangereuses ou gênantes sous forme de gaz, vapeur, aérosols liquides ou solides et peuvent contenir des sources de micro-organismes potentiellement pathogènes (exemple: un bloc opératoire).

Quelque soit les locaux, une ventilation est obligatoire.

Les chambres de patients doivent être obligatoirement munies d'un système de ventilation mécanique.

Les débits d'air minimum par occupant de locaux à pollution non spécifique sont donnés dans le tableau suivant:

Locaux	Débit d'air neuf minimal par occupant en m ³ /h
bureaux et locaux sans travail physique	25
Locaux de réunion	30
Atelier et local à travail physique modéré	45
Autres ateliers et locaux	60

Tableau 51 : Les débits d'air minimum par occupant de locaux à pollution non spécifique

- Particularités des locaux à pollution spécifique

- * Une prise d'air neuf à 8 mètres minimum de la source de pollution doit être installée.

- * Les débits de renouvellement d'air doivent être supérieurs à ceux donnés pour les locaux à pollution non spécifique et doivent être adaptés au type de pollution et à la quantité émise par la source.

- * Une filtration doit être mise en place pour limiter la pollution par les poussières à 10 mg/m³ d'air et la pollution alvéolaire à 5 mg/m³ d'air sur une durée de 8 heures.

- * La réutilisation de l'air ne peut se faire qu'après une épuration efficace. Cet air ne peut être réinjecté que dans des locaux possédant la même pollution que le fluide initial.

L'air issu des blocs opératoires (locaux à pollution spécifique) ne pourra donc pas être redistribué dans les chambres des patients (locaux à pollution non spécifique).

1.5.3.4. Critères et normes de conception des systèmes à vocation Particulière

La conception fonctionnelle des espaces ainsi que celle des systèmes CVCA doivent être faites en considérant un certain nombre de critères propres à chaque unité fonctionnelle afin de garantir que l'air y sera d'une qualité adéquate.

FONCTION ET SERVICE	ÉLÉMENTS DE CONCEPTION AYANT UNE INFLUENCE SUR LA QUALITÉ D'AIR
Administration	
<ul style="list-style-type: none"> ● Services administratifs ● Soutien au personnel 	<ul style="list-style-type: none"> ● L'application vise le confort, sans exigence particulière reliée au fait qu'il s'agit d'un établissement de santé. ● L'utilisation d'unités avec recirculation de l'air dans la pièce est permise (ventilo-convecteur, thermopompe, etc.).
Services ambulatoires	
<ul style="list-style-type: none"> ● Urgence ● Cliniques externes ● Médecine de jour ● Hôpital de jour ● Chirurgie d'un jour ● Néphrologie ● Oncologie 	<ul style="list-style-type: none"> ● Les salles de décontamination, de triage et d'attente de l'urgence sont des lieux avec un fort potentiel de contamination en raison du fait que certains patients peuvent être porteurs de maladies infectieuses non diagnostiquées. L'air de ces espaces doit donc être évacué directement à l'extérieur, sans aucune recirculation, sauf si une filtration HEPA est installée. ● La salle des plâtres doit être ventilée en pression négative. Selon les produits utilisés, un système d'évacuation spécial peut être requis pour capter la poussière de plâtre, de fibre de verre et de résine époxy. ● Les chambres d'isolement respiratoire et protecteur doivent être conçues conformément aux dispositions du guide Chambre d'isolement infectieux du Répertoire des guides de planification immobilière du MSSS (www.msss.gouv.qc.ca). ● L'air des salles de consultation et de traitement peut être filtré et recirculé en raison d'une moindre concentration des contaminants. ● Le système de distribution de l'air alimentant les salles de consultation et de traitement doit être conçu pour assurer un mouvement d'air provenant de l'arrière du personnel et se dirigeant vers le patient afin de limiter les risques de contamination aéroportée pour le personnel. ● Les exigences de ventilation pour la salle d'opération et celle de réveil pour la chirurgie d'un jour sont les mêmes que pour les chirurgies plus importantes. ● Dans la salle de dialyse, les débits d'air peuvent être importants en raison de la concentration élevée de personnes et d'équipements. Pour assurer le confort des patients, une attention doit être portée notamment à la localisation des diffuseurs et à la vitesse de l'air, limitée à 0,25 m/s à la hauteur du fauteuil. ● La récupération de la chaleur contenue dans l'air évacué doit être considérée, car les débits d'air sont élevés dans la plupart de ces locaux.

Tableau 52 : Critères et normes de conception des systèmes à vocation particulière

	Hospitalisation
<ul style="list-style-type: none"> ● Unité de médecine et de chirurgie – adulte, pédiatrique et d'isolement ● Unité de soins intensifs – adulte et pédiatrique ● Unité néonatale de soins intensifs ● Unité d'obstétrique ● Unité de soins psychiatriques ● Unité de désintoxication ● Unité de soins palliatifs et de fin de vie 	<ul style="list-style-type: none"> ● Les chambres d'isolement respiratoire et protecteur doivent être conçues conformément aux dispositions du guide Chambre d'isolement infectieux du Répertoire des guides de planification immobilière du MSSS (www.msss.gouv.qc.ca). ● Les unités de soins intensifs accueillent des patients dans un état très sérieux, voire critique, qui peuvent avoir des plaies vulnérables à l'infection par voie aérienne. Ces unités doivent être maintenues en tout temps en pression positive par rapport aux locaux voisins. ● Dans l'unité des grands brûlés, l'air devrait être introduit par un diffuseur de type E avec filtre HEPA intégré. La vitesse de l'air devrait être limitée à 0,25 m/s à la hauteur du lit du patient. ● Dans les soins intensifs néonataux, la vitesse de l'air devrait être limitée à 0,25 m/s à la hauteur des incubateurs.
	Services diagnostiques et thérapeutiques
<ul style="list-style-type: none"> ● Bloc opératoire et salles de réveil ● Endoscopie ● Électrophysiologie ● Imagerie médicale ● Inhalothérapie 	<ul style="list-style-type: none"> ● Les systèmes de ventilation alimentant les locaux de chirurgie doivent assurer des conditions d'asepsie très poussées. La conception de ces systèmes nécessite une étude approfondie. L'alimentation d'air se fait par le plafond et le flot d'air doit être dirigé sur le site chirurgical; les retours d'air sont localisés en périphérie de la pièce, généralement au bas et au haut des murs. En ce qui concerne la chirurgie au laser, l'appareil doit être muni de son système de captation à la source. ● La pression d'une salle de chirurgie doit être positive par rapport aux locaux avoisinants. Cette pression doit être maintenue en tout temps. ● La filtration des salles de chirurgie doit être d'au moins MERV 8 pour la filtration primaire et d'au moins MERV 14 pour la filtration secondaire. Une filtration MERV 17 est recommandée. ● Les gains de chaleur provenant des équipements d'imagerie médicale ainsi que les exigences strictes de température et d'humidité à maintenir dans ces locaux renfermant beaucoup de matériel électronique nécessitent des installations de ventilation et de refroidissement spécialement adaptés. ● La salle de bronchoscopie comporte un risque élevé de présence de contaminants aéroportés, et ce, malgré le recours à une hotte ou à une cabine de test. Cette salle doit être maintenue en pression négative et l'air doit être entièrement évacué vers l'extérieur. ● Les systèmes de ventilation du département de radiologie doivent être conçus pour contrôler les odeurs associées à certains traitements ou procédés. ● Les salles d'attente de radiologie présentent un risque de contamination (patient contagieux) et doivent être dotées d'un système de ventilation évacuant l'air directement à l'extérieur sans aucune recirculation, sauf si une filtration HEPA est installée.

Soutien clinique

- Laboratoire médical
- Retraitement des dispositifs médicaux (stérilisation)
- Pharmacie
- Réadaptation
- Nutrition clinique
- Psychologie et service social
- Soutien pastoral
- Morgue et autopsie

- La ventilation des laboratoires et de la pharmacie doit tenir compte particulièrement des activités qui s'y déroulent, et des hottes chimiques et des enceintes de sécurité biologiques qui sont installées dans les locaux. Pour en savoir davantage, consultez des documents de référence spécialisés tels que le ASHRAE Laboratory Design Guide, la norme ANSI/AIHA Z9.5-2003 Laboratory Ventilation et les Lignes directrices en matière de biosécurité en laboratoire de Santé Canada. La conception des systèmes CVCA de l'unité de retraitement des dispositifs médicaux (stérilisation) doit être faite conformément aux recommandations contenues dans le guide Unité de retraitement des dispositifs médicaux du Répertoire des guides de planification immobilière du MSSS (www.msss.gouv.qc.ca).
- Pour les salles de préparation de médicaments dangereux (pharmacie en oncologie), les exigences très précises sont décrites dans le document Salle blanche-préparation des médicaments dangereux du Répertoire des guides de planification immobilière du MSSS (www.msss.gouv.qc.ca).
- La salle d'autopsie et la morgue sont susceptibles d'être fortement contaminées par des bactéries (par exemple la tuberculose) et d'être la source de fortes odeurs. Ces locaux doivent être maintenus en pression négative et l'air doit être entièrement évacué vers l'extérieur, loin des prises d'air et des fenêtres ouvrantes.
- Un taux de ventilation élevé permet de réduire le taux de contamination dans l'air de la salle d'autopsie et de la morgue (principe de dilution). Des systèmes d'évacuation spéciaux peuvent être requis pour contrôler la concentration de formaldéhyde et la poussière d'os.

Soutien général

- Services alimentaires
- Approvisionnement distribution – lingerie
- Archives médicales
- Courrier
- Reproduction
- Transport
- Information
- Téléphonie

- Les conditions de chaleur, d'humidité et d'odeurs que l'on trouve dans les installations du service alimentaire requièrent une conception des systèmes CVCA spécialement adaptée. Ce sujet est couvert en détails par l'ASHRAE.
- La conservation des films peut nécessiter un taux d'humidité plus élevé que dans les locaux avoisinants. Il peut être requis d'assurer un moyen d'humidification local.
- Les locaux d'entretien requièrent en général une évacuation d'air.
- Les locaux d'entretien où il se fait de la soudure doivent être munis d'un système d'évacuation. Les travaux de peinture peuvent nécessiter l'installation de hottes ou d'autres dispositifs pour assurer la QAI ainsi que la sécurité incendie.

<ul style="list-style-type: none"> ● Télécommunication ● Ingénierie, Génie Biomédical ● Salubrité ● Sécurité ● Gestion des déchets ● Entretien des installations ● Entreposage Réception et Expédition ● Salles d'électromécanique 	<ul style="list-style-type: none"> ● La ventilation de la chaufferie doit assurer l'apport d'air nécessaire pour la combustion tout en maintenant des conditions confortables pour le personnel.
Recherche-enseignement-formation	
<ul style="list-style-type: none"> ● Laboratoires spécialisés ● Animalerie ● Salles de cours et administration ● Bibliothèque 	<ul style="list-style-type: none"> ● La ventilation des laboratoires doit tenir compte particulièrement des activités qui s'y déroulent et des hottes chimiques et des enceintes de sécurité biologiques qui sont installées dans les locaux. Pour en savoir davantage, consultez des documents de référence spécialisés tels que le ASHRAE Laboratory Design Guide, la norme ANSI/AIHA Z9.5-2003 Laboratory Ventilation et les Lignes directrices en matière de biosécurité en laboratoire de Santé Canada
Espaces divers	
<ul style="list-style-type: none"> ● Espaces publics ● Garderie 	<ul style="list-style-type: none"> ● La convergence de nombreuses personnes malades, parfois contagieuses, fait en sorte que les services d'accueil constituent un lieu où l'air peut comporter une grande concentration de contaminants. L'air doit donc être évacué directement à l'extérieur, sans aucune recirculation. ● La distribution de l'air dans les locaux d'information, des téléphonistes, de la sécurité, d'inscription et d'admission doit être faite de manière à assurer un mouvement d'air provenant de l'arrière du personnel et se dirigeant vers le patient afin de limiter les risques de contagion aéroportée pour le personnel. ● Les corridors communs (publics) devraient être ventilés en pression négative.
Services d'hébergement et de soins de longue durée	
<ul style="list-style-type: none"> ● Soins physiques de longue durée 	<ul style="list-style-type: none"> ● Les personnes hébergées dans un CHSLD sont pour la plupart très âgées. Elles présentent des pathologies complexes et des incapacités motrices et sensorielles importantes, souvent associées à des problèmes cognitifs, et requièrent un niveau de soins élevé pendant la durée de leur séjour.

- Soins psychiatriques de longue durée.

- La nécessité de contrôler la contamination microbienne n'est pas aussi critique dans un CHSLD que dans un CH, car les résidents ne présentent pas de maladies aiguës et ne subissent pas d'interventions chirurgicales. Cependant, leur état général fragile requiert un environnement sain avec une bonne qualité d'air.
- La ventilation des chambres des résidents doit être pleinement assurée 24 heures sur 24.
- L'aménagement et les systèmes de ventilation doivent être conçus de façon à contrôler les odeurs. Le problème d'odeur est en grande partie causé par l'incontinence de certains résidents.
 - *Lorsque possible, les sources de mauvaises odeurs devraient être confinées rapidement;
 - *L'air des locaux contenant des matières souillées doit être évacué;
 - *Les systèmes de ventilation doivent assurer un mouvement d'air et un apport d'air extérieur suffisant pour bien mélanger et diluer les contaminants qui n'ont pas été directement évacués à la source;
 - *L'absorption par filtre au charbon activé ou au permanganate de potassium activé peut être considérée pour contrôler les odeurs dans les cas où la dilution (apport d'air frais) n'est pas jugée suffisante.
- Les personnes âgées étant très sensibles aux courants d'air, la sélection des diffuseurs doit être faite de manière à assurer une vitesse d'air d'au plus 0,15 m/s dans l'espace occupé. La localisation des diffuseurs doit aussi être déterminée avec une attention particulière.
- Les personnes âgées étant également très sensibles au froid, la température de l'air introduit par les systèmes de ventilation doit être le plus proche possible de la température ambiante de la pièce afin d'éviter une sensation d'inconfort.
- Dans un CHSLD, l'air doit être filtré avec une efficacité MERV 14 afin de limiter la concentration de microorganismes dans l'air.
- Dans un nouveau CH, la climatisation doit être prévue pour les unités d'hébergement de soins de longue durée. Pour un nouveau CHSLD, l'air alimentant les unités d'hébergement (unités de vie) doit être tempéré (déshumidifié).
- Lorsqu'un fumoir est aménagé, l'air de cette pièce doit être évacué à un taux de 30 l/s par personne. De plus, cette pièce doit être conçue pour une occupation maximale de 70 personnes/100 m².
- Considérant les problèmes d'odeurs d'un fumoir, il est de bonne pratique d'installer deux évacuateurs, un premier assurant une évacuation minimale en tout temps pour éviter la propagation des odeurs et un deuxième assurant l'évacuation requise lorsqu'il y a présence de fumeurs.

Espaces loués par d'autres

- Les activités des locataires externes ne doivent avoir aucune incidence sur la qualité de l'air d'un établissement de santé.

Stationnement souterrain

- Un stationnement ou un garage fermé doit être pourvu d'un système de ventilation :
 - *Assurant un apport d'air extérieur pendant les heures d'ouverture;
 - *Limitant la concentration de monoxyde de carbone;
 - *Assurant le maintien d'une pression négative par rapport aux bâtiments contigus afin d'éviter que de l'air contaminé ne s'infilte dans le bâtiment;
 - *Possédant un détecteur de monoxyde de carbone pour contrôler l'arrêt et le départ du système.



1.5.4. La technologie des équipements de ventilation

1.5.4.1. Différents types de ventilateurs

1.5.4.1.1. Ventilateurs centrifuges

Ce sont des ventilateurs dans lesquels l'air rentre dans la roue dans une direction axiale et en sort dans une direction essentiellement parallèle à un plan radial. Ces ventilateurs sont les plus utilisés dans les systèmes de CVC. Ils sont essentiellement utilisés quand l'air doit être véhiculé à travers un réseau de conduits d'air et sont classés selon les critères suivants :

- L'augmentation de pression qu'ils provoquent : ventilateurs à basse pression (0-720 Pa), moyenne pression (720-3 600 Pa) ou haute pression (3 600-*)
- La disposition des aubes : ventilateurs dont la roue est équipée de nombreuses aubes (cages d'écureuil) ou nombre plus restreint d'aubes profilées ou simples.
- La forme des aubes : aubes inclinées vers l'avant (roues à action ; assurant des pressions et des rendements relativement faibles, mais d'une manière étalée sur la courbe de pression), aubes inclinées vers l'arrière (roues à réaction ; assurant des pressions et des rendements relativement élevés, mais d'une manière ponctuelle sur la courbe de pression) ou aubes à extrémité droite (usage particulier).
- Les applications particulières: ventilateurs pour gaz chaud, poussières abrasives, transport pneumatique, etc.



1.5.4.1.2. Ventilateurs hélicoïdes

Ce sont des ventilateurs dans lesquels l'air rentre dans la roue et en sort le long de surfaces cylindriques coaxiales au ventilateur. Ces ventilateurs sont essentiellement utilisés comme ventilateurs de parois ou ventilateurs donnant directement sur l'extérieur d'une façon générale.



1.5.4.1.3. Ventilateurs tangentiels

Ce sont des ventilateurs dans lesquels la trajectoire de l'air dans la roue est essentiellement normale à l'axe, aussi bien à l'entrée qu'à la sortie de la roue. Ces ventilateurs sont utilisés pour permettre d'atteindre des pressions élevées avec un faible encombrement. Lorsqu'ils sont installés à l'extérieur d'un bâtiment (en terrasse ou en toiture) les ventilateurs sont généralement installés dans des caissons ou des tourelles.





1.6. La climatisation :

Comme, en Tunisie, la climatisation est principalement marquée par le refroidissement de l'air, la production du froid est un élément important des systèmes de climatisation, en particulier, en termes de consommation énergétique. Par conséquent, les méthodes de production du froid les plus couramment utilisées dans les systèmes de climatisation sont introduites.

1.6.1. Théorie de la climatisation:

La climatisation d'un espace consiste à maintenir les conditions de l'air à des valeurs fixées selon l'utilisation de cet espace. Les paramètres les plus importants qui affectent la climatisation d'un espace sont les conditions de l'air extérieur, les charges internes et la radiation solaire.

La température, l'hygrométrie, le niveau sonore, la qualité de l'air, la vitesse de circulation de l'air ainsi que son mode de diffusion, etc. sont pris en compte dans le processus du traitement de l'air. De même, diverses technologies faisant appel à l'hydraulique, la thermique, l'aéraulique, l'acoustique, la régulation et l'automatisme sont sollicitées pour répondre à ces exigences.

La climatisation est inhérente à la psychrométrie, l'aéraulique et l'hydraulique qui sont les trois notions suivantes, essentielles à l'étude et au design de système de climatisation centralisée.

1.6.2. Processus élémentaires de la climatisation

Pour assurer une climatisation complète en toutes conditions, quatre fonctions partielles doivent être associées soit chauffer, refroidir, humidifier et déshumidifier. Les processus de base de la climatisation peuvent être particulièrement bien présentés dans un diagramme enthalpie(h), humidité absolue(x).

L'humidité absolue étant constante, un changement de température entraîne toujours un changement de l'humidité relative et de l'enthalpie. De la même manière, l'humidité relative et l'enthalpie changent si l'humidité absolue change et que la température est constante. Ainsi, il n'est pas possible d'ajuster la température et l'humidité relative indépendamment l'une de l'autre.

1.6.2.1. Refroidissement

Cette méthode permet d'obtenir une ambiance interne de confort définie en fonction de la température et de l'humidité. Elle se fait par un ensemble de traitements appliqués à l'air ambiant pour offrir aux occupants des conditions favorables durant toute l'année.

L'objectif de la climatisation de confort est d'assurer le bien-être dans l'habitat, l'amélioration de la productivité pour le personnel et un agrément supplémentaire pour la clientèle dans le tertiaire (magasins, bureaux, bâtiments publics, etc.) ou l'industrie (bureaux, ateliers, etc.). La climatisation intègre la température, l'humidité, la propreté de l'air (impuretés, odeurs), le niveau sonore et la qualité de la diffusion (mouvements d'air, vitesse) comme caractéristiques clés.

La Figure ci-après démontre un procédé de climatisation représenté par un refroidissement et une déshumidification de l'air. En régime permanent, pendant un temps t , les modifications des caractéristiques de l'air durant les processus de refroidissement et de déshumidification sont les suivantes :

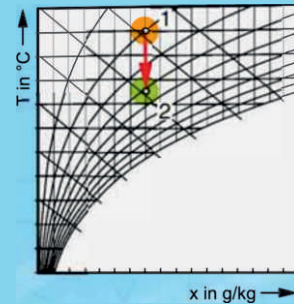


Figure 61 : Processus de refroidissement : retrait de chaleur et augmentation de l'humidité relative

1.6.2.2. Déshumidification

Le refroidissement de l'air, à une température inférieure à son point de rosée, s'accompagne toujours d'une déshumidification. La déshumidification consiste en un refroidissement à 100 % d'humidité relative (saturation) qui entraîne une condensation de l'humidité sur des surfaces froides. Puis, il s'ensuit un réchauffement à la température souhaitée.

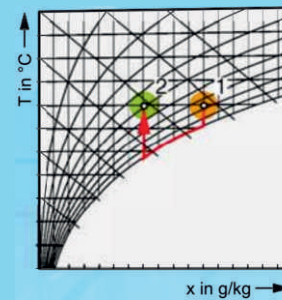


Figure 62 : Processus de déshumidification : diagramme h, x

1.6.2.3. Humidification

De l'air humide contient de l'eau dans un état de vapeur. On fait une distinction entre une humidité absolue et une humidité relative. L'humidité absolue est mesurée en g H₂O/kg d'air sec. Le fait le plus important dans le cadre de la climatisation, c'est l'humidité relative. Elle est perçue par l'homme. L'humidité relative est mesurée en % de l'humidité maximale qu'il est possible d'obtenir à une certaine température. 100% d'humidité relative signifie que l'air ne peut plus absorber de l'air supplémentaire; il est saturé. L'humidité excédentaire reste dès lors dans l'air sous forme de liquide (brouillard). La courbe de saturation, c'est la courbe limite inférieure dans le diagramme h,x.

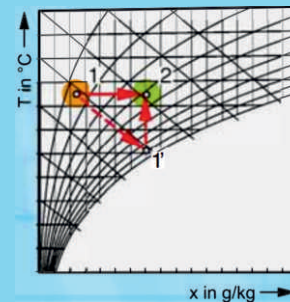


Figure 63 : Processus d'humidification : diagramme h, x

En cas de vapeur d'eau ou de brouillard d'eau, un échauffement supplémentaire est nécessaire afin de compenser le refroidissement dû à une enthalpie de vapeur 1-1'-2.

1.6.3. Théorie du froid

Pour En réalité, la notion de « froid » n'existe pas en thermodynamique, car le froid n'est généré que lorsque la chaleur est transportée d'un endroit à faible température vers un autre endroit à température plus élevée. Lors de ce processus, l'endroit, la substance ou le corps refroidi possède toujours une capacité thermique, tant que la température est située au-dessus du zéro absolu (0 K -273,15°C). Par conséquent, la technique frigorifique est admise comme une partie constituante de la thermodynamique, en s'appuyant sur le cycle de Carnot. Les notions théoriques de base de ce cycle et des transferts thermiques se trouvent à l'Annexe II.

Il existe différents moyens de production de froid, notamment :

- Installation frigorifique à compression ;
- Installation frigorifique à absorption ;
- Installation frigorifique à gaz froid (principe de Stirling) ;
- Production frigorifique thermoélectrique (élément Peltier) ;
- Générateur de froid à vortex ;

1.6.3.1. Installation frigorifique à compression

L'installation frigorifique à compression s'avère l'installation la plus fréquemment utilisée pour la production du froid. Ici, l'effet consistant suivant, soit que l'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une forte absorption de chaleur, est mis à profit. Lors de la condensation de la vapeur, la chaleur est de nouveau émise. Grâce aux différentes pressions survenant lors de l'évaporation et de la condensation, les niveaux de température peuvent être ajustés, de telle sorte qu'il se produise un transport de chaleur du côté froid vers le côté chaud. Comme présenté à la Figure 7, l'agent réfrigérant circule dans un circuit fermé : il s'agit d'un cycle frigorifique. Au lieu du compresseur à pistons, comme présenté dans la figure, un compresseur à vis, un compresseur scroll, un turbocompresseur ou un compresseur à éjection de vapeur peuvent également être utilisés (voir Section 2). Comme agent réfrigérant, des liquides à ébullition légère, comme les hydrocarbures fluorés (HF), le propane, le dioxyde de carbone (CO₂) ou l'ammoniaque (NH₃), peuvent être employés.

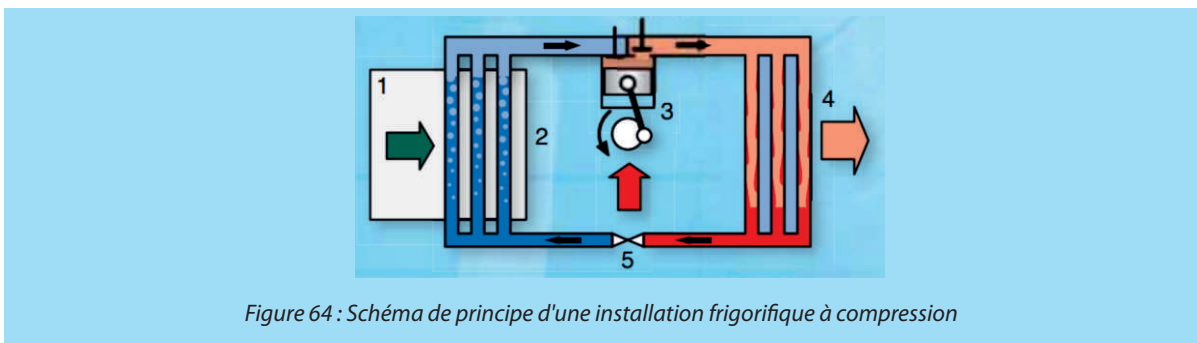
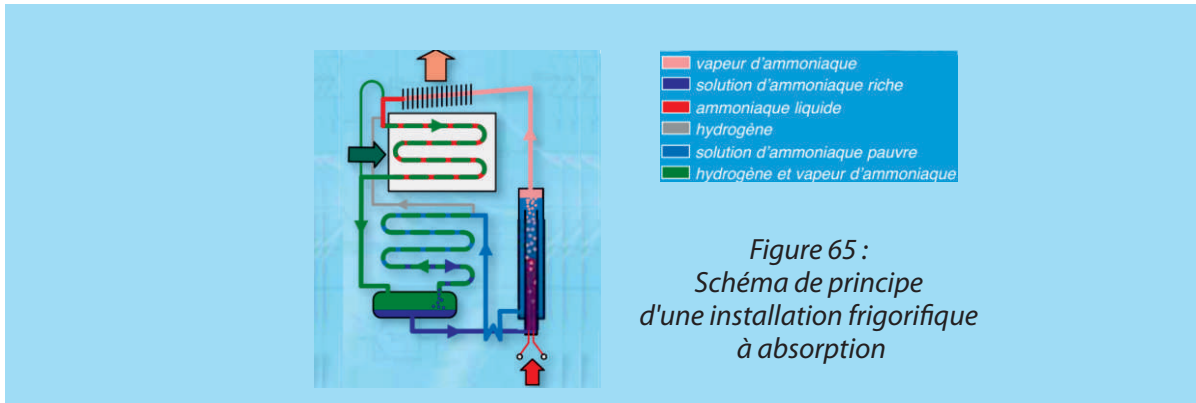


Figure 64 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à compression

Dans le cas le plus simple, une installation frigorifique à compression se compose d'un évaporateur (2) installé dans la pièce devant être refroidie (1), d'un compresseur (3), d'un condenseur (4) et d'un élément d'expansion (5).

1.6.3.2. Installation frigorifique à absorption

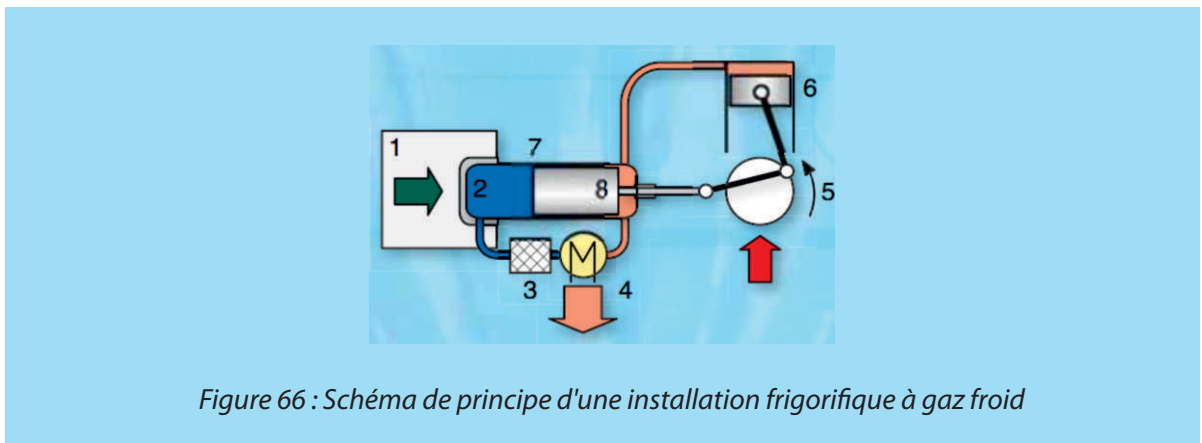
Dans le cas d'une installation à absorption, l'ammoniaque est utilisée comme agent réfrigérant. Comme dans une installation frigorifique à compression, l'ammoniaque liquide se dissipe dans un évaporateur, celui-ci se chargeant de chaleur. Dans un absorbeur, l'ammoniaque sous forme de vapeur est ensuite dissoute dans l'eau. La solution eau/ammoniaque est chauffée, de telle sorte que se dégage de l'ammoniaque sous forme de vapeur. Dans un condenseur, la vapeur ammoniaque est de nouveau condensée pour en faire de l'ammoniaque liquide.



Afin de pouvoir établir une différence de température entre l'évaporation et la condensation, il faut créer une différence de pression. Celle-ci est produite par une pompe pour la solution ou pour ce que l'on appelle un gaz auxiliaire (hydrogène [H₂]). En utilisant le gaz auxiliaire, il est possible de faire l'économie d'une pompe, et l'installation frigorifique ne possède pas de pièces mobiles. L'arrivée de l'énergie d'entraînement s'effectue par le bouilleur et elle est uniquement thermique. Le réchauffement du bouilleur peut s'effectuer électriquement ou avec du gaz. La chaleur perdue ou l'énergie solaire peuvent également être utilisées comme source de chaleur pour le fonctionnement d'un système frigorifique à absorption.

1.6.3.3. Installation frigorifique à gaz froid

L'installation frigorifique à gaz réfrigérant, opérant selon le principe de Stirling, est utilisée pour produire des températures très basses. Elle peut être utilisée pour la condensation de l'air ou le refroidissement de caméras à infrarouge. L'installation frigorifique à gaz froid correspond au moteur Stirling connu, sauf que le sens de la rotation est inversé. Ainsi, le sens du passage du cycle est inversé et une machine motrice devient une machine productrice de travail comme pompe à chaleur.



L'installation frigorifique à gaz froid se compose d'un cylindre moteur (6) et d'un cylindre de refoulement (7). Dans le cylindre moteur, le gaz de travail (très souvent de l'hélium) est tantôt comprimé tantôt étendu. Le gaz chaud comprimé émet sa chaleur dans l'échangeur de chaleur (4). Lors de l'expansion, le gaz se refroidit et absorbe sur le côté froid (2) du cylindre de refoulement de la chaleur de la pièce devant être refroidie (1). Le piston de refoulement (8) et les pistons moteurs (6) sont déplacés en un déphasage correspondant par une commande manivelle (5). Le récupérateur (3) augmente le rendement.

1.6.3.4. Installation frigorifique thermoélectrique

Les installations frigorifiques thermoélectriques opèrent avec l'effet Peltier. Ce mode de fonctionnement correspond à l'inversion du fonctionnement du thermocouple que l'on connaît de la mesure de la température. Dans le cas de l'élément Peltier, un matériau semi-conducteur spécial est utilisé. Il est possible d'obtenir des températures très basses, le rendement diminuant cependant fortement avec une augmentation de la différence de température.

Les éléments Peltier sont utilisés avec du courant continu, la direction du courant indiquant la direction qu'emprunte le transport de la chaleur. Pour cette raison, les éléments Peltier peuvent refroidir et chauffer ; ils sont facilement réglables et ne possèdent pas de parties mobiles ou des admissions de liquides.

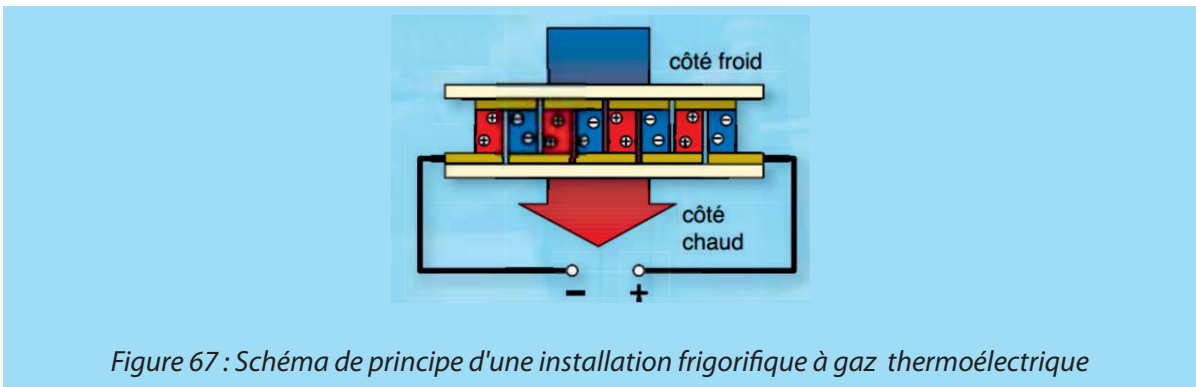


Figure 67 : Schéma de principe d'une installation frigorifique à gaz thermoélectrique

1.6.3.5. Générateur de froid à vortex

Le générateur de froid à vortex fait partie des machines frigorifiques exceptionnelles. La Figure 11 montre un flux d'air froid et chaud produit à partir d'un flux d'air comprimé venant de la température ambiante. L'air comprimé entre de manière tangentielle dans une chambre à vortex et est mis en rotation rapide. Au centre du vortex, il se forme un flux d'air froid, alors que la couche extérieure du vortex se réchauffe. L'air froid est retiré au centre et peut servir au refroidissement.

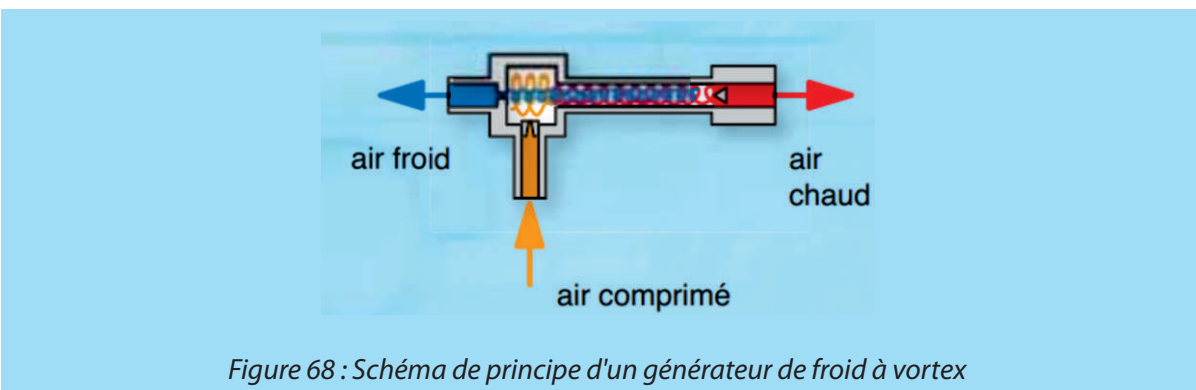


Figure 68 : Schéma de principe d'un générateur de froid à vortex

Cette machine frigorifique comporte les avantages suivants : elle a une structure simple, elle ne possède pas de pièces mobiles et elle ne requiert pas de carburants toxiques ni aucune alimentation en courant électrique. L'inconvénient réside en son faible rendement.

1.6.4. Systèmes de production du froid

Pour produire du froid, différents moyens et procédés existent comme il est présenté dans la Section 1. Les deux principales techniques du refroidissement employées dans les systèmes de climatisation centralisée sont par compression et par absorption.

L'adjonction d'un stockage permet de réduire ou d'éliminer l'impact des systèmes de climatisation basé sur des systèmes à compresseur électrique sur la pointe de puissance du bâtiment et du réseau électrique.

Le rejet de chaleur par les systèmes de climatisation peut utiliser des tours de refroidissement à l'eau ou à l'air.

Cette section présente les équipements principaux qui composent les refroidisseurs et éléments de stockage en mettant en avant les performances et applications de chaque élément dans une optique de réduire la consommation énergétique du système de climatisation centralisée.

Tout d'abord, les différents indices de performance des refroidisseurs sont rappelés.

1.6.4.1. Rappels sur les indices de performance des refroidisseurs

Les indices de performance des systèmes de refroidissement sont exprimés de différentes façons dans le marché. Deux types d'indices permettent de quantifier les performances des unités généralement, il s'agit : du coefficient de performance (COP) et du taux de rendement énergétique (EER). Chacun de ces indicateurs de performance est brièvement présenté ci-dessous.

*1.6.4.1.1. Coefficient de performance

- Le COP indique la performance d'un système de refroidissement par le rapport de l'effet de refroidissement produit en kW à l'énergie consommée par le compresseur, en kilowatts également. C'est donc un indicateur adimensionnel.
- $COP = \text{kW d'effet de refroidissement} / \text{kW entrée au compresseur}$.
- Le COP est mesuré à pleine charge et donc ne peut représenter avec précision les performances d'un appareil utilisé à des charges variables durant une saison de climatisation. Un second indice de performance a donc été créé, soit le SCOP (Seasonal COP).
- Le SCOP est calculé à partir de quatre mesures à charge et conditions du condenseur fixé par la norme de calcul.
- $SCOP = 0,03 \times SCOPA + 0,33 \times SCOPB + 0,41 \times SCOPC + 0,23 \times SCOPD$
- Où :
- SCOPA est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 35/30 à un taux de charge de 100 %.
- SCOPB est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 30/26 à un taux de charge de 75 %.
- SCOPC est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 25/22 à un taux de charge de 50 %.
- SCOPD est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 20/18 à un taux de charge de 25 %.

*1.6.4.1.2. Taux de rendement énergétique

Ce terme retrouvé dans la littérature anglaise sous le vocable « Energy Efficiency Ratio », avec l'acronyme EER, est l'unité la plus souvent utilisée dans les unités de climatisation qui incluent à la fois un compresseur et un circuit de réfrigérant, mais aussi pour les ventilateurs servant à faire circuler l'air climatisé dans le bâtiment ainsi que les ventilateurs utilisés pour les tours de refroidissement, le plus souvent à l'air. Le EER exclut les pompes d'eau glacée.

refroidissement résidentielles qu'aux unités de refroidissement pouvant atteindre 1 500 kW de capacité et il intègre l'ensemble de l'énergie électrique consommée par l'unité. L'EER en unité métrique se calcule comme suit :

$$\text{EER} = \text{kW de refroidissement} / \text{kW d'énergie consommée}$$

Le EER se calcule à des conditions normalisées de 35 °C au condenseur pour les unités air/eau et à 30 °C au condenseur pour les unités eau/eau. La principale limitation du EER est qu'il est calculé pour une unité à pleine charge, une condition qui se rencontre très rarement sur une application de climatisation saisonnière.

En Europe, Eurovent certification évalue la performance des refroidisseurs par l'indice ESEER qui signifie European Energy Efficiency Ratio. Ce ratio est calculé à partir de tests réalisés à quatre points d'opération et auxquels est appliquée une pondération qui représente les temps de fonctionnement estimés du refroidisseur à chaque niveau de chargement sur une saison.

$$\text{ESEER} = 0,03 \times \text{EERA} + 0,33 \times \text{EERB} + 0,41 \times \text{EERC} + 0,23 \times \text{EER}$$

Où :

- EERA est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 35/30 à un taux de charge de 100 %.
- EERB est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 30/26 à un taux de charge de 75 %.
- EERC est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 25/22 à un taux de charge de 50 %.
- EERD est évalué à une température air et eau à l'entrée du condenseur de 20/18 à un taux de charge de 25 %.

1.6.5. Cycle de compression mécanique de vapeur et composantes

Dans un cycle de refroidissement à compression mécanique de vapeur, un fluide circulant en circuit fermé traverse les différents éléments en changeant de phase (Figure 1). Les principales étapes du cycle sont : la compression, la condensation, la détente et l'évaporation.

Compression : le gaz est aspiré à basse pression et à basse température, il sera porté à haute pression et à haute température grâce à l'énergie mécanique du compresseur.

Condensation : les gaz chauds venant du compresseur sont dirigés vers le condenseur qui permettra aux gaz de se condenser par échange avec un fluide extérieur (l'eau, l'air, etc.) à température et à pression constante après dissipation de l'énergie de surchauffe du réfrigérant.

Détente : le liquide formé dans le condenseur est détendu par abaissement brusque de la pression au passage du détendeur.

Évaporation : le fluide liquide provenant du détendeur va entrer en ébullition dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur au fluide extérieur, (l'eau, l'air, etc.) à pression et à température constante.

Deux étapes intermédiaires sont à souligner : le sous-refroidissement et la surchauffe. Le sous-refroidissement du fluide entre le condenseur et l'appareil de détente a lieu pour assurer son passage total à l'état liquide. Il est généralement de 4 à 7 °C. Contrairement à la surchauffe, il ne présente aucun danger direct pour l'installation mais l'efficacité du cycle en dépend.

La surchauffe : entre l'évaporateur et le compresseur permet de s'assurer que tout le fluide s'est évaporé pour éviter les coups de liquide. Une surchauffe trop élevée influence le taux de compression du fluide et donc l'efficacité du compresseur. Elle est généralement de 5 à 8 °C et est régulée par le détendeur.

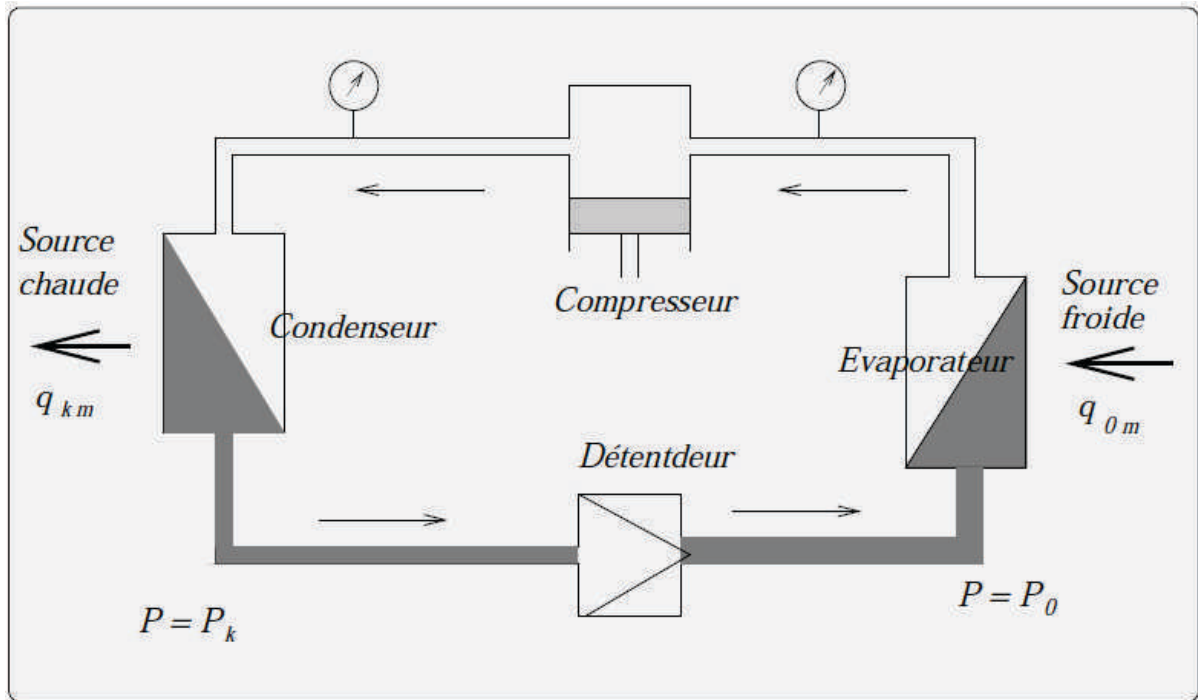




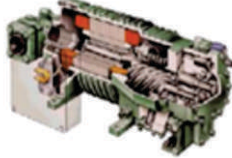
Figure 69 : Principe d'une machine frigorifique simple à compression mécanique

La performance d'un cycle frigorifique simple à compression mécanique varie en fonction de l'écart de température entre la source froide et la source chaude. Pour une diminution de 1 °K de la source froide, le COP baisse de 1,8 % et une augmentation de 1 °K de la source froide fait augmenter le COP de 1,6 % environ. Même si ces valeurs ne sont que de nature indicative, elles peuvent permettre à un expert en climatisation d'évaluer rapidement les économies liées à une optimisation du point de consigne pour l'eau glacée d'un groupe.

Dans cette section, les parties suivantes décrivent les caractéristiques des différents éléments qui composent les refroidisseurs à compression alimentant les systèmes de climatisation centralisée ainsi que leurs performances respectives.

1.6.5.1. Compresseurs

Les compresseurs qui sont intégrés aux refroidisseurs d'eau utilisent quatre technologies différentes, soit les compresseurs à pistons, à spirales, à vis et centrifuges dont les principales caractéristiques sont présentées au Tableau 1. En ce qui a trait aux unités de ventilation au toit de plus faible capacité, elles sont munies, en général, de compresseurs à spirales.

