

**Agence Nationale pour le Développement  
des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique**

A stylized illustration of a globe with various energy and climate symbols. The globe is dark teal, and the background is a lighter teal. Symbols include a factory with a plant, a fan, a sun, solar panels, a snowflake, and birds.

**Guide technique  
pour le chauffage,  
la ventilation  
et la climatisation**



# Sommaire exécutif

Les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) représentent une part importante de la consommation électrique des bâtiments résidentiels et tertiaires. Une étude récente réalisée par l'ADEREE sur la caractérisation du marché marocain des systèmes CVC, a estimé l'énergie utilisée pour le chauffage, la climatisation et la cuisson à 70 % de l'énergie totale consommée dans les logements.

L'ADEREE a élaboré ce guide pour les ingénieurs, les gestionnaires de l'énergie et les techniciens du bâtiment afin de leur fournir un outil de formation pratique, traitant du choix et du dimensionnement de systèmes CVC adaptés aux besoins de chaque bâtiment.

Ce guide décrit les composants, le fonctionnement et la structure des différents types de CVC :

- ➔ appareils de climatisation individuels et centralisés
- ➔ appareils réversibles de climatisation et de chauffage, pompes à chaleur
- ➔ appareils de ventilation mécanique simple et double flux VMC
- ➔ appareils de chauffage
- ➔ réseaux de distribution de la chaleur.

Des notions de confort hygrothermique sont rappelées, elles déterminent l'objectif des systèmes CVC qui est de procurer aux occupants des locaux des conditions climatiques optimales.

Ce guide présente aussi les outils indispensables pour :

- ➔ garantir un bon choix des systèmes CVC pour répondre aux exigences de performances énergétiques minimales du Règlement Thermique de Construction au Maroc.
- ➔ réaliser un dimensionnement optimal des installations.
- ➔ maîtriser les dispositions, normes et contraintes à appliquer aux réseaux de distribution.

Enfin ce guide présente des cartes de données météorologiques définies pour dimensionner les systèmes CVC : température extérieure sèche et humide de base de l'été et de l'hiver, humidité relative moyenne correspondant aux températures sèches de base de l'été et zonage climatique adapté au Règlement Thermique de Construction au Maroc.





<b>Introduction</b>	<b>7</b>	4.1.4.	Origine et marques des équipements	21	
<b>Partie 1 : Notions de base</b>	<b>9</b>	4.2.	Systèmes individuels	22	
<b>1. Les chaudières</b>	<b>10</b>	4.2.1.	Avantages	22	
1.1.	Le cycle de combustion comme source de chaleur	10	4.2.2.	Inconvénients	22
1.1.1.	Description d'une chaudière	10	4.2.3.	Origine et marques des équipements individuels de chauffage des locaux	22
1.1.2.	Types de système de combustion	11	4.2.4.	Origine et marque des systèmes individuels de climatisation	23
1.1.3.	Performance énergétique	11	4.2.4.1.	Répartition indicative par taille d'équipement	23
<b>2. Les pompes à chaleur</b>	<b>12</b>	4.2.4.2.	Répartition indicative par domaine	23	
2.1.	Description et principe de fonctionnement	12	4.2.4.3.	Répartition indicative par zone géographique	23
2.2.	Unités Air/Air	13	4.2.4.4.	Parc estimatif de climatiseurs individuels installés	24
2.3.	Unités Air/Eau	13	4.2.4.5.	Consommation estimée d'énergie des équipements de CVC individuels et part de leur consommation par rapport aux autres équipements	24
2.3.1.	Groupes de production d'eau glacée	13	4.3.	Ventilation mécanique contrôlée (VMC)	25
2.3.2.	Pompes à chaleur réversibles sur boucle d'eau	13	4.3.1.	Définition	25
2.3.3.	Types des ventilateurs	14	4.3.2.	VMC avec centrale de traitement d'air	25
2.4.	Unités Eau/Eau	14	4.3.3.	VMC sans centrale de traitement d'air	25
2.5.	Les compresseurs	15	4.3.4.	Typologie de ventilation	26
2.6.	Performance énergétique d'une pompe à chaleur	15	4.3.4.1.	Alimentation naturelle + évacuation naturelle	26
2.7.	Les machines à absorption comme source de froid et de chaleur	16	4.3.4.2.	Ventilation à alimentation mécanique	26
<b>3. Les équipements de ventilation mécanique contrôlée VMC</b>	<b>17</b>	4.3.4.3.	Ventilation à extraction mécanique	27	
3.1.	VMC simple ou double flux	17	4.3.4.4.	Ventilation mécanique double flux	27
3.1.1.	VMC simple flux	17	<b>5. Notions de confort hygrothermique</b>	<b>28</b>	
3.1.2.	VMC double flux	17	5.1.	Différents paramètres régissant le confort hygrothermique	28
3.2.	Différents types de ventilateurs	18	5.2.	Facteurs objectifs	28
3.2.1.	Ventilateurs centrifuges	18	5.2.1.	Paramètres relatifs à l'ambiance	28
3.2.2.	Ventilateurs hélicoïdes	18	5.2.1.1.	Température des parois	28
3.2.3.	Ventilateurs tangentiels	18	5.2.1.2.	Humidité de l'air	29
<b>4. Types d'installations de chauffage, climatisation et ventilation mécanique</b>	<b>19</b>	5.2.1.3.	Vitesse de l'air	29	
4.1.	Systèmes centralisés	19	5.2.2.	Paramètres relatifs à l'occupant	30
4.1.1.	Avantages	20	5.2.2.1.	Activité physique	30
4.1.2.	Inconvénients	20			
4.1.3.	Liste des équipements centralisés et leur codification	21			