Mode de compression	Type	Description	Gamme de puissance frigorifique	Performance COP minimum ¹	Régulation adaptée
Volumétrique à pistons	Semi-hermétique	<p>Le compresseur et le moteur d'entraînement sont logés dans un carter commun. Véritable compromis entre les types ouvert et hermétique à pistons, il présente une étanchéité imparfaite et un prix relativement élevé.</p>  <p>4</p>	de quelques dizaines de kW à quelques centaines de kW recourant à plusieurs compresseurs	<p>Refroidissement à l'air : 3,0 Refroidissement à l'eau : 4,0</p>	<p>Un compresseur à plusieurs étages ou plusieurs compresseurs en cascade ("centrale") Variation de la vitesse de rotation</p>
	hermétique à pistons	<p>De type compact, aucun de ces éléments n'est accessible, car le moteur et le compresseur sont enfermés dans une enveloppe unique. Utilisé dans les pompes à chaleur.</p>  <p>5</p>	Utilisé pour les petite et moyenne puissances (jusqu'à 30 kW).	<p>Refroidissement à l'air : 3,0 Refroidissement à l'eau : 4,0</p>	<p>Régulation type "marche/arrêt" commandée par thermostat d'ambiance ou sur circuit d'eau. Tendance actuelle : plusieurs compresseurs en cascade ("centrale")</p>
Volumétrique à vis	Machines ouverte ou fermée	<p>Les compresseurs à vis modernes ont des rotors à profils asymétriques. Ils peuvent être de types ouvert ou fermé. Le rendement volumétrique d'un compresseur à vis est bon grâce à l'absence d'espaces morts, l'inverse des compresseurs à pistons. Excellente fiabilité et longévité.</p>  <p>6</p>	A partir de 20 kW jusqu'à 1 200 kW	<p>Refroidissement à l'air : 4,5 Refroidissement à l'eau : >Jusqu'à 800 kW : 4,6 >Supérieur à 800 kW : 5,0 Très efficaces avec de l'eau de refroidissement à basse température comparés aux compresseurs centrifuges.</p>	<p>Plage de réglage de 10 à 100 % avec un rendement assez constant, du moins au-dessus de 50 % de la puissance nominale Modulation par « tiroirs »</p>

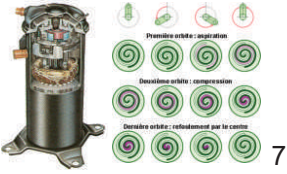

Mode de compression	Type	Description	Gamme de puissance frigorifique	Performance COP minimum ³	Régulation adaptée
Volumétrique à spirales (Scroll)	Spiro-orbital	<p>Les compresseurs sont composés de deux rouleaux identiques en forme de spirale. Grande longévité et sont souvent installés dans des unités de ventilation ou de refroidisseurs à air monoblocs sur toit.</p>  <p>7</p>	Puissance moyenne limitée autour de 40 kW par compresseur, mais peut aller jusqu'à 300 kW avec plusieurs compresseurs disposés en parallèle.	<p>Environ 4</p> <p>En principe, supérieur aux compresseurs à pistons</p>	Modulation de puissance optimale, par variation de la vitesse de rotation ou par mise en "centrale"
Centrifuge ou turbo compresseur	Ouvert et fermé	<p>Une turbine à régime élevé comprime le fluide frigorigène fournissant une pression de refoulement constante pour une vaste gamme de débit de gaz. Application aux grands centres commerciaux et industriels.</p>  <p>9</p>	Puissance de réfrigération pouvant atteindre 1 000 kW et au-delà.	<p>Refroidissement à l'air : 3,8</p> <p>Refroidissement à l'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> > Jusqu'à 800 kW : 4,5 > Supérieur à 800 kW : 4,7 > 	<p>Plage de réglage de 35 à 100 %.</p> <p>Régulation par prérotation du fluide frigorigène à l'entrée de la roue.</p>

Tableau 53 : Les caractéristiques techniques des différents types de compresseurs

1.6.5.2. Condenseur

Les condenseurs sont des échangeurs de chaleur utilisés pour évacuer la chaleur produite par le refroidisseur dans un milieu extérieur, appelé médium de condensation, soit l'air soit un circuit d'eau relié en général à une tour d'eau ou encore à un plan d'eau (bassin artificiel, rivière, lac, mer).

Les processus physiques qui se déroulent dans un condenseur sont les suivants :

- Désurchauffe : le fluide frigorigène à haute pression sous forme de vapeur diminue de température à partir de la sortie du compresseur et atteint la température de condensation ;
- Condensation du fluide frigorigène à température constante ;
Sous-refroidissement pour s'assurer que le fluide frigorigène est sous forme liquide dans son ensemble avant son passage dans la vanne de détente.

Les critères généraux de choix d'un condenseur reposent sur le rendement, l'encombrement, le système de régulation et le niveau de bruit.

Les condenseurs intégrés aux systèmes de refroidissement utilisent deux principales approches ; l'échange direct de chaleur entre le fluide frigorigène et le médium de

refroidissement (condenseurs à l'air, condenseurs évaporatifs ou condenseurs à l'eau) ou l'installation d'un circuit d'eau de condensation qui comprendra un condenseur à l'eau sur la machine frigorifique et une composante extérieure qui permettra la dissipation de chaleur dans l'air ambiant. Sur ce dernier type de système, on retrouve des systèmes de circulation d'eau de condensation de type fermé (pas de contact entre l'eau de condenseur et l'air extérieur) comme les aérogénérateurs ou les tours de refroidissement fermé et ceux de type ouvert (l'eau du condenseur est en contact avec l'air extérieur) qui sont désignés sous l'appellation de tours de refroidissement ouvert ou tours d'eau.

Les systèmes de condenseurs à l'air, de condenseurs évaporatifs et de condenseurs à l'eau requièrent une certaine proximité entre le compresseur et le condenseur due aux limites maximum de pertes de charge admissibles du côté fluide frigorigène.

Dans tous les cas, la puissance du système doit être égale à la puissance frigorifique absorbée à l'évaporateur plus la puissance du moteur électrique du compresseur.

1.6.5.2.1. Condenseur à l'air (fluide réfrigérant – air)

Le médium de refroidissement du fluide frigorigène est l'air et le transfert de chaleur s'effectue au travers d'un échangeur. En matière d'efficacité énergétique, ce type de condenseur entraîne une pression et une température de condensation supérieure à d'autres types de système, notamment ceux qui utilisent l'effet évaporatif pour le refroidissement. C'est donc un système relativement énergivore ce qui fait que bien des concepteurs vont lui préférer un système avec effet évaporatif pour les systèmes de plus grande capacité de refroidissement, en autant que l'eau soit disponible en quantité suffisante et à un coût abordable.

On retrouve donc les systèmes à l'air dans les systèmes de moyenne puissance et également dans les systèmes à plus grande puissance dans la région où l'accès à l'eau est limité.

La technologie du condenseur à l'air est la plus simple de tous les systèmes de dissipation de chaleur. Le réfrigérant sous forme de vapeur surchauffée pénètre par le collecteur supérieur et le liquide sous-refroidi s'évacue par le collecteur inférieur ().



Figure 70: Condenseur à air forcé

En raison du faible coefficient de transmission de l'air, les condenseurs à l'air des systèmes de climatisation centralisée utilisent plusieurs ventilateurs hélicoïdaux ou centrifuges afin de disposer de grandes surfaces d'échange avec des débits de ventilation importants. Ceci permet d'augmenter le coefficient global d'échange (K) entre le fluide frigorigène à haute pression et l'air extérieur.

La puissance de ventilation est habituellement de l'ordre de 20 à 40 W par kW thermique, pour un débit d'air considéré de 300 à 600 m³/h par kW thermique.

Le coefficient d'échange d'un condenseur est compris entre 20 à 30 [W/m².K] avec une différence de température sur l'air entre 5 et 10 °C et un écart entre la température de condensation du fluide frigorigène et celle d'entrée entre 10 et 20 °C. Une base de 0,3 à 0,4 m²/kW est considérée pour le calcul de la surface d'échange de la batterie.

1.6.5.2.2. Condenseur évaporatif (fluide frigorigène – air et effet évaporatif)

Il s'agit d'un condenseur de fluide frigorigène qui intègre dans son enceinte les systèmes de refroidissement par jet d'eau (effet évaporatif) et par circulation d'air soufflée). L'air entre « froid et sec » et en sort « chaud et humide » au contact de l'eau pulvérisée à contre-courant et des serpentins dans lesquels passe le fluide frigorigène qui entre sous forme de gaz surchauffé pour en sortir sous forme liquide. La différence de température entre l'eau à l'entrée du condenseur et la température humide de l'air se situe entre 3 et 7 °C et l'écart entre la température de condensation et celle de l'eau est d'environ 5 °C.

L'évaporation de l'eau permet d'augmenter l'énergie dissipée et de réduire ainsi la température de condensation, en valorisant le changement d'état de l'eau pulvérisée sous forme de gouttelettes qui vaporisent au contact des tubes où circule le fluide frigorigène.

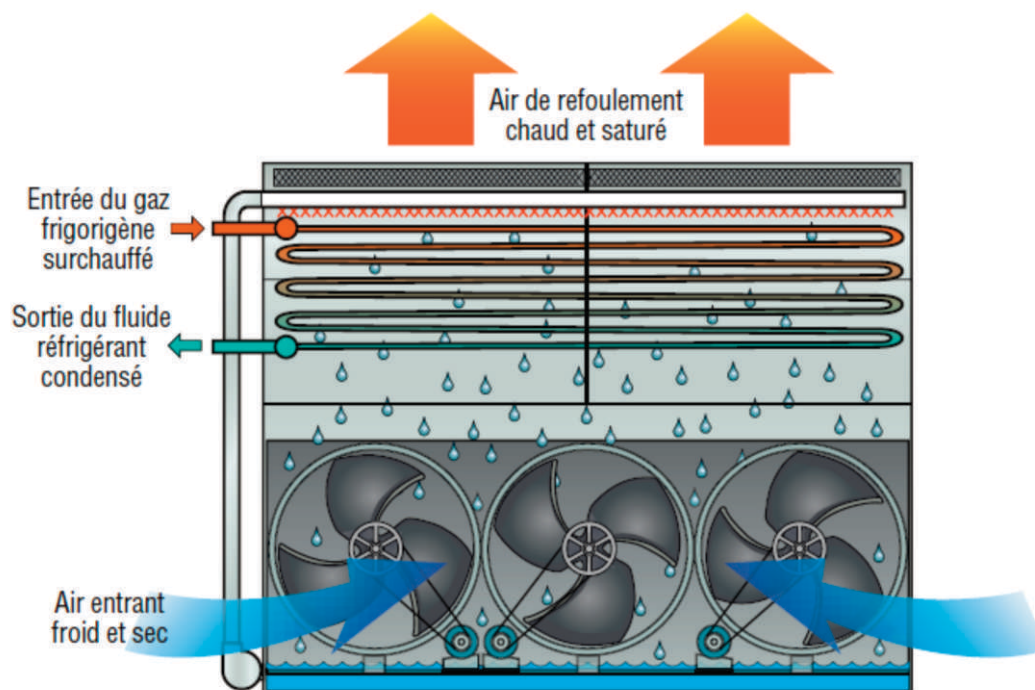


Figure 71 : Principe de fonctionnement d'un condenseur évaporatif

Source : EVAPCO, systèmes de condensation frigorigène à haute efficacité

¹⁰ Georges Vrinat. *Production du froid : Technologie des machines industrielles*. TI, Juillet 2001

¹¹ Mohamed Youbi-Idrissi. *Technique du froid et composants frigorigènes*, Université Marne la Vallée, 2006

¹² Mohamed Youbi-Idrissi. *Techniques du froid et composants frigorigènes*. Cemagref, 2006

Avec ce système, les débits d'eau et d'air sont réduits, ce qui diminue, par conséquent, la consommation d'énergie. Les condenseurs évaporatifs ont un besoin en eau de 50 à 100 fois plus faible par rapport à un circuit ouvert dans lequel l'eau est perdue.

Le débit d'air préconisé est 0,02 m³/s par kW thermique et celui de l'eau est de 0,02 litre/s par kW thermique. Un appoint d'eau de 260 l/h par kW thermique est également indiqué.

Il existe deux configurations de condenseurs évaporatifs :

- **Condenseur évaporatif simple** : fonctionne en « température de bulbe humide » pour permettre de valoriser la vaporisation afin d'abaisser la température de condensation ;
- **Condenseur évaporatif mixte** : optimise la consommation d'eau de refroidissement grâce aux trois modes de fonctionnement suivants :
- **Mode sec** : fonctionne comme un condenseur à air lorsque la température extérieure chute et favorable à une condensation basée sur un échange de chaleur sensible,
- **Mode adiabatique** : l'air est pré-refroidi (échange adiabatique) afin d'assurer une température de condensation inférieure à celle obtenue en mode "sec",
- **Mode combiné sec et humide** : la batterie supérieure à ailettes fonctionne à pleine capacité pendant que celle à surface lisse module en fonction de pression de la condensation pour garantir au niveau du condenseur, une température basse dans le but d'améliorer les performances du compresseur.

En Europe, le condenseur évaporatif est classé comme le système de refroidissement le plus performant du point de vue énergétique. Il est mis en valeur par le dispositif des Certificats d'économies d'énergie (CEE) et les BAT (Best available technics).

1.6.5.2.3. Condenseur à l'eau (fluide réfrigérant – eau)

Ce type de système est doté d'un échangeur de chaleur qui permet au fluide frigorigène d'échanger directement la chaleur avec une eau de refroidissement provenant de l'extérieur. Ce système est encore peu répandu pour les applications de refroidissement central, car il exige des investissements importants pour l'alimentation en eau de rivière, de lac ou de mer incluant les traitements requis pour maintenir l'échangeur de chaleur propre. L'utilisation d'eau potable des aqueducs municipaux est généralement non recommandée ou carrément interdite selon les juridictions. Il existe deux sortes de condenseurs à l'eau : les condenseurs à l'eau perdue et ceux à l'eau recyclée. Les condenseurs à l'eau perdue sont les plus utilisés pour les applications de climatisation centrale compte tenu du fait que la source de dissipation est souvent un plan d'eau naturel. Les applications en eau recyclée demandent la présence de grand bassin d'évaporation et donc un site de taille appropriée. Son principal avantage est que l'eau y est en circuit fermé et donc plus facile à contrôler au point de vue des impuretés et traitement chimique.

Condenseur à l'eau perdue : l'eau de refroidissement des vapeurs de fluide frigorigène est rejetée dans une réserve d'eau considérée infinie (barrage, retenue d'eau, rivière, mer, fleuve, etc.). Le coefficient d'échange de ce condenseur est de 10 à 30 fois plus élevé que celui d'un condenseur à l'air, ce qui réduit ses dimensions en plus de permettre la plupart du temps un fonctionnement de la machine frigorigène avec une pression et une température de condensation plus faible et donc, à meilleur rendement. La différence de température sur l'eau est de 5 à 15 °C et l'écart moyen entre la température de condensation du fluide frigorigène et celle de l'eau est de 10 à 20 °C. Plusieurs configurations de condenseurs à l'eau existent :

- Condenseur à l'eau à doubles tubes : constitué de deux tubes concentriques, l'eau

¹³ Georges Vrinat. Production du froid : Technologie des machines industrielles. T1, Juillet 2001

circule dans le tube central tandis que le fluide frigorigène se désurchauffe, se liquéfie et se sous refroidit dans l'espace annulaire, permettant ainsi une possibilité d'évacuation de la chaleur du fluide frigorigène vers l'extérieur. La circulation eau/fluide frigorigène s'effectue généralement à contre-courant (meilleures performances), les puissances échangées sont relativement faibles et le coefficient global d'échange (K) varie entre 700 et 950 W/m².K.

- Condenseur à l'eau multitubulaire () : constitué de plusieurs tubes en parallèle, son faisceau tubulaire est enclos dans un corps circulaire appelé calandre. La vitesse de circulation de l'eau de refroidissement dans les tubes est de 1 à 1,25 m/s. Le fluide frigorigène se condense dans la calandre au contact des tubes où circule l'eau de refroidissement. Le coefficient global d'échange (K) est compris entre 700 et 1 100 W/m².K.

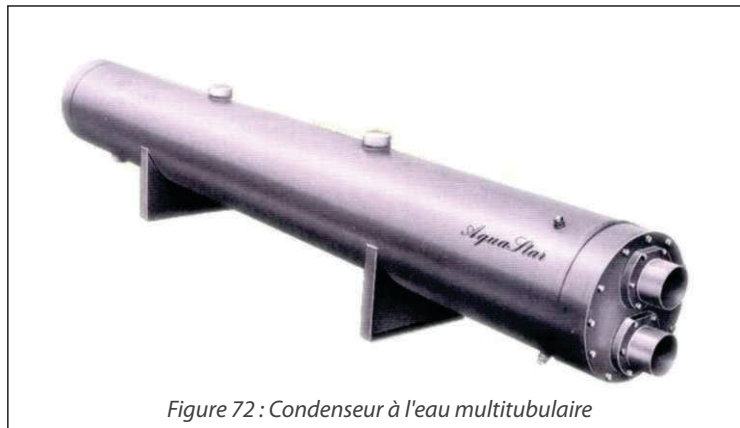


Figure 72 : Condenseur à l'eau multitubulaire

Source : La page du frigoriste

Ces systèmes ont été utilisés notamment dans la baie de Victoria à Hong Kong (eau de mer), à la ville de Toronto (refroidissement à partir de l'eau du lac Ontario) et récemment à la ville de Genève en puisant l'eau du lac Léman. Dans le cas de Genève, l'eau pompée est suffisamment froide pour être utilisée directement pour un premier stage de rafraîchissement de l'air dans les systèmes de ventilation et elle peut également être utilisée comme eau de condensation pour les machines frigorifiques à compression. La basse température de condensation qui en résulte permet d'augmenter l'efficacité et la capacité des groupes froids.

La Figure 5 illustre la pose d'une canalisation au lac Léman.



Figure 73 :
Pose de canalisation pour eau de
rafraîchissement/condensation

¹⁴ Site SIG : <http://www.sig-ge.ch/clients/grandes-entreprises/les-energies/vos-solutions-de-chaaleur-et-de-froid/froid-renouvelable/le-projet-genilac>
Source: Site RTFlash, recherche et technologie, 2012.

1.6.5.2.4. Aérorefroidisseur (eau du condenseur – air extérieur)

Ce type de refroidisseur a une allure semblable à celle d'un condenseur à l'air, à la différence que c'est de l'eau provenant du condenseur situé à proximité du compresseur de réfrigération qui circule dans les tubes à la place du fluide frigorigène (Figure 6). L'effet de refroidissement est obtenu par la circulation d'air extérieur qui est entraîné par des ventilateurs et qui circule au travers de la surface d'échange. Cependant, le fait qu'il n'y ait pas d'évaporation d'eau ne permet pas d'avoir un refroidissement intense et ce système est donc également plus énergivore que les condenseurs évaporatifs ou les tours de refroidissement en circuit ouvert.



Figure 74 : Schéma d'un aérorefroidisseur
Source : www.energie.wallonie.be

La régulation de cet appareil agit en tout ou rien ou en proportionnel sur le débit d'eau parcourant la batterie d'échange ou sur le nombre de ses ventilateurs hélicoïdes en action. Les avantages de cet équipement sont surtout : ses faibles coûts d'entretien, de consommation électrique modérée et sa consommation d'eau nulle qui évite les problèmes de contamination tels que ceux trouvés dans l'eau des tours de refroidissement. Son principal inconvénient est sa puissance de refroidissement réduite lorsque les conditions de température de l'air extérieur sont élevées. Ce type de refroidisseur n'est pratiquement pas utilisé dans les pays chauds où le condenseur à l'air (réfrigérant – air) ou les tours d'eau (eau de condensation – air) y sont préférés.

1.6.5.2.5. Tour de refroidissement à circuit ouvert (eau du condenseur – air extérieur avec effet évaporatif)

L'eau chaude issue du condenseur situé près de la machine de réfrigération est refroidie pour être réutilisée par un équipement spécial appelé « Tour de refroidissement » ou « tour d'eau ».

Il existe deux grands principes, soit la tour de refroidissement à circuit ouvert, soit la tour de refroidissement à circuit fermé.

En ce qui a trait aux tours à circuit ouvert, l'eau échauffée dans le condenseur est mis en présence d'un courant d'air (souvent à contre-courant), une partie de cette eau s'évapore dans l'air refroidissant la fraction restée liquide. Cette eau refroidie est ensuite récupérée dans un bac pour être à nouveau renvoyée vers le condenseur de la machine frigorifique. L'effet d'évaporation permet d'opérer le système de réfrigération à une pression et à une température de condensation plus faible que pour un condenseur à l'air d'où un gain de rendement du compresseur.

- › L'efficacité du système est influencée par la présence de tartre, en raison de la chaleur et de la présence de sels dans l'eau qui diminuent les échanges thermiques et réduisent, par conséquent, la performance du système. Un traitement chimique rigoureux est donc requis, d'une part, pour s'assurer du maintien de l'efficacité de refroidissement et, d'autre part, pour éviter la dérive à la hausse des températures de l'eau du condenseur (perte d'efficacité et de capacité du compresseur). Il existe également des filtres mécaniques à sable permettant de réduire les impuretés en suspension dans l'eau des tours de refroidissement.
- › La tour de refroidissement est munie de ventilateurs (centrifuges ou hélicoïdes) pour forcer le passage de l'air. L'eau chauffée dans le condenseur entre dans la tour par la

partie haute par une rampe de distribution munie de pulvérisateurs. L'eau est pulvérisée à partir des buses et divisée en fines gouttelettes pour améliorer l'évaporation. Elle ruisselle ensuite par gravité sur une surface d'échange air-eau (nids d'abeilles). L'eau refroidie tombe dans un bac où elle est recueillie pour aller condenser à nouveau le fluide frigorigène (par l'intermédiaire d'un circulateur ou pompe de recirculation) (Figure 7).

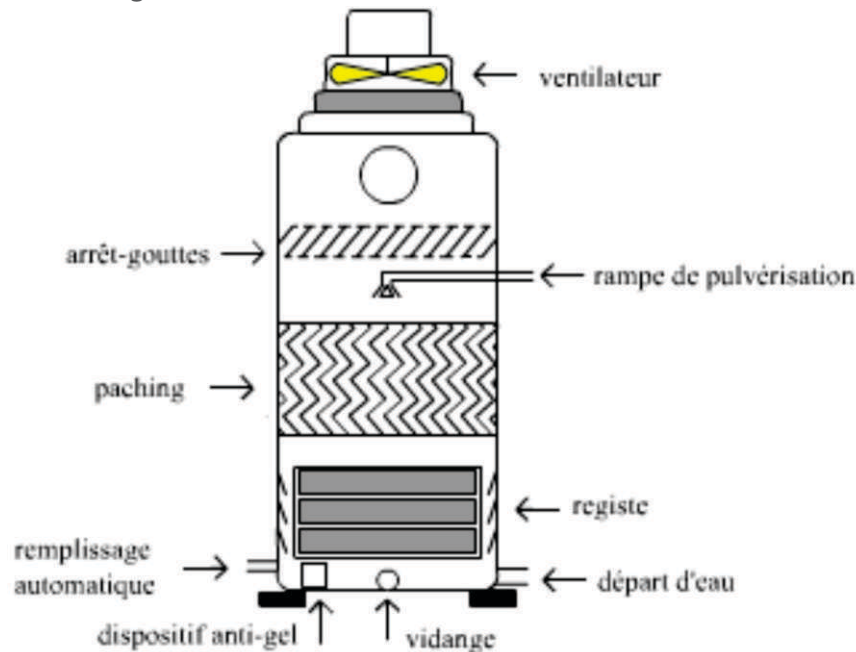


Figure 75 : Schéma de principe d'une tour de refroidissement à circuit ouvert
Source : La page du frigoriste

La notion d'approche d'une tour de refroidissement caractérise l'efficacité de la tour. Elle exprime la différence entre la température humide de l'air extérieur et la température de l'eau dans le bac de la tour (eau refroidie dans la tour). Plus l'approche est faible, plus la tour est efficace, la valeur de cette surchauffe se situe entre 3 et 7K.

1.6.5.3. Evaporateur

A l'opposé du condenseur, l'évaporateur est un échangeur dans lequel le fluide frigorigène liquide, après détente, est évaporé à température constante en prélevant de la chaleur au milieu ambiant à refroidir. Il peut refroidir de l'air ou de l'eau. En général, pour la climatisation centrale, on rencontre le plus souvent des refroidisseurs produisant de l'eau glacée. Les refroidisseurs produisant directement de l'air froid dans une unité centralisée incorporant système de réfrigération et de ventilation (unité de toiture) sont souvent limités aux systèmes de taille moyenne allant jusqu'à 350 kW. De nouveaux systèmes permettent de distribuer le fluide réfrigéré dans les bâtiments et d'alimenter directement de petits évaporateurs décentralisés.

Les processus physiques qui se déroulent dans un évaporateur sont les suivants :

- › Surchauffe : le fluide frigorigène à basse pression à l'état liquide est chauffé jusqu'à atteindre la température d'évaporation ;
- › Le fluide frigorigène s'évapore à température constante ;
- › Surchauffe : pour s'assurer que le fluide frigorigène est sous forme vapeur dans son ensemble pour rentrer dans le compresseur.

Les critères généraux de choix d'un évaporateur reposent sur le rendement, l'encombrement, le système de régulation et le niveau de bruit.

Les principaux types d'évaporateurs rencontrés en climatisation centrale sont les suivants :

1.6.5.3.1. Refroidisseur d'air à convection forcée

Il s'agit d'un type d'évaporateur dont le cadre sert à le fixer au ventilateur du système de climatisation ou de la pompe à chaleur. Ce refroidisseur se retrouve dans les unités de toiture regroupant groupe froid et système de ventilation qui servent de système central surtout dans les petit et moyen bâtiments. Il assure un écart de température de 6 à 10 K entre l'entrée et la sortie de l'air et de 15 à 20 K entre le médium à refroidir et la température d'évaporation. La Figure 75 illustre un refroidisseur d'air à convection forcée.



Figure 75 : Batterie froide pour refroidissement d'air
Source : www.ciat.fr

1.6.5.3.2. Evaporateur noyé

Ce type d'évaporateur est constitué d'une ou de deux calandres et est utilisé soit avec un compresseur centrifuge soit avec un compresseur à pistons ou vis lubrifiés. L'évaporateur noyé est conçu avec un séparateur de liquide en vue d'assurer la recirculation du fluide frigorigène liquide.

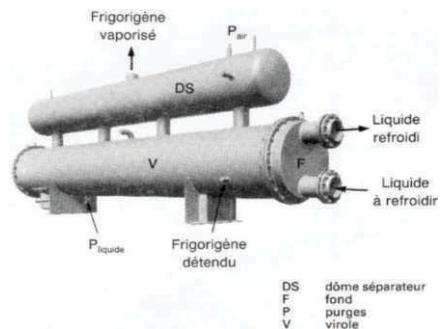


Figure 77 : Evaporateur noyé

Source : Georges VRINAT. Production du froid : technologie des machines industrielles. Juillet 2001

1.6.5.3.3. Evaporateur à détente sèche

Conçu essentiellement pour les fluides réfrigérants utilisés dans les climatisations centralisées du secteur tertiaire, ce système est constitué d'une calandre dans laquelle sont disposés des tubes en cuivre. Le fluide frigorigène circule à l'intérieur de ces derniers pendant que l'eau à refroidir circule dans la calandre. Des chicanes disposées à l'intérieur de la calandre permettent une circulation perpendiculaire du fluide par rapport aux tubes. Le coefficient global d'échange de ces évaporateurs est compris entre 800 et 1 200 W/mK. La présente un évaporateur à détente sèche.



Figure 78 : Evaporateur à détente sèche
Source : "<http://www.batisallon.fr>"

¹⁶ A. Vandamme. *Technique du froid : Cours de base, CFmnLog, Mars 2008*

1.6.6. Groupe de production d'eau glacée basé sur cycle de compression d'un fluide réfrigérant

Un groupe de production d'eau glacée est un refroidisseur de liquide, la plupart du temps l'eau glacée pour les applications tertiaires. Il existe deux catégories de groupes d'eau glacée : groupe à compression mécanique de vapeur et groupe à compression thermique de vapeur (à absorption) qui seront présentés plus loin dans ce guide. Le groupe à compression mécanique de vapeur, dont les principaux éléments constitutifs ont été étudiés à la section, est de loin le plus répandu pour le secteur tertiaire compte tenu de son efficacité de beaucoup supérieure aux systèmes à absorption. Dans cette catégorie, la chaleur retirée au fluide frigorigène est évacuée, soit par l'air (groupe à condenseur refroidi à l'air), soit par l'eau (groupe à condenseur refroidi à l'eau) (). Certains groupes ont deux circuits de refroidissement à l'eau où un des circuits est dédié à la récupération d'une partie de la chaleur rejetée par le groupe.

Le groupe d'eau glacée comporte, outre les éléments (compresseur, condenseur, évaporateur et détendeur) étudiés plus haut, des éléments connexes à savoir, pompes d'eau refroidie, pompe d'eau du condenseur (lorsque refroidi à l'eau), vannes de réglage, ventilateurs, etc.).



Figure 79 : Groupe de production d'eau glacée à condenseur à l'eau
Source : www.energie.wallonie.be

En climatisation, les groupes d'eau glacée servent dans la plupart des applications de refroidissement d'espace pour les bâtiments de moyenne et grande tailles et fonctionnent dans la plage de température de 6,6 °C à 7,2 °C pour l'eau refroidie. C'est la plage de température la plus courante. Toutefois, des températures d'eau allant à 5,5 °C peuvent être choisies par les concepteurs.

Il est à noter que dans les applications de stockage de froid dans la glace, les températures d'opération seront plus basses. Ces applications seront présentées dans une section distincte du guide.

1.6.6.1. Technologies des groupes de production d'eau glacée à compression mécanique

La climatisation à eau glacée est plus utilisée pour des applications de type tertiaire ou pour la climatisation des bureaux et espace de travail en milieu industriel. Trois points permettent de donner l'avantage à cette technologie :

- L'eau est une solution écologique (le fluide de transfert dans le bâtiment est l'eau) ;
- Souplesse d'utilisation : vannes modulantes au niveau de chaque terminal. Extension du réseau d'eau pouvant se faire sans grande difficulté ;
- Simplicité d'installation : les systèmes de distribution de l'eau sont bien connus de la plupart des installateurs et les problèmes qui peuvent être liés aux fuites sont plus aisés à prendre en compte qu'avec du fluide frigorigène distribué dans le bâtiment.

Pour produire du froid nécessaire au système, plusieurs modèles de groupes frigorifiques de production d'eau glacée à condensation par l'eau ou par l'air sont présentés par les constructeurs. Le compresseur du groupe frigorifique peut être de type scroll, à pistons, à vis ou encore centrifuge. Les technologies les plus courantes de groupes de froid sont exposées dans le ainsi que leurs caractéristiques de conception les plus répandues chez les manufacturiers.

Puissance	Compresseur	Evaporation	Condenseur
Inférieur à 50 kW	› Spirales (35 kW maxi) › Pistons	› Coaxial › A plaques	› Coaxial › A plaques à air
De 50 kW à 1 000 kW	› Pistons › Vis	› Multitubulaire noyé › A détente sèche › A plaques	› Multitubulaire › A air › A plaques
De 1 000 kW à 4 000 kW	› Vis › Centrifuge	› Multitubulaire noyé	› Multitubulaire › A air
Au-dessus de 4 000 kW	› Centrifuge	› Multitubulaire noyé	› Multitubulaire › A air

Source : IFDD. Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale
Tableau 54 : Technologies utilisées dans l'assemblage des groupes

De la même manière, la performance du groupe peut aussi varier en fonction de la nature du compresseur. Le 3 démontre les performances des groupes d'eau glacée pour différents types de compresseurs

Type d'équipement	Condensation	Efficacité frigorifique
Groupe à pistons	Air	2,8
	Eau	3,6
Groupe à vis	Air	3,5
	Eau	4,8 à 5,2
Groupe centrifuge	Air	3,0
	Eau	5,5 à 7,0

Tableau 55 : Performances des groupes d'eau glacée en fonction du type de compresseur

Source : ADEME, Tendance Habitat. En savoir plus sur les systèmes de refroidissement, 2002 et étude Econoler sur le marché des refroidisseurs 2010

Il faut noter que les groupes de production de froid à condensation à l'eau nécessitent souvent des débits d'eau importants de l'ordre de 1 m³/h pour une puissance de 10 à 15 kW frigorifique. Ce qui suppose qu'une analyse des possibilités d'approvisionnement en eau est nécessaire avant l'installation d'un tel système.

1.6.6.2. La flexibilité offerte au concepteur pour le choix d'une unité à haute efficacité respectant les budgets d'un projet donné.

Il existe une grande différence en matière de choix offert aux concepteurs de bâtiment tertiaire pour leurs groupes d'eau glacée en fonction de la technologie de compresseur utilisés. En effet, les groupes utilisant des compresseurs centrifuges sont ceux offrant le plus de flexibilité aux concepteurs de bâtiment tertiaire. De fait, pour ces appareils visant les applications de grande taille, les manufacturiers utilisent des logiciels de conception évoluée leur permettant d'assembler sur mesure les différentes composantes tels compresseurs et échangeurs de chaleur parmi des centaines de combinaisons possibles.

Leurs logiciels permettent littéralement de proposer une courbe des multiples solutions possibles où l'efficacité du groupe est fonction de l'investissement consenti lors de l'achat.

1.6.6.3. Les équipements auxiliaires des groupes de production d'eau glacée

En dehors des éléments conventionnels utilisés sur les groupes de production glacée et présentés à la section , il existe également des auxiliaires dont il faut tenir compte. En effet, la consommation électrique des systèmes centralisés d'eau glacée dépend fortement du type de système et de la puissance des auxiliaires.

1.6.6.3.1. Ventilateurs des tours de refroidissement

Qu'ils soient montés en haut de la tour pour générer un courant d'air ou sur le bas pour en forcer un, les ventilateurs et les moteurs de tours de refroidissement () consomment une quantité appréciable d'énergie et il est important de considérer les stratégies de contrôle permettant de minimiser leur usage. La plus fréquente stratégie est le contrôle des ventilateurs en fonction de la température de sortie de l'eau qui retourne vers le condenseur du groupe. La stratégie peut être un simple contrôle en/hors de chaque ventilateur ou la modulation de vitesse au travers d'un variateur de vitesse du moteur électrique.

Il existe une relation entre l'énergie des ventilateurs et l'énergie des compresseurs. Dans certaines conditions, il est plus rentable d'utiliser plus de puissance de ventilateur pour réduire la température de l'eau de condensation; ce qui permet de réduire à son tour la puissance de compression du groupe compte tenu du fait qu'il fonctionnera à pression de condenseur plus faible.



Figure 80 : Ventilateurs centrifuges montés sur tour de refroidissement

Source : www.directindustrie.fr

1.6.6.3.2. Pompes des tours de refroidissement

Les pompes d'aspiration d'eau de refroidissement alimentent en eau le bassin des grandes tours de refroidissement. L'un des défis clé pour les opérateurs de pompes consiste à prolonger l'intervalle moyen entre les défaillances, tout en réduisant la consommation d'énergie pour répondre aux normes du secteur, car les coûts d'énergie représentent 45 % du coût total des pompes sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ces pompes (), souvent centrifuges, en plus des ventilateurs constituent des agents négligeables de la consommation d'énergie du système de production de froid.



Figure 81 : Série de pompes montées sur un système de refroidissement

Source : www.ventilation.ventsys.net

¹⁷ <http://www.skf.com/fr/industry/solutions/industrial/pumps/requirements/reduced/energy/consumption/index.html>

1.6.6.3. Pompes de distribution d'eau glacée

Un autre auxiliaire important est les pompes qui distribuent l'eau glacée vers les différentes batteries froides montées sur les systèmes de ventilation des bâtiments tertiaires ou vers les convecteurs de pièce. Les systèmes centralisés utilisent fréquemment une stratégie comportant des pompes primaires qui font la circulation de l'eau entre l'évaporateur du groupe et la nourrice pour la distribution et un système de pompes secondaires qui alimentent diverses zones.

L'énergie des pompes primaires peut dans une certaine mesure être optimisée par l'utilisation de pompes à débit variable. Le débit sera réduit en fonction de la charge du bâtiment pour minimiser l'énergie de pompage sur une saison de climatisation. Il est très important toutefois de vérifier les débits minimum exigés par les fabricants car le fonctionnement sous ces débits peut entraîner des problèmes de fonctionnement des groupes.

L'énergie des pompes secondaires peut aussi être réduite par l'emploi de pompes à débit variable.

1.6.7. Refroidisseur à absorption liquide

Le refroidisseur à absorption liquide fait partie, comme la machine à compression de vapeur, des machines frigorifiques à changement de phase. Le schéma de principe est très différent et la particularité la plus importante pour le concepteur de système est que l'énergie thermique remplace ici l'énergie mécanique (provenant d'un moteur électrique le plus souvent) d'où son appellation de machine à compression thermique (.). Cette technologie est peu répandue dans le domaine de la production de froid centralisé dans le domaine tertiaire en raison de son faible rendement. Les seules applications pertinentes de cette technologie se retrouvent lorsqu'un site a une grande quantité de chaleur résiduelle qu'il peut utiliser comme puissance d'entrée au groupe. Cette situation se concrétise plus souvent dans le secteur industriel que dans le secteur tertiaire.

Soulignons que quelques projets de démonstration ont été menés dans différents pays pour produire du froid en combinant une unité à absorption avec une source d'énergie thermique solaire.

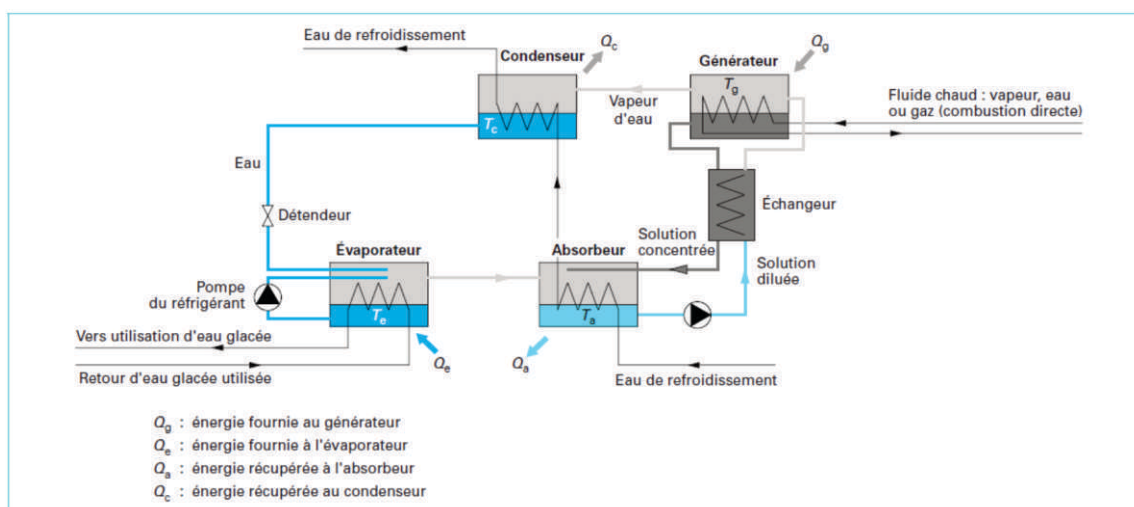


Figure 82 : Schéma d'un cycle d'absorption à simple effet utilisant de l'eau comme frigorigène et du bromure de lithium comme absorbant
 Source : Jacques DELBÈS, Adrien VADRO. Réseau de froid urbain : production et stockage du froid.

Techniques de l'ingénieur, BE 9 321 – 4

¹⁸ Voir le site web et le court video (Anglais) sur le parc national de Audubon en Californie : <http://losangelesaudubon.org/index.php/151-news/video-links/306-debs-park-solar-air-conditioning>

Le principe de fonctionnement de ces machines consiste à exploiter la faculté d'absorption et de désorption de la vapeur de certains liquides. En climatisation, le bromure de lithium (LiBr) et l'eau sont généralement utilisés, respectivement comme absorbant et fluide réfrigérant. Avec ce type de machine, la température de l'eau peut être abaissée jusqu'à 5 °C. Il faut souligner que l'ammoniac peut également être utilisé comme absorbant et permettre d'obtenir des températures négatives (jusqu'à -60 °C), mais son utilisation cause des difficultés en raison de ses effets toxiques enregistrés à son niveau en cas de fuite. Les systèmes à ammoniac, malgré leur grande efficacité, se retrouvent très peu dans le secteur tertiaire.

Par analogie à la machine à compression mécanique de vapeur et comme le montre la , la machine à absorption nécessite quatre principaux éléments : l'évaporateur, l'absorbeur, le générateur (bouilleur ou concentrateur) et le condenseur. Les principales étapes du cycle de fonctionnement d'un refroidisseur à absorption sont résumées au tableau 4.

Elément	Fonctionnement	Cycle ¹
Evaporateur	L'eau à refroidir perd sa chaleur au profit du fluide frigorigène (eau pulvérisée), sous basse pression. Il se dégage de la vapeur d'eau qui se dirige vers l'absorbeur.	
Absorbeur	A basse pression, la vapeur du frigorigène provenant de l'évaporateur passe dans l'absorbeur pour y être absorbée par une solution de LiBr. Une pompe assure la recirculation de la solution.	
Concentrateur	Pour éviter que la solution absorbante ne se sature, elle est régénérée dans un concentrateur (générateur), à la pression de condensation, permettant ainsi de réduire la quantité de chaleur que l'absorbeur doit rejeter.	
Condenseur	La vapeur de frigorigène dégagée dans le concentrateur est ensuite entraînée vers le condenseur où elle se condense au contact de l'eau de refroidissement qui y circule.	

- Réfrigérant sous forme liquide
- Réfrigérant sous forme vapeur
- Solution absorbante diluée
- Solution absorbante concentrée

Tableau 56 : Principales étapes du cycle d'une machine à absorption

¹⁹ www.energie.wallonie.be.lesite

1.6.7.1. Performance d'un système à absorption

Plusieurs types de refroidisseurs à absorption existent sous les appellations de simple, double ou triple effet. En fonction de la technique utilisée, la source chaude peut être constituée par de la vapeur d'eau, de l'eau chaude (solaire ou autre), ou encore de fumées provenant de la combustion directe de gaz. L'efficacité du système peut donc s'en trouver modifiée. Les caractéristiques de ces équipements sont les suivantes :

- Absorption simple effet : $0,6 < \text{COP} < 0,7$ pour puissances entre 0,1 et 5,8 MW,
- Absorption double effet : $1,1 < \text{COP} < 1,2$ pour puissances entre 0,1 et 5,3 MW.

Des machines à triple effet existent également, techniquement au point, mais dont le handicap majeur constitue le coût d'investissement qui ne favorise pas leur commercialisation. Ces machines fonctionnent avec une température en entrée de 180 °C et ont un COP voisin de 1,5.

Les machines à absorption à simple effet sont bien adaptées à la production décentralisée de froid sur un réseau de chaleur (urbain par exemple) en raison du faible niveau de température requis de la source chaude. Pour les productions centralisées où une source à plus haute température est disponible, l'utilisation d'absorbeur double effet donnerait un meilleur rendement en autant qu'une source d'eau à 140 °C soit disponible.

En climatisation tertiaire, seules les machines simple effet peuvent être utilisées en été avec une eau chaude avoisinant 90 °C et servie par un réseau de chaleur. Les différentes applications possibles, en fonction de la puissance, sont présentées au Tableau 5 .

Puissance (kW)	Utilisation
35 – 150	Solution en pied de bâtiment
150 – 300	Solution en pied de bâtiment, besoins plus importants
300 – 500	Solution décentralisée avec mini réseau de froid (plusieurs bâtiments)
> 500	Solution décentralisée avec miniréseau de froid (plusieurs bâtiments), besoins plus importants.

Source : Plaquette Summerheat. Solutions techniques – Guide des bonnes pratiques.

Tableau 57 : Applications possibles des machines à absorption en fonction des puissances

1.6.7.2. Analogie avec la machine frigorifique traditionnelle

La établit un parallèle entre un système à compression et un système à absorption. Il y a des similitudes sur la présence d'un évaporateur et d'un condenseur pour chaque système, mais une différence marquée en raison du remplacement du compresseur par un absorbeur/concentrateur qui fournit le « travail » au système de production de froid.

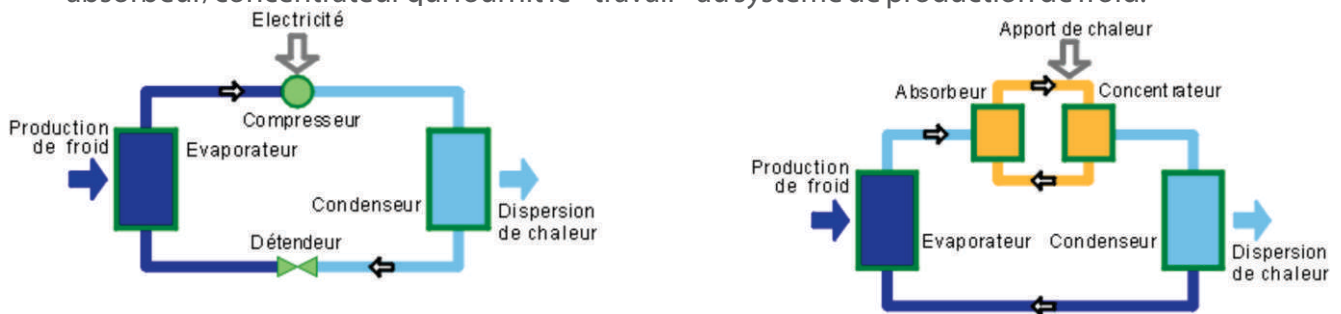


Figure 83 : Cycles comparés d'un système à compression et d'un système à absorption

Source : www.energie.wallonie-lesite.be.

Le dispositif permet ainsi de réduire la consommation d'énergie électrique mais requiert une plus grande quantité d'énergie thermique.

1.6.8. Pompes à chaleur réversible

Une pompe à chaleur (PAC) est basée sur un cycle de réfrigération à compression. Quel que soit le type de PAC, les mêmes composants principaux y sont retrouvés. La différence avec un climatiseur réside dans son principe de base qui consiste : à transférer la chaleur d'un corps à basse température et proche de l'habitation (air, eau, sol), à la convertir et à la restituer à une température supérieure pour assurer le chauffage d'une maison ou produire de l'eau chaude. Il en existe de multiples combinaisons : air/air, air/eau, eau/eau, sol/eau et sol/sol. Les pompes à chaleur réversibles peuvent indifféremment chauffer ou refroidir un espace en fonction de la température extérieure; et c'est la seule forme de PAC qui nous intéresse pour les objectifs de climatisation centralisée. En mode réversible, le cycle (production de chaleur ou de froid) est assuré au moyen d'une vanne à 4 voies qui permet de choisir quelle source sera froide (ou chaude). Les formes les plus utilisées dans les bâtiments tertiaires sont : air/eau et air/air. La Figure 17 illustre le schéma de principe d'une pompe à chaleur air/air.