5.2.2.2.	Vêtement	30	7.1.2.2.	Mise en œuvre	43
5.2.3.	Facteurs subjectifs	31	7.2.	Réseaux hydrauliques	43
5.2.4.	Qualité de l'air : confort olfactif et hygiénique	32	7.2.1.	Isolation thermique des tuyauteries de chauffage, de ventilation et climatisation	43
<b>Partie 2 : Dimensionnement des installations</b>		<b>33</b>	7.2.1.1.	Épaisseur minimale	43
<b>6.</b>	<b>Paramètres déterminant le dimensionnement des installations de chauffage, de climatisation et de ventilation</b>	<b>34</b>	7.2.1.2.	Mise en œuvre	44
6.1.	Conditions internes de température et d'hygrométrie	35	<b>Annexes</b>		<b>45</b>
6.2.	Conditions extérieures de calcul	35	Annexe 1.	Le cycle de combustion comme source de chaleur	46
6.3.	Taux de renouvellement d'air et les déperditions ou apports associés	35	Annexe 2.	Propriétés de l'air humide	47
6.3.1.	Taux de renouvellement d'air suivant la nature du local	35	Annexe 3.	Conditions extérieures de calcul de la charge frigorifique	49
6.3.2.	Échanges thermiques dus au renouvellement d'air	37	Annexe 4.	Conditions extérieures de calcul de la charge de chauffage	50
6.4.	Apports internes et les apports à travers les parois extérieures dans le cas des installations de refroidissement	39	Annexe 5.	Zonage climatique	51
6.4.1.	Apports thermiques par conduction	39	Annexe 6.	Carte des températures sèches de base de l'été	52
6.4.2.	Apports sensibles solaires à travers les parois vitrées	40	Annexe 7.	Carte des températures humides de base de l'été	53
6.4.3.	Apports sensibles dus à l'éclairage artificiel	40	Annexe 8.	Carte des températures sèches de base de l'hiver	54
6.4.4.	Apports dus aux équipements	40	Annexe 9.	Carte des humidités relatives minimales moyennes correspondant aux températures extérieures sèches de base de l'été	55
6.4.5.	Apports dus aux occupants	40	Annexe 10.	Carte des isolignes de température sèche de base de l'été	56
6.5.	Charge frigorifique de pointe des équipements terminaux de refroidissement	41	Annexe 11.	Cartes des Isolignes de température extérieure humide de base de l'été	57
6.6.	Déperditions à travers les parois extérieures dans le cas des installations de chauffage	42	Annexe 12.	Cartes des Isolignes de température extérieure sèche de base de l'hiver	58
6.7.	Dimensionnement des équipements de chauffage :	42	Annexe 13.	Fiche de vérification des installations de chauffage	59
<b>7.</b>	<b>Réseaux de distribution</b>	<b>43</b>	Annexe 14.	Fiche de vérification des installations de conditionnement d'air	60
7.1.	Réseaux aérauliques	43	<b>Conclusion</b>		<b>61</b>
7.1.1.	Dispositions générales	43			
7.1.2.	Isolation thermique des réseaux aérauliques	43			
7.1.2.1.	Épaisseur minimale	43			



## Listes des figures

Figure 1	Répartition de l'énergie utilisée dans les logements	7	Figure 21	Climatisation individuelle	22
Figure 2	Coupe schématique d'une chaudière (source : énergétique du bâtiment, Claude-Alain Roulet)	11	Figure 22	Répartition régionale du parc de climatiseurs individuels	23
Figure 3	Schéma de principe d'une pompe à chaleur en mode chauffage	12	Figure 23	Pourcentage de la consommation énergétique des CVC par rapport à la consommation énergétique totale suivant les zones climatiques du Maroc	24
Figure 4	Transfert d'énergie d'une PAC en mode chauffage	12	Figure 24	Appareil de mesure du confort thermique (Thermal Comfort Meter)	32
Figure 5	Pompe à chaleur réversible	12	Figure 25	Plages de confort hygrothermiques pour des activités de bureau	34
Figure 6	Unité extérieure et intérieure d'un climatiseur individuel de type split système	13	Figure 26	Apports internes et externes de chaleur	39
Figure 7	Unité autonome de climatisation (air/air) du type mono-bloc (roof-top)	13	Figure 27	Diagramme psychrométrique pour l'air humide	47
Figure 8	Refroidisseur de liquide à condensation par air et ventilateurs hélicoïdes	14	Figure 28	Carte du zonage climatique au Maroc adapté aux besoins du RTCM	51
Figure 9	Refroidisseur de liquide à condensation par air et ventilateurs centrifuges (source : Trane)	14	Figure 29	Carte des 38 stations météorologiques et leurs températures sèches de base de l'été	52
Figure 10	Cycle typique d'un refroidisseur à absorption à combustion directe	17	Figure 30	Carte des 38 stations météorologiques et leurs températures humides de base de l'été	53
Figure 11	Schéma de fonctionnement d'une ventilation double flux à échangeur thermique	17	Figure 31	Carte des 38 stations météorologiques et leurs températures sèches de base de l'hiver	54
Figure 12	Ventilateur centrifuge	18	Figure 32	Carte des humidités relatives minimales moyennes correspondant aux températures extérieures sèches de base de l'été.	55
Figure 13	Ventilateur hélicoïde	18	Figure 33	Carte des iso-températures extérieures sèches de base de l'été calculées en se basant sur la correction par rapport à l'altitude.	56
Figure 14	Ventilateur tangentiel	18	Figure 34	Carte des iso-températures extérieures humides de base de l'été calculées en se basant sur la correction par rapport à l'altitude.	57
Figure 15	Extracteur tourelle	18	Figure 35	Carte des iso-températures extérieures sèches de base de l'hiver calculées en se basant sur la correction par rapport à l'altitude.	58
Figure 16	Extracteur caisson	19			
Figure 17	Schéma général d'un système CVC centralisé.	19			
Figure 18	Ventilo-convecteur	20			
Figure 19	Pompe à chaleur	20			
Figure 20	Origine des équipements CVC	21			



### Listes des tableaux

Tableau 1.	Rendement d'une chaudière	11	Tableau 17.	Débit minimal d'air neuf des locaux à pollution non spécifique par occupant	36
Tableau 2.	Différents types de compresseurs	15	Tableau 18.	Détermination du débit total de renouvellement d'air	37
Tableau 3.	Performances énergétiques minimales	16	Tableau 19.	Débit minimal d'air neuf (à 1,2 kg/m <sup>3</sup> ) en [m <sup>3</sup> /h] suivant la nature du local	37
Tableau 4.	Équipements centralisés de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire	21	Tableau 20.	Détermination des échanges thermiques du renouvellement d'air	38
Tableau 5.	Équipements centralisés des installations de climatisation/chauffage	21	Tableau 21.	Détermination des échanges thermiques du renouvellement d'air en présence de contrôle d'humidité	39
Tableau 6.	Équipements centralisés de ventilation, d'extraction d'air et de mise en sécurité incendie	21	Tableau 22.	Apport en chaleur latente des équipements	40
Tableau 7.	Hypothèses de consommation pour les bâtiments d'habitation	24	Tableau 23.	Apport en chaleur latente des occupants	41
Tableau 8.	Ventilation naturelle + évacuation naturelle	26	Tableau 24.	Dimensionnement des équipements de chauffage	42
Tableau 9.	Ventilation à alimentation mécanique	26	Tableau 25.	Isolation minimale des gaines d'air	43
Tableau 10.	Ventilation à extraction mécanique	27	Tableau 26.	Épaisseurs minima d'isolation pour différents diamètres de canalisation	44
Tableau 11.	Ventilation mécanique double flux	27	Tableau 27.	Calcul de l'épaisseur d'isolation en fonction du type d'isolant	44
Tableau 12.	Taux de métabolisme moyen correspondant à diverses activités [EN ISO 7730]	30	Tableau 28.	Valeurs PCI et PCS typiques pour les combustibles utilisés dans les chaudières	46
Tableau 13.	Valeurs en clo pour quelques tenues types [EN ISO 7730]	31	Tableau 29.	Conditions extérieures de calcul de la charge frigorifique	49
Tableau 14.	Échelle de sensation de confort [Fanger, 1982 ; EN ISO 7730]	31	Tableau 30.	Conditions extérieures de calcul de la charge de chauffage	50
Tableau 15.	Conditions intérieures de calcul : humidité et température sèche	35			
Tableau 16.	Taux de renouvellement d'air appliqué pour le dimensionnement par type de local et par occupant	36			