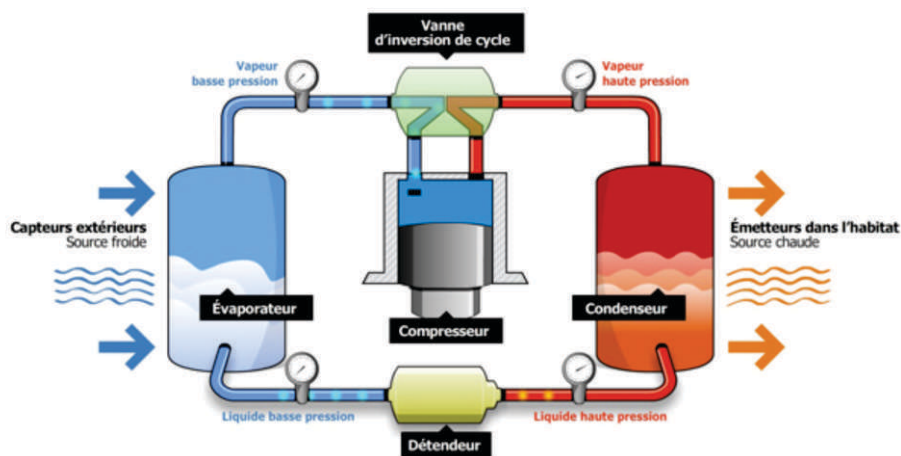


Figure 84 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur air/air
Source : Guide AITF/EDF. Bâtiments basse consommation, Juillet 2008

Pour les applications de climatisation centralisée, les configurations suivantes sont les plus utilisées :

- › **Pompe à chaleur air/air** : le condenseur est directement dans le flux d'air d'une unité de ventilation intérieure. Cette application est à la base semblable à un système de ventilation avec batterie de condenseur de fluide frigorigène qui a déjà été présenté aux sections précédentes. Ce système peut également être utilisé en mode chauffage, ce qui a le potentiel de réduire les coûts d'investissement comparativement à un système traditionnel ou à une chaudière fournissant la chaleur requise pour une batterie à l'eau chaude. Dans une configuration de système centralisé, ce système est limité aux bâtiments de petite et moyenne tailles car les unités PAC ont une capacité limitée. Il est possible de traiter différentes zones d'un grand bâtiment avec une série de petites pompes à chaleur mais dans ce cas il ne s'agit plus d'une application de climatisation centralisée car on est dans une logique de climatisation distribuée.
- › **Pompe à chaleur eau/eau** : une série de petites pompes à chaleur sont raccordées à un réseau hydraulique où elles peuvent puiser ou rejeter de la chaleur selon les besoins des pièces desservies. Le système permet donc de récupérer la chaleur absorbée dans les pièces qui sont en climatisation pour chauffer les pièces qui ont des besoins de chauffage. Par exemple, en début de journée ensoleillée, les façades situées à l'est des

bâtiments peuvent être en mode climatisation alors que les pièces des façades côtés nord ou ouest sont en besoin de chauffage. Ce système permet donc efficacement de répartir les surplus ou besoins énergétiques du bâtiment. Le réseau hydronique est généralement raccordé à une chaudière ou à une tour de refroidissement qui permet d'injecter plus de chaleur dans le circuit ou en rejeter selon les besoins.

- › **Pompe à chaleur eau/eau dans une application géothermique.** En mode climatisation, la chaleur absorbée dans le bâtiment est rejetée dans le sol. En mode chauffage, la chaleur du sol est utilisée pour le chauffage du bâtiment. Comme pour le système air/air, ce type de système pour la climatisation centrale est limité aux petit et moyen bâtiments en raison des limites de capacité des PAC offertes sur le marché. Une étude approfondie doit être réalisée pour vérifier la capacité du sol à absorber la chaleur en période de climatisation ou à servir de source de chaleur en mode chauffage.

Du fait de l'existence de plusieurs technologies de distribution de la chaleur et compte tenu de la grande variété des sources froides, ces machines offrent plusieurs modes de régulation. Le Tableau 6 résume les PAC et leurs applications pour la climatisation centrale, les principales méthodes de régulation des PAC courantes et les capacités maximum de chaque type de système.

Tableau n°58 : PAC les plus courantes, leurs régulations et gammes de puissances homologuées en Europe

Désignation	Description	Régulation	Gamme de puissances thermiques certifiées en Europe (kW) ¹
PAC air / air (Roof top)	Monobloc de toiture, mais parfois installé au sol, cette PAC est utilisée pour les applications de chauffage et de climatisation des grands locaux : supermarchés, entrepôts, ateliers de production, etc. Bien que facile à installer et à faible coût, le roof-top nécessite un accès à la toiture pour son entretien	Les différents compresseurs du monobloc sont régulés en cascade à l'aide d'une sonde de température installée dans le local et reliée à un régulateur.	0 – 200 kW
PAC eau / eau	Assure la climatisation en mode réversible. Les PAC de petites tailles peuvent être utilisées pour les applications de chauffage et de climatisation centrale lorsqu'elles sont raccordées à un circuit hydronique pour le transport de la chaleur des différentes zones du bâtiment. Les PAC réversibles de plus grande taille peuvent servir directement à la climatisation centrale de petit et moyen bâtiments lorsque couplés à une source géothermique ou à un plan d'eau (lac, rivière, mer). En mode chauffage, les PAC peuvent parfois aussi assurer une production décentralisée en eau chaude sanitaire (ECS) des locaux avec des accumulateurs électriques jouant le rôle de chauffe-eau. <ul style="list-style-type: none"> › Economie d'énergie d'environ 30 % par rapport à un chauffage électrique classique. › COP en chauffage saisonnier entre de 2,5 et 3. 	En fonction de la température extérieure, les compresseurs de la PAC sont enclenchés par étages successifs pour permettre d'obtenir la consigne demandée. Un limiteur installé en tête de l'installation permet d'éviter le gaspillage.	0 – 1 500 kW

1.6.8.1. Eléments terminaux de rafraîchissement spécifiques aux PAC

Pour optimiser le fonctionnement annuel des PAC dans les zones climatiques où les bâtiments ont besoin de chauffage et de refroidissement, il existe des systèmes radiants qui favorisent le confort thermique et l'utilisation de température d'eau d'alimentation moins extrême qu'avec d'autres éléments terminaux et donc favorisent l'efficacité énergétique de la PAC.

Le plafond rayonnant et le plancher radiant sont des équipements de chauffage et de rafraîchissement intégré dans un plafond ou un plancher, alimenté par une PAC réversible, fonctionnant en circuit fermé. Dans ce cas, on ne parle pas d'un système de

²⁰ Source : Fiche explicative PAC V6, n°FE 04, Version du 27/08/2013

climatisation, mais d'un système de rafraîchissement, qui ne permet en principe pas une température inférieure à plus de trois ou quatre degrés par rapport à l'extérieur.

Le procédé utilise comme surface d'échange homogène le plafond ou le plancher, le traitement d'air neuf étant complètement autonome. La régulation de la température d'alimentation de l'eau froide est assurée par un système qui prend en compte la température extérieure, la température intérieure, le taux d'humidité de l'air ambiant et la température du fluide caloporteur circulant dans l'élément terminal. La température de l'élément radiant rafraîchissant est contrôlée pour éviter les risques de condensation. La puissance est limitée à environ 35 W/m².

Dans le secteur tertiaire, ces systèmes sont installés dans des locaux où l'on souhaite éviter les mouvements d'air et le brassage des poussières. Cependant, ils doivent être complétés selon les besoins - salle de réunion et autres - par des systèmes plus puissants en climatisation, tels que ventilo-convecteur ou poutre froide.

Les avantages principaux de ces éléments terminaux sont : le confort accru, une augmentation de l'inertie du bâtiment, un entretien réduit, une réduction du bruit et des poussières en comparaison de systèmes à pulsion d'air froid.

1.6.9. Systèmes de climatisation centralisée à eau froide

Il existe deux types de systèmes utilisant l'eau froide produite par un refroidisseur : les systèmes eau/eau et les systèmes air/eau. Les systèmes eau/eau ou « tout eau » sont caractérisés par le fait que la ventilation des locaux a uniquement une fonction hygiénique et les besoins énergétiques sont totalement pris en charge par les unités terminales à eau. Quant aux systèmes air/eau, l'eau sert à traiter l'air qui ensuite, transporte les calories dans les locaux.

1.6.9.1. Systèmes « tout eau »

Dans ce type de système eau/eau, l'eau glacée ou chaude est produite par un groupe de production centralisée et est ensuite distribuée dans les batteries incorporées à un équipement terminal à travers un réseau de tuyauteries. Les apports en air des locaux assurent uniquement une fonction hygiénique. Les équipements terminaux qui caractérisent ce type de systèmes sont présentés dans les sections suivantes :

1.6.9.1.1. Ventilo-convecteur

Les ventilo-convecteurs sont des appareils terminaux capables de refroidir, de chauffer et de filtrer l'air, fonctionnant pour une seule zone du bâtiment. Ces systèmes sont les plus utilisés aujourd'hui en climatisation centralisée et permettent d'isoler une pièce inoccupée (ex. chambre d'hôtel) et de pouvoir contrôler sa température en cas de besoin.

Pour fonctionner, les ventilo-convecteurs disposent d'un ventilateur incorporé qui leur permet de souffler l'air repris ou mélangé dans le local. Dans certains cas, un caisson de mélange avec arrivée d'air neuf peut être intégré au ventilo-convecteur. La prise d'air peut se faire directement en façade au dos du ventilo-convecteur (Figure 38) ou venir d'un caisson de traitement d'air en centrale, il existe des ventilos dits "2 tubes réversibles" utilisés soit pour la climatisation, soit pour le chauffage et des ventilos dits 4 tubes équipés de deux batteries, l'une froide et l'autre chaude.

1.6.9.1.2. Module de traitement d'air

Équipement de traitement d'air modulaire décentralisé, le module de traitement d'air (MTA) est une variante du ventilo-convecteur. Ce système flexible est adapté aux bâtiments

modulaires dont les cloisons auraient la possibilité d'être modifiées (immeubles de bureaux, chambres d'hôtel, etc.). Contrairement au ventilo-convecteur placé dans le local à traiter, le MTA est logé dans un local technique à proximité des locaux climatisés. Il est un système global de confort intégré au bâtiment et comprend : un volet de réglage du débit d'air neuf, un filtre à air, une batterie monobloc à ailettes ainsi qu'un ventilateur centrifuge. Relié aux circuits d'eau et d'air neuf, l'installation d'un MTA par étage est nécessaire.

1.6.9.2. Systèmes « tout air »

Dans ce type d'installation, l'air est traité dans une CTA pour ensuite être distribué via un réseau de conduits aérauliques jusqu'aux éléments terminaux de l'installation. En premier lieu, cette section présente les différents éléments d'une CTA ayant une influence sur la consommation énergétique du système de climatisation centralisée. Par la suite, les différents types de systèmes « tout air » sont analysés

Une CTA est un équipement destiné : à ventiler par l'introduction d'air neuf et l'extraction d'air vicié, à filtrer l'air, chauffer par soufflage d'air chaud, à rafraîchir par soufflage d'air froid, à échanger les calories entre deux flux d'air, à déshumidifier par condensation de la vapeur d'eau et à humidifier l'air par vaporisation d'eau. La Figure 33 illustre le schéma de principe d'une CTA courante sans ventilateur de retour.

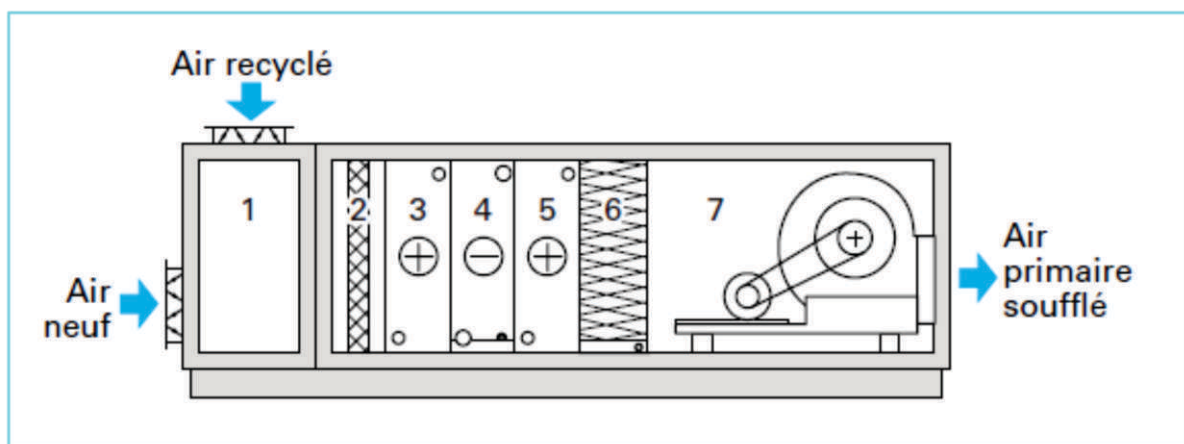


Figure 85 : Centrale de traitement d'air

1.7. Le chauffage

Les installations de chauffage, de climatisation et de ventilation (CVC) sont destinées à contrôler la température, la qualité d'air et parfois l'humidité pour apporter un environnement intérieur adapté à l'activité des occupants. Ces installations représentent une part importante de la consommation énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires.

Les fonctions assurées sont:

- ➡➡ le chauffage;
- ➡➡ le refroidissement;
- ➡➡ la ventilation mécanique contrôlée.

Cette première partie présente les équipements de production de chaleur, de froid et de ventilation.

1.7.1. Les chaudières

1.7.1.1. Le cycle de combustion comme source de chaleur:

La chaleur utilisée pour le chauffage dans les secteurs tertiaire et résidentiel, hors électricité, résulte en majeure partie de la combustion d'hydrocarbures. Cette première partie présente un rappel succinct sur les hydrocarbures et leur processus de combustion.

1.7.1.2. Description d'une chaudière:

Les chaudières sont des appareils qui convertissent des combustibles en chaleur pour chauffer un fluide caloporteur : eau, air, huile. Elles sont habituellement fabriquées en métal ou en fonte. Les chaudières transfèrent la chaleur de combustion au fluide par un assemblage de tubes pouvant être des tubes à eau ou des carneaux de fumées.

Les chaudières sont constituées généralement d'un brûleur ou d'un foyer de combustion, d'un échangeur de chaleur permettant de transmettre la chaleur de combustion à un fluide caloporteur (air, eau, huile), qui transmettra cette chaleur à la distribution, et d'une cheminée d'extraction des gaz brûlés (Figure 86). Le tout est, en principe, isolé thermiquement de l'extérieur.

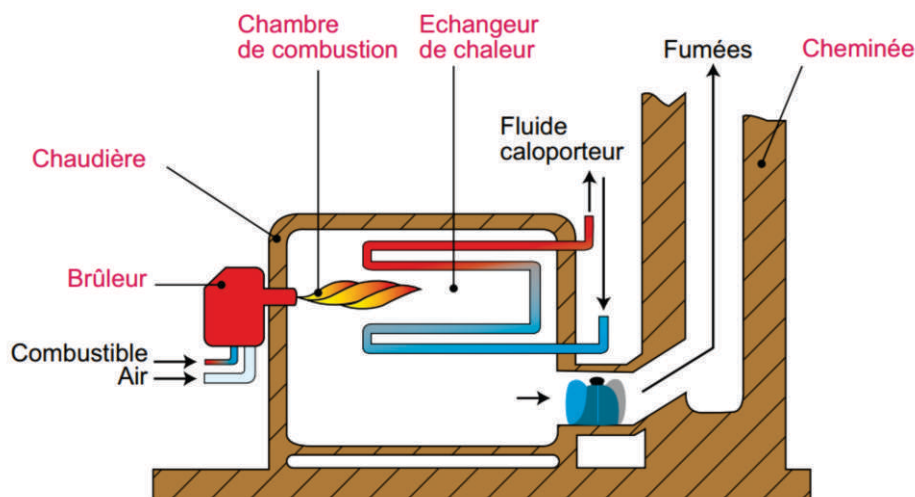


Figure 86 : Coupe schématique d'une chaudière

1.7.1.3. Types de système de combustion:

Le système de combustion pour chacun des types de chaudière dépend du combustible utilisé. On distingue trois types principaux de systèmes de combustion:

- ⇒ ⇒ chaudière à gaz naturel ou GPL (avec brûleur atmosphérique ou pressurisé);
- ⇒ ⇒ chaudière au fuel;
- ⇒ ⇒ chaudière à charbon.

Les chaudières sont généralement installées dans un local dédié (chaufferie) sur un socle reposant sur le sol. Toutefois, et pour de faibles puissances calorifiques ne dépassant pas 30 kW, il existe des chaudières dites murales pouvant être installées dans des enceintes proprement ventilées ou espaces abrités à l'extérieur du bâtiment. Certaines chaudières sont aussi disponibles dans des versions étanches à flux forcé qui peuvent être installées à l'intérieur même des locaux. Ces chaudières sont équipées de brûleurs atmosphériques et sont disponibles en version simple (chauffage uniquement) et en version mixte (chauffage + production d'eau chaude sanitaire). Elles sont en outre équipées d'une pompe de circulation permettant de véhiculer l'eau chaude vers les divers terminaux de chauffage.

1.7.1.4. Performance énergétique

La performance énergétique d'une chaudière est exprimée par son rendement calorifique, défini comme étant le rapport de l'énergie utile fournie par la chaudière sur le pouvoir calorifique total du combustible consommé. Dans le cas d'une chaudière à eau chaude, le rendement instantané d'une chaudière peut être exprimé comme suit:

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{Q_{fuel} PCI}$$

\dot{m} :	débit massique de l'eau chauffée [kg/h]
C_p :	capacité calorifique de l'eau chauffée [kJ/°C·kg]
T_e :	température d'entrée de l'eau chauffée [°C]
T_s :	température de sortie de l'eau chauffée [°C]
Q_{fuel} :	débit massique du fuel [kg/h]
PCI :	pouvoir calorifique inférieur [kJ/kg]

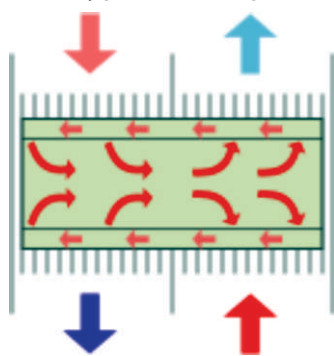
La condensation (PCS) permet une amélioration des performances de 7% à 10%.

1.8. La récupération d'énergie

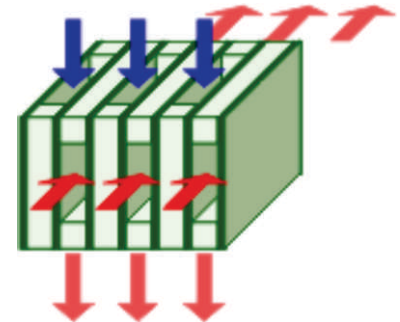
L'air neuf de ventilation, après avoir été porté à la température de confort à l'intérieur du bâtiment, est rejeté à l'extérieur alors qu'il possède un niveau énergétique supérieur à l'air extérieur que l'on introduit. On parle d'une enthalpie (un contenu en chaleur) plus importante que l'air extérieur.

L'idée est de transférer cette chaleur de l'air extrait vers l'air neuf. On peut ainsi arriver à une récupération de 50..95 % du budget de chauffage de l'air de ventilation.

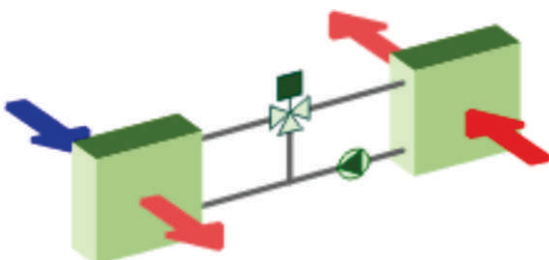
Il existe 4 types de récupérateurs :



Les caloducs



Les échangeurs à plaques (simples ou doubles, avec refroidissement adiabatique indirect)



Les échangeurs à eau glycolée (simples ou à haute performance).



Les échangeurs à régénération (roues, à clapets simples ou multiples).

Figure 87 : Différents modes de récupération d'énergie

En fonction du type de système, le rendement de récupération varie de 50 à 95 %.

La rentabilité du récupérateur résulte de la comparaison entre "le bénéfice", c'est-à-dire, le coût de l'énergie récupérée, et "les dépenses", c'est-à-dire :

Le coût du récupérateur (y compris le coût lié à son encombrement), tenant compte de la possibilité de réduire la puissance thermique des autres équipements thermiques (batteries, chaudières, humidificateurs). Cette possibilité augmente avec la performance du récupérateur, mais dépend aussi du type de récupérateur et de son mode de régulation, notamment en hiver (risque de givre).

L'augmentation de la consommation des ventilateurs liée à la perte de charge du récupérateur. Cette perte de charge n'est pas directement liée à la performance du récupérateur. Bien sûr un double échangeur à plaques aura plus de pertes de charge qu'un simple échangeur. Mais un caloduc présentera lui des pertes de charge importantes alors que ses performances sont plutôt médiocres.

Les coûts d'entretien, tous les récupérateurs n'ayant pas la même accessibilité.

Comme on le voit, il est difficile de tirer des règles générales quant à la rentabilité d'un récupérateur, ni quant à la performance du récupérateur à installer. Sans compter qu'il reste un point délicat dans le calcul de la rentabilité du fait des conditions de fonctionnement essentiellement variables de la ventilation.

L'optimisation consiste à rechercher, parmi plusieurs solutions techniques applicables à la situation concernée, l'équipement présentant le temps de retour le plus court et/ou l'économie maximale. Une étude devra ainsi être menée par le concepteur tenant compte :

- Du rendement de récupération tant en température qu'en humidité. Le rendement considéré sera établi suivant la norme EN 308 et correspondra au matériel réellement installé,
- Du mode de régulation de la récupération,
- Du risque de givre côté air extrait et du mode de dégivrage appliqué,
- De la possibilité de réduire la puissance de production de chaud, de froid et d'humidité et de réduire la puissance des batteries de chaud et de froid. Cette possibilité dépend du rendement du récupérateur et de son mode de régulation (régulation modulante ou tout ou rien), de la régulation de vitesse du ventilateur,
- De la perte de charge supplémentaire du récupérateur et de la consommation électrique qui en résulte,
- De l'encombrement dû au récupérateur et du surinvestissement qu'il entraîne,
- Du coût du récupérateur.

En fonction de l'énergie récupérée et de l'investissement à consentir, la rentabilité de chaque type de récupérateur varie en fonction du débit d'air à traiter. Ainsi, pour les faibles débits (... 5 000 m³/h ...), ce sont les échangeurs à plaques simples qui sont les plus rentables. Les échangeurs par accumulation sont quant à eux fort onéreux pour les petites installations. Il n'en va pas de même pour les plus grosses installations (... 20 000 m³/h ...) pour lesquelles ils deviennent plus que concurrentiels.

Cela montre qu'il est intéressant lors de chaque projet d'envisager attentivement différents types d'installation et d'en évaluer la rentabilité.

1.9. Systèmes de stockage de froid

Les systèmes de stockage de froid permettent l'optimisation des systèmes de production d'eau glacée utilisant des refroidisseurs à compression mécanique. Ils permettent selon la conception du système :

- 1) de réduire la puissance installée des compresseurs des groupes froids lors d'une nouvelle installation ou,
- 2) de réduire la pointe de puissance du bâtiment tertiaire en période de climatisation. Il est possible également de concevoir un système pour combiner ces deux stratégies.

Ils sont utilisés dans certains systèmes pour réduire ou éliminer complètement les charges des compresseurs et équipements de dissipation de chaleur (tours de refroidissement) en période de pointe électrique.

En raison des charges de refroidissement qui varient de jour et de nuit, les systèmes de stockage permettent de réduire (en général 25 à 50 %) la puissance de la centrale de production de froid. C'est l'une des technologies les plus prometteuses pour gérer la demande de pointe dans les bâtiments tertiaires et, particulièrement, dans la région MENA où les charges de climatisation augmentent de façon très rapide depuis quelques années.

Ce type de système a un coût initial élevé en raison de la quantité de matériel (cuves de stockage, pompes supplémentaires, tuyauterie additionnelle et équipements de contrôle) et de l'espace requis pour les équipements de stockage. Ces coûts peuvent partiellement être compensés par une réduction de la taille des compresseurs dans les cas d'une nouvelle installation. Le coût de l'installation varie selon la configuration du système. Les périodes de retour sur investissement (PRI) sont de 5 à 7 ans (3 à 5 ans dans certains cas) et sont surtout dépendant de la différence de coûts d'approvisionnement la période de climatisation de pointe comparativement au prix qui doit être payé si la production de froid est réalisée en période hors pointe.

Les systèmes de stockage ont certains inconvénients dont le principal est relatif aux pertes thermiques non négligeables des réservoirs de stockage, surtout dans le cas d'un stockage à petite échelle où elles peuvent varier de 1 à 5 % de la capacité journalière de stockage. Certains systèmes de stockage peuvent aussi provoquer une chute de l'efficacité de la production. Pour le stockage de glace, par exemple, une production de froid à environ - 10 °C au lieu de 5 °C est exigée dans des circonstances normales. Il faut s'assurer que le groupe froid peut fonctionner à ces températures ce qui n'est pas toujours le cas dans les situations où les groupes froid sont déjà existants. Dans le cas des installations neuves, le concepteur peut bien entendu choisir le groupe permettant la production de glace.

Toujours pour la production de glace, étant donné que le COP des refroidisseurs dépend de la température de l'évaporateur, l'efficacité peut chuter d'à peu près 35 % dû à la température plus basse requise pour la production. Cette réduction d'efficacité est toutefois compensée partiellement par la plus faible température de condensation qui peut être atteinte en période hors pointe (souvent la nuit) où la température extérieure est plus basse permettant ainsi aux condenseurs à l'air ou à l'eau un fonctionnement à plus basse température.

1.9.1. Technologies de stockage de la glace

Actuellement, seules les centrales de climatisation à eau glacée permettent l'utilisation du stockage froid. Deux principaux moyens de stockage de froid ont été développés, il s'agit du :

²² Jacques DELBÈS, Adrien VADROT. Réseaux de froid urbain : production et stockage du froid. *Techniques de l'ingénieur*, B 9 321 - 11

²³ Association of energy engineers. CEM, Thermal energy storage, section 5

- > stockage d'eau froide par chaleur sensible ;
- > stockage de glace par chaleur latente.

1.9.1.1. Stockage par chaleur sensible

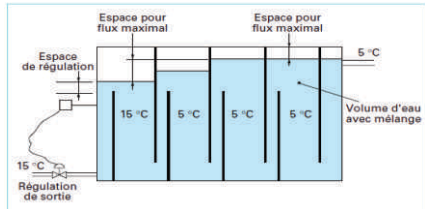
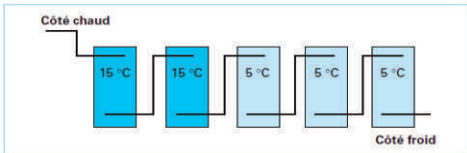
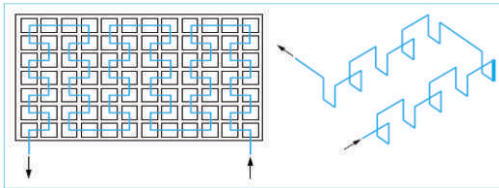
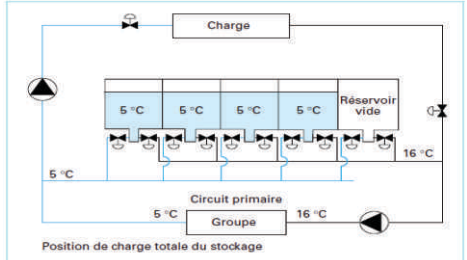
Le moyen le plus simple de stockage thermique est l'eau à l'état liquide. Ce système demande de grands volumes de stockage (4 à 5 fois l'espace d'un système de stockage thermique de la glace) avec une température minimale de l'eau avoisinant les 4 °C afin qu'aucun changement d'état ne se produise pouvant endommager le système de stockage.

Les parois des citernes ne doivent pas être exposées aux rayons solaires et aux intempéries, car ils sont nuisibles au rendement de stockage. Pour minimiser les gains de chaleur, les citernes doivent être protégées des rayons solaires (sous des abris par exemple). Le rendement de stockage des citernes chute également lorsque les périodes de stockage sont longues.

Parmi les technologies de stockage de l'eau glacée, il y a les citernes à stratification naturelle qui sont très économiques et des plus fiables, parce que simple. Cette méthode de stockage utilise la gravité pour séparer l'eau de départ (plus froide, dense et lourde) de l'eau de retour (plus chaude, moins dense et plus légère).

D'autres méthodes de stockage de l'eau glacée existent et sont rassemblées dans le ci-dessous.

Tableau n°59 : Récapitulatif de quelques méthodes de stockage de l'eau glacée

Méthode de stockage	Description	Schéma ¹
Système à chicanes	Le système de stockage est compartimenté par des chicanes. L'eau est mise en circulation par pompage, soit verticalement, soit horizontalement et traverse les divers compartiments par stratification naturelle. Les différents mélanges et le rapport surface/ volume font augmenter les pertes d'énergie.	
Système à réservoirs en série	Des réservoirs en série permettent de maintenir une température basse du côté froid alors que le système est alimenté par une eau à une température plus élevée en réduisant graduellement la température de l'eau à travers les différents réservoirs.	
Système à labyrinthe	Le système peut se révéler économique malgré ses défauts de fonctionnement. Il tient son nom des murs en forme de labyrinthe.	
Système à un réservoir vide	Des réservoirs en série permettent de maintenir une température basse du côté froid alors que le système est alimenté par une eau à une température plus élevée en réduisant graduellement la température de l'eau à travers les différents réservoirs.	

²⁴ Source des images : Jacques DELBÈS, Adrien VADROT. Réseaux de froid urbain : production et stockage du froid. Techniques de l'ingénieur, B 9 321 – 13 et 14

En raison des faibles valeurs de ΔT que l'on peut atteindre en pratique au niveau des réservoirs de stockage d'eau glacée, la puissance énergétique est limitée; par exemple, un stockage par stratification avec un ΔT égal à 10 °C donne une puissance théorique de 12 kWh/m³. Plus la différence de température ΔT est élevée, plus la puissance sera élevée mais avec l'eau les limites de température sont imposées par la température de distribution désirée et le différentiel de température au-dessus de zéro que l'on veut conserver comme sécurité.

L'utilisation d'une saumure en lieu et place de l'eau est possible pour augmenter la capacité de froid en permettant de diminuer la température du stockage sous zéro.

1.9.1.2. Stockage par chaleur latente - Glace

La méthode de stockage par chaleur latente permet de stocker des quantités d'énergie plus importantes avec des masses et des variations de température plus faibles. Dans le stockage thermique de la glace, la glace se forme, soit à l'extérieur des tubes où circule un médium froid, soit à l'intérieur des tubes qui baignent dans un médium froid, soit dans des nodules remplis d'eau. La forte chaleur latente de fusion de la glace est ici utilisée pour stocker le froid. Ces systèmes produisent de la glace pendant les heures creuses, qui est ensuite fondue pour produire de l'eau glacée pendant les périodes de climatisation de pointe. La technologie utilise des systèmes de stockage plus compacts que ceux du stockage de l'eau et accumulent généralement environ 10 fois plus d'énergie par unité de volume. Par exemple, la congélation d'un kg d'eau entrepose environ 334 kJ de froid sous forme de glace à 0°C et la fusion de cette glace permet d'extraire les 334 kJ de l'environnement. Environ 10 kg d'eau à 5 °C doivent être entreposés pour emmagasiner la même quantité d'énergie thermique. Ces systèmes de stockage de glace produisent généralement l'eau glacée à une température entre 1,1 °C et 1,7 °C pour la production d'air frais entre 5,6 et 9,4 °C. Longtemps limité aux systèmes à eau glacée, le stockage de glace est depuis quelques années, également disponible au Japon pour des installations de climatisation centralisées du type VRF (Variable Refrigerant Flow), ou VRV (Variable Refrigerant Volume).

Le stockage de glace est intéressant parce qu'il permet de réduire :

- La taille du groupe frigorifique (dans le cas d'une installation neuve dimensionnée en fonction du stockage disponible),
- La puissance électrique souscrite du bâtiment,
- La surface des locaux techniques (si le stockage est fait à l'extérieur du bâtiment),
- Les arrêts/marches du groupe frigorifique,
- Les coûts d'exploitation,

Le système permet en outre des économies sur les coûts de l'énergie pouvant atteindre 15 %. Toutefois, cet estimé peut varier grandement selon la structure de coûts de l'électricité entre les périodes de pointe et hors pointe.

Le stockage de glace s'applique dans la climatisation des hôpitaux, hôtels, bâtiments à usage de bureaux, etc., ainsi que dans les usages industriels et les centrales téléphoniques. La technologie utilisée pour le stockage de glace dépend de chaque constructeur. Les technologies les plus courantes sont présentées ci-après.

La glace peut être remplacée par le changement de phase d'un sel eutectique ce qui permet un changement de phase à plus haute température que l'eau d'où une réduction des puissances de compresseurs sera requise durant la phase de stockage d'énergie. Toutefois, les systèmes eutectiques sont encore peu répandus en raison de leurs coûts élevés d'achat et

de leur durée de vie limitée qui exigent un remplacement régulier du médium de stockage. La disposition environnementale des sels eutectiques périmée est un problème à considérer avec soin avant de choisir cette approche.

Les sections suivantes décrivent quelques technologies de stockage disponibles sur le marché. Ce guide ne cautionne aucun des systèmes présentés ici car ils ne sont fournis que pour illustrer les principes de stockage. Une grande gamme de produits de qualité existe sur le marché. Le concepteur doit donc fournir en fonction des besoins de son projet spécifique en considérant les budgets, les performances du produit proposé, sa durée de vie et les garanties offertes.

1.9.1.3. Stockage dans des nodules

Dans ce système, des nodules remplis d'eau ou de sels eutectiques sont disposés dans une cuve fermée, fabriquée sur mesure, sous pression ou non, remplie d'eau glycolée (fluide frigoporteur). Les nodules occupent environ 60 % de la cuve, le reste étant occupé par le fluide frigoporteur.

Les nodules () sont constitués de sphère de 8 à 10 cm de diamètre (il existe également des nodules à facettes ou de diverses formes). Ils sont obtenus par soufflage (sans fuite) et remplis avec de l'eau ou des matériaux à changement de phase (solide – liquide). Le refroidissement des nodules permet de changer l'eau en glace ou de cristalliser les sels eutectiques. L'opération inverse se produit lorsque de la fonte de la glace ou des sels qui sont transférés au glycol pour climatiser le bâtiment..

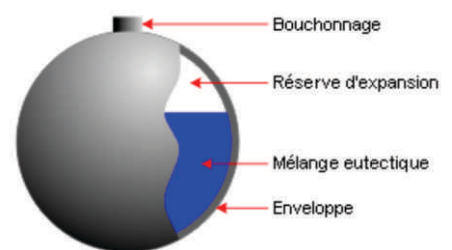


Figure 88 : Caractéristiques d'un nodule avec mélange eutectique

Source : CD Rom- www.energie.wallonie.be

La capacité totale de stockage ainsi que les puissances maximum qui peuvent être échangées avec le fluide frigoporteur pendant les phases de stockage et de déstockage sont déterminées par le nombre de nodules. En plus de ses performances thermiques en matière de puissance d'échange, les nodules peuvent avoir une durée de vie allant jusqu'à 30 ans d'utilisation en conditions normales.

1.9.1.4. La cuve

Le site et la capacité du système déterminent les dimensions de la cuve. Elle peut être cylindrique ou parallélépipédique (en béton ou en acier). Les cuves cylindriques peuvent être horizontales ou verticales, placées à l'extérieur, à l'intérieur ou encore sous terre. L'échange thermique, pour un rendement optimum entre le système et les nodules, lors de la charge ou de la décharge, est rendu possible grâce au fluide frigoporteur circulant dans la cuve. Pour une meilleure répartition du fluide et pour obtenir un meilleur rendement, les cuves sont équipées de deux diffuseurs.



Figure 89 : Cuve de stockage

Source : www.cristopia.com

²⁷ Source : www.ciat.com

1.9.1.5. Les cuves de stockage à formation de glace sur tuyauterie

Les cuves de stockage à formation de glace sur tuyauterie diffèrent du système à nodules par la forme des réservoirs et le mode de fonctionnement. Ici, les réservoirs de glace sont isolés, produits en usine et offerts en différentes tailles. Chaque réservoir contient un échangeur de chaleur qui varie en configuration selon les fabricants. Certains utilisent un échangeur formé de tubes enroulés en spirale qui est lui-même entouré d'eau (Figure 21). D'autres utilisent une série de batteries d'échangeur monté verticalement dans les bacs (Figure 22). Dans la phase de stockage, la glace se forme autour de l'échangeur grâce à l'eau glycolée passant dans ce dernier. Inversement, la glace libère des frigories, pendant la phase de décharge, qui sont ensuite réinjectées dans le circuit par le fluide frigoporteur qui circule dans l'échangeur.

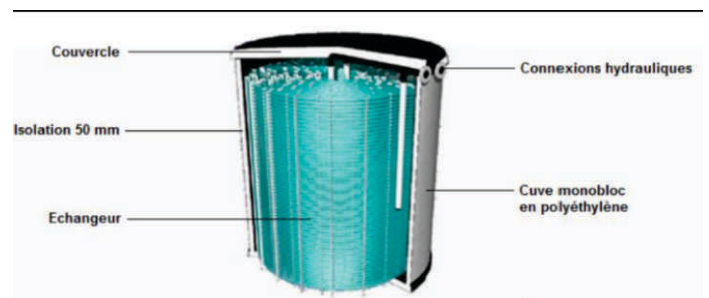
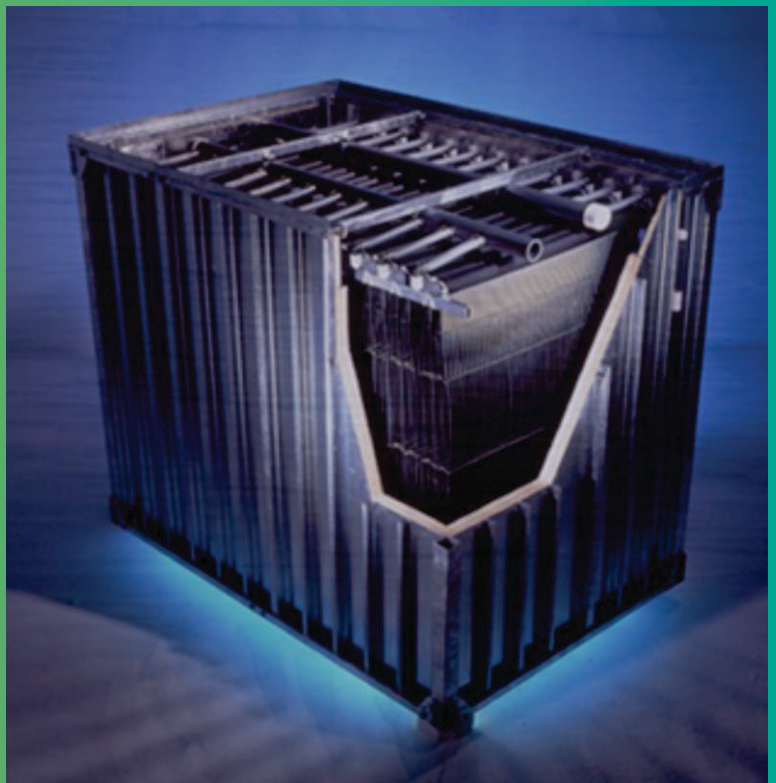


Figure 90 : Cuves de stockage à échangeur interne
Source : <http://www.calmac.com/>

Figure 91 :
Accumulateur de glace à
échangeurs verticaux
Source : www.icestor.com



1.9.2. Stratégies de stockage

L'utilisation de l'énergie stockée dépend des objectifs visés par le stockage et non de la technologie. Cet objectif peut consister, d'une part, à abaisser au maximum la pointe électrique en arrêtant les compresseurs durant la période de pointe journalière ou, d'autre part, à lisser la charge en faisant fonctionner le compresseur à un niveau de chargement plus régulier toute la journée. La première méthode demande une capacité de stockage plus grande car celui-ci doit permettre de climatiser le bâtiment pour toute la période de pointe où les compresseurs seront utilisés. La seconde méthode demande une capacité de stockage réduite car les compresseurs seront utilisés simultanément à la décharge du stockage de glace durant la journée.

La stratégie d'utilisation et la méthode de régulation constituent donc les piliers de la performance du système et de ses entités. En effet, la demande des réseaux desservis fluctue dans le temps, selon les saisons (dans certains pays) et les coûts de l'énergie (heures pleines, heures creuses, etc.). Ce qui impose une conduite flexible du système.

Les différentes stratégies de gestion du système de stockage de glace et leurs fonctionnements sont détaillés ci-après.

1.9.2.1. Le stockage total

Si les besoins en froid de la journée sont couverts par la quantité d'énergie stockée durant la nuit, le groupe frigorifique peut être arrêté en journée pour permettre au système de fonctionner en mode déstockage, comme il est indiqué à la Figure 92.

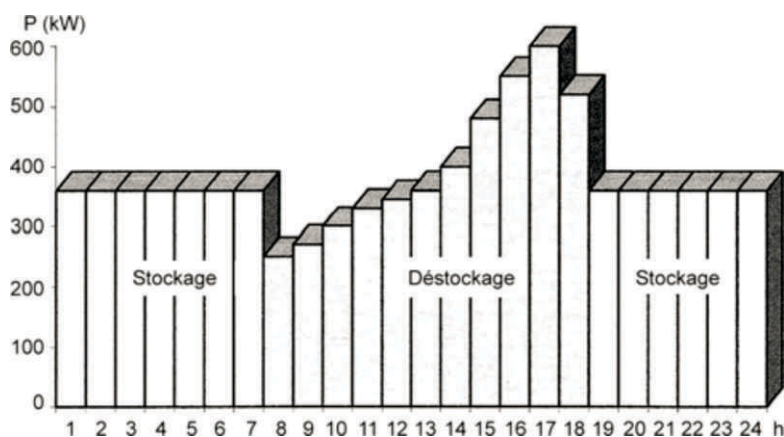


Figure 92 :
Exemple de besoins frigorifiques
entièrement couverts en journée
par le déstockage

Source :
Jean Desmons. Aide Mémoire de
Génie climatique.
2e édition, DUNOD, Paris, 2008, 2009

Cette stratégie permet de diminuer de manière appréciable la puissance frigorifique installée en comparaison avec une installation classique. En revanche, cette stratégie est celle pour laquelle le volume de stockage est le plus conséquent.

1.9.2.2. Le lissage de la charge sur les compresseurs

La nuit, les groupes frigorifiques chargent les cuves de stockage, qui resteront en attente, et se déchargeront en parallèle avec les compresseurs le jour. Les cuves seront dimensionnées par rapport à la puissance frigorifique qui sera requise en période de jour en complément du

fonctionnement des refroidisseurs. Cette configuration permet de réduire la puissance installée des compresseurs qui seront souvent dimensionnés sur 30 à 60 % de la puissance maximum de refroidissement requise par le bâtiment. Dans tous les cas, le dimensionnement et les stratégies de contrôle des compresseurs viseront à les faire fonctionner au maximum de leur rendement. En période de pointe de climatisation, lorsque la demande appelée est supérieure à la puissance frigorifique pouvant être fournie par le groupe, le complément des besoins seront assurés par les cuves de stockage. La présente un exemple de répartition des puissances en mode production directe assistées d'un déstockage de l'énergie emmagasinée dans la glace.

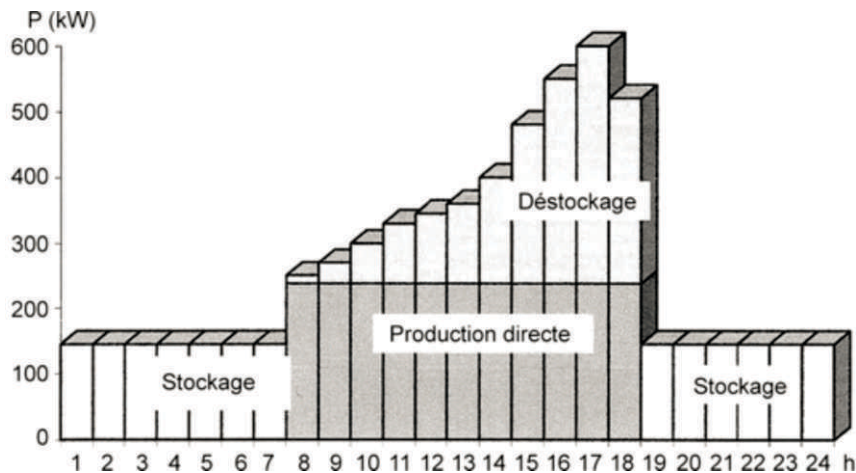


Figure 93 : Exemple de répartition des charges en mode production directe plus déstockage

Source :
Jean Desmons. Aide Mémoire de Génie climatique.
2e édition, DUNOD, Paris, 2008, 2009

1.9.3. Aspect énergétique du stockage de glace

1.9.3.1. Avantages

Les cuves de stockage permettent une régularisation du profil de la charge électrique et une diminution des coûts de l'énergie. Elles constituent une solution flexible et fiable pour la gestion des besoins énergétiques en climatisation et ont le potentiel de réduire de façon importante la puissance frigorifique installée (jusqu'à 70 % dans les applications de lissage de la charge).

En plus des avantages cités ci-dessus, les cuves offrent, entre autres, les avantages spécifiques suivants :

- Réduction de la demande électrique de 20 à 40 % dans les périodes de tarification de pointe.

1.9.3.2. Inconvénients

Les pertes d'énergie par les cuves sont significatives même si le coût de cette consommation reste faible dû à la production du froid hors pointe.

Par ailleurs, les inconvénients suivants peuvent être énumérés :

- Différentiel de température au niveau de l'échangeur requiert un abaissement (approche) de la température du condenseur d'où une consommation d'énergie plus élevée ;
- Le passage du régime positif à un régime négatif entraîne une diminution de la température d'évaporation et, par conséquent, une baisse de la performance du groupe

frigorifique quoique celle-ci est partiellement compensée par des températures de condensation plus faibles en période de production de glace (souvent la nuit durant les heures creuses);

L'usage de l'eau glycolée, qui est un moins bon fluide frigoporteur que l'eau, exige l'installation de surfaces d'échange accrue ou des différentiels de température plus grands par rapport à un système à l'eau.

1.9.4. Aspect financier du stockage de glace

Théoriquement, les premières observations dès la réalisation du projet amènent à conclure d'une économie directe liée à :

- La réduction de la taille des groupes de froid de 10 à 15 %. Ce qui induit une diminution de leur puissance et celle du volume du réfrigérant. Cette diminution se traduit par une diminution de l'investissement initial en groupes de froid et de ses annexes ;
La réduction des postes de transformation directement en lien avec la réduction de
- puissance froide installée.

Dans la suite du projet, il est important de tenir compte des économies financières réalisées liées à l'exploitation du système. Ces économies sont de trois ordres :

- Économie due au déplacement de la consommation électrique des heures de pointe vers les heures creuses ;
Économie réalisée sur la prime fixe liée à la puissance souscrite (donnée liée au
- déstockage) ;
Économie liée à la diminution des coûts d'exploitation et d'entretien des groupes de
- petites tailles.

Les économies liées à la réduction du coût de l'énergie sont de l'ordre de 10 à 20 % mais varient grandement selon la structure tarifaire de chaque pays.

1.9.4.2. Inconvénients

La complexité de ces installations entraîne un investissement bien plus important que dans le cas des groupes ne disposant pas de stockage ainsi que des surcoûts de maintenance au niveau des dispositifs de stockage (cuves) et de ses équipements annexes (pompes, échangeurs). De plus, l'usage du groupe froid sur une longue période si une stratégie de lissage est utilisée réduira la durée de vie du compresseur.

1.10. Le free Cooling

Le "Free Cooling" est une expression anglophone utilisée pour désigner une méthode de rafraîchissement gratuite d'un logement. Le principe de fonctionnement est simple : il utilise la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une maison, d'un immeuble ou tout autre bâtiment pour alimenter le système de refroidissement.

Le free-cooling est une technique de rafraîchissement passif des bâtiments. Elle utilise l'air extérieur lorsque sa température est inférieure à la température ambiante du bâtiment. Elle peut être l'unique système de refroidissement choisi ou se combiner à d'autres. Ce free-

cooling mécanique, naturel ou hybride selon les cas, a un potentiel de refroidissement limité en demi-saison et en période estivale durant la journée.

Comme toute technique de refroidissement passif, le free-cooling n'est adapté que si une stratégie sur la réduction des besoins de refroidissement a été préalablement menée.

1.10.1. Une solution respectueuse de l'environnement

Le Free Cooling, ou système de refroidissement passif (ou ventilation intensive d'été), permet de refroidir naturellement un bâtiment tout en étant parfaitement respectueux de l'environnement. En été, le principe du Free Cooling est capable d'assurer les mêmes fonctions qu'un climatiseur.

Cette alternative écologique permet de faire redescendre la température ambiante dans un logement de quelques degrés. Les résidents peuvent ainsi bénéficier d'un meilleur confort thermique en été, même s'il fait très chaud dehors pendant le jour et la nuit.

1.10.2. Le principe de fonctionnement du Free Cooling

Le refroidissement passif est une solution très économique puisque la chaleur évacuée du logement est conservée par la sonde géothermique afin de ne pas être gaspillée. Cette énergie permet en effet de chauffer l'eau chaude sanitaire utilisée dans la salle de bains ou dans la cuisine lorsque le système de refroidissement passif est associé à une pompe à chaleur géothermique. La chaleur est alors temporairement stockée dans le sol ce qui permet au système d'être d'une grande efficacité.

Le Free Cooling utilise une énergie gratuite : l'air extérieur. Dès lors que celui-ci est d'une température plus basse que la température intérieure, elle peut servir au fonctionnement de ce système de ventilation forcée. Dans des bâtiments industriels où les machines produisent elles-mêmes de la chaleur lorsqu'elles sont en fonctionnement, l'air frais extérieur permet d'alimenter en fraîcheur les locaux. Les groupes frigorifiques énergivores sont ainsi relayés par le Free Cooling qui permet de réaliser des économies sur la facture énergétique du bâtiment pendant l'hiver.

En été, le système de ventilation permet d'extraire la chaleur que le bâtiment a accumulé en journée.

Les sources d'énergie de refroidissement naturel pouvant être utilisées pour le Free Cooling sont les suivantes :

1. Les eaux profondes (nappes phréatiques, lac, etc.) ;
2. La température extérieure pendant la nuit ;
3. Les vents froids des hautes altitudes (en montagne) ;
4. La température extérieure lorsque les journées sont fraîches (la force du vent joue alors le rôle de ventilateur) ;
5. Les souterrains, etc.

La pompe de circulation du système consomme une petite quantité d'électricité pour fonctionner. Lorsqu'un plancher chauffant est installé dans le logement, le Free Cooling permet de refroidir le sol en refroidissant le fluide caloporteur passant dans les tuyaux. Ce système permet de créer du froid au sol et d'extraire la chaleur des pièces par le haut.

1.10.2.1. Les avantages du Free Cooling

Le refroidissement passif d'un logement permet d'éviter les courants d'air et implique des frais d'investissement peu importants. De plus, à l'usage, c'est une solution efficace qui ne coûte pas très cher.

Un climatiseur est bien plus efficace pour refroidir un logement mais il s'agit d'un système très énergivore et peu respectueux de l'environnement. Pour un refroidissement passif du logement, une pompe à chaleur géothermique est nécessaire. Il faut savoir que le confort thermique des résidents en été est effectif jusqu'à ce que la température d'une pièce atteigne 28 °C. Au-delà, la chaleur est difficile à supporter. Le refroidissement passif permet de diminuer de plusieurs degrés la maison sans installation d'un système de [climatisation](#).

Pour obtenir des performances répondant aux exigences des bâtiments basse consommation, installer un système de Free Cooling est une des solutions idéales.

Sur le toit d'une maison, sur le toit d'un immeuble ou encore sur le toit du bâtiment d'une entreprise, il est conseillé d'installer un système générant de l'énergie grâce à une pompe à chaleur ou un groupe froid réversible. Ces appareils sont capables d'utiliser des énergies gratuites et peuvent générer aussi bien du chaud que du froid pour subvenir aux besoins du bâtiment tout au long de l'année. Afin d'éviter les mauvaises surprises, nous vous conseillons toutefois de prévoir une autre solution de chauffage pour votre bâtiment, puisque ces appareils ne serviront que d'appoint sur les températures extérieures deviennent trop froides. Cette nécessité dépend également du COP (coefficient de performance) de la pompe à chaleur ou du groupe de froid réversible que vous avez installé.

1.10.2.2. Installation des ouvertures

Des châssis basculants sont particulièrement adaptés au principe du Free Cooling. Leur étanchéité contre la pluie est efficace et ils sont prévus pour empêcher les risques d'intrusion. Les châssis basculants peuvent être munis de commandes manuelles ou de commandes automatiques. Pour optimiser le système, il est possible de positionner des grilles fixes à l'intérieur de ce type d'ouverture. Cela permet de pouvoir ouvrir les châssis basculants entièrement. La ventilation intensive est ainsi maximisée puisque les ouvertures peuvent être complètement ouvertes. Selon les besoins en refroidissement du bâtiment, ces grilles peuvent être amovibles et peuvent être ôtées en hiver, par exemple.

Pour mettre en place un système de Free Cooling efficace, sachez que l'air frais entre toujours par le bas d'une pièce et que l'air chaud peut être extrait par le haut du bâtiment. En effet, l'air chaud monte. Cela permet la circulation de l'air.

Sachez également que l'orientation du bâtiment a une influence directe sur l'efficacité du système de Free Cooling. La majorité des vents forts soufflent depuis le sud-ouest et l'axe dans lequel est positionné le bâtiment à son importance. En effet, des vents parallèles aux ouvertures ne fonctionnent pas pour le système de Free Cooling.

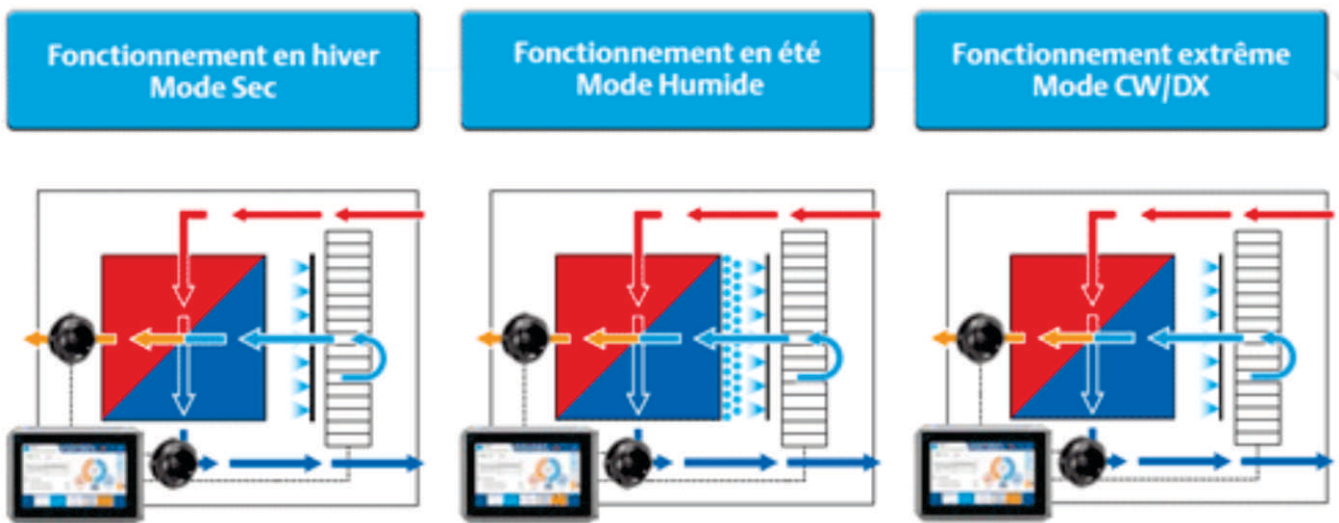


Figure 94 : Principe du Free Cooling

1.10.2.3. Free Cooling comment ça marche?

Les Roof top et les CTA fonctionnent en marche normale en air repris avec un minimum d'air neuf (ex: 80% air repris, 20% air neuf, moduler en fonction de la température extérieure), ce réglage est géré par l'utilisateur via un automate ou par une sonde de qualité d'air en fonction du taux d'occupation ou encore par deux sondes hygrométriques par différence d'enthalpie entre l'air intérieur et extérieur.

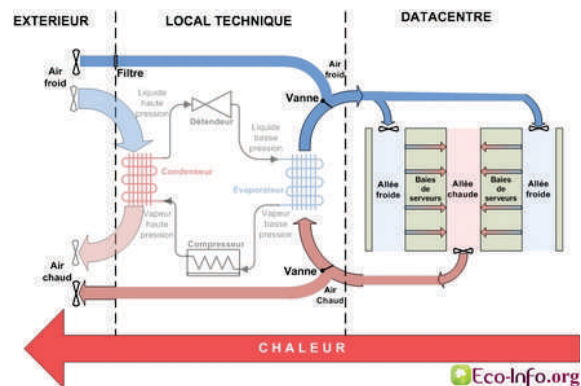
Le free Cooling (refroidissement gratuit) consiste à utiliser directement l'air extérieur pour refroidir un local on introduit de l'air extérieur si celui-ci est d'une température plus basse que l'air repris (intérieur) et que la régulation est en demande de froid. L'admission de cet air plus frais se fait par l'intermédiaire d'un volet ou registre motorisé commandé par une régulation. Ce système peut remplacer complètement la puissance frigorifique distribuée par les compresseurs ou les vannes trois voies lorsque la température de l'air extérieur le permet et ceci jusqu'à que la demande de froid devienne trop importante et à ce moment la régulation démarrera le ou les compresseurs (roof top etc) ou ouvrira les vannes trois voies.

Le Free Cooling est intéressant énergétiquement pour les locaux avec de fortes charges internes, Data center, magasin avec beaucoup d'éclairage ou à forte occupation, casino de jeux, enfin des locaux ayant des besoins en rafraîchissement une grande partie de l'année.

On distingue quatre types de free Cooling

a) Free Cooling à air – direct

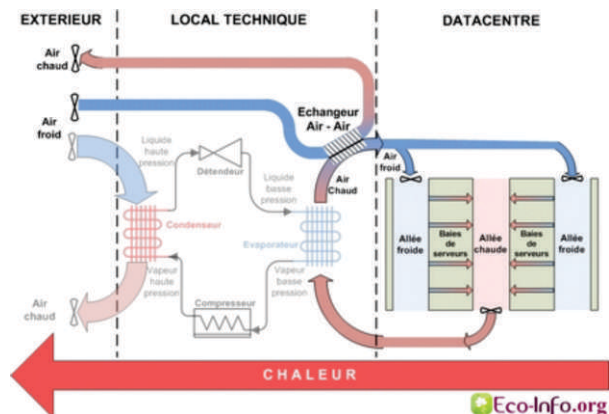
Figure 95 : Principe du Free Cooling



- L'air frais de l'extérieur entre directement dans le circuit d'air de refroidissement du Datacentre.
- L'air extérieur peut éventuellement être rafraîchi en passant dans un échangeur air - eau si le datacentre dispose d'eau industrielle.
- Si nécessaire, il peut y avoir une pompe à chaleur qui ne prendra alors le relais qu'en cas de nécessité (lorsque la température extérieure est par exemple supérieur à 30°C (Voir les recommandations de l'ASHRAE et de l'ETS)).
- Le flux d'air en sortie est recyclé et mélangé avec l'air extérieur pour éviter une charge de travail en humidification/déshumidification inutile.

b) Free Cooling à air – indirect

Figure 96 : Principe du Free Cooling



Dans le cas où l'air extérieur frais est impropre pour une entrée directe dans le circuit de refroidissement du Datacentre (taux d'humidité trop élevée, trop chargé en particules) il est tout de même possible d'effectuer un échange de chaleur.

- L'air du circuit de refroidissement du Datacentre est recyclé et passe par un échangeur de chaleur air – air avec l'air extérieur.
- Le datacentre est situé à proximité d'une source d'eau fraîche (cours d'eau, eau industrielle, etc.).
- Cette eau peut être encore rafraîchie à l'aide d'un échangeur eau – air ou par une tour de refroidissement.
- L'eau est directement distribuée dans le circuit d'eau glacée du Datacentre.
- Ce système est encore plus efficace avec l'exploitation de baies réfrigérées (refroidissement au plus près de la source de chaleur).

c) Free Cooling à eau – indirect

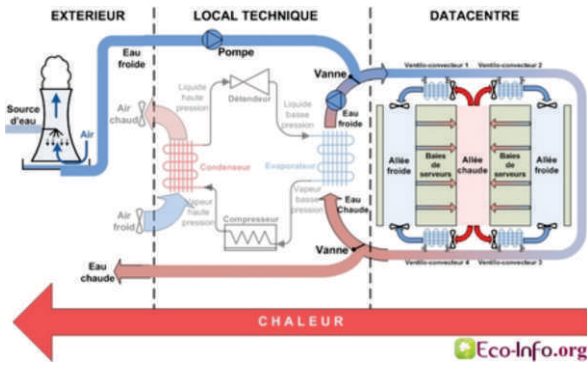


Figure 97 : Free Cooling à eau – direct

d) Free Cooling à eau – indirect

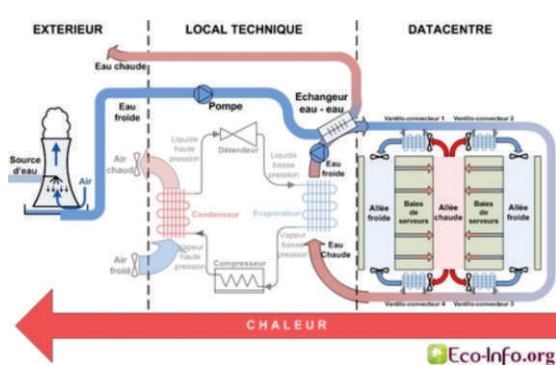


Figure 98 : Free Cooling à eau - indirect

- De même que pour le FreeCooling à eau direct, le datacentre est situé à proximité d'une source d'eau fraîche (cours d'eau, eau industrielle, etc.)
- Cette eau peut être encore rafraîchie à l'aide d'un échangeur eau – air ou par une tour de refroidissement (refroidissement par évaporation).
- L'eau n'est pas directement distribuée dans le circuit d'eau glacée du Datacentre mais passe par un échangeur de chaleur eau – eau .
- Ce système est encore plus efficace avec l'exploitation de baies réfrigérées (refroidissement au plus près de la source de chaleur).

1.11. Le refroidissement adiabatique

Solution économique pour rafraîchir l'air en été, le refroidissement adiabatique consiste à faire passer l'air chaud à travers un échangeur humide. En s'évaporant, l'eau absorbe les calories de l'air qui se refroidit. Si le module adiabatique est correctement dimensionné, la consommation électrique supplémentaire est négligeable, tout comme sa consommation d'eau pouvant être issue de la récupération d'eau pluviale.

Par exemple, un air sec à 20°C avec 30% d'humidité relative est rafraîchi à 12°C en traversant un nuage d'eau. Son humidité relative est augmentée à 80%.

Ce principe s'applique au bâtiment dans les centrales de traitement d'air et dans les machines frigorifiques. Le présent dispositif est uniquement orienté vers les centrales de traitement d'air où l'air pulsé est rafraîchi en humidifiant l'air neuf (refroidissement adiabatique direct) ou l'air vicié (refroidissement adiabatique indirect).

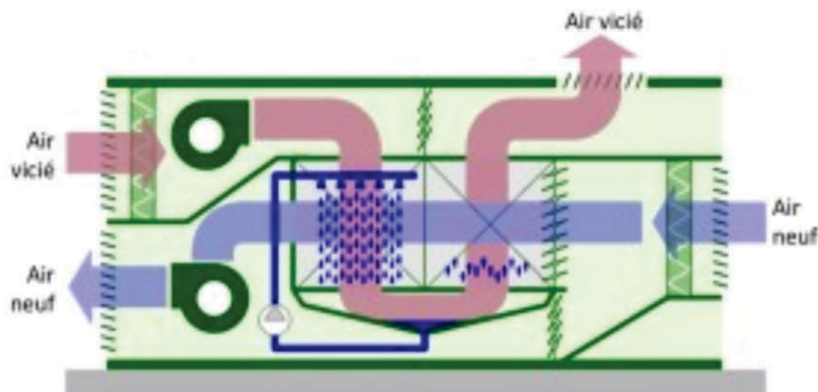


Figure 98 : Refroidissement adiabatique de l'air neuf

Les groupes de refroidissement utilisent aussi le principe de refroidissement adiabatique :

- En pulvérisant de l'eau sur les aérorefroidisseurs pour les groupes de refroidissement utilisant l'air comme source,
- En installant les tours de refroidissement pour les groupes de refroidissement qui utilisent l'air comme source.

Le rafraîchissement adiabatique est plus efficace en été et plus particulièrement lorsqu'il fait chaud et sec. En effet, dans la plupart des pays européens, plus la température augmente plus l'humidité relative diminue. Ceci signifie que plus la température augmente, plus l'air est capable d'absorber de l'eau, augmentant ainsi son pouvoir rafraîchissant. Cette technologie n'est donc pas préconisée si les besoins de refroidissement doivent être satisfaits tout au long de l'année (type locaux serveurs,).

Typologies de refroidissement adiabatique

On distingue deux types de refroidissement adiabatique dans les centrales de traitement d'air :

- Le refroidissement adiabatique direct : l'air pulsé est rafraîchi en humidifiant l'air neuf ;
- Le refroidissement adiabatique indirect : l'air pulsé est rafraîchi par échange de chaleur avec l'air vicié qui est humidifié.

Le refroidissement adiabatique direct est exceptionnel et éventuellement indiqué dans le cas de grandes salles présentant un taux d'occupation humaine faible. L'air insufflé est en effet très humide.

L'objet du dispositif porte principalement sur le refroidissement adiabatique indirect. Dans ce cas, ce n'est pas l'air entrant qui est humidifié, mais bien l'air évacué. Celui-ci transmet ses frigories à l'air entrant via l'échangeur de chaleur.

L'humidification de l'air évacué peut être réalisée de deux manières :

- Avant l'échangeur de chaleur,
- Dans l'échangeur de chaleur.

Le système est compatible uniquement avec des échangeurs de chaleur à plaques. Le tableau suivant présente ces deux principes.


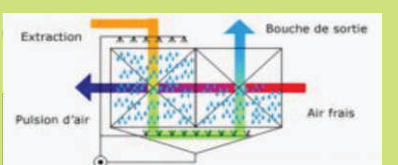
	Refroidissement adiabatique indirect externe à l'échangeur de chaleur	Refroidissement adiabatique indirect interne à l'échangeur de chaleur
Schéma	 <p><i>Principe de l'humidification externe à l'échangeur de chaleur</i></p>	 <p><i>Principe de l'humidification interne à l'échangeur de chaleur</i></p>
Explication	L'air évacué est humidifié en amont de l'échangeur.	L'air évacué est humidifié au sein de l'échangeur.
Conséquences principales	L'air évacué ne peut être refroidi qu'une seule fois (La température la plus basse qui peut être théoriquement atteinte dans l'air évacué est la température du thermomètre mouillé (ou température de rosée) de l'air évacué. La température la plus basse qui peut être atteinte réellement dans l'air évacué dépend du rendement d'humidification). La puissance frigorifique est par conséquent limitée. La récupération d'eau est possible mais un appoint sera toujours nécessaire.	L'air évacué est refroidi tout le long de son trajet dans l'échangeur de chaleur. Chaque fois que l'air reprend de la chaleur dans l'air entrant, il peut être à nouveau refroidi (vers sa température du thermomètre mouillé). La puissance frigorifique est par conséquent supérieure. La récupération d'eau est possible mais un appoint sera toujours nécessaire.

Tableau n°60 : Typologies de refroidissement adiabatique

1.11.1. Spécificités du dispositif selon la nature des travaux

Dans le cadre d'un projet de rénovation, si les installations de ventilation ne sont pas remplacées, il est possible d'installer un système de refroidissement adiabatique externe direct ou indirect. Si le refroidissement est indirect, il est nécessaire de s'assurer que l'échangeur de chaleur puisse supporter des taux d'humidité importants par un traitement de type époxy par exemple.

Le refroidissement adiabatique peut être intégré aux groupes de ventilation existants, soit en modifiant le récupérateur de chaleur (refroidissement adiabatique indirect interne à l'échangeur de chaleur), soit en ajoutant un module de refroidissement adiabatique externe (refroidissement adiabatique indirect externe à l'échangeur de chaleur).

Le module externe de refroidissement adiabatique est directement connecté à la centrale de traitement d'air existante. On évaluera l'impact du système sur les pertes de charges (pour plus d'explications sur les pertes de charge, voir le dispositif (pour plus d'explications sur les pertes de charge, voir le dispositif Conduits de ventilation, à la page pertes de charges) au ventilateur et le réglage du ventilateur sera adapté pour fournir les débits d'air appropriés. En effet, si la plage de fonctionnement du ventilateur n'est pas adaptée, les débits d'air seront réduits et l'installation de ventilation inefficace. De plus, on s'assurera de disposer d'un espace suffisant. Par exemple, pour une installation de ventilation de 9.000 m³/h (correspondant à 250 employés), on prévoira au minimum un espace de 2 m² et une hauteur libre de 50 cm.



Figure 100 :
Installation d'un caisson
de refroidissement adiabatique
direct en toiture

(Source : [Coollea](#))

Pour les **nouvelles installations**, les systèmes de refroidissement adiabatique indirect intégrés à la centrale de traitement d'air ne nécessitent pas de local technique avec des dimensions plus importantes.

1.11.2. Impact santé/environnement

1.11.2.1. Consommation d'énergie

La consommation d'énergie du refroidissement adiabatique est nettement inférieure à celle du refroidissement actif. Un EER (Energy Efficiency Ratio) de 20, voire plus, est possible dans les meilleures conceptions. Le principal consommateur d'énergie est le ventilateur. Celui-ci doit compenser la perte de pression de l'humidificateur et souvent insuffler des débits supérieurs à ceux de la ventilation hygiénique afin d'accroître la *puissance frigorifique*.

Une **consommation** limitée est également consacrée à l'énergie de la **pompe** (par exemple, 600 W pour une *puissance frigorifique* de 33 000 kW) nécessaire pour acheminer l'eau à vaporiser.

1.11.2.2. Confort des utilisateurs

Pour garantir le confort des utilisateurs, le **taux d'humidité de l'air pulsé devra être contrôlé et limité à 70%**. Dans le cas du refroidissement adiabatique indirect, il n'y a pas d'échange d'humidité entre l'air vicié et l'air pulsé, aussi les risques d'inconfort thermique (humidité) et de condensation (plafond froid, tuyaux d'eau de ville non isolés,...) à l'intérieur du bâtiment sont limités.

En revanche, pour le rafraîchissement adiabatique direct, c'est l'élément premier à contrôler lors du dimensionnement, d'autant plus lorsqu'il y a une occupation humaine dans les espaces refroidis via cette technique.

1.11.2.3. Impact sur l'environnement

Le refroidissement adiabatique est une mesure qui réduit l'usage de la climatisation et par conséquent l'emploi de fluides frigorigènes. La performance énergétique du refroidissement adiabatique dépend par ailleurs des données climatiques.

1.11.2.4. Consommation d'eau

Le refroidissement adiabatique est consommateur d'eau. Néanmoins, on peut concevoir cette installation avec une récupération d'eau de pluie. Le dimensionnement du système de récupération d'eau de pluie devra prévoir un stockage suffisant pour le fonctionnement du refroidissement adiabatique en été.

La **consommation** d'eau est considérable (1 litre pour la production d'une *puissance frigorifique* de +/- 0,7 kW). La consommation d'eau dépend des éléments suivants :

- le rendement de l'échangeur de chaleur (plus le rendement est élevé, plus la consommation d'eau est basse),
- la présence ou l'absence d'une récupération de l'eau (la consommation d'eau peut varier de 3 à 4 fois),
- la possibilité d'utiliser de l'eau de pluie (en fonction surtout du type d'échangeur de chaleur).

1.11.3. Avantages et inconvénients des différentes typologies de refroidissement adiabatique

Typologies de refroidissement adiabatique	Avantages	Inconvénients
Refroidissement adiabatique direct	<ul style="list-style-type: none"> ● Facile d'installation par l'ajout d'un module en toiture ou à la sortie de la centrale de traitement d'air sur l'air neuf. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Humidité relative importante qui entraîne un inconfort. Cette technique n'est pas recommandée dans les espaces à occupation humaine ● Utilisation limitée ● Le système implique une augmentation des pertes de charge qui doivent être supportées et configurées dans l'installation de ventilation.
Refroidissement adiabatique indirect externe à l'échangeur	<ul style="list-style-type: none"> ● Installation facilitée par l'ajout d'un module sur l'air vicié en amont de l'échangeur 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nécessite un espace disponible dans le local technique ● Applicable uniquement pour les échangeurs à plaque ● Le système implique une augmentation des pertes de charge qui doivent être supportées et configurées dans l'installation de ventilation.
Refroidissement adiabatique indirect interne à l'échangeur	<ul style="list-style-type: none"> ● Meilleur rendement que le système avant l'échangeur ● Encombrement limité ● Surcoût limité du système pour l'installation d'une nouvelle centrale de traitement d'air ● Pertes de charge prises en compte dans la nouvelle installation 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nécessite l'installation d'une nouvelle centrale de traitement d'air ● Applicable uniquement pour les échangeurs à plaque qui ont un rendement thermique moindre que les roues <i>hygroscopiques</i>

Tableau 61 : Avantages et inconvénients des différentes typologies de refroidissement adiabatique

1.11.4. Etapes de conception et paramètres à définir

Pour concevoir un système de refroidissement adiabatique, il est avant tout nécessaire de réaliser un bilan thermique du bâtiment afin de déterminer une [série de paramètres](#) tels que la charge frigorifique à fournir, la température de l'air à pulser, la charge hygrométrique du bâtiment,...

Il s'agit ensuite, à l'aide de ces données de [dimensionner](#) l'installation et d'en définir la [régulation](#).

Lorsque plusieurs stratégies de refroidissement sont envisagées, il est souvent nécessaire de les comparer par une *simulation thermique dynamique* afin de définir les paramètres de fonctionnement suivants :

[Température de l'air pulsé nécessaire](#)

[Charge hygrométrique du bâtiment](#)

[Rendement de l'échangeur de chaleur](#)

[Rendement de l'humidificateur](#)

[Refroidissement secondaire \(et déshumidification\)](#)

[Débit de ventilation : faut-il l'augmenter ou non?](#)

2. L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL :

La conception de l'éclairage des locaux hospitaliers doit être préalablement étudiée par l'architecte vu les conditions particulières requises pour chaque entité du bâtiment, et surtout les conditions climatiques en Tunisie.

En effet, le nombre élevé de journées ensoleillées (300 j/an) conjugué à une forte luminosité, fait que l'éclairage naturel doit être pris en considération en fonction des orientations des locaux et de leur affectation.

Les longues et nombreuses journées ensoleillées représentent un potentiel d'économie d'énergie appréciable et un intérêt physiologique et psychologique certain pour les occupants si la conception du bâtiment en a tenu compte (l'orientation des façades, dimensionnement des ouvertures, choix des matériaux de revêtement et de leurs couleurs). Le cas contraire, des défauts de conception tels que des grandes baies vitrées non protégées au sud ou des chambres d'hospitalisation ouvrant au sud-ouest, présenteraient outre une sérieuse gêne pour les occupants, une surconsommation énergétique importante en mesures palliatives.

La part du poste éclairage dans le bilan de consommation d'électricité des établissements hospitaliers tunisiens varie de 17% à 50%, suivant la catégorie d'établissement (publics, privés, centre hospitalo-universitaire ou centre de soin, etc.) La disparité de ces ratios, montre qu'il existe un gisement important d'économie d'énergie lié directement au choix des systèmes d'éclairage artificiel (luminaire et lampe) et à leur mode d'exploitation (habitudes des utilisateurs).

L'établissement d'un cahier de charges, précis et complet, mais aussi accessible à tous les intervenants du secteur du bâtiment, constitue la base essentielle pour élaborer et réussir la conception d'un projet d'éclairage. Les critères de conception y afférant seront identifiés et quantifiés.

La maîtrise de la consommation d'électricité pour l'éclairage passe nécessairement par l'optimisation de la contribution de l'éclairage naturel, dans un pays où on comptabilise en moyenne pas moins que 300 jours de soleil par an. Également nous chercherons à préciser l'importance de l'amélioration de l'efficacité globale de l'installation d'éclairage et de l'optimisation de la gestion de la puissance lumineuse et du temps d'utilisation dans la réduction de la consommation de ce poste.

En tant que prestataires de santé, les médecins installés les hôpitaux et les cliniques doivent réaliser des tâches multiples : faire des examens, administrer des traitements, travailler à

l'ordinateur. Leur capacité de concentration et de vigilance est sollicitée pratiquement en permanence. La sécurité et la fiabilité de l'équipement médical – dont l'éclairage fait partie – sont donc cruciales. Dans le même temps, l'efficacité économique gagne en importance. Des solutions d'éclairage intelligentes et sophistiquées contribuent à réduire nettement les dépenses de fonctionnement courantes.

2.1. Notion de base sur l'éclairage

Les grandeurs photométriques sont à la base de toutes les mesures en éclairage et il en existe 4 fondamentales :

2.1.1. L'intensité lumineuse (candela) :

Qui est une des 7 unités du système international mais qui est peu utilisée seule dans l'éclairage à part pour des luminaires très directs

La candéla est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian.

Cette unité est utilisée pour quantifier la quantité de lumière fournie par une source directive. Elle ne dépend pas de la distance d'observation.

Pour avoir un ordre de grandeur, une candela correspond à peu près à l'éclairage d'une bougie (voir le rapprochement étymologique entre candela et chandelier). Il s'agit d'une des 7 unités de base du système international.

La candela est basée sur une lumière de 555 nm de longueur d'onde (couleur verte), c'est à dire en vision de jour dite photopique (donc correspondant au pic de sensibilité des cônes).

2.1.2. Le flux lumineux (lumen) :

Qui est notamment utilisé pour exprimer le flux total émis par une source lumineuse, Il s'agit du flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme située au sommet de l'angle solide et ayant une intensité lumineuse de 1 candela ($1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \times 1 \text{ sr}$). Dans la pratique, cette unité est utilisée pour quantifier la quantité de lumière fournie par une source ou un luminaire de manière globale.

Pour mémoire, un angle solide correspond à la notion d'angle plan mais en trois dimensions et le stéradian est l'unité de mesure de l'angle solide.

2.1.3. L'éclairement (lux) :

Qui peut être notamment utilisé pour exprimer la quantité de lumière souhaitée sur une surface dans une pièce,

Un lux (lx) correspond à l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux de 1 lumen par mètre carré. Dans la pratique, cette grandeur est utilisée pour caractériser une quantité de lumière dans un lieu ou sur une surface.

2.1.4. La luminance (candela/m²) :

Qui porte la notion d'éblouissement et qui est la seule de ces quatre notions directement appréciable par l'être humain.

Une candela par mètre carré correspond à la luminance d'une source dont l'intensité lumineuse est 1 candela et l'aire 1 mètre carré. Cette grandeur est la seule perceptible par l'homme et est très utilisée pour mesurer l'éblouissement, voir la notion d'UGR.

Dans la pratique, la quantité de lumière qui arrive dans la direction de l'observateur est divisée par la surface apparente de la source dans la direction donnée.

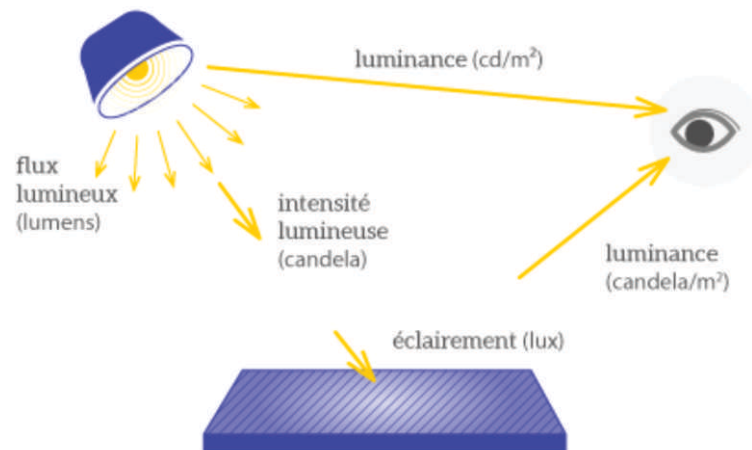


Figure 102 : Les grandeurs photométriques

A cela s'ajoutent d'autres notions comme l'[UGR](#) (méthode unifiée d'évaluation de l'éblouissement) ou [la classe photométrique](#) (répartition du flux lumineux dans l'espace). Les [courbes photométriques](#) sont également présentées dans une page dédiée.

2.1.5. Synthèse

Voici une synthèse de ces grandeurs :

Grandeur	Unité	Définition	Abréviation	Utilisation
Intensité lumineuse	Candela	Flux lumineux par angle solide	Cd	Mesure du flux émis par une source ou un luminaire dans une direction. Est particulièrement approprié pour les sources ou luminaires directs.
Flux lumineux	Lumen	Flux lumineux total	Lm	Mesure du flux total émis par une source ou un luminaire.
Eclairement lumineux	Lux	Flux lumineux par surface (Lm/m^2)	Lx	Mesure du flux sur une surface (au sol, sur un bureau...) Utilisé notamment pour préciser les valeurs exigées dans les différentes pièces d'un bâtiment , voir norme d'éclairage intérieur
Luminance lumineuse	Candela par m^2	Flux lumineux par angle solide divisé par la surface apparente de la source	Cd/m^2	Seule grandeur perceptible par l'œil. L' UGR est calculé à partir de cette grandeur fondamentale pour évaluer l'éblouissement.

Tableau 62 : synthèse de ces grandeurs photométriques

2.2. Les différents types de luminaires et lampes

Les lampes et sources sont à la base de l'éclairage : il s'agit donc de bien les maîtriser pour bien concevoir des [luminaires](#). Leur principe physique est extrêmement variable d'une source à l'autre et ceci a des conséquences importantes quant à leur utilisation.

Produire de la lumière consiste à générer des [photons](#) (c'est-à-dire des [particules électromagnétiques](#)) dont la [longueur d'onde](#) correspond au visible, c'est-à-dire environ entre 380 et 780 nm. Cela est rendu possible par le déplacement d'électrons que l'on peut séparer en deux types :

– **L'incandescence** : il s'agit d'un déplacement d'électrons par **chauffage**, cela correspond à la théorie du [corps noir](#). Les sources naturelles les plus communes proviennent de cette technologie comme le soleil ou le feu.

Les sources artificielles de ce type sont nombreuses et historiquement les premières apparues (feu, lampe à huile, bougie, [lampe incandescence](#), [halogène](#)...). Elles présentent généralement une grande [qualité de lumière](#) ([spectre](#) continu à l'instar de la [lumière naturelle](#)), un prix bas mais une faible efficacité lumineuse et une [durée de vie](#) courte. Elles ne sont quasiment plus utilisées dans l'éclairage à cause de leurs mauvaises performances.

– **La luminescence** : il s'agit d'un déplacement d'électrons **à froid** par réaction électrique ou chimique, par frottement... Cela correspond également à un phénomène naturel que l'on peut retrouver dans un éclair dans le ciel ou une luciole. Les sources artificielles sont nombreuses et variées également. Elles sont apparues uniquement à la fin du XIXe siècle (grande famille des [lampes à décharge](#): [lampe au sodium](#), [aux vapeurs de mercure](#), [aux halogénures métalliques](#), [lampes fluorescentes](#)...) et les [LED/OLED](#) sont venues compléter ce groupe récemment. Le [spectre électromagnétique](#) est discret (donc non continu), ce qui implique une [qualité de lumière](#) possiblement moindre que les lampes incandescentes. Pourtant – et malgré un prix plus élevé –, ces lampes sont très utilisées car elles proposent une grande efficacité énergétique ainsi qu'une longue [durée de vie](#).

[LED \(Light Emitting Diode\)](#) : diode électroluminescente, appelé SSL (Solid State Lighting) ou DEL (Diode Electro Luminescente) en français. Il s'agit d'un composant opto électronique capable de générer de la lumière. La lumière émise est ponctuelle.

Pendant des années, choisir une lampe a été un compromis entre un certain nombre de paramètres comme :

- Le coût ;
- L'efficacité lumineuse;
- La [durée de vie](#) ;
- La [température de couleur proximale](#) (la couleur émise par la lampe) ;
- Le [rendu des couleurs](#) (mesuré par l'[IRC](#), l'Indice de Rendu des Couleurs) ;
- Les puissances ;
- L'encombrement ;
- Le type d'[appareillage](#) ;
- La possibilité de [gradation](#) ;
- La vitesse de réallumage à chaud (pour les luminaires de secours par exemple)

Depuis 2014 environ (et suivant les types de lampes), les LEDs ont petit à petit éclipsé toutes les autres sources par leurs propriétés très intéressantes (efficacité, durée de vie, réactivité, IRC...). Les économies d'échelle ont permis de diviser leur prix par 5 également en quelques années.

Voici un résumé des caractéristiques des lampes utilisées dans l'éclairage professionnel (données prises dans les catalogues des plus grandes marques européennes) :

Type de sources	Coût	Efficacité (lm/W)	Durée de vie (h)	IRC	Puiss.(W)	Appar.	Gradation	Spécifique
Incandescence	Excellent marché	<15	1000 à 2000	100	5 à 100	Non	Découpage de phase	–
Halogène	Très bon marché	10 à 30	2000 à 5000	100	5 à 2000	Non	Découpage de phase	–
Tube T5/T8	Bon marché	80 à 115	20 à 35000	50 à 100	14 à 120	Oui	Electronique, baisse d'efficacité	Fort encombrement
Fluocompacte avec ballast déporté	Bon marché	50 à 90	6 à 20000	50 à 100	5 à 120	Oui	Electronique suivant lampe, baisse d'efficacité	Fort encombrement
Fluocompacte avec ballast intégré	Bon marché	40 à 75	6 à 20000	50 à 100	5 à 75	Non	Lampe spécifique	Fort encombrement
Sodium basse pression	Bon marché	140 à 200	10 à 18000	Non significatif	18 à 180	Oui	–	Fort encombrement
Sodium haute pression	Bon marché	70 à 140	15 à 35000	20 à 80	35 à 1000	Oui	Electronique si ≤150 W Réduction de puissance sur un seuil si > 150 W*	Faible encombrement, réallumage après quelques minutes
Halogénures (ou iodures) métalliques	Bon marché	80 à 120	6 à 20000	60 à 90	20 à 3500	Oui	Electronique si ≤150 W Réduction de puissance sur un seuil si > 150 W*	Faible encombrement, réallumage après quelques minutes
Vapeur de mercure (ballon fluo)	Bon marché	40 à 60	8 à 20000	40 à 70	50 à 1000	Oui	–	Faible encombrement, réallumage après quelques minutes
LED	Correct	150 à 215	50 000	Jusqu'à 90	Jusqu'à 3	Oui	Electronique augmentation d'efficacité	Attention à l'échauffement et à l'éblouissement
OLED	Très cher	Jusqu'à 50	15 000	Jusqu'à 90	Suivant surface	Oui	Non significatif	

Type de sources	Caractéristiques principales	Type de bâtiment	Luminaire	Type de besoin
Incandescence	Peu cher, très faible efficacité, faible durée de vie, excellent IRC	Quasiment inutilisé maintenant, voir norme	Vieux luminaires ou très spécifiques (haute température)	Applications spécifiques comme les très hautes températures
Halogène	Peu cher, faible efficacité, faible durée de vie, excellent IRC	Très peu utilisé, logement particulier	Suspension, lampe de table, lampe de bureau, lampadaire...	Coût faible, encombrement faible
Tube T5/T8	Bon marché, très bonne efficacité, longue durée de vie, bon IRC	Tertiaire, quasiment plus utilisé	Type linéaire ou surfacique comme des suspensions	Bonne efficacité, flux important, dimensions importantes
Fluocompacte avec ballast déporté	Bon marché, bonne efficacité, bonne durée de vie, bon IRC	N'est plus utilisé		
Fluocompacte avec ballast intégré	Bon marché, efficacité moyenne, durée de vie moyenne, bon IRC	N'est plus utilisé		
Sodium basse pression	Bon marché, excellente efficacité, durée de vie moyenne, couleur orangé, très mauvais IRC	N'est plus utilisé		Uniquement relamping sur installation existante
Sodium haute pression	Bon marché, très bonne efficacité, durée de vie moyenne, IRC moyen, délai pour rallumage à chaud	N'est plus utilisé		Uniquement relamping sur installation existante
Halogénures (ou iodures) métalliques	Bon marché, bonne efficacité, durée de vie moyenne, bon IRC, délai pour rallumage à chaud	N'est plus utilisé		Uniquement relamping sur installation existante
Vapeur de mercure (ballon fluo)	Faible efficacité	Inutilisé (interdit en 2015)		Uniquement relamping sur installation existante
LED	Cher, excellente efficacité, très bonne durée de vie, bon IRC, éclairage ponctuel (attention à l'éblouissement et à l'échauffement)	Tertiaire, architectural, industriel, logement	Toute application sauf grande chaleur	Très bonne efficacité, longue durée de vie, toutes dimensions
OLED	Très cher, efficacité moyenne, durée de vie moyenne, éclairage surfacique		Prototype, très haut de gamme design	Design innovant (notamment éclairage à partir d'une surface courbe)

Tableau n°63 : Résumé des des caractéristiques des lampes utilisées dans l'éclairage professionnel

2.3. Niveau d'éclairage exigé selon l'activité

Le classement des luminaires chirurgicaux et d'examens est dictée par la norme internationale EN 60601-2-41.

Lampe d'examens Eclairage : disposé à proximité du patient pour éclairer localement le corps de celui-ci, pour l'accompagnement d'un diagnostic ou d'un traitement pouvant être interrompu, en cas de panne de lumière, sans danger pour le patient. Elle n'est pas prévue pour une utilisation dans les blocs opératoires.

Lampe de petite chirurgie (éclairage de soins) Eclairage individuel disposé à proximité du patient pour éclairer localement le corps. de celui-ci, fournissant une intensité lumineuse centrale adaptée (telle que définie par le tableau de la norme). Elle est prévue pour les blocs opératoires, pour les diagnostics et des traitements pouvant être interrompus, en cas de panne de lumière, sans danger pour le patient.

Grand luminaire chirurgical : Eclairage individuel disposé à proximité du patient pour éclairer localement le corps de celui-ci, à sûreté intégrée (pouvant fonctionner par exemple en cas de dysfonctionnement d'un composant ou d'une panne de courant) et fournissant une intensité lumineuse centrale adaptée (telle que définie par le tableau de la norme). Il est prévu pour l'assistance lors de traitements et des diagnostics, ainsi que pour une mise en œuvre dans les blocs opératoires.

Systèmes d'éclairages chirurgicaux : Une combinaison de plusieurs luminaires chirurgicaux pour éclairer localement le corps du patient. Le système est à sûreté intégrée (pouvant fonctionner par exemple en cas de dysfonctionnement d'un composant ou d'une panne de courant) et fournit une intensité lumineuse centrale adaptée (telle que définie par le tableau de la norme). Il est prévu pour l'assistance lors de traitements et des diagnostics, ainsi que pour une mise en œuvre dans les blocs opératoires.

EXIGENCE	TYPE DE LUMINAIRE		
	LAMPES D'EXAMENS	LAMPES CHIRURGICALES	
		PETIT ECLAIRAGE (SOINS)	GRAND ECLAIRAGE ET SYSTEMES D'ECL.
SURETE INTEGREE	NON	NON	OUI
ANESTHESIE (USAGE PREVU)	LOCALE	LOCALE / GENERALE	LOCALE / GENERALE
LIEU D'INSTALLATION PREVU	SALLES D'EXAMENS	SALLES D'OPERATIONS	SALLES D'OPERATIONS
POIGNEE STERILISABLE	NON	OUI	OUI
INTENSITE LUMINEUSE CENTRALE	AUCUNE EXIGENCE	40 - 160'000 LUX 40 - 90'000 LUX	40 - 160'000 LUX 90 - 160'000 LUX
DIAMETRE DU CHAMP ECLAIRE	AUCUNE EXIGENCE	OUI	OUI
REPARTITION LUMINEUSE D50 DOIT ETRE > OU = 1/2 DE D10!	AUCUNE EXIGENCE	OUI	OUI
PROJECTION D'OMBRES	AUCUNE EXIGENCE	OUI	OUI
TEMPERATURE DE COULEUR	3000 K - 6700 K 3500 K	3000 K - 6700 K 4300 K	3000 K - 6700 K 4300 K
INDICE DE INDICE DE RENDU DES COULEURS	85 - 100 RA > 90	85 - 100 RA > 90	85 - 100 RA > 90
AUGMENTATION DE LA T° DU CHAMP ECLAIRE	AUCUNE EXIGENCE	MAX. 6 MW/M2-LX	MAX. 6 MW/M2-LX

VALEUR DE LA NORME

VALEURS USUELLES DU MARCHÉ

Tableau n°64 : Classement des luminaires chirurgicaux et d'examens suivant la norme EN 60601-2-41

Figure 2: Classement des luminaires chirurgicaux et d'examens suivant la norme EN 60601-2-41
Le tableau suivant spécifie les éclairagements recommandés suivant la norme EN 12464
(Eclairage des postes de travail):

N° de réf.	Type de pièce, tâche visuelle ou activité	Eclairage à maintenir E_m in Lux	Limitation / protection contre l'éblouissement UGR_L	Indice de rendu des couleurs R_a	Remarque
7.1	salles polyvalentes				tous les éclairagements au sol
7.1.1	salles d'attente	200	22	80	
7.1.2	couloirs : en journée	200	22	80	
7.1.3	couloirs : la nuit	50	22	80	
7.1.4	salles de jour	200	22	80	
7.3	chambres médicalisées, chambres en maternité				tous les éclairagements au sol
7.3.1	éclairage général	100	19	80	éclairage au sol
7.3.2	éclairage de lecture	300	19	80	
7.3.3	examens simples	300	19	80	
7.3.4	examens et soins	1000	19	90	
7.3.5	veilleuse	5	-	80	
7.3.6	sanitaires pour les patients	200	22	80	
7.4	salles d'examens (non spécifique)				
7.4.1	éclairage général	500	19	90	
7.4.2	examens et soins	1000	19	90	
7.8	salles d'accouchement				
7.8.1	éclairage général	300	19	80	
7.8.2	examens et soins	1000	19	80	

N° de réf.	Type de pièce, tâche visuelle ou activité	Eclairage à maintenir E_m in Lux	Limitation / Protection contre l'éblouissement UGR_L	Indice de rendu des couleurs R_a	Remarque
7.9	salles de soins (non spécifique)				
7.9.1	dialyse	500	19	80	l'éclairage doit être réglable
7.9.2	dermatologie	500	19	90	
7.9.3	salles d'endoscopie	300	19	80	
7.9.4	salles de pansement	500	19	80	
7.9.5	balnéothérapie	300	19	80	
7.9.6	kinésithérapie et radiothérapie	300	19	80	
7.10	blocs opératoires				
7.10.1	salles de préparation et de réveil	500	19	90	
7.10.2	salles d'opération	1000	19	90	
7.10.3	champ opératoire				E_m 10'000 - 100'000 Lux
7.11	unité de soins intensifs				
7.11.1	éclairage général	100	19	90	éclairage au sol
7.11.2	examens simples	300	19	90	éclairage sur le lit
7.11.3	examens et soins	1000	19	90	éclairage sur le lit
7.11.4	surveillance nocturne	20	19	90	
7.14	salles stériles				
7.14.1	salles de stérilisation	300	22	80	
7.14.2	salles de désinfection	300	22	80	

Tableau n°65 : Les éclairagements recommandés suivant la norme EN 12454 (Eclairage de postes de travail)

2.4. Normes appliqués aux luminaires

La principale norme concernant la fabrication des luminaires est la NF EN 60 598 qui se décompose en deux parties :

- **NF EN 60598-1** Avril 2015 : Luminaires – Partie 1 : exigences générales et essais (partie générale commune à tous les luminaires) ;
- **NF EN 60598-2** : partie spécifique qui dépend du luminaire.

De plus, certaines normes spécifiques viennent s'ajouter :

- **NF EN 13032-1+A1, 2, 3, 4, 5** : Lumière et éclairage – Mesure et présentation des données photométriques des lampes et des luminaires ;
- **NF EN 61547** Novembre 2009 : Équipements pour l'éclairage à usage général – Exigences concernant l'immunité CEM ;
- **NF EN IEC 55015** Août 2019, C91-015 : Limites et méthodes de mesure des perturbations radioélectriques produites par les appareils électriques d'éclairage et les appareils analogues.

- **NF EN 62493** Août 2015 Évaluation d'un équipement d'éclairage relativement à l'exposition humaine aux champs électromagnétiques ;
- **NF EN 62722-2-1** Juin 2016 : Performance des luminaires – Partie 2-1 : exigences particulières relatives aux luminaires à LED ;
- **NF EN 62504** Décembre 2014 : Éclairage général – Produits à diode électroluminescente (LED) et équipements associés – Termes et définitions.

2.5. Démarche de calcul et de conception

2.5.1. Avant-projet:

Tout projet d'éclairage s'appuie sur les données de base du projet. Ces éléments sont soit objectifs (dimensions du bâtiment, exigences normatives...) soit sont la conséquence d'un parti pris architectural (mise en valeur de tel ou tel élément, priorisation des notions...).

Ces données de base peuvent se résumer à :

- Quelle est la nature du projet (objectifs du bâtiment, moyens financiers, ambiance voulue...)
- Quel est le type de local (dimensions, présence de lumière naturelle, matériau...)?
- Quelles sont les tâches visuelles à effectuer (par qui ?, quel type ?, pendant combien de temps?).

A partir de là - et grâce notamment à la norme d'éclairage intérieur EN 12464-1 il devient possible de déterminer :

- Les caractéristiques de l'éclairage (éclairage moyen à maintenir, uniformité d'éclairage)
- Les données sur l'éblouissement (par une valeur de l'UGR)
- La qualité de la lumière (IRC, température de couleur proximale)
- Les efficacités minimales des luminaires
- Les caractéristiques mécaniques du luminaire (IP, IK, classe électrique, test au fil incandescent...)

Ces éléments peuvent être validés par une étude d'éclairage statique et une étude en coût global.

Ensuite, suivant la nature du projet, le type de bâtiment et son utilisation, la gestion intelligente de l'éclairage peut-être également envisagée avec détecteurs de présence/mouvement et/ou de luminosité et luminaires gradables de manière plus ou moins automatique.

2.5.2. Mode opératoire :

Le mode opératoire pour un projet d'éclairage peut donc se résumer ainsi :

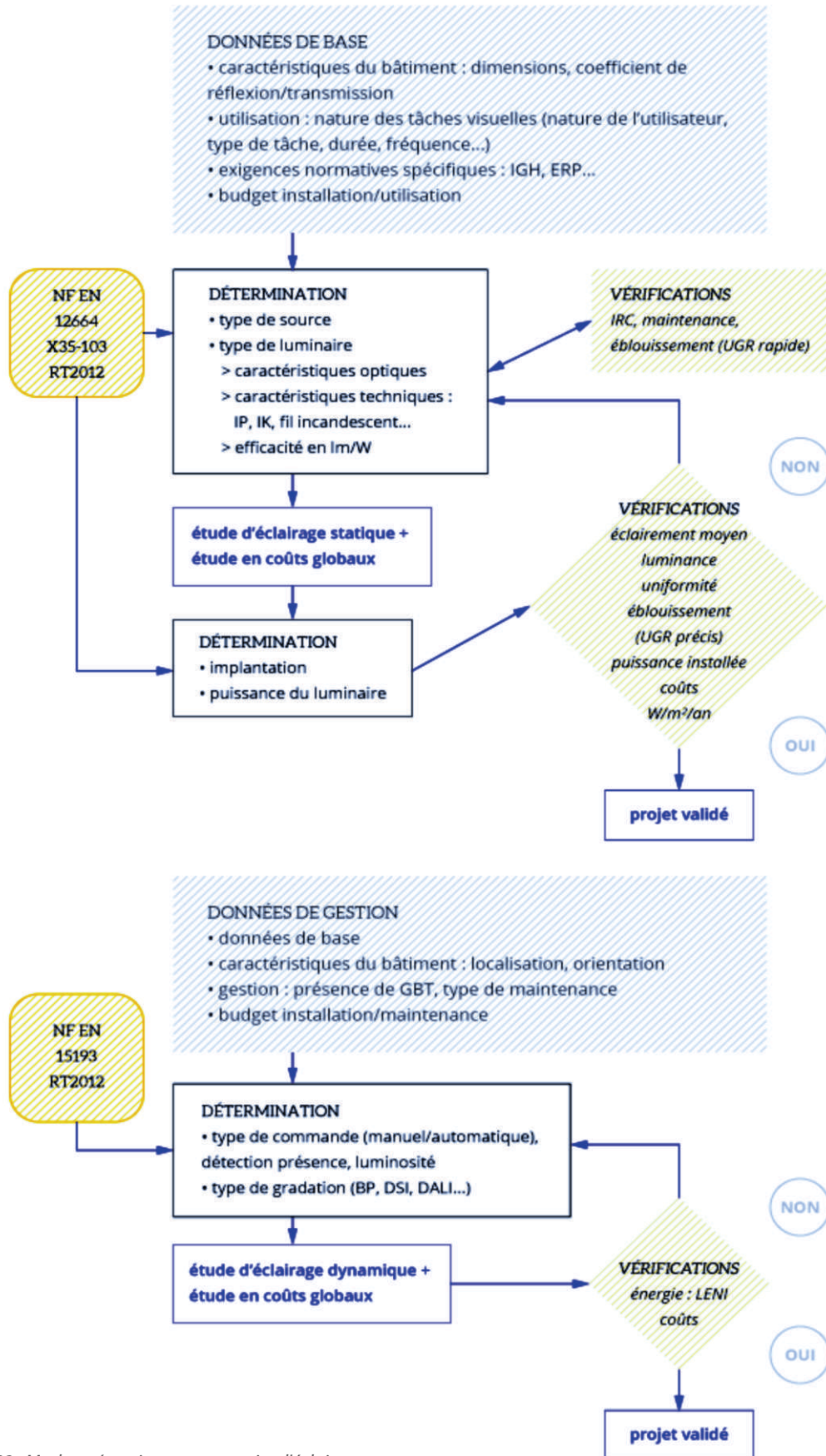


Figure 102 : Mode opératoire pour un projet d'éclairage

2.5.3. Pratique :

Les bâtiments, les pièces et leurs usages se retrouvent dans nombre de situations : des luminaires sont donc dessinés pour certaines utilisations précises et la profession a pris également des habitudes.

En pratique et par habitude, les luminaires sont très facilement définis et il reste donc systématiquement le calcul par le logiciel dédié pour déterminer le nombre de luminaires en fonction des caractéristiques d'un bâtiment et d'une pièce pour un niveau d'éclairément moyen, une uniformité et un UGR donné.

Quant à cet UGR, par manque de temps il est régulièrement considéré par la méthode rapide, c'est-à-dire pris dans une pièce standard et non calculé in situ.

Le mode opératoire simplifié d'un projet se résume donc souvent à ceci :

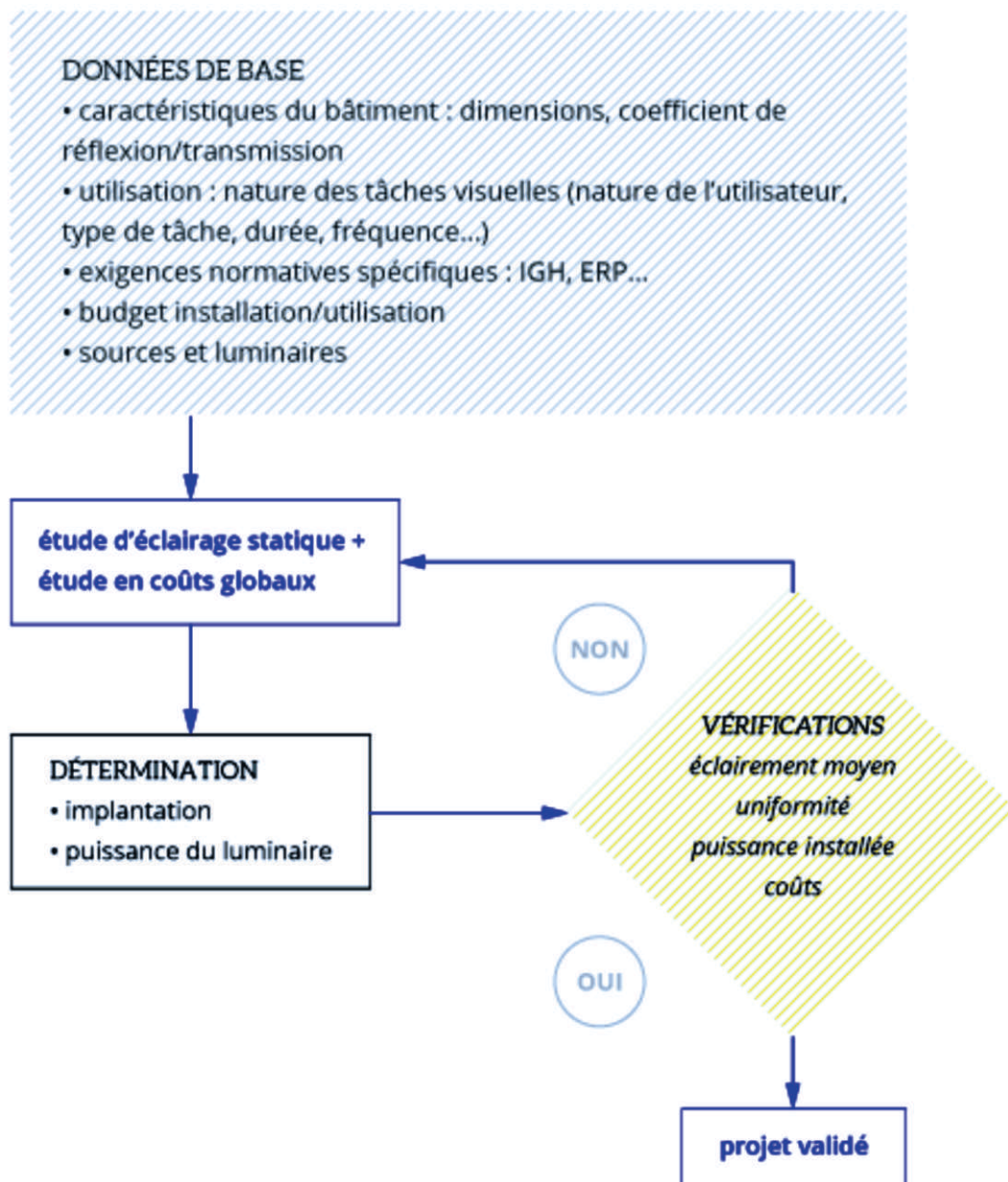


Figure 103 : Mode opératoire simplifié d'un projet éclairage

2.5.4. Etude d'éclairage : possibilités et performances

Concernant l'éclairage, la performance d'un luminaire peut être déclinée en deux grands thèmes, le confort et la performance énergétique. Mais, s'il est important d'analyser le luminaire en lui-même (pour comparaison par rapport aux luminaires de même catégorie), il est capital d'examiner le luminaire dans son milieu : en effet, les luminaires sont étudiés pour une application donnée et certains peuvent être très performants pour telle ou telle utilisation mais inappropriés pour d'autres.

Confort :

L'ergonomie et le confort d'éclairage jouent un rôle capital dans l'éclairage des bâtiments : il s'agit d'un paramètre essentiel aux choix des luminaires.

Les concepts principaux intervenant dans le confort sont, en fonction des tâches visuelles :

- L'éclairage moyen à maintenir (calculable grâce à une étude d'éclairage comme ci-dessous), L'uniformité d'éclairage (calculable grâce à une étude d'éclairage comme ci-dessous),
- Le rendu des couleurs (voir IRC),
- L'éblouissement (voir UGR, calculable grâce à une étude d'éclairage comme ci-dessous),
- Les contrastes.

Toutes ces notions sont traitées de manière exhaustive dans la norme d'éclairage intérieur (EN 12 464-1).

- Tâche visuelle : les détails sont de petites dimensions, les contrastes de luminance de la tâche visuelle sont particulièrement faibles et la tâche est exécutée sur une longue durée,
- Situation à risque : possibilité d'erreur liée à une mauvaise perception visuelle susceptible d'avoir des conséquences graves en termes d'accidentologie, de qualité du produit et de coût.

2.5.5. Performance énergétique :

La puissance installée et la consommation énergétique due à l'éclairage peuvent être calculées facilement en insérant des luminaires dans une pièce grâce à une simulation informatique avec des logiciels appropriés.

Ces études peuvent être de deux types :

- Puissance installée (étude statique) : les luminaires sont insérés dans une pièce et il est possible de calculer l'éclairage sur une surface définie en fonction des luminaires installés, ce qui donne la puissance installée pour l'éclairage qui est un premier indicateur d'efficacité énergétique,
- Energie consommée (étude dynamique) : cette étude reprend l'étude statique précédente mais en la complétant par la prise en compte de la lumière naturelle (et donc de la gradation) et de la présence, voir la EN 15 193.

Voir la page dédiée pour les différents modes opératoires et ci-dessous les détails et une synthèse comparative entre les deux types d'étude.

2.5.6. Etude statique (étude en puissance) :

A partir des données de base des luminaires (la puissance lumineuse assignée ainsi que la répartition du flux lumineux, un calcul est effectué en insérant ces luminaires dans une pièce dont les paramètres géométriques, photométriques et d'empoussièrement ont été rentrés.

2.5.7. Etude dynamique (étude en énergie) :

Mais cette simulation statique ne peut pas prendre en compte la lumière naturelle et les économies d'énergie qui en découlent (avec par exemple des détecteurs de luminosité qui permettent de baisser automatiquement le flux des luminaires).

Afin d'avoir ces valeurs, il est nécessaire de procéder à des calculs plus complexes prenant en compte notamment:

- la position (qui détermine un ciel "standard", voir ciel couvert) et l'orientation du bâtiment
- la présence
- le type de détection
- la gradation

Il est ainsi possible de calculer le LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) qui correspond à la consommation énergétique du bâtiment pour l'éclairage (y compris la consommation de veille pour la gradation et l'éclairage de secours). Sa valeur est donnée en kWh/an/m².

	Etude statique	Etude dynamique (LENI)
Mesure	Puissance installée	Energie consommée
Unité	W/m ² /100lux	kWh/an/m ²
Luminaire, prise en compte de :		
Caractéristiques des sources	oui	oui
Caractéristiques optiques	oui	oui
Système d'allumage	non	oui
Gradation	non	oui
Consommation de veille	non	oui
Luminaires de secours	non	oui
Bâtiment, prise en compte de :		
Géométrie	oui	oui
Caractéristiques photométriques (coefficients de réflexion et de transmission)	oui	oui
Maintenance (facteur de maintenance)	oui	oui
Lumière naturelle	non	oui
Position sur la terre (latitude, longitude)	non	oui
Orientation (nord, sud, est, ouest)	non	oui
Utilisation/présence	non	oui
Normes et règlements		
NF EN 12464-1 – Eclairage intérieur	oui	oui
RT 2012	non	oui
NF EN 15193 – Performance énergétique des bâtiments	non	oui
Calculs		
Éclairement	oui	oui
Uniformité d'éclairement	oui	oui
UGR	oui	oui
Puissance installée	oui	oui
Consommation annuelle (LENI)	non	oui

Tableau n°66 : Comparaison entre une étude statique et dynamique

2.6.L'étude du cout global d'un projet d'éclairage

Un projet de relamping d'éclairage se réalise sur 5 étapes essentielles :

Étape 1 diagnostic : Le diagnostic permet de se doter d'un état des lieux opérationnel, de valider les besoins et d'identifier les économies d'énergie potentielles.

Étape 2 projeter : Le projeteur élabore la solution d'éclairage en tenant compte des réglementations et des normes. Le projet permet de hiérarchiser les besoins. L'étude photométrique est une étape fondamentale pour garantir le bon éclairage et la maîtrise des consommations d'énergie.

Étape 3 planifier : Un plan lumière (SDAL ou Schéma directeur d'aménagement lumière) permet la programmation pluriannuelle des investissements de rénovation.

Étape 4 installer : L'installateur dépose l'ancien équipement. Il met ensuite en œuvre le nouveau matériel prescrit par la collectivité.

Étape 5 Maintenir : Le contrôle périodique des installations et le nettoyage régulier des matériels permettent de conserver l'efficacité dans le temps.

L'approche économique s'apprécie dans l'achat des luminaires, mais également dans l'installation et la maintenance (relamping et nettoyage) et l'énergie consommée. Le but étant de pouvoir comparer différentes solutions avec un indicateur de retour sur investissement (TRB: temps de retour sur investissement).

Un outil couramment utilisé est l'analyse en coût global avec un tableau comme ci-dessous. Cette étude est à mener en parallèle avec une étude d'éclairage.

Lampes ou tubes interchangeables	Module non interchangeable (LED)
Données de base	
Niveau d'éclairement moyen à maintenir (EN 12 464-1)	
Surface du local (m ²)	
Nombre d'heure d'allumage par jour (h)	
Nombre de jours d'allumage par an (j)	
Nombre d'heures d'allumage par an (EN 15 193)	
Durée de vie économique des lampes utilisées (h)	Fréquence de nettoyage du luminaire
Prix de l'électricité (DTTC par kWh)	
Taux horaire de la main d'œuvre (DT)	
Coût de l'investissement initial	
Nombre de luminaires dans le local	
Nombre de lampes par luminaire	-
Temps d'installation par luminaire (h)	
Temps d'installation des systèmes de gestion (h)	
A = Coût total installation (DT)	
Coût du luminaire sans lampe (DT)	Coût du luminaire avec LED (DT)
Coût d'une lampe (DT)	-
Coût du système de gestion lumière du jour (DT)	
Coût du système de gestion présence (DT)	
Coût des lampes par luminaire (DT)	-
Investissement par luminaire (DT)	
B = Coûts total des luminaires équipés (DT)	
A + B = C = Investissement total : fourniture et pose luminaire et gestion (DT)	

Tableau n°67 : Outil d'analyse du coût global d'éclairage

Coût de consommation d'énergie	
Puissance installée (<u>étude d'éclairage</u> statique, kW/m ²) ou Energie consommée annuelle (LENI, <u>étude d'éclairage</u> dynamique, kWh/an/m ²)	
Consommation annuelle du local (kWh/an)	
D = Coût annuel de la consommation énergétique (DT)	
Coût de la maintenance	
Nombres de lampes à remplacer par an	–
Coût des lampes à remplacer par an (DT)	–
Temps d'intervention pour le nettoyage d'un luminaire et le remplacement des lampes (h)	Temps d'intervention pour le nettoyage d'un luminaire (h)
Temps d'intervention pour le nettoyage des luminaires et le remplacement des lampes (h)	Temps d'intervention pour le nettoyage des luminaires (h)
E = Coût annuel de maintenance (DT)	
D + E = F = Coût annuel d'exploitation (DT)	

A l'aide de ce tableau (et d'études d'éclairage en parallèle), il est possible de comparer différentes solutions d'éclairage pour dresser un bilan du type :

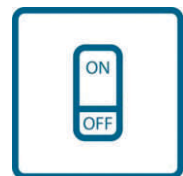
	Solution existante	Projet 1	Projet 2
Consommation annuelle (kWh)	x0	x1	x2
Economies d'énergie annuelles (kWh)		y1	y2
Surcoût de l'installation (DT)		z1	z2
Economies annuelle globale (DT)		a1	a2
Retour sur investissement (an)		T1	T2

Tableau 68 : comparaison des différentes solutions d'éclairage

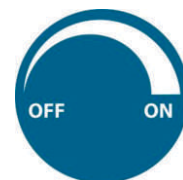
2.7. La gestion de l'éclairage

La gestion de l'éclairage au sens large définit le moyen de contrôler les luminaires dans un local. Il peut s'agir d'un moyen manuel, semi-automatisé ou totalement automatisé :

- **L'allumage/extinction (on/off) manuel** est le moyen le plus facile de contrôler les lampes. Il s'agit simplement d'allumer ou d'éteindre (en contrôlant le circuit électrique) les lampes en fonction des besoins au moyen d'interrupteurs.



- **Le dimming (ou gradation)**, c'est-à-dire l'ajustement en continu de l'éclairage artificiel, consiste à contrôler le flux lumineux de la lampe en fonction des apports extérieurs et des desiderata des utilisateurs.



- **La gestion temporelle** utilise une horloge pour effectuer des actions sur les lampes. Les actions peuvent être effectuées soit à heures programmées (horloge), soit après un certain temps d'allumage (minuterie) et consistent à éteindre l'éclairage, le plus souvent, mais elles peuvent également consister à allumer ou graduer les lampes.



La détection de présence utilise un capteur qui détecte la présence (ou l'absence) d'un individu dans un espace spécifié. L'action sur les lampes peut être de trois types : l'allumage, l'extinction ou, dans certains cas plus rares, la gradation.



➤ **La détection de lumière du jour** va utiliser un capteur photosensible pour effectuer des actions sur l'éclairage artificiel en fonction de l'apport de lumière naturelle. Ces actions peuvent être de différents types : allumage, extinction ou gradation.



➤ **La gestion locale ou centralisée (GTC)** : dans une configuration locale, chaque organe d'action locale (interrupteur) agit sur un ou des luminaires sans passer par un organe de commande central ; dans une configuration centralisée, tous les équipements sont connectés en parallèle sur un même bus de communication, chaque lampe et chaque interrupteur ayant une adresse informatique



➤ **Le contrôle de puissance** : des installations de gestion centralisée permettent de piloter les lampes de manière à toujours maintenir le niveau d'éclairage à la valeur requise. Ainsi, seule l'énergie absolument nécessaire est consommée malgré le surdimensionnement de l'installation d'éclairage nécessaire pour maintenir les niveaux d'éclairage requis durant toute la durée d'utilisation du luminaire.



Il faut donc:

Travailler en priorité sur le zonage de l'éclairage ;

Limiter ensuite la puissance installée ;

Affiner enfin la gestion de l'éclairage, en travaillant sur la détection d'absence et sur la possibilité de "dimmer" un ou deux luminaires en fonction de l'éclairage naturel.



3. LES ASPECTS ÉNERGÉTIQUES DES INSTALLATIONS TECHNIQUES ANNEXES

Dans un établissement de santé, on rencontre outre les appareils de chauffage, climatisation et la ventilation, d'autres appareils et installation pour le service de l'hôpital tel que définit ci après :

3.1. Les Appareils de levage :

Les appareils de levage dans un bâtiment de santé sont la plupart du temps de nature suivant :

- Des ascenseurs, des monte-lits, des monte-brancards et des monte-charge pour faciliter le transport des patients, de l'équipement médical, des charriots avec des aliments
- Un ascenseur est un transport vertical assurant le déplacement en hauteur.
- Les dimensions, la construction et le contrôle en temps réel pendant l'usage des ascenseurs permettent l'accès sécurisé des personnes.
- L'ensemble du dispositif des guides, moteur, mécanique et câbles est installé le plus souvent dans une trémie ou gaine rectangulaire verticale fermée ou parfois semi-fermée située en général à l'intérieur de l'édifice, dans laquelle la cabine et le contrepoids gravitent.

3.1.1. Constitution d'un ascenseur

Principe de fonctionnement d'un ascenseur à adhérence :

Les ascenseurs (ou monte-charge) sont constitués de trois éléments essentiels :

Le mécanisme d'entraînement constitué du moteur, du réducteur et du frein,

- La cabine,
- Le contrepoids.
-

La cabine et le contrepoids sont reliés par des câbles passant par la poulie d'entraînement (poulie du treuil qui fonctionne par adhérence).

Pour dimensionner le contrepoids, on tient compte :

- Du poids de la cabine (ainsi que l'ensemble d'éléments liés à la cabine), on notera ce poids P_{ca} ,
- Et de la charge maximale admissible, noté P_{ch} .

Le contrepoids sera dimensionné selon la relation suivante : $P_{cp} = P_{ca} + P_{ch} / 2$. Il va donc équilibrer le poids de la cabine (appelé poids mort) plus la moitié du poids de charge maximum.

Dans le cas d'une charge maximale, un système sans contrepoids (cas d'un treuil), le moteur doit soulever un poids de $P_{ca} + P_{ch}$, contre $P_{ch}/2$ dans le cas d'un système à adhérence avec contrepoids.

Ce système d'adhérence est créé par un profil spécial donné aux gorges de la poulie d'entraînement où passent les câbles.

La cabine et les contrepoids vont suivre une trajectoire rectiligne à l'aide de guides.

Les éléments d'un ascenseur se situent à deux endroits :

- La gaine d'ascenseur ou la cabine effectue ses déplacements,
- La machinerie qui comporte le moteur et l'organe de commande.

Dans la gaine on trouve généralement :

- Les guides,
- Les amortisseurs de la cabine et des contrepoids,
- La cabine et ses accessoires dont le parachute,
- Les contrepoids,
- Les renvois des limiteurs de vitesse,
- Les câbles de suspensions et des limiteurs,
- Les portes palières,
- Les organes de sélection (à chaque étage),
- Un ensemble de divers accessoires.
- Dans la machinerie, on trouve :
 - La poulie d'entraînement par adhérence, son réducteur, son moteur, son frein et des poulies de renvoi éventuelles,
 - Le limiteur de vitesse,
 - L'appareillage électrique.

La disposition d'un ascenseur varie en fonction de l'architecture des bâtiments.

Ainsi la machinerie peut se situer en bas, en haut ou en position latérale de la gaine d'ascenseur. Aujourd'hui, de nouvelles architectures d'ascenseur permettent de supprimer cette salle de machinerie, le système d'entraînement ainsi que l'appareillage électrique se trouvent alors dans la gaine d'ascenseur (généralement en haut).

La gaine elle pourra être simple ou double (dans le cas de deux ascenseurs) et sera constituée dans certains cas de pylônes auto-porteur afin de recevoir un habillage spécial (gaine en verre par exemple).

Enfin, les portes palières peuvent être soit sur une seule face, soit à plusieurs faces dans le cas d'accès opposés.

Nous voilà donc face à ce schéma :

Se balader sur les éléments de la photo pour obtenir des explications et si une main apparaît elle vous guidera vers une page d'explications.

Ici, deux machineries ont été représentées (en haut et en bas de gaine) mais en réalité, une seule est présente.

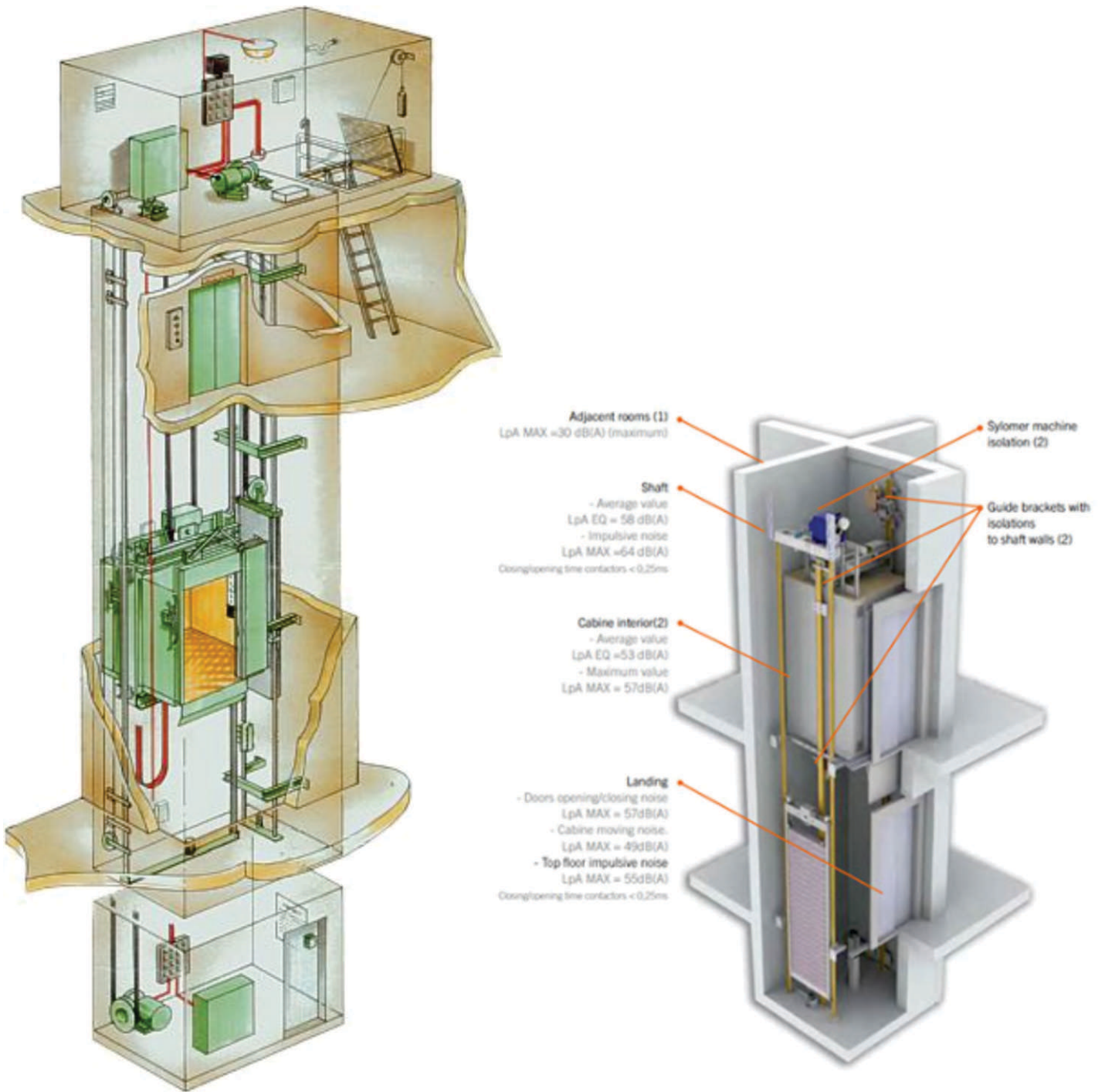


Figure 104 : Composition d'un ascenseur

	ASCENSEURS SANS LOCAL MACHINERIE (MRL)			ASCENSEURS AVEC LOCAL MACHINERIE HAUTE		
VITESSE (M/S)	1-1,6	1-1,6	0,6-1,6	1-1,6	1-1,6	0,6-1-1,6
CHARGE (KG)	320 à 1 000	630 à 1 600	1 650 à 2 500	320 à 1 000	630 à 1 600	1 650 à 2 500
CAPACITE (PERSONNES)	4 à 13	8 à 21	22 à 33	4 à 13	8 à 21	22 à 33

Tableau 69 : Exemple de caractéristique d'un ascenseur

3.1.2. Ascenseur basse consommation

C'est une nouvelle gamme d'ascenseur qui s'intègre parfaitement dans les projets HQE, ou simplement dans les bâtiments de basse consommation (BBC) et ceux de label Haute Performance Énergétique, il assure jusqu'à 45% d'économies d'énergie directes

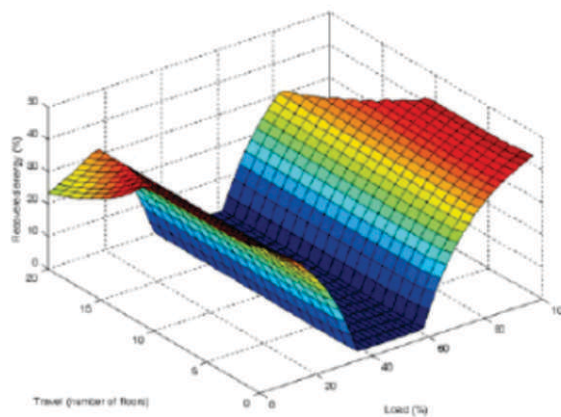


Figure 105 : Courbe de fonctionnement d'un ascenseur

Gestion de l'énergie : L'énergie électrique consommée par l'ascenseur NEO est très inférieure à la consommation des ascenseurs traditionnels. L'économie à considérer peut être calculée en fonction du nombre d'étages desservis, du nombre de voyages et de l'occupation de la cabine. L'ascenseur NEO intègre un système de Régénération d'énergie capable de stocker l'énergie non utilisée par l'ascenseur et de la restituer au moment opportun.

Ainsi, l'ascenseur NEO permet de réduire le pic d'énergie consommée et permet de signer des contrats d'énergie électrique réduits auprès du fournisseur d'électricité du bâtiment

Gestion de l'entretien et de la maintenance : L'ascenseur NEO intègre la technologie de Gearless, moteur synchrone à aimant permanent, permettant une efficacité accrue en termes de rendement de l'installation.

L'entretien d'un tel système en est simplifié. Le cœur de l'ascenseur NEO est adapté à la gestion assistée par ordinateur de la maintenance complète du système avec un suivi en temps réel des différents composants de l'ascenseur.

3.2. La station de production de fluides médicaux:

Les établissements de santé utilisent des fluides médicaux pour le besoin thérapeutique des patients. En effet:

- L'oxygène O₂: principal fluide utile en médecine
- Découvert par Josef Priestley en Août 1774, sa première utilisation en clinique en 1868 (anesthésie dentaire)
- Les fluides médicaux = parie arsenal thérapeutique, possèdent propriétés physiques et pharmacologiques adaptés à utilisation clinique
- Utile en plusieurs disciplines: Anesthésie réanimation, Pneumologie, analgésie...

3.2.1. Utilisation des fluides médicaux dans les établissements de santé:

3.2.1.1. Utilisés pour leurs propriétés physiques: «dispositifs»

- Chirurgie ophtalmique (le tamponnement par le gaz favorise de façon mécanique l'application de la rétine sur l'épithélium pigmentaire);
- CO₂ utile en coelochirurgie (il permet la distension de la paroi abdominale)
- Aspiration médicale (vide) utilisée pour l'aspiration des mucosités et des liquides biologique;
- Les gaz utilisés pour la cryoconservation ou la cryochirurgie.

3.2.1.2 L'utilisation des autres fluides médicaux: «Médicament»

- Propriétés pharmacologiques propres (effet anesthésique ou analgésique du protoxyde, effet vasodilatateur sur la circulation artérielle pulmonaire du monoxyde d'azote)
- Implication "naturelle" dans la respiration, à savoir air médical, oxygène médical, mélanges pour exploration fonctionnelle respiratoire.

3.2.1.3. Les différents fluides médicaux dans le bâtiment santé

- L'oxygène médical
- L'air médical
- Le protoxyde d'azote N₂O
- Le monoxyde d'azote NO
- Les mélanges à base d'Hélium



3.3. La Buanderie :

Avoir une buanderie en interne vous permet de maîtriser les coûts et la qualité du traitement du linge.

En ayant la main sur les processus et les délais, vous êtes en mesure de garantir la satisfaction des occupants :

- Vous choisissez les produits et équipements utilisés pour traiter le linge
- Vous réduisez les coûts de traitement (plus de frais de livraison)
- Vous contrôlez la durée de vie de votre linge

Malgré ses avantages, l'intégration d'une buanderie dans votre établissement hôtelier est un travail complexe, qui doit prendre en compte de nombreux éléments.

3.3.1. Méthode RABC

La norme RABC énonce un certain nombre de règles permettant d'anticiper les risques de contamination et d'assurer une parfaite hygiène de linge.

Pour respecter les normes d'hygiène de base et appliquer la méthode RABC, vous devez réfléchir à la façon dont vous allez aménager l'espace et équiper votre buanderie. Par exemple, vous devez créer deux zones bien définies pour le linge sale et le linge propre (on parle en général de zone propre et zone sale), pour éviter toutes contaminations.

3.3.2. Privilégier des équipements peu énergivores et peu polluants

La création d'une buanderie n'est pas anodine dans le sens où elle génère des coûts. La consommation d'eau en particulier, fait partie des dépenses importantes d'une buanderie professionnelle.

En choisissant un prestataire spécialiste des solutions de chauffage et de production de froid comme FTH Synergie, vous bénéficiez de conseils pour limiter les coûts de votre buanderie avec :

- Des solutions pour améliorer les performances énergétiques de votre buanderie (ex : la récupération de la chaleur des fumées, lors du séchage et du repassage)
- Des solutions pour faire des économies d'eau (ex : le recyclage l'eau chaude grâce à un échangeur thermique)
- Des solutions pour réduire la consommation de produits lessiviels (ex : en utilisant des machines à laver à l'ozone)
- Des contrats pour assurer la maintenance de vos appareils (le calcaire et une utilisation intensive peuvent fragiliser vos machines. Un entretien régulier vous protégera des pannes et autres désagréments pouvant ralentir le traitement du linge).

3.3.3. Penser l'espace afin d'optimiser les conditions de travail

Pour assurer le bon fonctionnement de la buanderie de votre établissement de santé, pensez à créer un espace qui améliore les conditions de travail de vos employés par :

- Un éclairage approprié, pour assurer les travaux de couture et de contrôle de qualité du linge
- Un système de ventilation et de renouvellement de l'air efficace pour évacuer la chaleur et lutter contre l'humidité
- L'emploi de systèmes pour réduire le bruit des machines (ex : plots antivibratoires, création d'un local à part et insonorisé pour les machines)
- Une conception des locaux facilitant les déplacements au sein de la buanderie (ex : avoir suffisamment d'espace pour que les chariots transportant le linge puissent circuler librement).

3.3.4. Créer et équiper une buanderie

Concevoir une buanderie commerciale ou industrielle est un exercice complexe, qui doit prendre en compte de multiples éléments :

- Nombre de machines,
- Dimensionnement des équipements,
- Respect des règles d'hygiène,
- Des règles de sécurité,
- Des normes environnementales

Les objectifs recherchés sont :

- Obtenir le meilleur lavage,
- Avec la plus faible consommation possible,
- Sécher le linge sans utiliser trop d'énergie,
- Optimiser les flux de circulation du linge,
- Eviter notamment que linge sale et linge propre ne se croisent

Le bureau concepteur doit répondre à toutes ces questions, et aider à choisir les équipements qui correspondent aux besoins :

- Machines frontales,
- Séchoirs rotatifs,
- Armoires de séchage,
- Machines aseptiques,
- Volume de 8 kg à 2 t/jour...

Le bureau concepteur doit maîtriser de plus tous les aspects de la démarche RABC et garantir une installation offrant une hygiène irréprochable.

3.4. La cuisine et les chambres froides

La conception d'une cuisine professionnelle doit être effectuée avec des règles d'hygiène et de sécurité drastiques, pour ne pas souffrir aucun amateurisme.

En effet, on ne peut prendre aucun risque avec la santé des personnes et la sécurité des patients et des salariés.

Le bureau concepteur doit créer une cuisine pleinement aux normes, dimensionnée en fonction des besoins, et limitant les consommations d'énergie.

3.4.1. La cuisine et les chambres froides

Le bureau concepteur doit faire une analyse fine des besoins, répondant à toutes les contraintes : hygiène, sécurité, rentabilité...

On distingue les équipements de cuisine suivants :

- Équipement de cuisson : cuisson horizontale (piano, induction, plancha, feux vifs, plaques coups de feu, sauteuse mixte...) ; cuisson verticale (four mixte, à convection, vapeur, boulanger ; cuisson basse température, cuisson sous vide ...)
- Équipement de froid : cellule de refroidissement, chambre froide, froid eutectique ...
- Équipement de préparation dynamique : coupe-légumes,essoreuses, tamis, mixeurs...
- Équipement de lavage : laverie automatique, à capot, lave-batterie...

3.4.2. La ventilation au cœur de votre future cuisine

La ventilation d'une cuisine est un poste souvent sous-estimé, y compris pour une cuisine professionnelle, et pourtant le choix de la hotte est essentiel.

Il peut avoir des implications sur la structure-même de votre bâtiment.

La ventilation permet de traiter l'air, d'apporter un minimum de confort dans les zones de travail.

Elle doit respecter les conditions d'hygiène " marche en avant " (qui permet d'organiser les flux des personnes, des produits et des déchets pour éviter tout risque de contamination des aliments) mais aussi les règles de sécurité incendie.

Les différents type de ventilation dans un cuisine sont (simple, à compensation, à induction, plafond filtrant) et les meilleures solutions pour la sécurité incendie des équipements :

- Systèmes de détection et d'extinction de feux de friteuse,
- Moteurs agréés F400/120 pour la résistance au feu,
- Clapets coupe-feu&hellip.

3.5. La station de surpression d'eau

L'eau est un bien précieux. Préserver sa qualité et en économiser les ressources sont des objectifs toujours plus importants. En fonction du nombre d'habitants ou d'occupants de l'immeuble, en fonction de la surface à arroser ou en fonction des règles strictes de protection incendie, la surpression est un objectif à la fois "SANITAIRE" et "de SECURITE" qu'il a lieu d'intégrer à la fois en termes de fiabilité et d'économie d'énergie.

Prenons le cas d'applications de type habitat et tertiaire (immeubles, HLM, hôpitaux, ...), les besoins exprimés sont :

Maintenir une pression, indépendamment des variations de la consommation. Offrir la même prestation, quels que soient :

- La topographie du terrain
- Les pics de consommation
- Les variations de pression du réseau d'eau de ville
- La hauteur du bâtiment

Il s'agit de concevoir et de réaliser une prestation réunissant un ou plusieurs critères:

- Efficacité au juste prix
- Souplesse, flexibilité, silence
- Communication et anticipation (panne, prévention, automatisme, ...)
- Ou bien une solution sur mesure pour répondre à une demande spécifique



3.5.1. La Variation de Vitesse :

Installer des pompes à variation de vitesse dans les immeubles anciens, permet d'économiser 50% d'énergie par rapport à des pompes à vitesse fixe très souvent surdimensionnées.

Comment fonctionne la variation de vitesse ? Electroniquement, la vitesse et le débit sont ajustés en fonction des besoins thermiques. Cela se passe dans la journée par exemple avec un fort besoin en chauffage le matin et un moindre chauffage l'après-midi dû aux apports solaires. Même durant la durée de vie du bâtiment, si les besoins de l'immeuble évoluent, avec une meilleure isolation par exemple, alors la vitesse pourra s'adapter. La visualisation de la courbe caractéristique débit /pression montre bien le niveau moindre de fonctionnement, moins de débit, moins de pression. $P(\text{Watts}) = \text{Débit} \times \text{Pression}$; le tout baisse et engendre des économies d'énergie.

Les pompes ou surpresseurs équipés de VEV apporte indéniablement des économies d'énergie mais également une sécurité de fonctionnement notamment pour les surpresseurs. N'oublions pas que les surpresseurs fonctionnent quasiment tout le temps avec une variation de débit. Avec la variation de débit, le moteur fonctionne dans une zone de courbes avec rendement élevé. Sinon faire varier le débit en jouant sur la pression occasionnerait de piètres rendements et des dépenses énergétiques plus importantes.

3.6. La station de traitement des Eaux potable:

L'eau potable distribuée par la SONEDE répond à un besoin vital et ne présente aucun risque pour la santé.

Les différentes étapes de traitement de l'eau pour le rendre potable sont :

- **Dégrillage** : les grosses particules sont éliminées.
- **Coagulation** : floculation - décantation : formation des floccs cohésifs, volumineux et lourds donc faciles à décanter.
- **Filtration** : les toutes petites particules présentes dans l'eau sont arrêtées par le sable.
- **Désinfection** : une petite quantité de chlore est ajoutée.

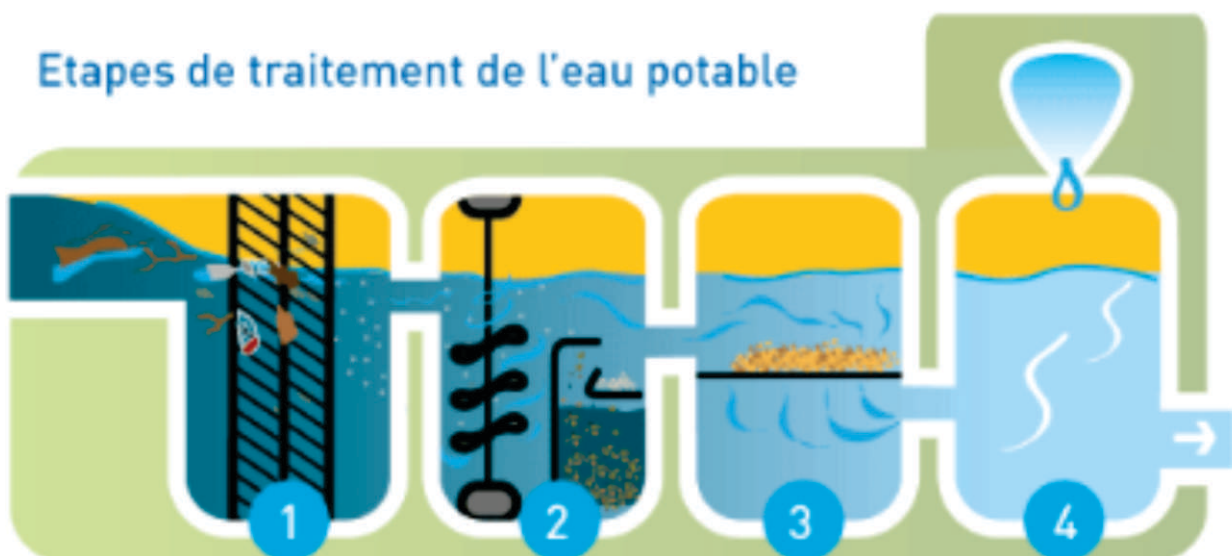


Figure 106 : Station de traitement d'eau potable

3.6.1. Traitement des eaux d'appoint

A la section les eaux de chaudières, on trouve des exemples de qualité exigée sur les eaux d'alimentation de chaudière (extrait du projet Normes européennes). Pour satisfaire ces exigences, un traitement d'eau d'appoint est presque toujours nécessaire et, suivant la qualité de l'eau brute, commence souvent par une clarification filtration permettant de délivrer une eau de qualité physique compatible avec les traitements sur résine et/ou membrane indispensable pour assurer la qualité chimique nécessaire. Par ailleurs, les chapitres mise en œuvre des échangeurs d'ions et séparation par membranes ont décrit les principales technologies utilisées, mettant en œuvre échange d'ions et/ou membranes, voire électrodésionisateur, éléments incontournables des traitements d'eaux d'appoint

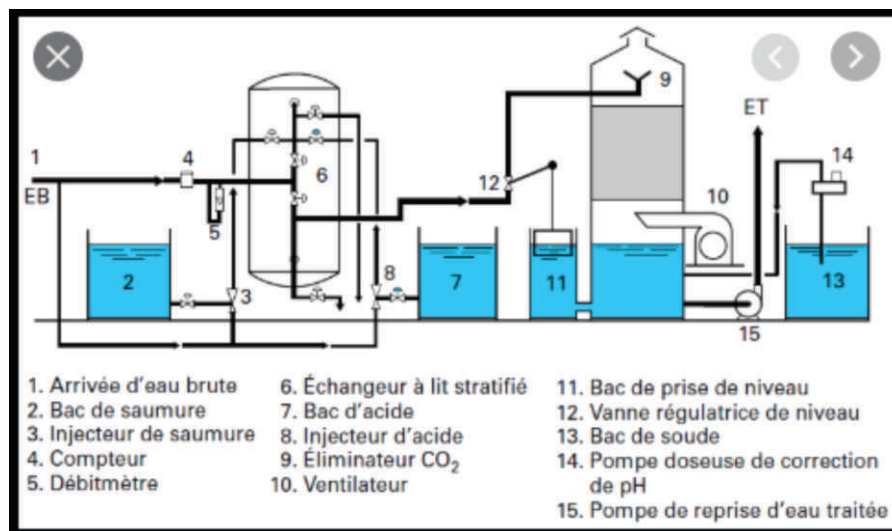


Figure 107 : Traitement des eaux d'appoints

3.6.2. Conditionnement des eaux de chaudières

Le traitement et le conditionnement de l'eau doivent répondre aux trois objectifs prioritaires suivants :

- Maintien de l'échange thermique par prévention de l'entartrage et de la formation de dépôts sur les parois ;
- Protection contre la corrosion ;
- Qualité de la vapeur produite.

Les postes de traitement de l'eau assurent l'épuration et le dégazage de l'eau d'appoint ou de l'eau alimentaire. Le conditionnement est le complément indispensable du programme de traitement et comporte l'introduction rationnelle de « produits de conditionnement » au moyen de groupes de dosage

Parmi les produits les plus utilisés, on peut citer :

- **Les phosphates** : associés à l'alcalinité de l'eau de chaudière, ils neutralisent la dureté par formation de phosphate tricalcique, composé insoluble que l'on peut disperser puis évacuer par les purges de fond ou par les purges continues. Pour les systèmes où l'eau alimentaire est à moins de 1°TH, les phosphates sont utilisés pour contrôler l'alcalinité ou le pH de l'eau en chaudière et par conséquent, permettre d'éviter la corrosion acide ou alcaline des parois internes de la chaudière. On les associe souvent à des dispersants naturels et/ou de synthèse;
- **Polymères naturels** : lignosulfonates, tanins ;
- **Polymères de synthèse** : polyacrylates, copolymère acrylate/styrène sulfonates qui ont également un rôle de séquestrants ;

Les séquestrants : tel que l'EDTA qui permettent de maintenir les impuretés en solution ;

Les phosphates organiques qui apportent une inhibition avec effet de seuil ;

Les réducteurs d'oxygène : sulfite de sodium, bisulfites, tanins, hydrazine carbohydrazine, hydroquinone, dérivés de l'hydroxylamine (DEHA)... Ces réducteurs, catalysés ou non, permettent la rétrogradation des oxydes (ex. Fe_2O_3 Fe_3O_4), la réduction de l'oxygène dissout ainsi que, pour certains, la passivation des surfaces métalliques. Leur choix et leur dosage, diffèrent suivant que l'on dispose ou non d'un dégazage thermique et suivant l'utilisation de la vapeur (certains produits tels que l'hydrazine sont interdits en industrie agroalimentaire).

Les antimousses ou antiprimage, mélanges de tensioactifs qui modifient les tensions superficielles du liquide et suppriment les mousses réduisant ainsi l'entraînement de fines gouttelettes d'eaux dans la vapeur (primage).



3.7. La station d'épuration: STEP

Une station d'épuration est installée généralement à l'extrémité d'un réseau de collecte des effluents et juste en amont de la sortie des eaux qui seront épurées

Les premiers traitements sont présents dans toutes les stations, ils consistent en :

- **Un dégrillage** : passage des eaux au travers d'une grille retenant les éléments les plus grossiers qui seront éliminés avec les ordures ménagères.
- **Un dessablage, dégraissage, déshuilage** : élimination des sables qui sont déposés et des graisses qui flottent et seront raclées en surface.
- **Pour enlever les matières restantes**, on utilise différents systèmes faisant intervenir :
- **Des micro-organismes** (pour les matières biodégradables),
- **Et/ou** des composés chimiques.

Le schéma ci dessous résume pour le système le plus couramment utilisé les différentes étapes du traitement des eaux :



Figure 108 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration à boues activées

3.7.1. Les systèmes d'épuration

3.7.1.1. Les systèmes biologiques

L'élimination des composés organiques

Ils utilisent des bactéries aérobies qui dégradent rapidement par voie oxydative les composés organiques contaminant l'eau. Ces micro-organismes ont une activité pratiquement illimitée. Ils sont capables de transformer nombre de molécules organiques ou minérales grâce à leur extrême richesse en enzymes qui catalysent les réactions nécessaires d'une part, à leur respiration, d'autre part à la synthèse de la matière vivante par biodégradation du milieu.

L'élimination de l'azote :

L'azote organique se transforme dans les eaux usées en azote ammoniacal (NH_4^+). L'élimination de l'azote ammoniacal est, le plus souvent, obtenue grâce à des traitements biologiques, de « nitrification-dénitrification ». La nitrification consiste en une transformation, par des cultures bactériennes, de l'azote ammoniacal en nitrates (NO_3), une forme oxydée de l'azote. Une seconde phase, la dénitrification, complète le processus. Les nitrates, sous l'action de bactéries « dénitrifiantes », sont transformés en azote gazeux. Ce gaz s'échappe alors dans l'atmosphère.

L'élimination du phosphore :

La déphosphatation biologique consiste à provoquer l'accumulation du phosphore dans les cultures bactériennes des boues. Le rendement moyen est d'environ 60 %. Sur SIG -Beauce les stations d'épuration sont repérées en fonction de leur système d'épuration

Les boues activées (BA) :

Dans cette méthode, le traitement des eaux est réalisé par des microorganismes, les bactéries qui se nourrissent de matières polluantes, mais il faut leur apporter de l'oxygène (par des apports d'air) pour leur permettre d'assimiler les polluants. Suivant ce que l'on veut traiter, on utilise différentes bactéries soit pour :

- Traiter le carbone (transformer le carbone en CO_2),
- Transformer l'azote en nitrates puis les nitrates en azote gazeux
- Stocker le phosphore.

La séparation de l'eau traitée de la masse des bactéries (que l'on appelle « boues ») se fait dans un bassin spécifique : le "clarificateur".

Pour conserver un stock constant et suffisant de bactéries dans le bassin de boues activées, une grande partie des boues extraites du clarificateur est ensuite renvoyée dans le bassin.

La plupart des stations d'épuration municipales fonctionnent selon ce principe.

Le décantateur-digesteur : Les matières en suspension tombent par gravité, décantation. Les microorganismes se développent naturellement.

Les filtres à sable (FS) : L'eau traverse un massif de sable qui la filtre, des bactéries épuratrices se développent et complètent cette filtration.

Les filtres à roseaux : Les eaux usées sont traitées dans un bassin à deux étages de graviers planté de roseaux. Les bactéries agissent au niveau des graviers, la présence des roseaux permet d'aérer les eaux. Ainsi depuis la route on aperçoit les roseaux de la station de Loury.

Les procédés biologiques à cultures fixées :

Les biofiltres et les lits bactériens

Le principe de ces procédés consiste à faire percoler l'eau à traiter à travers un matériau sur lequel les bactéries se développent constituant alors un biofilm sur ce support.

Lit bactérien (des galets ou des supports alvéolaires) : les eaux usées décantent sur un lit bactérien poreux. L'aération est donnée par l'oxygène de l'air. Le biofilm qui se forme se détache et tombe au fur et à mesure de sa formation.

Les biofiltres (des argiles cuites, des schistes, du polystyrène, des graviers ou des sables), le développement des bactéries se fait sur des disques. Le biofilm obtenu dans ce cas reste accroché aux filtres.

3.7.1.2. Les traitements physico-chimiques:

Ils permettent d'agglomérer les particules par :

- **Coagulation**
- **Floculation**

qui seront ensuite éliminées par décantation ou flottation.

Certaines stations d'épuration n'utilisent que des traitements physico-chimiques. Elles sont adaptées aux contextes touristiques saisonniers où les variations de charge peuvent être très brutales sur une courte période et permettent d'enlever jusqu'à 90 % des matières en suspension : La pollution dissoute n'est que très partiellement traitée.

Remarque : l'élimination du phosphore se fait par l'adjonction de réactifs, comme des sels de fer ou d'aluminium, et permet d'obtenir une précipitation de phosphates insolubles et leur élimination par décantation. Ces techniques, les plus utilisées actuellement, éliminent entre 80 et 90 % du phosphore, mais engendrent une importante production de boues.

3.7.1.3. Le lagunage naturel

Il est utilisé pour les assainissements collectifs de petite dimension, l'eau usée subit des pré-traitements (dégraisseurs, déshuileurs, dessableurs...) puis elles circulent lentement par gravité dans une succession de bassins (appelés lagunes) peu profonds. Au cours de ce cheminement, la dégradation de la matière organique est assurée principalement par des micro-organismes aérobies (qui ont besoin d'oxygène pour vivre). Les premiers bassins sont des bassins à micro-organismes, où est dégradée la matière organique (microphytes) contenue dans les eaux usées. Le dernier bassin contient des iris, roseaux, joncs. (macrophytes) qui absorbent (pour leur croissance) les éléments minéraux issus de la dégradation de la matière organique, le rayonnement solaire peut aussi éliminer des contaminants biologiques.

3.7.2. La mesure des performances de l'épuration

Pour comparer les teneurs en polluants des eaux usées et des eaux épurées on utilise plusieurs indicateurs

- **Les matières en suspension (MES)** : matières minérales ou organiques non dissoutes mesurées en mg/L.
- **Les matières organiques** présentes sous forme particulaire et dissoute, on les mesure indirectement par :

- La demande biochimique en oxygène (DBO), mesurée en mg O₂/L (comme on la mesure pendant 5 jours (réaction lente), on parle de D.B.O₅ mesurée en mg O₂/L) : c'est la quantité de dioxygène qu'il faut fournir à un échantillon d'eau pour minéraliser les matières organiques biodégradables contenues dans celle-ci par oxydation par des bactéries aérobies.

La consommation en dioxygène provient de deux réactions :

- Une oxydation lente par voie chimique des composés organiques ou minéraux réducteurs en présence d'oxygène dissous
- Une consommation d'oxygène par les micro-organismes présents dans le milieu pour
- La demande chimique en oxygène (DCO), mesurée en mg O₂/L. C'est la quantité globale d'oxygène nécessaire à la dégradation de certaines matières organiques (très difficilement biodégradables par les micro-organismes) par oxydation avec un oxydant chimique fort.
- L'azote et le phosphore mesuré en mg/L
- Les contaminants biologiques (bactéries, parasites) : mesuré en nombre/mL

Ces différents paramètres permettent de définir : l'Equivalent Habitant (ou l'E.H)

Il exprime la charge polluante contenue dans 180 litres d'eau usée c'est-à-dire la production d'un habitant et pour un jour.

Un Equivalent Habitant correspond à : 60g de D.B.O₅ , 135g de D.C.O, 9,9g d'azote, 3,5g de phosphore.

Cette unité permet de déterminer le dimensionnement des stations en fonction de la taille des agglomérations donc de la charge polluante.

4. ALIMENTATION ÉNERGÉTIQUE DE L'ÉTABLISSEMENT

4.1. L'alimentation électrique:

L'alimentation électrique des établissements de santé est assurée à partir du réseau MT STEG 30KV, et parfois 10KV dans les anciennes lignes STEG.

Le raccordement sur le réseau est réalisé selon les schémas suivants :

4.1.1. Raccordement sur un réseau radial MT: simple dérivation

Le poste haut de poteau (voir Postes d'extérieur) ne comporte pas d'appareillage à moyenne tension. Le transformateur du poste est le plus souvent auto-protégé ; sa puissance est limitée à 160 kVA.

Le poste est alimenté par une dérivation du réseau radial (aérien ou câble), aussi appelé réseau en antenne, de distribution moyenne tension. Ce type de réseau permet une alimentation unique pour les récepteurs (cf. Fig. B6-A).

Le poste comporte, en règle générale, une cellule arrivée et protection générale par interrupteur-sectionneur et fusibles avec des sectionneurs de mise à la terre, comme indiqué en Figure B6-B.

Dans certains pays un transformateur monté sur poteau, sans interrupteur-sectionneur ou fusibles (installés sur le poteau), constitue le "poste". Ce type de distribution est très courant dans les zones rurales. Les dispositifs de protection et de manœuvre sont éloignés du transformateur et commandent généralement une ligne aérienne principale sur laquelle sont connectées des lignes aériennes secondaires.

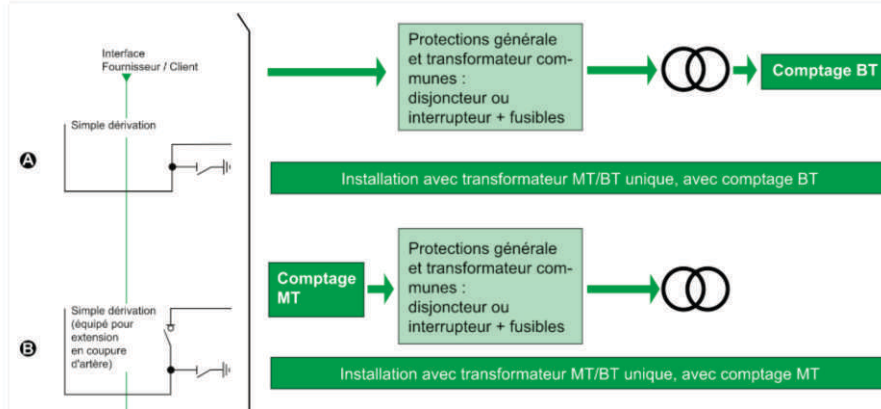


Figure 109 : Raccordement sur un réseau radial MT : simple dérivation

4.1.2. Raccordement sur deux câbles MT en parallèle : double dérivation

Ce type d'alimentation, avec automatisme de permutation (PASA) est utilisé, voire exigé, pour certaines installations à activité critique comportant une nécessité de double alimentation (ex. : hôpitaux).

Lorsqu'il est possible de disposer de deux câbles souterrains en parallèle pour alimenter un poste, on utilise un tableau MT similaire à celui du poste en coupure d'artère (cf. Fig. B6-C).

La principale différence avec le poste en coupure d'artère est que les deux interrupteurs-sectionneurs sont inter-verrouillés de façon à ce qu'un seul d'entre eux puisse être fermé à la fois, sa fermeture interdisant celle de l'autre interrupteur.

En cas de perte de l'alimentation, l'interrupteur d'arrivée correspondant doit être ouvert et l'inter-verrouillage doit permettre de fermer l'interrupteur qui était ouvert.

Cette séquence peut être réalisée de façon manuelle ou automatique.

Les domaines d'utilisation de ce schéma sont les réseaux de certaines villes à forte densité ou en extension alimentés par câbles souterrains.

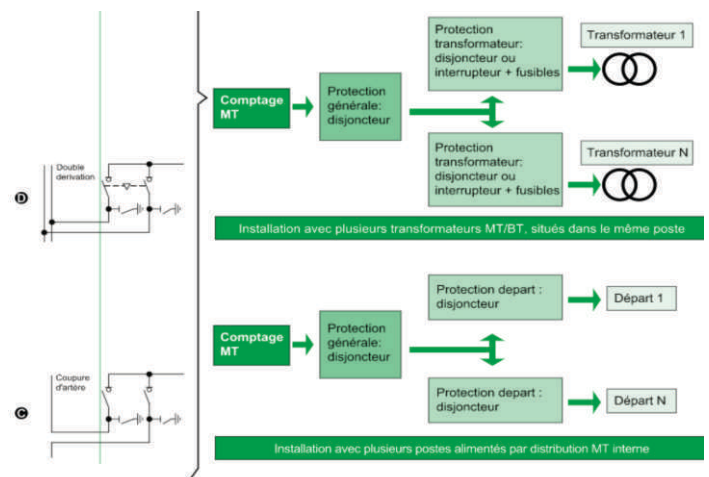


Figure 110 : Raccordement sur deux câbles MT en parallèle : double dérivation

Les différentes tarifications STEG sont les suivantes :

à compter du 1^{er} Juin 2019
(Hors Taxes)

NIVEAU DU TARIF	TARIF	REDEVANCE DE PUISSANCE ⁽¹⁾ (mill/kW/mois)	PRIX D'ENERGIE (mill/kWh) ^{(1) (2)}			
			Jour	Pointe matin été	Pointe soir	Nuit
MOYENNE TENSION	Uniforme	5 000 ⁽³⁾	251			
	Postes horaires	11 000	240	366	329	188
	Pompage pour irrigation ⁽⁴⁾	-	279	NA	Effacement	225
	Irrigation agricole	-	189	Effacement	195 ⁽⁵⁾	138
	Secours	6 000	264	407	365	200

(*) La TVA est à appliquer au taux de 19 % sur les redevances et les prix d'énergie hors taxes.

Tableau 70 : Exemple de tarification STEG Electrique.

4.1.3. L'Alimentation sans interruption

Une alimentation sans interruption (ASI), ou alimentation statique sans coupure (ASSC) ou encore un onduleur (du nom d'un de ses composants) est un dispositif de l'électronique de puissance qui permet de fournir un courant alternatif stable et dépourvu de coupures ou de micro-coupures, quoi qu'il se produise sur le électrique.

Les ASI de dernières générations permettent également de maximiser le facteur de puissance vu du réseau, et de délivrer une haute qualité d'énergie en sortie, tout ceci indépendamment du réseau d'entrée (fréquence et tension RMS fixes, taux de distorsion harmonique faible).

Certaines ASI présentent des modes de fonctionnement capables d'assurer la compensation d'harmoniques des courants absorbés sur le réseau.

Elle repose sur la mise en cascade des dispositifs suivants :

- Un convertisseur de courant alternatif du secteur en courant continu appelé redresseur ;

- Un dispositif de stockage de l'énergie (batterie d'accumulateurs, super condensateurs, volant d'inertie, etc.) ;

- Un convertisseur produisant du courant alternatif (pour la sortie de l'appareil), appelé onduleur ou "mutateur" fonctionnant à fréquence fixe ;

Et accessoirement d'une source d'énergie externe (par exemple un groupe électrogène) si l'interruption de l'alimentation électrique se prolonge au-delà de la capacité du dispositif de stockage prévu.

Le Stockage : Le stockage d'énergie peut être fait sous différentes formes :

- Chimique : dans des batteries d'accumulateurs on parle de BESS de l'anglais Battery Energy Storage System ;

- Électrique : dans des super condensateurs ou des bobines supraconductrices, on parle alors de "SMES" de l'anglais Super conducting Magnetic Energy Storage ;

- Mécanique / énergie cinétique : en utilisant une machine synchrone raccordée au réseau prenant le relais en cas de coupure. On parle alors d'accumulateur cinétique. On trouve sur le marché des accumulateurs cinétiques à axe horizontal ou vertical. Les accumulateurs à axe vertical font souvent appel à la sustentation magnétique et offrent généralement une autonomie plus élevée que ceux à axe horizontal.

- Gaz comprimé : un gaz est comprimé dans un réservoir.

Cependant ce stockage ne peut fonctionner que pendant un temps limité et l'alimentation SANS interruption nécessite une source d'énergie de plus longue durée tel qu'un groupe électrogène. Le groupe est démarré dès que la durée d'interruption de l'alimentation électrique devient critique, par rapport aux capacités de stockage restantes, à la consommation électrique et au temps de démarrage du groupe électrogène.

Il est important de souligner que la nature du stockage utilisé par un onduleur ou ASI ne change pas la nature de l'onduleur. Comme précisé ci-dessous, un onduleur statique qui utilise un accumulateur cinétique comme réserve d'énergie n'en devient pas pour autant une ASI dynamique; pas plus qu'un onduleur dynamique qui utilise une batterie ne devient un onduleur statique.

La Génération : Le courant issu de ces réserves d'énergie est continu. Soit immédiatement (batteries, accumulateurs chimiques ou électriques), soit via un étage redresseur pour les accumulateurs cinétiques (la fréquence du courant alternatif généré naturellement par ces

derniers varie avec la décharge de l'accumulateur et ne peut donc servir directement à alimenter une charge en 50 Hz ou 60 Hz).

Deux technologies sont présentes sur le marché pour la partie onduleur ou mutateur.

1. La technologie statique (s'appliquant aux onduleurs statiques) dans laquelle la tension alternative de sortie de l'ASI est produite à partir du courant continu issu de la réserve d'énergie par le biais de transistors commutés à haute fréquence pour reconstituer un signal sinusoïdal à partir du signal continu.

2. La technologie dynamique (s'appliquant aux onduleurs dynamiques ou rotary UPS) dans laquelle une machine synchrone est utilisée (comme un alternateur) pour générer le courant alternatif de sortie.

Un premier étage à base de thyristor à basse fréquence (50 Hz ou 60 Hz) peut être utilisé pour générer un signal alternatif carré qui est ensuite transformé en sinusoïde par la machine synchrone. Il s'agit alors de technologie "hybride".

Chaque technologie a des avantages et des inconvénients (techniques et financiers) propres qui aident à effectuer le choix pour une application donnée. On observe par exemple que la part de marché des onduleurs dynamiques est plus importante sur les applications de forte puissance telles que les gros centres informatiques de plusieurs milliers de mètres carrés.

Il faut souligner que le choix d'une technologie pour l'étage onduleur/mutateur (statique ou dynamique) ne conditionne pas le choix du type de réserve d'énergie. On peut ainsi avoir un onduleur dynamique avec comme réserve d'énergie des batteries chimiques. Ou inversement retenir un onduleur statique avec comme réserve d'énergie un (ou plusieurs) accumulateur cinétique. Dans ce dernier cas certains utilisent parfois l'appellation d'onduleur dynamique ou rotary UPS. Il s'agit alors d'une appellation erronée car elle introduit une confusion entre la nature de la réserve d'énergie et la technologie d'onduleur utilisée.

La Topologie : Bien qu'il existe sur le marché plusieurs types d'ASI, différents du point de vue de leur configuration ou de leur architecture, on parvient généralement à les classer parmi les trois topologies suivantes :

- En attente passive (offline ou passive standby),

- En interaction avec le réseau (line-interactive)

- À double conversion (online ou double conversion).

Ces expressions désignent l'état de l'onduleur lors du fonctionnement normal du réseau électrique (mode normal de l'ASI).

Quelle que soit sa topologie, l'ASI fonctionne selon le même principe : lorsque la tension du réseau d'entrée sort des tolérances spécifiées de l'ASI, ou lors d'une défaillance de ce réseau, l'ASI se met en mode autonome. Ce mode est maintenu pendant toute la durée d'autonomie de la batterie ou, suivant le cas, jusqu'à ce que le réseau revienne dans les tolérances spécifiées, ce qui entraîne un retour au mode normal.

Le tableau suivant récapitule le fonctionnement en mode normal ou en mode autonome pour chacune des trois typologies.

TYPOLOGIE : ASI FONCTIONNANT EN ATTENTE PASSIVE

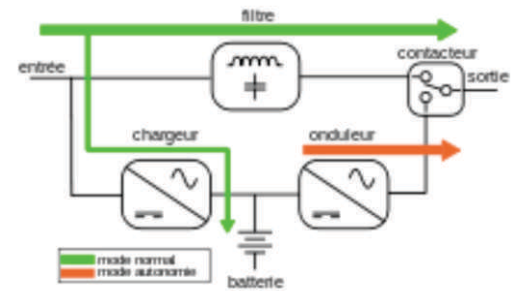
MODE NORMAL

L'onduleur est en attente, isolé de la charge par l'interrupteur d'ASI. La charge est alimentée directement par le secteur, ou par l'entremise d'un filtre ou conditionneur qui élimine certaines perturbations électriques. Le chargeur, branché sur le réseau, assure la recharge de la batterie ;

MODE AUTONOME

L'alimentation de la charge est transférée du réseau vers l'onduleur via l'interrupteur d'ASI. Le temps de permutation de l'interrupteur, généralement très court, est de l'ordre de 10 ms.

Simple et économique, cette configuration n'offre qu'une protection élémentaire. La charge n'est pas véritablement isolée par rapport au réseau électrique et la régulation de fréquence y est inexistante. La régulation de tension, limitée par la capacité de conditionnement d'un simple filtre en ligne, peut être sensiblement améliorée grâce à l'ajout d'un transformateur ferorésonnant ou à commutation de prise automatique. Par ailleurs, le temps de basculement de l'interrupteur, bien que très rapide, peut être inacceptable pour certaines installations sensibles. Ces inconvénients font que ce type d'ASI n'est utilisable qu'avec de faibles puissances (moins de 2 kVA) et pour tous les appareils.



TYPOLOGIE : ASI FONCTIONNANT EN INTERACTION AVEC LE RÉSEAU

MODE NORMAL

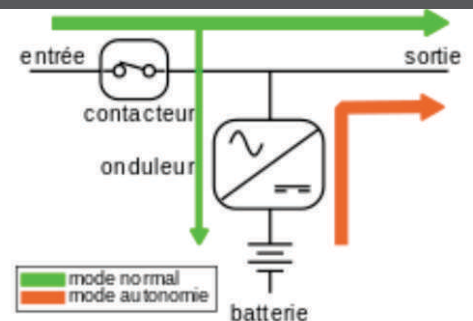
La charge est alimentée par le « réseau conditionné » constitué par l'onduleur en parallèle (en interaction) avec le réseau. L'onduleur, à fonctionnement réversible, conditionne la puissance de sortie et assure la recharge de la batterie.

MODE AUTONOME

L'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge. Le contacteur de puissance coupe l'alimentation d'entrée pour éviter un retour d'alimentation depuis l'onduleur.

L'interaction avec le réseau permet une certaine régulation de la tension de sortie mais elle reste moins efficace que celle effectuée sur l'ASI à double

conversion. Comme l'ASI à attente passive, il n'y a pas véritablement d'isolation entre la charge et le réseau électrique, ni de régulation de fréquence de sortie. Pour ces raisons, cette configuration reste marginale dans le domaine des moyennes et fortes puissances.



TYPOLOGIE : ASI FONCTIONNANT EN DOUBLE CONVERSION

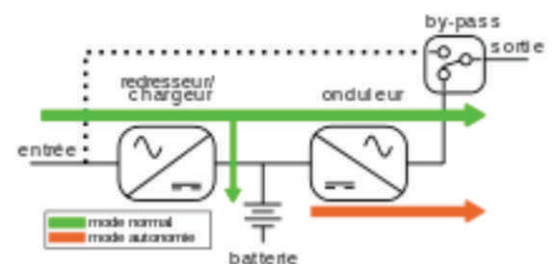
MODE NORMAL

L'onduleur est en série entre le réseau et la charge. La puissance fournie à la charge transite en permanence par le duo chargeur-onduleur qui réalise une double conversion alternatif/continu - continu/alternatif.

MODE AUTONOME

L'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge. Cette configuration est la plus coûteuse, mais aussi la plus complète au point de vue de la protection de la charge. L'onduleur régénère en permanence la tension fournie par le réseau, ce qui permet une régulation précise de la tension et de la fréquence de sortie (il y a même possibilité de fonctionner en convertisseur de fréquence, lorsque cela est prévu). De plus, l'isolement de la charge par rapport au réseau élimine les reports des perturbations du réseau électrique sur la sortie de l'ASI. Par ailleurs, le passage du mode normal au mode autonome s'effectue instantanément, sans aucun délai de permutation.

L'ASI comporte un contacteur statique de dérivation pour rediriger la charge vers le réseau (ou vers une source auxiliaire constituée par exemple d'une génératrice diesel), dans l'éventualité d'une défaillance de l'ASI ou avant la fin d'autonomie de ses batteries. L'ASI étant synchronisée avec le réseau de dérivation, ce transfert s'effectue sans coupure. Grâce à ses nombreux avantages, l'ASI à double conversion est un excellent choix pour protéger les sites et les applications critiques. La puissance et l'autonomie vont être des facteurs clés pour déterminer à quel moment il faut démarrer un [groupe électrogène](#) en cas d'interruption prolongé du secteur⁴.



4.2. L'alimentation gaz naturel, GPL , Gazoil

4.2.1. L'alimentation gaz naturel

L'alimentation gaz naturel est assurée à partir du réseau de distribution national STEG moyennant un poste détente gaz.

On distingue trois types d'alimentation:

- Alimentation Basse pression BP1 ou BP2
- Alimentation Moyenne Pression MP1 ou MP2
- Alimentation Moyenne Pression HP1 ou HP2

Le tableau suivant récapitule les différents type de tarification :

• Niveau pression : Basse Pression 
(à compter du 01/06/2019) (Hors taxes)

Tarif Basse Pression	Secteur	Débit souscrit (th/h)	Redevance De débit ⁽¹⁾ (mill/th-h-mois)	Prix d'énergie ⁽¹⁾		
				(mill/th)	(mill/m3)	
Basse Pression 1	Résidentiel	C° ≤ 300 th/mois 1 à 300 th/mois (1 à 30 m3/mois)	50 et 100	15	24,3	231
					Non Résidentiel	25,5
	Résidentiel	300 < C° ≤ 600 th/mois 1 à 600 th/mois (1 à 60 m3/mois)			35,8	341
					Non Résidentiel	37,5
	Résidentiel	600 < C° ≤ 1500 th/mois 1 à 1500 th/mois (1 à 150 m3/mois)			47,0	447
					Non Résidentiel	51,1
Résidentiel	C° > 1 500 th/mois 1 à 1 501 th/mois et plus (1 à 151 m3/mois et plus)	58,6	557			
		Non Résidentiel	66,2	629		
Basse Pression 2	Résidentiel	160 à 8 000	40	50,0	475	
	Non Résidentiel			56,0	532	

Niveau pression : MP

Tarifs	Débit souscrit (th/h)	Redevance ^(*)		Prix d'énergie (mill/th) ^(*)
		D'abonnement (DT/ab-mois)	De débit (mill/th-h-mois)	
MP1	1 000 à 4 000	20	300	61,6
MP2	6 000 à 30 000	20	450	61,0

Tableau 71 : Tarification gaz de la STEG

(*) La TVA est à appliquer au taux de 19 % sur les redevances et les prix d'énergie hors taxes.

Augmentation du Débit Souscrit :

En cas d'augmentation du débit souscrit (avec ou sans changement de tarif), le coût de renforcement est calculé sur le débit supplémentaire.

Abréviations :

mill = millime Tunisien, DT = Dinar Tunisien, ab = abonnement, th = thermie, h = heure, TVA : Taxe sur la valeur ajoutée

Niveau pression : HP

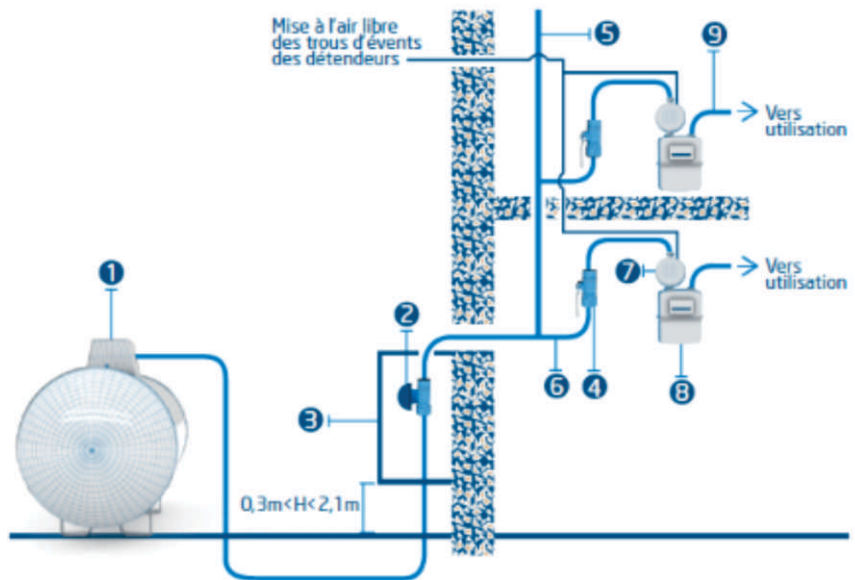
Tarifs Haute Pression	Débit souscrit (th/h)	Redevance (**)		Prix d'énergie (mill/th) (**)
		D'abonnement (DT/ab-mois)	De débit (mill/th-h-mois)	
HP1	10 000 à 30 000	300	700	52,2
HP2	0 à 2 000 Tep/mois (*) (0 à 20 000 000 th/mois)	300	700	58,0
	> 2000 Tep/mois (*) (de 20 000 001 th/mois et plus)			70,0

(*) 1 Tep = 10 000 Thermies

4.2.2. L'alimentation gaz GPL Propane:

Ce type d'alimentation est destinée pour les zones qui ne sont pas desservis par le Gaz naturel, le poste détente est analogue à celui du gaz naturel.

La pression gaz dans le réservoir GPL peut atteindre les 20 Bars.

Schéma d'installation à partir d'une citerne gaz apparente pour collectif

1 - Ensemble détente.

Sous capot la première détente ainsi que le limiteur de pression 1,75 bar sont fournis par Butagaz.

2 - Vanne « coup de poing ».

3 - Coffret comprenant : un limiteur de débit/vanne « coup de poing » sécurité.

4 - Vanne à carré avant compteur.

5 - Conduite montante.

6 - Branchement particulier.

7 - Détente 37 mbar.

8 - Compteur BP à sécurité.

9 - Tube cuivre Ø 10-12.

Figure 111 : Schéma d'installation Gaz GPL

4.2.3. L'alimentation gasoil

Une installation est constitué par :

- Un réservoir gasoil
- Un jauge de niveau
- Un évent
- Une pompe gasoil
- Un filtre gasoil

Pour des raisons de sécurité, il doit être placée à coté du réservoir, un bac à sable, une pelle, un seau et ce pour recouvrir le gasoil par terre en cas d'épandage.

En outre le réservoir doit être placée dans une cuvette dans le volume est supérieurs au volume de gasoil dans le réservoir.

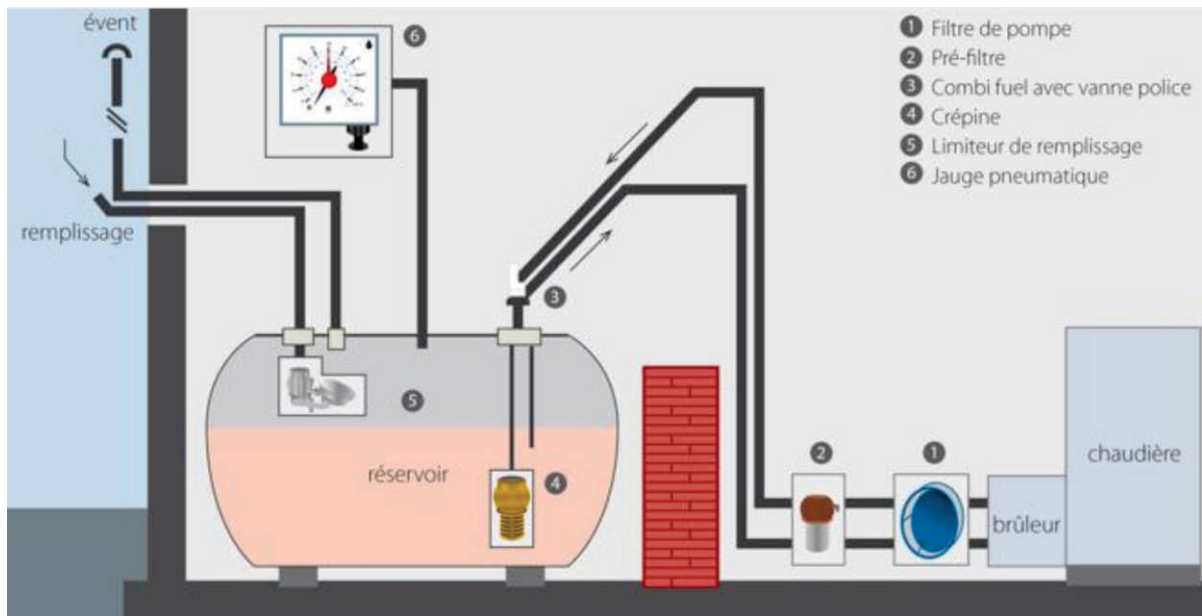


Figure 112 : Schéma d'alimentation gasoil d'une chaufferie

Un distributeur de gasoil, peut être installé à proximité du réservoir gasoil, si des véhicules ou des chariots élévateur sont desservis par celui-ci.

4.3. L'alimentation eau potable:

L'alimentation en eau potable d'un établissement de santé est assurée à partir d'un ou plusieurs compteurs SONEDE

Le schéma de principe de branchement au réseau SONEDE est le suivant :

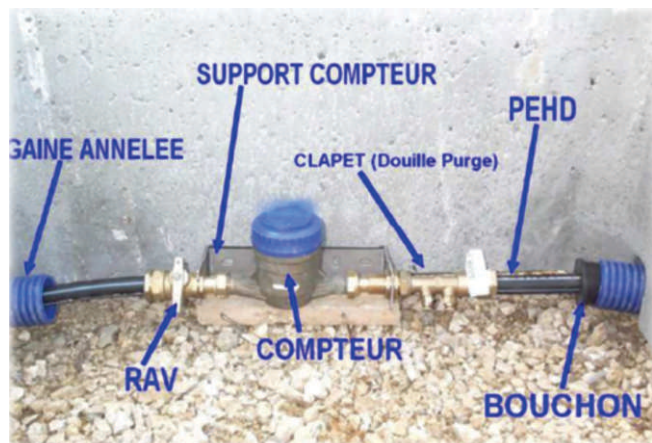
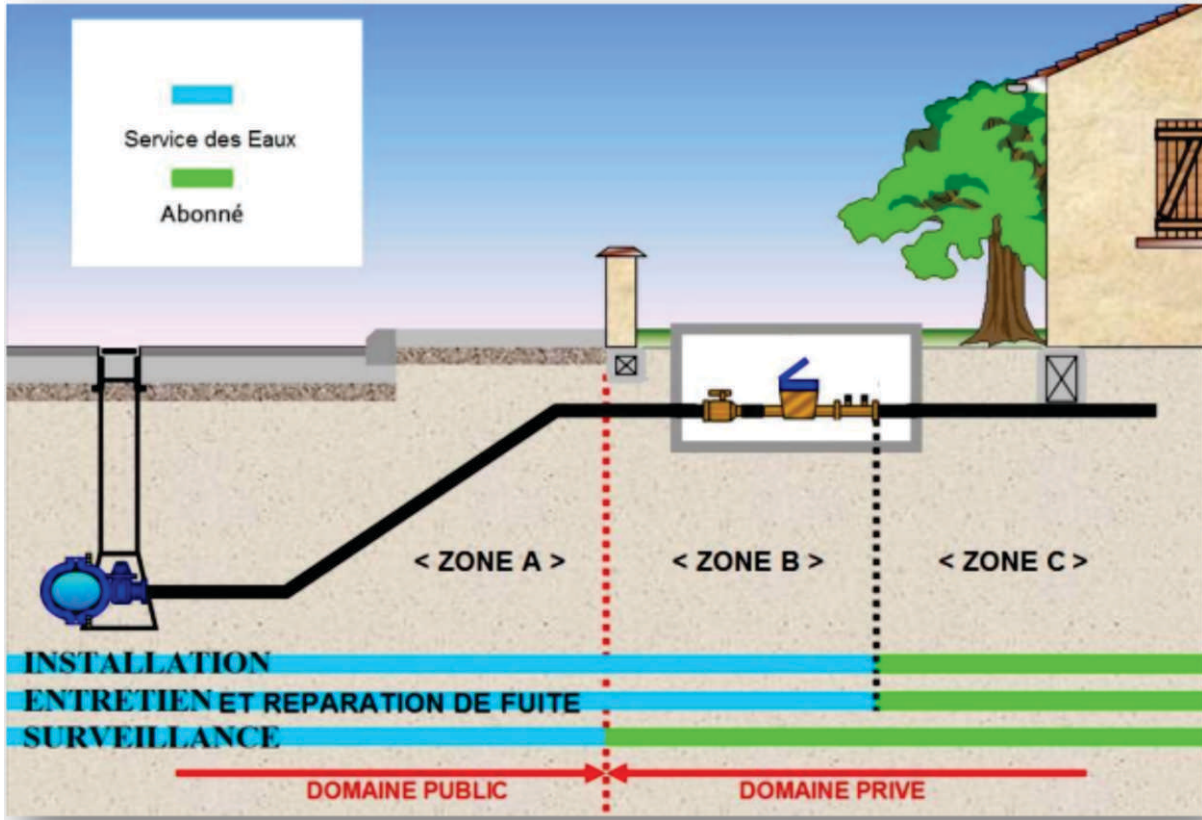


Figure 113 : Réseau d'alimentation d'eau potabl



4.4. La Cogénération - Le tri génération :

La cogénération (ou production combinée chaleur-force) consiste à produire et à utiliser de manière simultanée de l'énergie thermique et de l'énergie mécanique (figures 1 et 2).

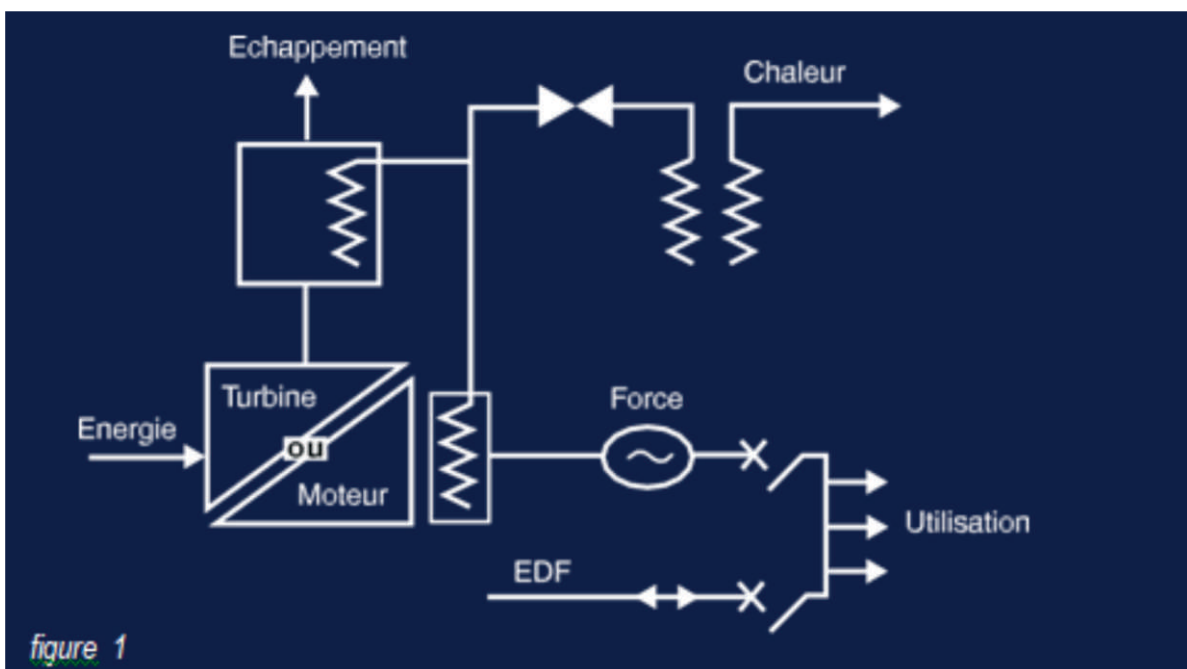


figure 1

Figure 114: Schéma type d'une installation de cogénération

4.4.1. Les avantages de la cogénération

Cette production simultanée permet d'optimiser le rendement global d'une installation en minimisant la consommation d'énergies primaires par rapport à des productions distinctes (figure 3)

En effet, quel que soit le type de la propulsion, le rendement électrique dépasse rarement 35 % :

Pour les turbines, ce rendement varie fortement avec la charge,

Si l'on compare le rendement d'une centrale de cogénération avec le rendement d'un ensemble classique (centrale électrique + chaufferie), le gain est de 30 à 35 % pour la cogénération.

Exemples:

a- Avec une cogénération, 100 kW de combustible produisent :

- 35 kW d'électricité,
- 55 kW de chaleur, soit un rendement de 90 %.

b- Pour avoir les mêmes productions avec une centrale classique, il faut :

- Pour 35 kW d'électricité 100 kW de combustible,
- Pour 55 kW de chaleur 60 kW de combustible, soit un rendement de $90/160 = 56\%$.

La différence de rendement entre les 2 types de centrales est de 34 % et l'économie d'énergie primaire est de $(160 - 100)/160 = 37\%$.

4.4.2. Bilan d'une centrale de cogénération :

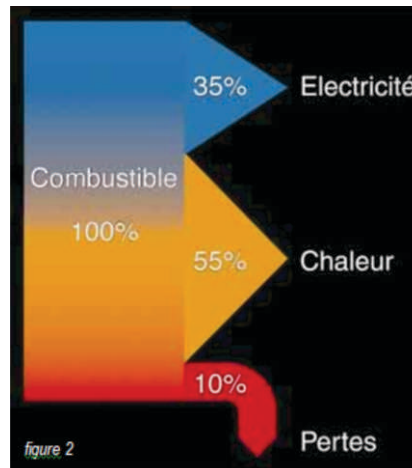


Figure 115 : Bilan d'une centrale de cogénération

4.4.3. Bilan d'un système conventionnel :

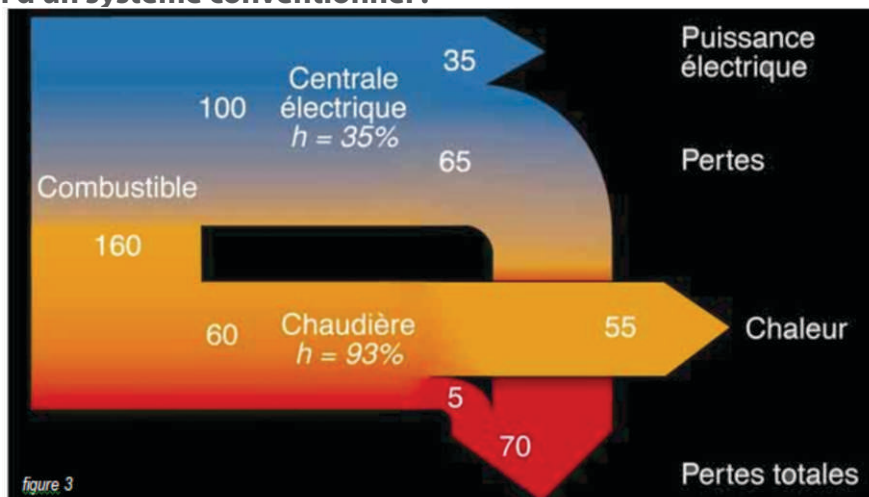


Figure 116 : Bilan d'un système conventionnel

4.4.4. Les impositions législatives

Le décret 2020-3232 du 3 Décembre 2002 relatif à la co-génération impose que l'achat par la STEG de l'excédent électrique sera suspendu si les conditions suivantes ne sont pas respectées :

- La valeur minimale du rendement énergétique global annuel : $60 \% = \text{énergies électriques} + \text{thermiques fournies} / \text{énergie consommée}$,
- La valeur minimale du rapport des énergies produites : énergie thermique / énergie électrique supérieure ou égale à 0,5 l'énergie thermique produite devra faire l'objet d'une utilisation justifiable, soit pour les besoins propres du producteur, soit pour des besoins de tiers,
- Les termes des rapports de ces deux équations sont exprimés en tonnes d'équivalent pétrole « tep ».

N.B l'équivalent thermique de l'électricité est calculé sur la base de 0,086 tep par mégawatheure.

5. LE MANAGEMENT DE L'ÉNERGIE DANS L'ÉTABLISSEMENT :

L'énergie et l'eau dans un établissement hospitalier représente:

- De nombreux fournisseurs (électricité, gaz, fuel, GPL, eau, ...),
- Une multitude de dépenses dispersées, ventilées dans plusieurs postes comptables
- Un budget important et souvent difficile à maîtriser.

Les principales préoccupations du "responsable-énergie" sont :

- Une connaissance parfaite des locaux et services de l'établissement,
- Une simplification de la gestion des factures,
- Une connaissance des consommations par type d'énergie et par poste d'utilisation,
- Une analyse efficace de l'évolution de ces consommations.

La réalisation de ces objectifs nécessite la disponibilité d'outils de comptage et d'analyse fiables, et la prise en charge de ces moyens par une équipe de personnes compétentes et motivées.

5.1. Les compétences minimales du responsable de l'énergie:

- Formation d'ingénieur en mécanique, électromécanique et thermique;
- Connaissances approfondies des principes et des méthodes de gestion et de conservation de l'énergie;
- Connaissance de la structure d'organisation administrative de l'établissement;
- Aptitudes à analyser et à compiler des données techniques et statistiques ainsi que des rapports techniques relatifs à l'utilisation de l'énergie;
- Connaissance des différentes sources d'information concernant la gestion et la conservation de l'énergie;
- Aptitudes à développer et à établir des relations de travail efficaces avec les autres employés et à motiver les gens à agir de façon autonome; g- Aptitudes à travailler comme un gestionnaire ayant des objectifs bien définis;
- Aptitudes à lire et à comprendre les plans et les cahiers de charge;
- Connaissance des principaux types de systèmes de régulation automatique incluant l'instrumentation;
- Connaissance des équipements et des méthodes de mesure de l'énergie; k-
- Connaissance du mode d'exploitation de l'établissement;

- Connaissance au niveau de la conception et de l'opération et/ou de l'entretien des installations du bâtiment;
- Autres qualités personnelles dont l'intérêt et l'enthousiasme pour l'utilisation rationnelle de l'énergie et l'aptitude à communiquer des idées à tous les échelons de l'organisation,
- Connaissance des modes de facturation de l'énergie et des possibilités de modification des contrats d'approvisionnement.

Les tableaux d'analyse que doit remplir le responsable énergétique sont dans le cahier des charges de l'ANME.

6. LA GESTION TECHNIQUE CENTRALISÉE: GTB

Ce système est recommandé, et s'adapte parfaitement aux grands établissements (hôpitaux universitaires) qui disposent d'infrastructures matérielles et humaines suffisantes, et dans lesquelles les consommations d'eau et d'énergie sont importantes, justifiant les investissements supplémentaires.

Le système de gestion de bâtiments (GBT) présente un rôle dans la comptabilité énergétique et dans le contrôle de la gestion de l'énergie et de l'eau dans un établissement.

La mise en œuvre d'un tel système nécessite au préalable une étude technique par un bureau spécialisé, qui définira l'architecture du système et ses constituants en fonction des caractéristiques des installations et de systèmes techniques retenus par les concepteurs des lots spéciaux du bâtiment. Le cahier des charges doit être détaillé. Les fonctions doivent être bien décrites et développées. Les services d'accompagnement doivent être inclus dans les prestations à fournir.

La gestion technique de bâtiments (GTB) constitue alors un lot séparé, pour lequel le fabricant et l'entrepreneur présenteront une offre "conjointe et solidaire", permettant de garantir au maître d'ouvrage des relations Fabricant-Utilisateur, nécessaire pour la définition complète du produit, pour la formation du personnel d'exploitation et de gestion de l'énergie et pour l'extension ultérieure du système.

L'entrepreneur sera essentiellement chargé de la pose du raccordement du matériel.

Le fabricant sera essentiellement chargé de la fourniture du matériel, de l'étude et de la réalisation de la configuration informatique et des logiciels d'analyse, de la mise en service du matériel et des logiciels, ainsi que de la formation. Un contrat d'entretien, précisant le type de prestation et détaillant la liste des pièces de rechange doit être lié à l'établissement au fabricant.

L'architecture d'un système GTB doit être ouverte, modulaire et évolutive. Les possibilités d'évolution des systèmes GTB dépendent, en partie, de leur qualité d'ouverture "de compatibilité". En effet, cette compatibilité doit permettre de faire communiquer les appareils de différents fournisseurs et préserver les possibilités d'adaptation et d'évolution du système. L'ouverture concerne trois (3) niveaux :

- Les raccordements des points : capteurs, compteurs et actionneurs. Le choix se fera sur des composants qui émettent et reçoivent des signaux standardisés.
- Les liaisons par transmission numérique entre appareils communicants ; par exemple entre une unité locale et un poste d'exploitation.
- Les liaisons avec un terminal ou tout autre système d'analyse et de traitement des informations : choix d'un micro-ordinateur muni d'un système d'exploitation standardisé, un protocole de télécommunications standardisé, des données présentées dans des formats de fichiers connus, aisément traités par des logiciels.

Le système de gestion technique des bâtiments est constitué d'un ensemble de composantes et d'appareils qui peuvent être regroupés sous cinq (5) niveaux fonctionnels hiérarchisés.

Niveau 1 : Les unités de traitement local (UTL)

Ce niveau est constitué de nombreuses sous stations réparties dans le bâtiment ou sur le site de l'établissement, chacune contrôlant un sous-ensemble d'équipements techniques.

- a. Les unités de traitement local (UTL) assurent chacune et de manière autonome :
 - L'échange des informations et des actions avec les équipements techniques par l'intermédiaire de capteurs, de détecteurs et d'actionneurs,
 - Les fonctions d'automatisation dont le principe admet la décentralisation. Chaque UTL assure les séquences, verrouillages, régulations, programmations temporelles relatifs aux équipements auxquels elle est reliée et selon les directives que lui a transmis le système central,
 - Les dialogues locaux réservés généralement aux interventions in-situ,
 - Les échanges avec le niveau supérieur, qui est le système central

Niveau 2 : Le système central (SC)

Ce niveau est constitué d'un ensemble de traitement informatique comprenant un ordinateur de type industriel, multitâches, multi-utilisateurs et en temps réel et des modules de logiciel dédiés aux différentes applications. Le système central est conçu pour assurer :

- L'échange d'ordres globaux avec les UTL et la réception des informations qu'elles émettent;
- Les fonctions de régulation et d'automatisation du niveau supérieur, c'est à dire celles qui s'adressent à plusieurs sous-ensembles et à leur interaction, celles qui font correspondre plusieurs sous-ensembles à une même donnée opérateur (horaires d'occupation par exemple), ou celles qui sont globales et uniques à l'établissement (contrat STEG par exemple);
- La synchronisation des UTL entre elles et l'harmonie de leurs actions;
- La mise en forme des données en vue de leur accès par l'opérateur, ou de leur affichage automatique;
- La structuration des données en vue de leur traitement en fin de gestion (mise en fichier, tri);
- La gestion des postes opérateurs et leurs affectations selon les opérateurs en cours de session et selon les principes d'organisation interne des équipes d'exploitation.

Niveau 3 : Le périphérique de dialogue

Ce niveau est constitué de terminaux informatiques tels que consoles, imprimantes et micro-ordinateurs de bureau. Ces appareils sont reliés au système central et sont utilisés pour :

- La surveillance et l'affichage ergonomique adapté à la destination des messages,
- Le pilotage immédiat ou différé,
- La décentralisation des travaux de gestion (analyse, corrélation, bilan).

Le ordinateur central transfère les données classées et triées vers les micro-ordinateurs périphériques afin de sauvegarder ses capacités de travail en temps réel. Les fichiers de données ainsi constitués seront accessibles au gestionnaire pour des opérations d'analyse et

de révision courante de la bureautique.

La liaison des périphériques de dialogue avec le système central se fera au moyen d'un réseau local Ethernet (10 base T ou 100 base T) avec hubs ou switch, utilisant le protocole TCP-IP.

D'autres liaisons du type ligne spécialisé ou RTC pourraient être utilisées en cas de liaison à distance.

Niveau 4: Réseau de communication

La communication entre les UTL et le système central devra se faire par un câble « Bus » raccordant un nombre élevé d'UTL qui seront montées en coupure sur ce bus avec by-pass automatique en cas de défaut. La transmission des données sera assurée par un protocole de transmission binaire du type SDLC ou équivalent.

Le niveau des signaux devra garantir une communication fiable sur une distance de 2000 m entre deux UTL sans faire appel aux modems. La liaison des périphériques de dialogue avec le système central se fera au moyen d'un réseau local Ethernet (10 base T ou 100 base T) avec hubs ou switch, utilisant le protocole TCP-IP. D'autres liaisons du type spécialisé ou RTC pourraient être utilisées en cas de liaison à distance.

Niveau 5: Les logiciels d'applications

On traite uniquement des logiciels d'applications du système GTB. Ces logiciels assurent les cinq (5) fonctions suivantes :

Supervision-centralisation: Cette fonction permet à l'opérateur de commander et de surveiller les installations. Le système surveille tous les points d'information et envoie les télécommandes depuis les postes opérateurs :

- Comptage des heures de fonctionnement des équipements contrôlés,
- Enregistrement des statistiques,
- Affichage de la valeur instantanée d'un point de mesure,
- Édition de journaux sur un périphérique (total ou partiel).

Automatisation : Cette fonction permet au système de générer de multiples actions sur les installations et/ou les périphériques suivant des programmes d'automatisation:

- Programmes de réaction de processus,
- Programmes horaires (éclairage, ventilation, ..),
- Programmes de maintenance préventive,
- Programmes d'optimisation énergétique (limitations du temps de marche)
- Programmes de gestion des réseaux électriques (délestage sélectif),
- Programmes du rondier (points de passage, sécurité).

Support opérateur : Cette fonction apporte à un opérateur « non informaticien » toute l'aide nécessaire à une utilisation rationnelle du système GTB :

- Identification des points (localisation géographique et fonctionnelle),
- Gestion de l'écran de visualisation,
- Sécurité d'accès au système (protection contre intrusions et fausses manœuvres);
- Dialogue entre système et opérateur pour réaliser une fonction précise;
- Fichiers de textes libres, édités sur demande.

7. LES BONNES PRATIQUES POUR L'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DES BÂTIMENTS EXISTANTS:

Afin d'améliorer la performance énergétique d'un bâtiment santé existant, un plan d'action d'efficacité énergétique a été mis au point pour son utilisation par les responsables des établissements de santé et qui vise à réduire la facture énergétique.

Ce plan d'action a été inspiré à partir des fiches projets réalisées dans les audits énergétiques tertiaires et plus particulièrement les bâtiments à usage hospitaliers.

Ci-après le récapitulatif du plan d'action d'efficacité énergétique dans les bâtiments de santé :

N°	Action	Descriptif de l'action
1	Optimisation du contrat de fourniture STEG	Ce projet consiste à faire l'analyse des différents types de tarification et de déduire celle qui est la plus rentable à l'établissement
2	Amélioration du facteur de puissance	Pour les contrats MT, le facteur de puissance peut être source de pénalité ou de bonification, une étude devra être réalisée pour améliorer le cos phi et avoir le maximum de bonification STEG
3	Réduction de la puissance souscrite	La valeur de la puissance souscrite devra être la plus proche de la puissance maximale appelée, afin de réduire les dépenses sur la redevance STEG à la puissance souscrite
4	Réduction du débit souscrit	La valeur du débit souscrit devra être la plus proche du débit maximal appelé, afin de réduire les dépenses sur la redevance STEG à Débit souscrite
5	Installation Film anti chaleur	Les vitrages clairs permettent la pénétration du rayonnement solaire, d'où un surchauffe par effet de serre et une surcharge de la climatisation. L'installation du film réfléchissant sur le vitrage permet de réduire 79% du rayonnement sans effet considérable sur l'éclairage du local
6	Étanchéité des ouvertures	Dans les établissements hospitaliers plusieurs portes d'accès entre les locaux conditionnés et les locaux non conditionnés ou avec l'extérieur d'où des pertes énergétiques par flux d'air entre les deux milieux. L'installation d'un rideau d'air au niveau de ces accès permet de réduire considérablement ces pertes
7	Isolation des toitures	La plupart des bâtiments existants ne sont prévus avec isolation thermique. D'où pertes thermiques à travers les parois. Les toitures des bâtiments occasionnent des pertes thermiques importantes de l'ordre de 30% de la masse du bâtiment. La mise en place d'une isolation adéquate associée à une étanchéité permet d'améliorer les conditions d'ambiances des locaux et réduire la consommation énergétique
8	Remplacement des climatiseurs standard par d'autres plus performants	Les climatiseurs standards ont un EER de l'ordre de 2,1, alors que les climatiseurs actuels ont un EER de l'ordre de 3,8 et sont à débit variable d'où la substitution des anciens climatiseurs a un impact important sur l'économie d'énergie de l'ordre de 50%

Tableau 72 : Les bonnes pratiques pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments existants

9	Récupération de frigorie au niveau des salles septiques	Les salles septiques fonctionnent avec une climatisation tout air neuf, d'où une dépense considérable du poste climatisation. L'installation des échangeurs air/air sur le réseau de gaine permet de récupérer une partie des frigories, soit une élévation de la température de l'air ambiant à l'entrée du climatiseur de 5%.
10	Stockage du froid	Dans les salles radio, scanner, IRM, et les salles serveur le besoin en climatisation est indispensable toute l'année. Entre autre pour les établissements de santé dont le tarif est à poste horaire, il bénéficie d'un tarif réduit pendant la nuit, à cet effet, on produit du froid négatif pendant cette période et de le restituer pour la climatisation pendant la période de pointe. Ce qui a des conséquences sur la réduction du coût d'électricité de climatisation dans ce poste.
11	Remplacement des chaudières standards par d'autre à condensation	La plupart des chaudières standards ont un rendement global de l'ordre de 90% lorsqu'ils sont à l'état neuf et 80% à l'état ancien, entre autre les chaudières à condensation ont un rendement de l'ordre de 105% à cause de la récupération de l'énergie de condensation des fumées. D'où la substitution de chaudières existantes par d'autres à condensation engendre un gain de l'ordre de 25% sur la consommation de combustible
12	Remplacement des groupes motopompes par d'autre à haut rendement et à débit variables	Les anciens groupes motopompes ont un rendement global de l'ordre de 50-60%. Leur substitution par d'autre à haut rendement avec une variation électronique du débit permet un gain énergétique de l'ordre de 20 à 40%
13	Remplacement des séchoirs électriques par d'autres à gaz	Les séchoirs électriques des linges sont très énergivores. Pour la même puissance thermique produit par du gaz naturel (séchoir à gaz) permet un gain monétaire de l'ordre de 85%.
14	Relamping par du LED	Les lampes LED ont une efficacité lumineuse supérieure à 130 lumens/W électriques avec une durée de vie de l'ordre de 50000heures. Contre les lampes fluorescentes de l'ordre de 100 lumens/W avec une durée de vie de l'ordre de 6000heures. La substitution des lampe fluorescente par du LED permet des économies d'énergie de l'ordre de 50%.
15	Installation d'un système de monitoring et de contrôle commande	La mise en place d'un système de comptage et de supervision des équipements énergivores permet de maîtriser la consommation de ces équipements et par suite un gain énergétique de l'ordre de 5% de la consommation globale de l'établissement.
16	Sensibilisation et formation du personnel	Un programme d'efficacité énergétique ne peut réussir qu'avec l'intégration et la volonté de tous le personnel de l'établissement, à cet effet des journées à porte ouvertes avec des animations et des affichages de sensibilisation peut être bénéfique pour l'environnement de l'établissement de santé.
17	Intégration des énergies renouvelables	Selon la disponibilité des terrasses et des surfaces libre de l'établissement ainsi qu'un bon climat, il peut être rentable de placer des installations solaires photovoltaïques et des chauffe-eaux solaires collectif pour couvrir une partie du besoin de l'établissement et réduire le coût énergétique.

Toutes ces actions peuvent être réalisé en partie ou intégralement selon le besoin de l'établissement, soit en faisant appel à un expert auditeur énergétique ou par les moyens de bords Il faut signaler qu'ils sont sujets de subvention du Fond FTE, moyennant un rapport de diagnostic à présenter à l'ANME (cas d'un ou trois actions). Pour la réalisation de plusieurs actions, il faut passer à l'audit énergétique réglementaire.



CHAPITRE 04

AUTOPRODUCTION PHOTOVOLTAIQUE

1.COMPOSITION D'UNE INSTALLATION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE:

On distingue deux types d'installations :

- Les installations autonomes pour les sites isolés équipées de batteries d'accumulateurs
- Les installations raccordées au réseau public

Dans ce qui suit, nous allons nous contenter des installations photovoltaïques raccordées au réseau public, destinées à l'établissement de santé.

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau permet de produire de l'électricité pour consommer une partie et envoyer l'excédent sur le réseau électrique STEG.

Une installation solaire photovoltaïque raccordée au réseau est essentiellement composée des éléments suivants :

- Le générateur photovoltaïque
- Un ou plusieurs onduleurs
- Un système de pose au sol ou sur toiture
- D'un système de protection électrique
- De câbles électriques
- D'un compteur réseau
- D'un système de supervision local ou à distance

1.1.Générateur photovoltaïque:

Un générateur photovoltaïque est composé d'un ou plusieurs modules photovoltaïques. En présence d'un rayonnement lumineux, le générateur photovoltaïque produit un courant électrique continu. Les modules sont connectés en parallèle ou/et en série de façon à obtenir des caractéristiques électriques (tension, courant,...) compatibles avec le ou les onduleurs réseau.



Figure 117 : Exemple d'un champ photovoltaïque

1.2. Les onduleurs :

On distingue les onduleurs suivant :

1.2.1. Onduleurs réseau :

L'onduleur réseau est un convertisseur électrique permettant de transformer le courant électrique continu du générateur photovoltaïque en courant alternatif compatible avec le réseau électrique national. Dans le cas d'un raccordement au réseau, l'onduleur doit intégrer un système de découplage au réseau selon la norme VDE 0126-1-1. Dans le cas échéant, un système de découplage externe doit être installé.

1.2.2. Onduleurs string :

L'onduleur string se connecte à un ensemble de modules branchés en série appelé string (en général par série d'une dizaine). L'onduleur peut avoir plusieurs entrées et donc se connecter à plusieurs dizaines de modules. Il permet la gestion indépendante de la puissance de chaque string. Chaque générateur photovoltaïque peut comporter plusieurs onduleurs strings. Ainsi, il est généralement utilisé pour les installations de 1 kWc à 100 kWc



Figure 118 : Exemple d'un onduleur string

1.2.3. Onduleurs central :

L'onduleur central se connecte à plusieurs centaines de modules en série. Du fait de cette solution centralisée, le coût aux Wc de l'installation est réduit et la maintenance est facilitée grâce à des moyens de supervision adaptés. Aussi, dans le cas de grosse centrale photovoltaïque, la gestion du réseau est simplifiée. L'onduleur central est généralement utilisé pour les installations supérieures à 100 kWc.



Figure 119 : Exemple d'un onduleur central

1.3. Système de pose au sol ou sur toiture:

Le système de pose permet de maintenir les modules photovoltaïques au sol ou sur une toiture.

1.3.1. Intégration sur la toiture :

1.3.2. Intégration au sol :

1.4. Câbles électriques:

Une installation photovoltaïque comprend plusieurs types de câble en fonction des contraintes électriques ou extérieure. Le câblage entre les modules photovoltaïques et l'onduleur intègre une connectique particulière pour éviter les risques de chocs électriques pendant l'installation. Enfin toutes les parties métalliques d'une installation photovoltaïque sont interconnectées et reliées à la même prise de terre.

1.4.1. Câble PV :

Les câbles reliant les modules au coffret de protection courant continu sont spécifiques au photovoltaïque et ses contraintes. Les câbles utilisés sont communément appelés câble PV. Ce sont des câbles mono conducteurs en cuivre ou en aluminium d'isolement équivalent à la classe II.

Les câbles doivent respecter les caractéristiques suivantes :

- Isolant de type C2 non propagateur de la flamme
- Température admissible sur l'âme d'au moins 90°C en régime permanent
- Stabilité aux UV répondant à la condition d'influence AN3
- Tension assignée du câble (U₀/U) compatible avec la tension maximum UCOMAX

Les câbles pouvant être utilisés dans les installations photovoltaïques sont spécifiés dans le guide UTE C32-502.



Figure 120 :
Câble mono conducteur spécifique au PV

1.4.2. Câble P U1000R2V :

Les câbles électriques utilisés entre le coffret de protections continues et l'onduleur et les câbles de la partie courant alternatif sont généralement des câbles U1000R2V lorsqu'ils sont à l'abri du rayonnement solaire direct. Le conducteur est en aluminium ou en cuivre, l'enveloppe isolante en polyéthylène réticulé et la gaine extérieure en PVC.

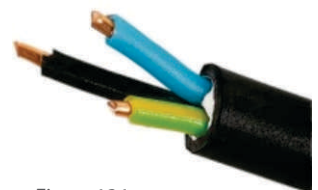


Figure 121 :
Câble U1000R2V de type 3G

1.4.3. Connectique débrochable :

Une Connectique débrochable spécifique au photovoltaïque est utilisée sur la partie courant continu (modules photovoltaïques, boîtes de jonctions, coffret DC, onduleurs) pour faciliter l'installation et réduire les risques de chocs électrique. L'installation de ces connecteurs sont obligatoires lorsque la tension UOCMAX entre chaque module PV et à l'extrémité de chaque chaîne PV est supérieure à 60V.

Les connecteurs doivent être :

- Spécifiés pour le courant continu et dimensionnés pour des valeurs de tensions et courants identiques ou supérieures à celles des câbles qui en sont équipés.
- Assurer une protection contre les contacts directs
- Être de classe II
- Résister aux conditions extérieures (UV, humidité, température)
- Conformés à la norme NF EN 50521
- Dans la pratique, des connecteurs appelés MC3 et MC4 sont utilisés.



Figure 122 :
Connecteurs MC4 mâle et femelle

1.5. La sécurité des installations électriques:

1.5.1. Système de protection électrique

L'installation d'un système photovoltaïque est régie par des normes tunisiennes et européennes en termes de sécurité électrique. La norme européenne EN 50160 et la norme française C15-100 relatives aux installations électriques basse tension imposent l'installation de système de protection en courant continu et en courant alternatif.

1.5.1.1. Protection courant continu

Une Protection courant continu est exigée en amont de l'onduleur. Elle est donc placée entre les modules photovoltaïques et l'onduleur. Elle comporte au minimum un dispositif de coupure et de sectionnement général DC sur la liaison principale.

La coupure générale DC doit respecter les dispositions suivantes :

- Tension assignée d'emploi \geq UOC max
- Courant assigné $I_n \geq 1,25 I_{sc}$ STC
- Conformité aux normes de la série NF EN 60947
- Matériel spécifié pour le courant continu de catégorie d'emploi à minima DC21B avec marquage correspondant
- Commande des dispositifs de coupure d'urgence facilement reconnaissables et rapidement accessibles à proximité de l'onduleur
- Coupure électromécanique omnipolaire et simultanée assurée par une commande directe ou par l'intermédiaire d'une action télécommandé

Le sectionnement général DC doit :

- Être bipolaire pour isoler électriquement les 2 conducteurs correspondant à chaque polarité mais peut ne pas être à sectionnement simultané.
- Être spécifié pour le courant continu
- Se situer en amont et à proximité de l'onduleur

Dans la pratique ces deux fonctions sont assurées par un interrupteur-sectionneur.

Dans le cas d'un générateur photovoltaïque comportant plusieurs groupes en parallèle, un système de protection des courants inverse est ajouté.

La protection des biens et des personnes notamment contre les surtensions atmosphériques (la foudre) exigent également l'installation de parafoudres DC.

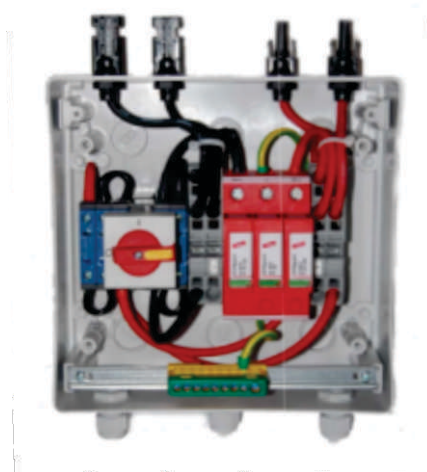


Figure 123 :
Intérieur d'un coffret de
protection courant continu

1.5.1.2. Protection courant alternatif

Une protection courant alternatif est exigée en aval de l'onduleur. Elle est donc placée entre l'onduleur et le réseau de distribution. Elle comporte au minimum un dispositif de coupure et de sectionnement général AC sur la liaison principale.

Chaque onduleur nécessite l'installation d'un disjoncteur différentiel.

La protection des biens et des personnes notamment contre les surtensions atmosphériques (la foudre) exigent également l'installation de parafoudres AC.

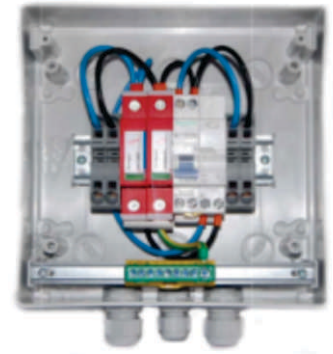


Figure 124 :

Intérieur d'un coffret de protection courant alternatif

1.5.2. Mise à la terre

L'ensemble des parties métalliques d'une installation photovoltaïque doit être mise à la terre en respectant le principe d'équipotentialité et en évitant les boucles d'induction. Le câble de terre est de couleur vert/jaune de type H07V. Le conducteur est en cuivre et l'isolation en PVC (polychlorure de vinyle). La section minimale des câbles de terre reliant les modules photovoltaïques est de 6mm^2 . La section minimale du câble de terre reliant la prise de terre unique est de 16mm^2 .

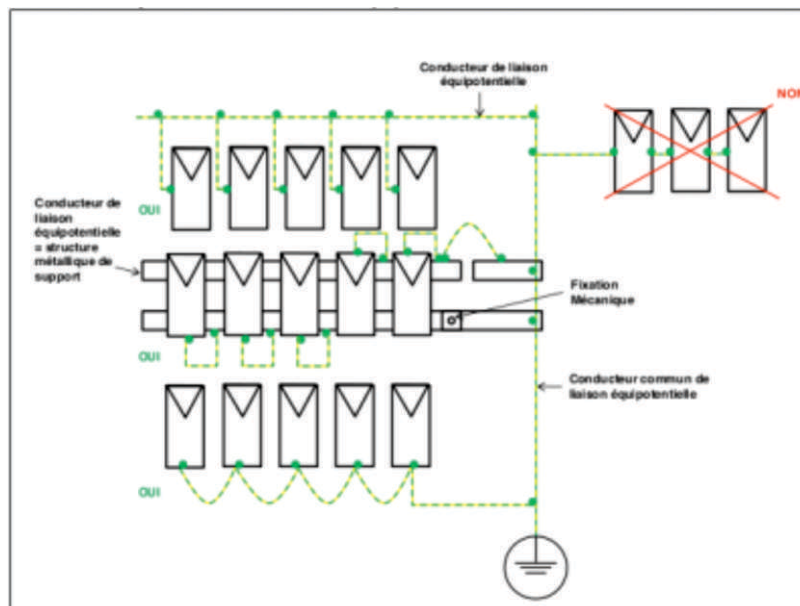


Figure 125 : Principe de mise en œuvre de l'équipotentialité des modules photovoltaïques.

1.6. Comptage électrique :

Dans le cas d'une installation photovoltaïque reliée au réseau avec injection totale, le gestionnaire du réseau « STEG » ajoute deux compteurs d'énergie. Un pour mesurer la production d'électricité et un autre pour mesurer la consommation des appareils électriques de l'installation photovoltaïque, notamment les onduleurs.

Dans le cas d'un système en autoconsommation, un compteur d'énergie est ajouté pour mesurer la production d'énergie. L'existant continuant de mesurer la consommation

électrique du bâtiment. En Tunisie, le gestionnaire de réseau STEG remplace les compteurs de consommation et de production par un seul compteur, bidirectionnel. En règle général, l'onduleur réseau possède une fonction permettant de mesurer la production photovoltaïque. Il est aussi tout à fait possible d'ajouter un compteur externe dans le but de superviser le fonctionnement de l'installation photovoltaïque.

1.7. Supervision:

La supervision d'une installation photovoltaïque permet d'évaluer la qualité de fonctionnement du système et à contrario de détecter les éventuelles anomalies. Ce système doit s'inscrire dans le cadre d'une maintenance préventive et curative qui va assurer la longévité de l'installation.

En règle générale les onduleurs ont une capacité de stockage qui enregistre les paramètres de fonctionnement et les données d'erreurs du système photovoltaïque. Il est alors possible de suivre localement ou à distance le fonctionnement du système.

Localement, les principaux paramètres (énergie produite, puissance instantanée,...) sont disponibles sur l'écran d'affichage de l'onduleur. Grâce à des technologies de télécommunication comme l'Ethernet, la wifi, ou le réseau 3G, il est possible de superviser à distance le fonctionnement d'une installation photovoltaïque. Cet option est particulièrement utile pour la maintenance des grandes centrales photovoltaïques.

1.8. Normes:

Les installations photovoltaïques sont régies par des normes électriques tunisiennes et européennes et des règles d'intégration architecturales.

Pour la sécurité des biens et des personnes, l'installation d'un système photovoltaïque doit répondre aux normes électriques suivantes :

- [Norme DIN VDE 0126-1.1](#)
Relative au dispositif de déconnexion automatique entre le générateur et le réseau public de distribution.
- [Norme européenne NF EN 50160](#)
Relative aux caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution
- [Norme NFC 15-100](#)
Relatives aux règles des installations électriques à basse tension
- [Norme NFC 14-100](#)
Relative aux installations de branchement à basse tension
Ces normes sont spécifiées dans les guides suivants:
- [UTEC 15-712-1](#)
Installations photovoltaïques sans stockage et raccordées au réseau public de distribution
- [UTEC 15-400](#)
Raccordement des générateurs d'énergie électrique dans les installations alimentées par un réseau public de distribution.

2. PROCESSUS DE DÉVELOPPEMENT DES PROJETS D'ÉNERGIES RENOUVELABLES :

2.1. Projet sous le régime de l'autoconsommation (MT/HT) sans transport:

Tout établissement public ou privé, raccordé au réseau électrique national en MT ou HT et, opérant dans les secteurs de l'industrie, de l'agriculture ou du tertiaire peut produire sa propre électricité à partir des énergies renouvelables. Pour réaliser un projet à des fins

d'autoconsommation, raccordée au réseau MT/HT, il faut présenter une demande au Ministère en charge de l'énergie. La validité de l'accord ministériel est de deux (02) ans pour les projets solaire PV et trois (03) ans pour les projets éoliens. Une possibilité d'extension d'un (01) an est possible (sur la base d'une demande justifiée et après accord de la CTER).

Les projets d'autoconsommation permettent de consommer sa propre électricité instantanément, et ainsi réaliser des économies sur ses factures, mais également de revendre les excédents de sa production d'électricité à la STEG qui s'engage à les acheter dans le cadre d'un contrat conclu entre les deux parties (dans la limite des 30% de la production annuelle de l'installation). Ce contrat d'achat des excédents est signé pour une durée de 20 ans, reconductible ensuite tacitement par période de 1 an, sauf dénonciation de l'une des parties.

La première configuration possible pour un projet d'autoconsommation est un projet sans transport d'électricité sur le réseau. Dans ce cas, le lieu de production de l'électricité est aussi le lieu de consommation. Pour le solaire PV, cela peut concerner des projets sur toiture ou au sol par exemple.

Les particularités de cette configuration par rapport au cas avec transport, depuis un site déporté sont :

- Il n'y a pas besoin d'identifier un site pour accueillir les installations de production d'électricité à partir des ENR puisque le site de production est lui même site de consommation. Il est donc fait l'hypothèse pour la configuration d'autoconsommation sans transport qu'il n'y a pas d'étape de sélection du site.
- Les procédures de raccordement de l'installation au réseau pour la revente des excédents, peuvent être allégées, voir même non nécessaires dans le cas où le site de consommation disposerait déjà des infrastructures de raccordement suffisantes au réseau MT/HT.

Enfin, certaines procédures listées dans la présente partie sont fournies à titre informatif et leur application doit être évaluée au cas par cas par le porteur projet, en fonction du type de projet (éolien, PV sur toiture, PV sur sol) et de sa taille. Ceci est notamment le cas pour l'étude d'impact environnementale (EIE), le permis de circuler, ou le permis de bâtir. Le lecteur pourra trouver des détails sur les procédures, les contrats et le comptage dans le guide détaillé.

Les étapes principales d'un projet d'autoconsommation sans transport d'électricité sont décrites dans le schéma ci-dessous.



Figure 126 :
Les étapes principales d'un
projet d'autoconsommation
avec transport d'électricité

Faisabilité	Développement	Construction	Exploitation
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sélection d'une entreprise installatrice. 2. Etude de pré faisabilité. 3. Etude préliminaire de raccordement au réseau électrique MT / HT. 4. Etude d'impact environnemental (le cas échéant). 5. Etude de faisabilité. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Accord Ministériel. 2. Permis de bâtir (sauf si toiture). 3. Autorisations de circulation à titre exceptionnel. 		
	<ol style="list-style-type: none"> 1-A. Contrat - Programme avec l'ANME (pour bénéficier des incitations du FTE). ou 1-B. Déclaration de l'opération d'investissement. (pour bénéficier des primes du FTI). 2. Demande de prêt bancaire. 3-A. Primes prévues par le FTE. ou 3-B. Primes prévues par la loi de l'investissement (FTI). 		
	<p>Raccordement au réseau & Mise en service</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 & 2. Etudes à effectuer et données techniques à fournir à la STEG pour le raccordement au réseau HT/MT (si projets > 1MW). 3. Etude détaillée de raccordement au réseau HT/MT. 4. Réalisation du raccordement au réseau HT/MT (le cas échéant). 5. Réception et mise en service par la STEG. 6. Réception et validation de conformité par l'ANME (uniquement dans le cas d'un contrat programme avec l'ANME). 		

2.2. Projet sous le régime de l'autoconsommation (MT/HT) avec transport d'électricité (sur site déporté):

La seconde configuration possible pour un projet d'autoconsommation est un projet avec transport d'électricité sur le réseau.

Dans ce cas, le lieu de production de l'électricité n'est pas le lieu où cette électricité sera consommée. En effet, il est nécessaire de disposer de suffisamment d'espace pour installer tous les équipements nécessaires à la production et cela n'est pas forcément possible sur le lieu de consommation. L'électricité est alors transportée sur le réseau.

Les modalités de tarification des excédents et le contrat de revente sont similaires à celles de l'autoconsommation sans transport. Toutefois, dans le cas d'un projet avec transport d'électricité, il faut également prendre en compte que le transport de l'énergie depuis le lieu de production vers le lieu de consommation sera facturé par la STEG pour l'utilisation du réseau.

Les particularités de cette configuration par rapport au cas sans transport sur le réseau sont :

- Il est nécessaire d'identifier un site pour accueillir les installations de production d'électricité à partir des ENR, ce qui engendre des procédures et précautions spécifiques. Une étape de sélection du site est donc présentée dans la page suivante.
- Les travaux et études nécessaires au raccordement de l'installation au réseau, pour la revente des excédents à la STEG ainsi que le transport vers le site de consommation, sont potentiellement plus importantes, tout particulièrement si le site déporté n'est pas déjà ou suffisamment raccordé au réseau.

- Certaines procédures listées dans la présente partie sont fournies à titre informatif et leur application doit être évaluée au cas par cas par le porteur du projet, en fonction du type de projet (éolien, PV sur toiture, PV sur sol) et de sa taille. Ceci est notamment le cas pour l'étude d'impact environnementale (EIE), le permis de bâtir ou le permis de circuler.
- Le lecteur pourra trouver des détails sur les procédures, les contrats et le comptage dans le guide détaillé.

Les étapes principales d'un projet d'autoconsommation sans transport d'électricité sont décrites dans le schéma ci-dessous.

Faisabilité	Développement	Construction	Exploitation
<p>1 à 3. Sélection et étude préliminaire du site.</p> <p>4. Enquête foncière</p> <p>et 7. Autorisations ou avis vis-à-vis des différentes servitudes.</p> <p>5. Attestation de vocation du terrain.</p> <p>6. Permis d'occupation temporaire du domaine de l'Etat (essais et les études).</p>	<p>1. Accord Ministériel</p> <p>2. Avis d'implantation sur un terrain agricole.</p> <p>3. Permis d'occupation du domaine de l'Etat (réalisation & exploitation).</p> <p>4. Permis de bâtir.</p> <p>5. Autorisation de circulation exceptionnelle.</p>		
<p>Etudes de faisabilité et préparation</p> <p>1. Etude de pré-faisabilité.</p> <p>2. Etude préliminaire de raccordement au réseau électrique MT / HT.</p> <p>3. Etude d'impact environnemental (le cas échéant).</p> <p>4. Etude de faisabilité.</p>			
	<p>Financement et Incitations</p> <p>1-A. Contrat - Programme avec l'ANME (pour bénéficier des incitations du FTE).</p> <p>Ou 1-B. Déclaration de l'opération d'investissement (pour bénéficier des primes du FTI).</p> <p>2. Demande de prêt bancaire.</p> <p>3-A Ou 3-B. Primes prévues par le FTE et le FTI.</p>		
	<p>1 & 2. Etudes à effectuer et données techniques à fournir à la STEG pour le raccordement HT/MT (Projets > 1MW).</p> <p>3. Etude détaillée de raccordement au réseau HT/MT.</p> <p>4. Réalisation du raccordement au réseau HT/MT.</p> <p>5. Réception et mise en service par la STEG.</p> <p>6. Réception et validation de conformité par l'ANME (uniquement si contrat programme).</p>		

3 . OUTILS DE CALCUL D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE:

3.1. Bilan de puissance:

Afin de calculer la puissance optimale de l'installation PV, il est nécessaire en premier lieu de définir les futures consommations électriques de l'établissement :

Pour les nouveaux établissements raccordés au réseau MT et ne disposant pas d'historique de consommation électrique, le BE/IC devra se référer aux résultats de l'étude prévisionnelle ayant servi à la STEG pour fixer les caractéristiques du poste de transformation et de la puissance souscrite de l'établissement.

Le BE/IC est demandé à évaluer les différents potentiels solaires de l'établissement, dont on peut distinguer :

- La puissance solaire maximale qui pourrait être mise en place au niveau des surfaces disponibles pour l'implantation des modules : A cet effet le BE/IC essaiera de situer, en collaboration avec le responsable chargé du projet au sein de l'établissement, les surfaces disponibles pour recevoir les modules solaires PV. L'objectif est d'évaluer grossièrement la puissance PV maximale pouvant être installée au niveau de ces surfaces, tout en tenant compte de l'orientation et des différentes contraintes de pose ainsi que de l'inclinaison des modules.
- La puissance solaire qui pourrait être installée pour couvrir la totalité de la consommation électrique de l'établissement durant la période diurne. Ces consommations correspondent aux consommations effectuées pendant les postes horaires « Jour » et « pointe matin été » ainsi que les consommations pendant les jours de dimanche (facturées au tarif nuit).
- La puissance solaire maximale qui pourrait être réalisée en restant dans la limite de vente d'excédents à la STEG de 30% de la production annuelle de l'installation, conformément aux exigences de la réglementation tunisienne.

Les résultats de ces calculs devront être récapitulés dans le tableau suivant :

Evaluation des potentiels solaire (en kWc)	
Potentiel max. des surfaces disponibles	
Potentiel de couverture des besoins diurnes	
Potentiel avec vente d'excédents dans la limite de 30%	

Tableau n°73 : Evaluation des potentiels solaires des systèmes photovoltaïques

Pour le calcul des potentiels PV dans la limite des besoins diurnes et dans la limite de vente des excédents (30%), le BE/IC aura besoin de fixer le productible annuel moyen de l'installation solaire.

A cet effet, il pourrait se référer aux logiciels de simulation pour une première estimation du productible tout en tenant compte des données météorologiques du site de l'installation solaire et de la disposition des modules PV (orientation, inclinaison).

3.2. Courbes de charges:

L'approche adoptée pour l'élaboration de(s) profil- type de la consommation ainsi que

les méthodes d'extrapolation de ce(s) profil(s) devront être élaborée en concertation avec le responsable chargé du projet de l'autoproduction au sein de l'établissement.

L'analyse du profil de la consommation électrique pourrait se référer aux estimations faites par le BE/IC à partir des informations relatives au rythme de l'activité de l'établissement et aux caractéristiques de l'exploitation des équipements consommant l'énergie électrique.

Sur la base des résultats de cette analyse, le BE/IC doit déterminer la répartition de la consommation annuelle et des consommations mensuelles en fonction des postes horaires.

En plus, le BE/IC est demandé d'indiquer les courbes de consommations journalières, hebdomadaires et annuelles. Plusieurs courbes doivent être prises en compte selon l'usage de l'établissement (jour ouvrable pour le différents mois, jour férié, jour de la période de vacance ou d'arrêt de fonctionnement).

Les résultats de l'analyse de la consommation électrique seront présentés dans les tableaux suivants :

Evolution des consommations électriques annuelles			
Année	Année N	Année N+1	Année N+2
Consommation électrique annuelle (en kWh ou MWh)

Tableau 74 : Evolution des consommations électriques annuelles

Répartition des consommations mensuelles par poste horaire (Année de référence)				
	Jour	Pointe Soir	Nuit (Dimanche)	Pointe Matin été
Janvier				
Février				
Mars				
Avril				
Mai				
Juin				
Juillet				
Aout				
Septembre				
Octobre				
Novembre				
Décembre				
Année				

Tableau 75 : Répartition mensuelles des consommations par postes horaires

Les différents régimes à poste horaire de la STEG sont présentés dans le schéma suivant :

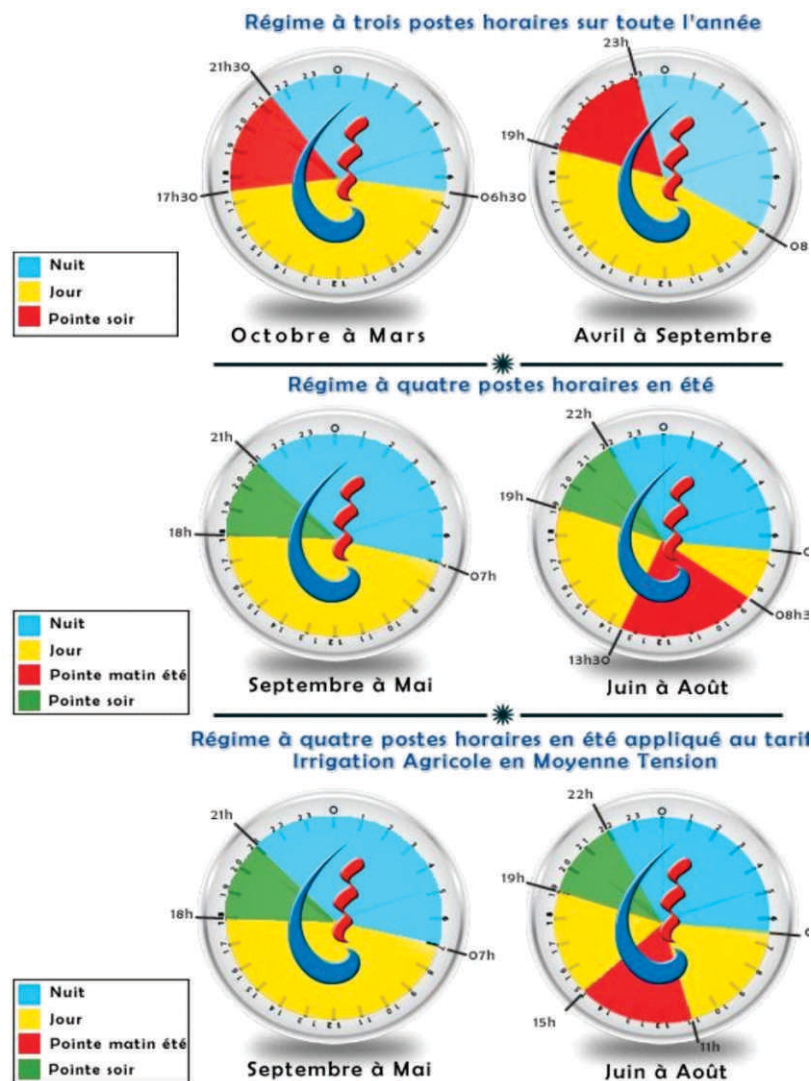


Figure 127 : Les différents régimes à poste horaire de la STEG

3.3. Etude de faisabilité :

Les Bureaux d'Etudes (BE) et Ingénieurs Conseils (IC) ont un rôle clé dans le processus de développement des projets d'autoproduction à travers l'expertise apportée pour assister les auto-producteurs dans les différentes phases de ces projets. L'expertise des BE/IC couvre plusieurs aspects, dont en particulier :

- La préparation des études technico-économiques ;
- L'assistance pour la passation des contrats des travaux ;
- L'approbation des études détaillées à soumettre pour l'obtention des autorisations ;
- L'assistance des auto-producteurs dans les démarches administratives ;
- Le suivi de chantiers,
- La réception des travaux.

L'élaboration des différentes études techniques et économiques se rapportant aux projets d'autoproduction d'électricité par l'énergie solaire photovoltaïques raccordées au réseau électrique MT et HT est la suivante :

Les aspects techniques de l'étude devront couvrir :

- La présentation de l'établissement auto-producteur et des caractéristiques de son abonnement auprès de la STEG ;
- L'analyse de la consommation électrique de l'établissement ;
- La présentation du site prévu pour la réalisation de l'installation solaire ;
- Les données météorologiques du site ;
- L'évaluation des potentiels solaires ;
- Le pré-dimensionnement de l'installation solaire ;
- L'évaluation de la production électrique de l'installation PV.

L'analyse des aspects économiques du projet d'autoproduction inclue :

- L'estimation des coûts d'investissement et d'exploitation ;
- La définition du schéma de financement du projet ;
- L'analyse de la rentabilité économique et le calcul des indicateurs financiers du projet
- L'analyse de sensibilité.

3.3.1. Présentation générale de l'établissement :

Dans ce chapitre, le BE/IC devra introduire et présenter l'établissement, objet du projet de l'autoproduction, à travers une description sommaire récapitulant en particulier les informations suivantes :

- Nom et coordonnées de l'établissement,
- Son secteur d'activité ;
- Son statut juridique ;
- Le responsable chargé du projet de l'autoproduction au sein de l'établissement ;
- Les spécificités de l'abonnement au réseau électrique de la STEG.

En plus de ces informations, il est demandé d'inclure dans ce chapitre les plans et les photos permettant l'identification et la localisation le(s) bâtiment(s) de l'établissement :

- Une photo aérienne de type Google Earth ou équivalent,
- Un plan de masse de l'établissement,
- Des photos de l'établissement.

Le BE/IC devra également indiquer les horaires journaliers de fonctionnement de l'établissement durant les différentes saisons et de préciser les périodes programmées de ses arrêts (congrés annuel, maintenance, vacances...).

3.3.2. Analyse de la consommation électrique de l'établissement :

Le BE/IC devra donner dans ce chapitre un état de la consommation électrique de l'établissement durant les 3 premières années projetées d'exploitation en se référant à l'estimation issue du bilan de puissance. le BE/IC devra spécifier l'année de référence qui sera retenue pour le reste de son étude tout en présentant les justificatifs de ce choix.

3.3.3. Présentation du site d'implantation de l'installation :

Ce chapitre de l'étude servira à identifier le site prévu pour l'implantation de l'installation solaire PV. Il est à noter que conformément à la réglementation tunisienne, ce site pourrait être différent de celui du site de consommation (site de l'établissement).

L'identification du site de l'installation doit porter en particulier sur les informations relatives aux éléments suivants :

- Le positionnement précis du site, comprenant notamment son adresse exacte et sa localisation géographique (avec une indication de son longitude et latitude) ;
- Les dimensions du site ;
- Sa surface globale ;
- Son orientation...

3.3.4. Pré-dimensionnement de l'installation:

Le BE/IC est demandé à détailler la méthodologie employée pour pré-dimensionner l'installation solaire PV. Ce dimensionnement devra être effectué en prenant en compte des différents facteurs clés, dont notamment :

- Les courbes de charges de l'établissement,
- Les surfaces disponibles pour l'implantation des modules avec prise en considération de leurs orientations, des masques et des différentes contraintes possibles,
- Les données météorologiques du site,
- La rentabilité économique de l'installation pour l'auto-producteur,
- Le budget que l'auto-producteur pourrait mobiliser pour le financement de son projet.

3.3.4.1. Données métrologique du site

L'étude devra préciser les données météorologiques de référence relatives au site de l'installation solaire.

Il existe une variété d'ensembles de données de ressources solaires différents disponibles avec divers niveaux de précisions, résolutions, périodes historiques et couvertures géographiques. Les ensembles de données font soit appel à des mesures au sol dans les stations météorologiques bien contrôlées, soit utilisent des données satellitaires traitées. Le tableau suivant résume quelques-uns des ensembles de données plus applicables à l'échelle mondiale.

Source	Description
SolarGIS	Des données sur les ressources solaires sont disponibles pour les latitudes comprises entre 60° Nord et 50° Sud à une résolution spatiale de 250 m. Les paramètres des ressources solaires sont calculés à partir de données satellitaires, de données atmosphériques et de modèles numériques de terrain.
3Tie	L'ensemble de données dispose d'une couverture mondiale comprise entre 48° S et 60° N avec des cartes spatiales et des séries horaires de rayonnement à une résolution spatiale d'environ 3 km.
HelioClim	Proposent une résolution spatiale d'environ 4 km. la région couverte s'étend de 66° à 66° à la fois en latitude et longitude (principalement l'Europe, l'Afrique et le MoyenOrient).
Meteororm	Base de données interpolées sur la ressource solaire mondiale. Permet la production d'années météorologiques typiques pour tout endroit sur terre. Elle comprend une base de données du rayonnement pour la période 1991 -2010.
NASA	Données satellitaires mensuelles couvrant le monde entier pour une période de 22 ans (1983 2005). Les données peuvent être considérées comme raisonnables pour les études de préféabilité. Toutefois, ces données ont une résolution spatiale faible.
PVGIS	Donne des valeurs mensuelles interpolées pour chaque localisation géographique à partir de la moyenne des mesures terrestres de 1981-1990 pour l'Europe, et des données satellite de 1985 -2004 (Meteosat) pour l'Afrique

Tableau 76 : Résumé des ensembles de données les plus applicables à l'échelle mondiale

3.3.4.2. Evaluation du potentiel solaire

Le BE/IC est demandé à évaluer les différents potentiels solaires de l'établissement, dont on peut distinguer :

- La puissance solaire maximale qui pourrait être mise en place au niveau des surfaces disponibles pour l'implantation des modules : A cet effet le BE/IC essaiera de situer, en collaboration avec le responsable chargé du projet au sein de l'établissement, les surfaces disponibles pour recevoir les modules solaires PV. L'objectif est d'évaluer grossièrement la puissance PV maximale pouvant être installée au niveau de ces surfaces, tout en tenant compte de l'orientation et des différentes contraintes de pose ainsi que de l'inclinaison des modules.
- La puissance solaire qui pourrait être installée pour couvrir la totalité de la consommation électrique de l'établissement durant la période diurne. Ces consommations correspondent aux consommations effectuées pendant les postes horaires « Jour » et « pointe matin été » ainsi que les consommations pendant les jours de dimanche (facturées au tarif nuit).
- La puissance solaire maximale qui pourrait être réalisée en restant dans la limite de vente d'excédents à la STEG de 30% de la production annuelle de l'installation, conformément aux exigences de la réglementation tunisienne.

3.3.4.3. Optimisation de la puissance solaire à installer

Le choix de la puissance solaire à installer devra faire l'objet d'une concertation entre le BE/IC et le responsable chargé du projet d'autoproduction au sein de l'établissement. Ce choix pourrait se référer à plusieurs critères, tels que :

- La mise en place d'une puissance PV dans la limite de la surface disponible,
- La réalisation d'une installation ayant le rendement économique le plus élevé, indépendamment de l'importance de son taux de couverture des besoins électriques de l'établissement,

· La mise en place d'une capacité solaire dont le coût d'investissement correspond à la limite du budget pouvant être mobilisé par l'auto-producteur.

A cet effet, il est recommandé d'étudier plusieurs scénarios pour différentes puissances solaires PV et d'analyser leur faisabilité technique ainsi que leurs impacts en termes de :

- Coûts d'investissement,
- Taux de couverture des besoins électriques de l'établissement,
- Economies sur la facture électrique,
- Rentabilité économique, à travers le calcul des principaux indicateurs financiers.

La concertation avec l'auto-producteur pour le choix de la puissance à retenir devra s'appuyer sur les résultats de l'analyse de ses différents scénarios. Une analyse de sensibilité est fortement recommandée pour faciliter l'optimisation de la puissance solaire.

3.3.5. Estimation de l'énergie électrique produite par l'installation:

Après la fixation de la puissance solaire PV à mettre en place pour le compte de l'établissement auto-producteur, le BE/IC devra présenter les résultats détaillés relatifs à la production de l'installation. Les informations à fournir au niveau de l'étude portent sur :

- La production électrique annuelle ainsi que les productions mensuelles de l'installation solaire,
- L'énergie électrique produite durant la durée d'exploitation de l'installation (20 ans) et en tenant compte de la dégradation de ses performances,
- La puissance maximale injectée sur le réseau,
- Les profils des productions électriques mensuelles par poste horaire,

- Les excédents de production mensuels par poste horaire ainsi que la quantité d'énergie électrique vendue annuellement à la STEG,
- Les taux d'autoconsommation mensuels et de la couverture annuelle des besoins électriques de l'établissement par l'énergie solaire
- Le taux annuel de l'excédent vendu à la STEG.

Ces informations sont indispensables et importantes pour l'évaluation de la préfaisabilité du projet et d'approuver par la suite sa rentabilité économique pour l'auto-producteur.

Il existe plusieurs logiciels fiables de modélisation du solaire PV disponibles sur le marché. (PVSyst, PV*SOL, RETScreen, Homer, Insel, Archelios et Polysun...)

Pour des évaluations précises de rendement énergétique, exigées surtout par les banques, PVSyst est aujourd'hui l'un des logiciels les plus fréquemment utilisés.

Le BE/IC est demandé à effectuer les calculs et les simulations nécessaires pour la puissance solaire PV retenue et de reporter les résultats de ces calculs dans des tableaux récapitulatifs.

3.3.6. Estimation du coût de l'investissement et des coûts d'exploitation:

L'étude devra estimer le coût de l'installation solaire PV à mettre en place en prenant en considération :

- La taille de l'installation PV (puissance retenue),
- Les coûts moyens des installations solaires réalisées en Tunisie,
- Les surcoûts éventuels dus à des contraintes particulières (aménagement du site d'implantation des modules, renforcement des structures, besoins de structures porteuses adaptés, précautions particulières...)

Le BE/IC pourrait également s'appuyer sur des devis estimatifs élaborés par les sociétés installatrices éligibles. Dans l'estimation du coût de l'investissement, il est nécessaire de séparer les coûts spécifiques des différents principaux composants du projet, dont notamment les prix relatifs aux :

- Modules photovoltaïques ;
- Onduleurs solaires ;
- Structures et supports de la fixation de modules ;
- Protections DC et AC ;
- Câblage et petit matériel d'installation ;
- Frais d'installation ;
- Autres frais éventuels (raccordement au réseau, local technique ; suivi des performances/afficheurs...)
- Maîtrise d'œuvre.

Tous ces coûts devront être donnés en hors TVA et en TTC

3.3.7. Schéma de financement:

Le schéma de financement du projet devra être discuté avec l'auto-producteur afin de fixer le taux d'autofinancement et de déterminer les conditions du prêt (taux d'intérêt et durée de remboursement) qui sera mobilisé pour clôturer ce plan de financement. Le BE/ IC devra également estimer dans ce schéma le montant de la subvention pouvant être accordée au projet par le Fonds de Transition Énergétique (FTE).

Le schéma de financement du projet devra être présenté dans l'étude comme suit :

Taux d'autofinancement (%)	
Taux d'endettement (%)	
Montant de l'autofinancement (DT)	
Montant du crédit (DT)	
Taux d'intérêt du crédit (%)	
Durée de remboursement (ans)	
Durée de grâce (ans)	
Subvention accordée par le FTE (DT)	

Tableau 77 : Schéma de financement d'un projet à présenter au niveau des études

3.3.8. Analyse de la rentabilité économique

L'étude devra présenter une analyse de la rentabilité économique du projet d'autoproduction en calculant ses flux de trésorerie durant la durée d'exploitation de l'installation solaire. Cette analyse devra aboutir à une détermination des principaux indicateurs financiers de l'investissement :

- Taux de Rentabilité Interne (TRI) ;
- Valeur Actualisée Nette (VAN) ;
- Temps de retour sur Fonds propres ;
- Ratio de couverture de la dette ;
- Coût actualisé de l'électricité produite.

Le BE/IC est demandé de présenter dans le rapport de l'étude les hypothèses et les paramètres utilisés comme entrées lors du calcul de flux monétaires et de simulations effectuées.

3.3.9. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à changer les entrées du modèle financier afin d'analyser leurs impacts sur les flux monétaires et par conséquent sur les indicateurs financiers du projet.

Dans ce cadre, le BE/IC devra analyser cette sensibilité par la variation des facteurs et paramètres suivants :

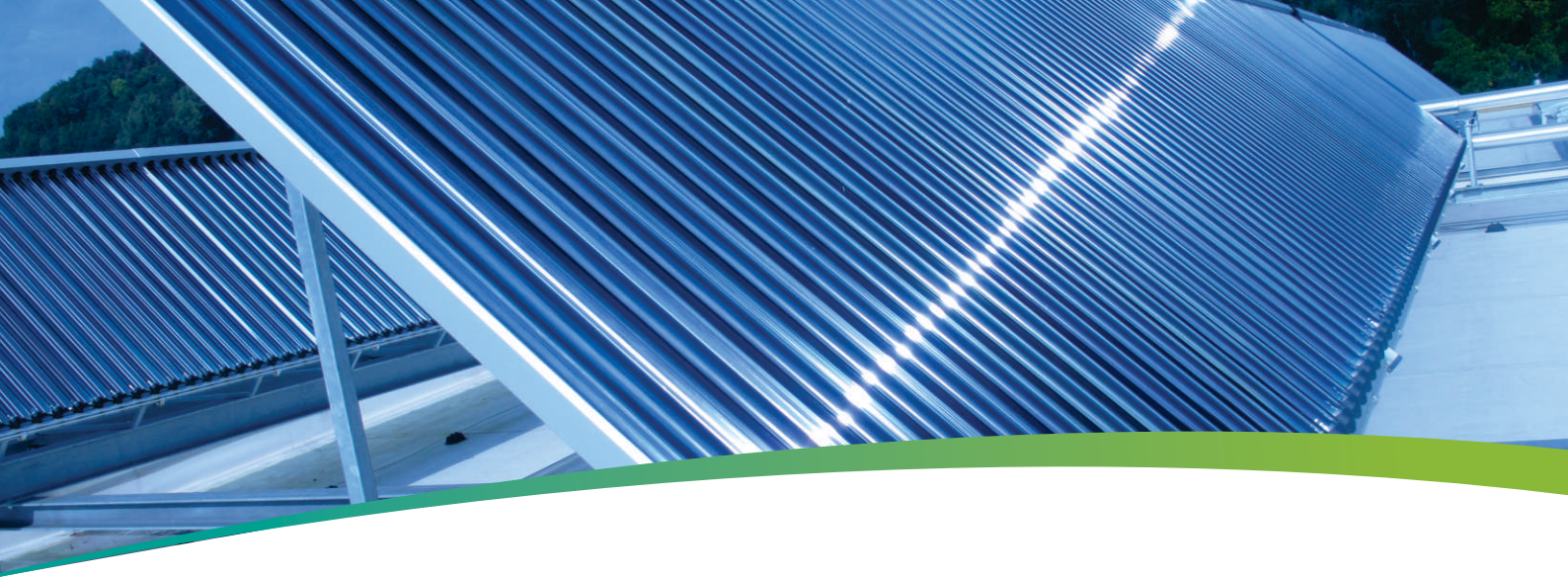
- Coût d'investissement ;
- Production électrique annuelle de l'installation solaire ;
- Taux de croissance des tarifs de l'énergie électrique ;
- Taux d'intérêt du crédit bancaire.

3.3.10. Synthèse du projet

Dans ce chapitre, le BE/IC devra synthétiser le projet dans un tableau récapitulatif conformément au modèle suivant :

Etablissement auto-producteur	
Secteur et branche d'activité	
Adresse	
Gouvernorat	
District STEG	
Référence du compteur électrique	
Niveau de tension de raccordement	
Régime tarifaire	
Consommation électrique annuelle (kWh)	
Puissance de l'installation solaire (kWc)	
Production solaire annuelle (kWh)	
Production solaire autoconsommée (kWh)	
Production solaire vendue à la STEG (kWh)	
Taux de la production en excédent (%)	
Taux de couverture des besoins (%)	
Coût de l'investissement (DT)	
Frais annuels d'exploitation et de maintenance (DT)	
Taux d'autofinancement (%)	
Montant de la subvention FTE	
Temps de retour (ans)	
Valeur Actualisée Nette (DT)	
Taux de Rentabilité Interne TRI (%)	

Tableau 78 : Tableau de synthèse de projet pour un auto producteur



CHAPITRE 05

PRODUCTION DE L'EAU CHAUDE PAR LE SOLAIRE THERMIQUE

1. COMPOSITION D'UNE INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE

Une installation solaire d'eau chaude sanitaire est essentiellement composée des éléments suivants :

- Un ensemble de capteurs solaires qui transforment le rayonnement solaire en énergie thermique.
- L'échangeur, les circulateurs, le ballon de stockage solaire,
- Un ballon de stockage d'appoint destiné à apporter l'énergie nécessaire lorsque l'apport solaire est insuffisant. Il est raccordé sur une chaudière alimenté par l'énergie d'appoint.
- Le réseau de distribution, pour obtenir l'eau chaude sanitaire aux différents points de puisage du bâtiment.
- Un dispositif de régulation, de mesure et de contrôle de l'installation.

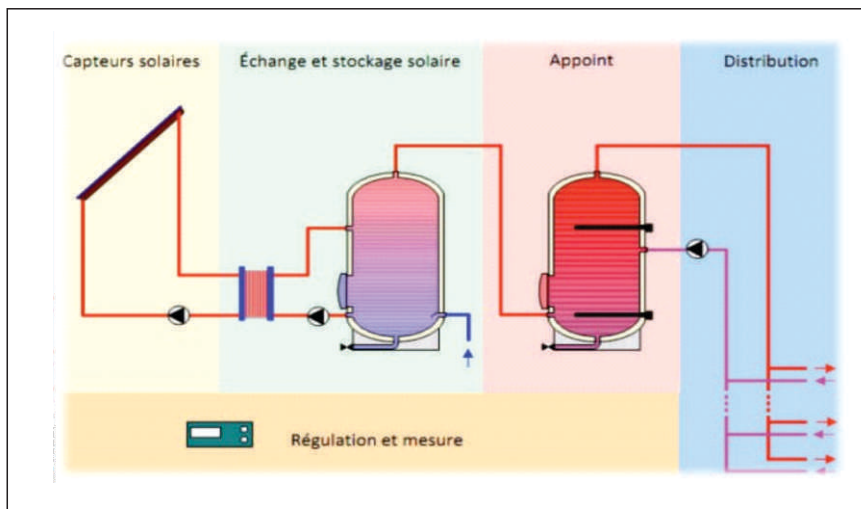


Figure 128 : Schéma simplifié d'une installation solaire collective de production d'eau chaude avec indication des principaux sous-ensembles

1.1. Les différents types de Capteurs :

1.1.1. Capteurs plans sans vitrage

Les capteurs sans vitrage, sont constitués d'un simple absorbeur, le plus souvent ces capteurs sont fabriqués en matière synthétique. La température maximale atteinte par les capteurs sans vitrage est insuffisante pour la production d'eau chaude sanitaire mais bien adaptée au chauffage de l'eau de piscine extérieure dont la température est de l'ordre de 30°C.



Figure 129 : Capteur plan sans vitrage



1.1.2. Capteurs plans vitrés

Ce capteur est utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire, jusqu'à une température de 70°C, dans les bâtiments à usage résidentiel et tertiaire (ex. Immeubles, hôtels, piscines couvertes, bains maures...). Il représente la part de marché la plus importante en Tunisie avec environ 90%.

Il est constitué d'un coffre isolant protégeant l'arrière du capteur et permettant la fixation de la couverture transparente. Celle-ci est constituée d'une feuille de verre trempé, qui en cas de bris se décompose en de très nombreux morceaux sans dangers pour les utilisateurs. L'absorbeur est l'élément sensible du capteur, il est constitué d'une feuille de métal bon conducteur de la chaleur (cuivre ou aluminium) solidaire d'un réseau de tubes dans lequel circule le fluide (eau ou fluide antigel) qui permettra d'évacuer hors du capteur l'énergie qu'il aura capté. L'absorbeur est de couleur sombre (bleu foncé ou noir) afin de capter la plus grande partie du rayonnement solaire visible.

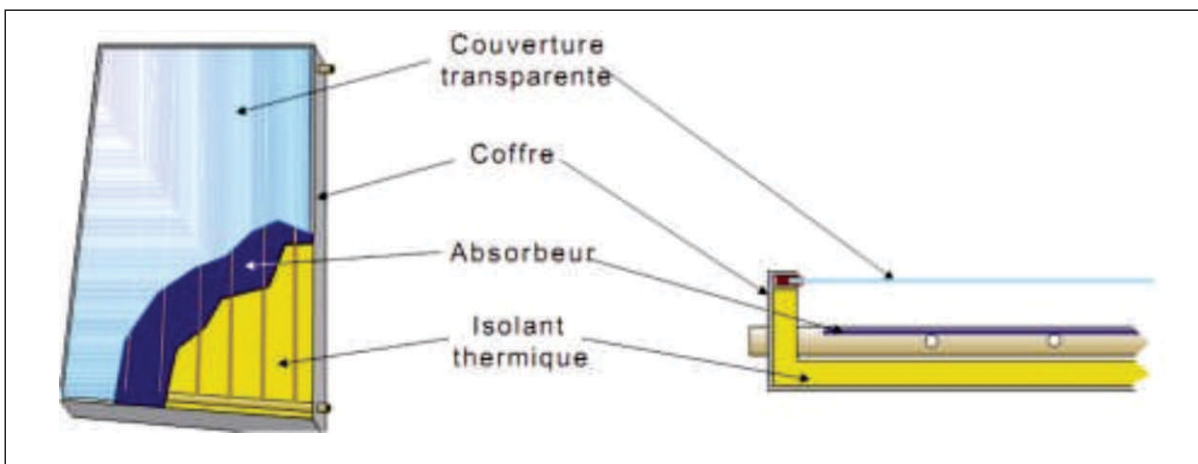


Figure 130 : Capteur plan vitré

1.1.3. Capteurs à tubes sous vide

Un moyen très efficace pour améliorer la performance des capteurs solaires thermiques, consiste à supprimer l'air contenu dans les capteurs, cela réduit considérablement les pertes par convection.

La configuration la plus courante est constituée d'un assemblage de tubes sous vide de faible surface unitaire. L'absorbeur est constitué d'une étroite feuille de cuivre ou d'aluminium disposant d'un revêtement sélectif sur laquelle est soudé un tube dans lequel circule le fluide caloporteur. La principale difficulté technologique réside dans la soudure verre/métal qui peut prendre diverses configurations.

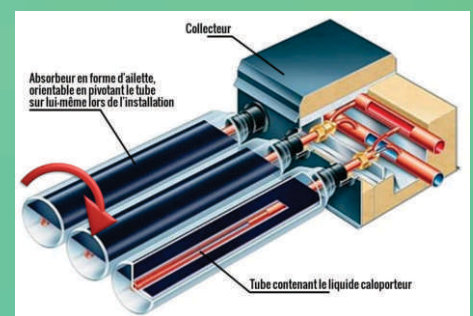
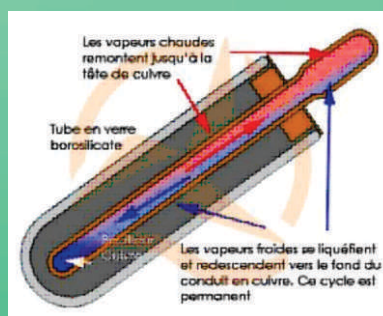
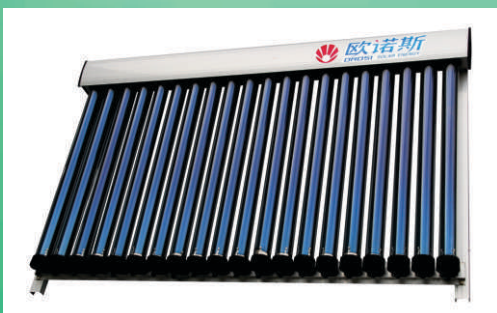


Figure 131 : Capteur à tube sous vide

1.1.4. Le rendement énergétique d'un capteur solaire

Le comportement énergétique d'un capteur solaire se caractérise par sa courbe de rendement, qui est normalement définie par l' équation suivante :

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T - T_a)^2}{G}$$

- η** Le rendement du capteur,
- T** La température moyenne du capteur, en première approche c'est la moyenne entre la température d'entrée et de sortie du capteur (°C),
- T_a** La température de l'air ambiant extérieur (°C),
- G** L'irradiation solaire revue dans le plan du capteur (W/m²)
- η₀** : Un coefficient qui est caractéristique du capteur solaire. Il est constitué du produit du facteur de transmission de la couverture transparente par le «Facteur de forme» qui tient compte de la géométrie de l'absorbeur.
- a₁ et a₂** Deux coefficients caractéristiques du capteur, appelés respectivement coefficients de perte de premier et second ordre

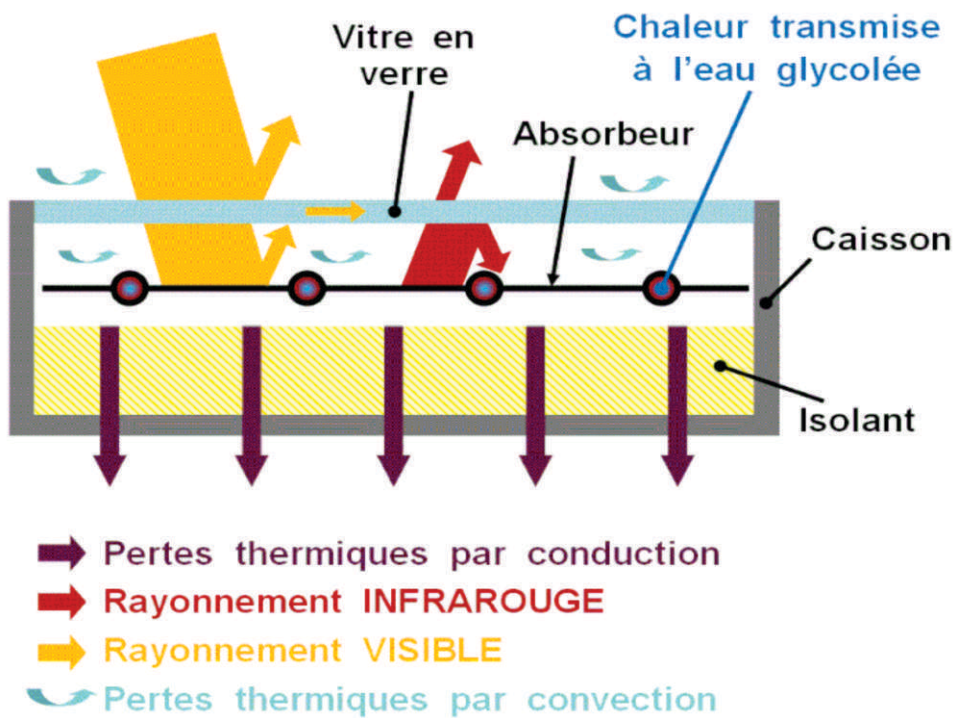
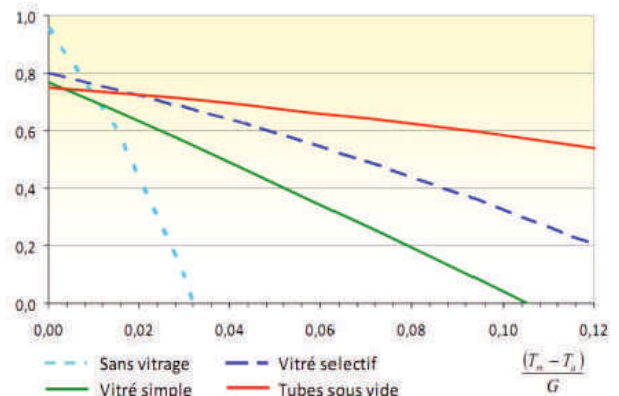


Figure 132: Rendement énergétique d'un capteur solaire

Le graphique ci-contre montre la variation du rendement de différents types de capteurs solaires en fonction des conditions de fonctionnement, caractérisées par les variables T ; T_a et G. On note que plus le capteur est performant, moins il est sensible aux températures élevées. On constate que plus on souhaitera une température de fluide élevée dans le capteur, plus on aura intérêt à prendre un capteur à tubes sous vide.



1.1.5. Le choix du type de capteur

CONSIDERATIONS DE BASE	20°C - 30°C	40°C -50°C -60°C	70°C - 80°C - 90°C	Plus de 90°C – 250°C
Capteurs solaires	Capteurs non-vitré	Capteurs vitré	Capteurs à tubes sous vide de moyenne performance	Capteurs à tubes sous vide de haute performance (Capteur à concentration)
Champ d'application	Chauffage de l'eau de piscine	*Production de l'eau chaude sanitaire et/ou *chauffage à basse température des locaux	*chauffage des locaux et/ou *Production de froid par machine à absorption simple effet et/ou *préchauffage de l'eau des procédés industriels à basse température	*Production de froid par machine à absorption double effet et/ou *Production de la vapeur pour le besoin thermiques des procédés industriels à moyenne température
Type de bâtiment concerné	Piscines extérieures	* Etablissements de santé, Hôtels, stations touristiques, Foyers, Habitat collectif (immeubles), Hammams, Piscine couverte, Restaurants, Douches, etc	Usage de bureaux, Espaces Commerciaux, Industrie, etc .	
Circulation/stockage	Aucun stockage	*Chauffe-eau solaires individuels interconnectés ou Circulation forcée (stockage intérieur)	Circulation forcée	
Remarques	En Tunisie, les piscines extérieures sont généralement chauffées durant les saisons intermédiaires (du 15/09 au 31/10 et du 5/04 au 15/06)	Nécessite une étude de faisabilité pour évaluer le besoin en eau chaude sanitaire et dimensionner, ainsi, la taille de l'installation	Nécessite à la base l'évaluation des besoins thermiques avant de dimensionner et concevoir l'installation	Nécessite à la base l'évaluation des besoins thermiques avant de dimensionner et concevoir l'installation

Tableau 79 : Le choix des capteurs solaire thermique en fonction des températures de sortie à l'utilisation

1.2. Ballon de stockage et échangeur:

La fonction principale du stockage solaire est de résoudre les problèmes induits par le caractère discontinu du rayonnement solaire et la consommation d'eau chaude en dissociant autant que possible, le captage de l'utilisation.

Dans une installation de production d'eau chaude sanitaire, la façon la plus simple de stocker cette énergie est de l'accumuler dans un réservoir d'eau chaude.

En fonction de la configuration adoptée, le stockage peut être effectué de manière centralisée (ballon commun) ou individuelle (petit ballon de stockage situé dans chacun des services).

Le transfert d'énergie du circuit primaire vers le ballon de stockage est effectué grâce à un échangeur de chaleur. La capacité d'échange doit être suffisante pour permettre d'évacuer la totalité de la chaleur en provenance des capteurs.

Dans le cas d'une installation composée de taille moyenne ou grande avec stockage centralisé, cet échangeur est généralement de type externe et à plaques.

Dans le cas d'une configuration de chauffe-eau solaire individuels, l'échangeur de chaleur est intégré dans les ballons.



1.3. Dispositif d'appoint:

Une installation solaire ne permet pas, normalement, de satisfaire la totalité des besoins en eau chaude sanitaire d'un bâtiment, sur toute l'année, en particulier les jours de faible ensoleillement.

En outre, l'optimisation technico-économique d'un projet solaire conduit à des surfaces de captation qui limitent le taux de couverture solaire.

Par conséquent, le bâtiment doit disposer d'un système d'appoint tel que chaudière gaz, fuel ou électrique.

1.4. Le Circuit de distribution:

L'eau chaude sanitaire produite en local technique doit être distribuée à chaque point de puisage du bâtiment par un réseau constitué de canalisations correctement isolées. Selon la configuration choisie, on peut distribuer l'eau sanitaire à sa température de consigne (l'appoint est dans ce cas centralisé), ou à la température obtenue par le chauffe-eau solaire.

1.5. La régulation:

Le système de régulation a pour objet de mettre en service les autres composants électriques du circuit afin d'optimiser le captage d'énergie, le stockage et la distribution de l'énergie.

1.6. Le système de suivi à distance des performances:

Le système de suivi des performances à distance est un boîtier raccordé au réseau téléphonique dont le rôle est de :

- Stocker les données de fonctionnement de l'installation solaire (températures, énergie solaire, énergie d'appoint, état de fonctionnement des pompes) sur plusieurs jours,
- Assurer un suivi de l'installation par des spécialistes (bureau d'études, entreprises d'installation),

- Faciliter l'analyse des données et l'établissement des rapports de gains financiers et environnementaux générés par le projet,
- Vérifier, a tout moment, le bon fonctionnement de l'installation, Détecter les éventuels dysfonctionnements.

1.7. Configurations type :

1.7.1. Chauffe-eau solaires individuels (CESI) :

Les chauffe-eau solaires individuels fonctionnant en thermosiphon constituent une solution simple pour la production collective d'eau chaude sanitaire.

Cette solution est employée, aussi, dans des logements collectifs, en situant les équipements sur la toiture commune. Chaque alimentation de chauffe-eau doit être raccordée à la canalisation d'eau froide du logement. De même la sortie du chauffe-eau solaire est raccordée au le réseau d'eau-chaude du logement, si l'appoint électrique est situé dans le chauffe-eau solaire (peu conseillé). Dans le cas contraire, la sortie est raccordée à l'entrée du chauffe-eau ou à la chaudière d'appoint située dans le logement.

Dans ce type de système il faut veiller a ce que la distance du chauffe-eau solaire au logement ne soit pas très importante, afin que l' eau chaude soit immédiatement disponible aux points de puisage.

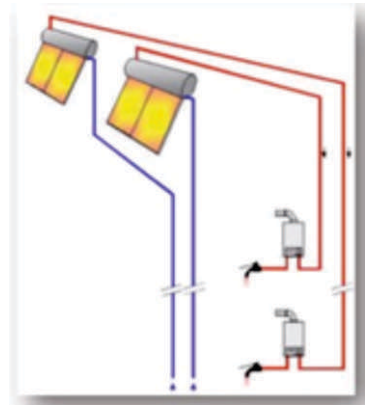
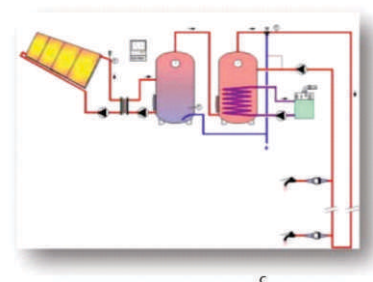


Figure 133 :
Chauffe-eau-eau solaires individuels (CESI)

1.7.2. Système solaire avec production, stockage et distribution intérieures centralisées (CESC) :

Les chauffe-eau solaires de type centralisés sont les plus courants dans des bâtiments collectifs en Tunisie puisque la production d'eau chaude sanitaire est collective. C'est le cas des centres sportifs, hôtels, résidences, hôpitaux, etc.

La production d'eau chaude (solaire et appoint) est disposée dans les parties communes, le plus souvent en rez-de-chaussée ou en sous-sol, tandis que les capteurs sont installés sur le toit du bâtiment.

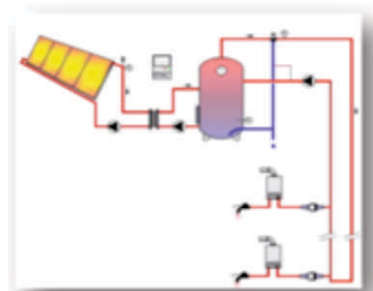


1.7.3. Système solaire avec stock solaire centralisé et appoint individuel (CESCAI) :

C'est une configuration individualisée, utilisée en Europe, qui consiste a préchauffer l'eau sanitaire dans un ballon solaire collectif et, contrairement au cas précédent, sa température a l'entrée dans les locaux est variable, en fonction de l'ensoleillement et du volume d'eau consommé.

L'énergie d'appoint permettant de porter l'eau sanitaire à sa température de consigne est assurée par des chaudières instantanées a gaz ou par de ballons électriques.

La production d'énergie d'appoint est effectuée de manière individuelle par chaque utilisateur et, par conséquent, il n'est pas nécessaire d'effectuer une répartition des coûts associés. Par contre, la fourniture d'eau préchauffée pourra faire l'objet, au même titre que l'eau froide, des compteurs d'eau individuels devront être disposés a l'entrée de chaque local.

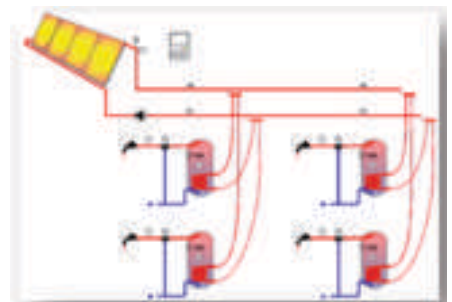
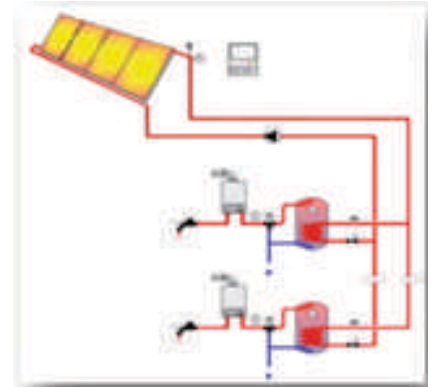


1.7.4. Système solaire avec production centralisé stockage et appoint individuel (CECSAI):

Dans ce cas de figure, utilisé en Europe, il n'y a pas de stockage ni de distribution collective de d'eau. L'eau préchauffée est stockée dans les ballons individuels situés dans chaque logement puis chauffée dans chaque logement.

L'énergie des capteurs solaires est distribuée dans le bâtiment au moyen d'une boucle fermée qui transfère l'énergie dans chaque ballon par l'intermédiaire d'un échangeur noyé situé dans la partie basse de celui-ci. L'eau préchauffée par le solaire dans ce ballon est amenée à la température de consigne par un appoint électrique situé dans la partie supérieure ou par une chaudière disposée en aval.

Une deuxième configuration appelée « en parapluie », consiste en la connexion des échangeurs des ballons solaires directement sur la canalisation générale du circuit primaire, située en toiture du bâtiment. Chaque ballon est raccordé par une tuyauterie aller/retour de petit diamètre.



1.8. Systèmes sous pression et autovidangeable

Cette disposition est utilisée comme un moyen de protection contre les risques de surchauffe. Ce type d'installation est particulièrement utile lorsqu'il s'agit d'équiper un bâtiment à usage intermittent (hôtel, caserne, camping, logements saisonniers) ou lorsque la consommation, très variable tout au long de l'année, pourrait entraîner des surchauffes régulières voire des vaporisations du fluide caloporteur.

Les systèmes solaires autovidangeables, ou Drain Back en anglais, peuvent être utilisés dans les différentes configurations présentées précédemment.

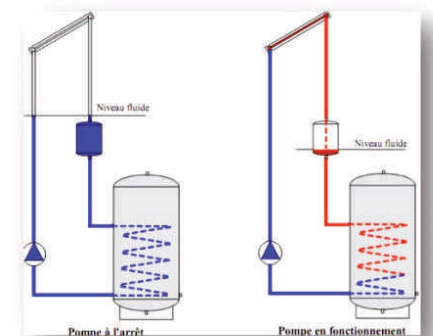


Figure 134 :
Fonctionnement d'une installation autovidangeable

2. DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE

Une installation solaire bien conçue, ne doit pas produire plus que 90% des besoins. En cas de doutes, mieux vaut sous-dimensionner la surface des capteurs solaires.

2.1. Dimensionnement des besoins énergétiques

Le calcul des besoins énergétiques liés à la production d'eau chaude sanitaire s'établit selon la formule suivante :

$$B_{ECS(i)} = 1,16 \cdot V_{ECS(i)} \cdot D_i \cdot (T_{ECS} - T_{EF(i)})$$

Avec :

$ECS(i)$: Les besoins énergétiques nécessaires à la production d'eau chaude sanitaire pour le mois i exprimé en Wh.

$V_{ECS(i)}$: La consommation journalière d'eau chaude sanitaire en litres/jour.

D_i : Le nombre de jours du mois i .

T_{ECS} : La température de consigne de l'eau chaude sanitaire en °C pour le volume VECS.

$T_{EF(i)}$: La température d'eau froide du mois i (C°).

Un des points les plus critiques dans le dimensionnement d'une installation réside dans la détermination de la consommation d'eau chaude (VECS).

La première possibilité pour déterminer la consommation réelle d'un bâtiment consiste à effectuer des mesures de consommation si le bâtiment utilise une production d'eau chaude centralisée. Dans le cas le plus courant de logements individuels équipés de moyens de production distribués, il est impossible dans la pratique de justifier l'installation de compteurs individuels.

Dans tous ces cas, on devra faire une estimation des consommations à partir de mesures existantes sur des ensembles équivalents. Le nombre de logements, d'occupants et les données propres au bâtiment, permettront d'estimer cette consommation.

En première approximation, pour le secteur résidentiel collectif, le volume de consommation s'établit en moyenne à 30-35 litres d'eau chaude à 40°C par jour et par habitant.

Par ailleurs, il peut être convenable d'affecter les consommations mensuelles d'un coefficient saisonnier, pour tenir compte d'une moindre consommation d'eau chaude pendant les mois d'été, à cause de l'absence de certains habitants pendant une période de vacances.

Ces coefficients saisonniers, européens, sont à titre d'indication.

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Coef.	1,15	1,1	1,05	1,1	1,03	1,02	0,91	0,77	0,92	0,95	1,03	1,07

Tableau 80 : Variation des coefficients européens saisonniers

2.2.Calcul des performances d'une installation solaire :

Il s'agit de déterminer combien de capteurs d'une certaine marque et d'un certain type sont nécessaires pour atteindre la production énergétique cible pour un bâtiment donné. Pour procéder à ce choix, il est nécessaire de disposer d'une méthode de calcul qui permette d'estimer la quantité d'énergie qu'une installation solaire est en mesure de produire tout au long de l'année. Le choix de la méthode de calcul utilisée peut avoir une influence sur le résultat final.

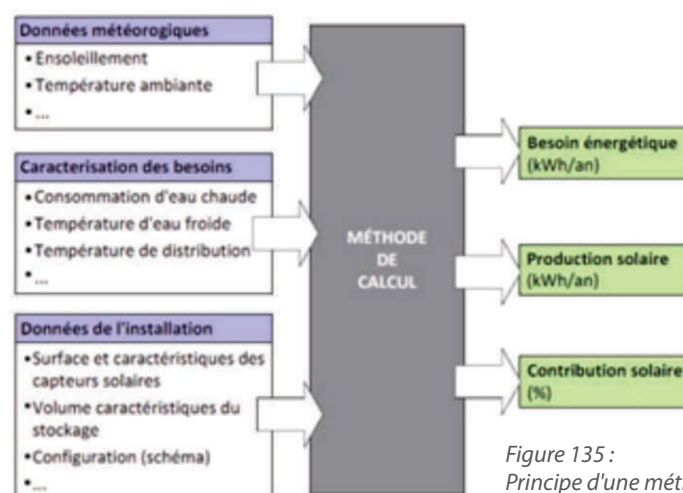


Figure 135 : Principe d'une méthode de calcul simplifié

2.3. Conseil pour le choix des équipements solaires :

Les tuyauteries des circuits primaires et secondaires doivent être alimentaires et résister à des hautes températures (ex. cuivre). Le choix des diamètres (D_i) doit tenir en compte du débit (Q), de la vitesse de l'air (v) et de la masse volumique du fluide (f)

$$D = 33,3 \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot v \cdot f}}$$

Il est recommandé de choisir des circulateurs simples pour les installations solaires dont la surface de captation est inférieure à 150 m² et double pour ceux supérieures à cette valeur. Un ratio indicatif de 40 à 70 l/h/ m² capteur pourra être utilisé.

Le dimensionnement du vase d'expansion devra être effectué en tenant compte le fluide antigel et le raccordement au circuit primaire. Celui-ci devra être surdimensionné et le fluide antigel utilisé devra être de qualité alimentaire (ex. propylène-glycol).

Il est préconisé de choisir un échangeur de chaleur à plaque pour une surface de capteur supérieure à 30 m² et généralement cet organe devra être surdimensionné (on pourra utiliser une puissance spécifique de 100 W/K/m² de capteur).

Le ballon de stockage devra être de revêtement alimentaire et résister à une température maximale de 90°C. Généralement, le volume de stockage solaire est équivalent à la consommation journalière.

Pour une installation solaire, il est important de mettre en place des vannes d'équilibrage des débits, des purgeurs manuels si accès aisé, de choisir un échangeur à plaque extérieur avec un appoint séparé en série après le préchauffage solaire et des ballons solaires montés en série.

Il faut prévoir un dispositif de maintien de température du réseau de distribution retour de bouclage. Si les ballons solaires et l'appoint sont éloignés alors il faut mettre en place un bouclage entre les deux.

Grossièrement, on peut utiliser les ratios suivants pour un premier pré-dimensionnement d'une installation solaire thermique :

- ● 1 m² pour 40 à 50 l de stockage solaire,
- ● Au moins 450 kWh/m².an de productivité d'un capteur solaire,
- ● 1 à 2 m² de capteurs solaires pour 100 L de consommation par jour,

Publié par



Programme pour l'Efficacité Energétique dans les Bâtiments (PEEB)

c/o Agence Française de Développement (AFD)
5 Rue Roland Barthes
75012 Paris, France
E info@peeb.build
T +33 (0) 1 53 44 35 28
I www.peeb.build

En coopération avec



Un engagement durable et renouvelable

Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie

Siège social : 1, avenue du Japon
Cité administrative Montplaisir - B.P. : 213 - 1073 Tunis, Tunisie
T : (216) 71 906 900 - F : (216) 71 904 624
E : boc@anme.nat.tn
I : www.anme.nat.tn

Le programme pour l'Efficacité Energétique dans les Bâtiments (PEEB) est actuellement financé par le Ministère Fédéral Allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire (BMU), le Ministère Français de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES), l'Agence Française de Développement (AFD) et le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM). Le PEEB est sous l'égide de la Global Alliance for Buildings and Construction (GABC).

Le PEEB est mis en œuvre par l'Agence Française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), AFD et la Deutsche Gesellschaft für International Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Élaboré par

Le Bureau d'Etudes ASSELEC

Contacts

Rym Nafti
Coordinatrice Nationale de la composante Tunisie
E rym.nafti@giz.de

Helen Lisa Naser
E helen.naser@giz.de

Conception

©Agoraphagic, Tunis

Lieu et date

Tunis, juin 2021

Financé par



of the Federal Republic of Germany



Ce projet fait partie de l'Initiative Internationale du Climat (IKI). Le Ministère Fédéral Allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire (BMU) soutient cette initiative sur la base d'une décision adoptée par le Bundestag Allemand.

Mis en œuvre par



Sous l'égide de





PEEB

PROGRAMME FOR
ENERGY EFFICIENCY
IN BUILDINGS

**Secrétariat du Programme pour l'Efficacité
Énergétique dans les Bâtiments (PEEB)**

c/o Agence Française de Développement (AFD)
5 Rue Roland-Barthes
75012 Paris, France

E info@peeb.build
T +33 (0) 1 53 44 35 28
I www.peeb.build