# Introduction

Face aux défis de l'accroissement rapide de la consommation d'énergie au Maroc, dont plus de 95% des besoins énergétiques sont importés de l'extérieur, l'efficacité énergétique est devenue un des sujets clés dans tous les domaines d'activité, y compris le secteur de l'habitat. Dans ce dernier, les besoins en énergie sont très variés et les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) représentent une part importante de la consommation électrique des bâtiments résidentiels et tertiaires. Une étude récente, réalisée par l'Agence de Développement des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (ADEREE) sur la caractérisation du marché marocain des systèmes CVC a estimé l'énergie utilisée dans les logements :

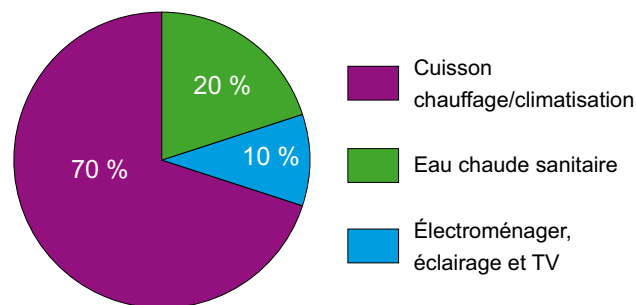


Figure 1 Répartition de l'énergie utilisée dans les logements

Cette consommation augmente de façon continue en raison du développement économique accéléré qu'a connu le Maroc durant les dernières années, caractérisé par une forte progression du secteur tertiaire et une amélioration du revenu des ménages. Cet essor s'est traduit par une augmentation notable du besoin de confort, matérialisé notamment par l'acquisition d'équipements de chauffage et de climatisation, aussi bien par le secteur tertiaire que par le secteur résidentiel. En mai 2010, ce marché a affiché une croissance à 12% en quantité et 8% en valeur par rapport à l'année précédente.

Le Maroc s'est donné pour objectif de réaliser une économie d'énergie de 12% à l'horizon 2020 et de 15% à l'horizon 2030, à travers la mise en place d'un plan d'efficacité énergétique dans les différents secteurs économiques. C'est notamment le secteur du bâtiment qui représente environ 25% de la consommation totale du Maroc dont 18% pour le résidentiel et 7% pour le tertiaire.



# Introduction

Pour répondre à cette situation le gouvernement marocain a engagé un certain nombre d'actions, dont la mise en place d'un Règlement Thermique de Construction au Maroc (RTCM). Son objectif est de rationaliser la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Il contribuera à freiner la croissance d'émission des gaz à effet de serre due à la consommation d'énergie fossile dans les secteurs tertiaires et résidentiels.

Ce guide traite des installations de chauffage, de climatisation et de ventilation. Ces équipements individuels et collectifs sont de natures différentes :

- appareils de chauffage avec chaudière et radiateurs, poêle à bois, poêle à gaz, radiateurs électriques, aérothermes électriques...
- appareils de climatisation ;
- appareils réversibles de climatisation et de chauffage ;
- appareils de ventilation.

La première partie est un rappel des notions de base dans les chapitres 1, 2, 3 et 4.

Le chapitre 5 est consacré au confort hygrothermique et au rôle qu'il joue dans le choix et le dimensionnement des équipements de conditionnement d'air.

La seconde partie présente et discute les paramètres déterminant le dimensionnement des installations de chauffage, de climatisation et de ventilation.

Les chapitres 6 et 7 donnent les dispositions importantes à prendre en considération par les bureaux d'études et de contrôle dans leurs opérations de dimensionnement de ces installations.

Les annexes contiennent : les cartes des caractéristiques thermiques de base du Maroc, un rappel technique sur la combustion des hydrocarbures, les caractéristiques de l'air humide et deux fiches de contrôle des installations.





# Partie 1 : Notions de base





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. Les chaudières

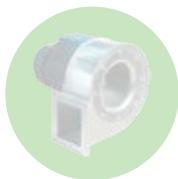
### 1.1. Le cycle de combustion comme source de chaleur

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.

#### 1.1.1. 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 2). Le tout est, en principe, isolé thermiquement de l'extérieur.



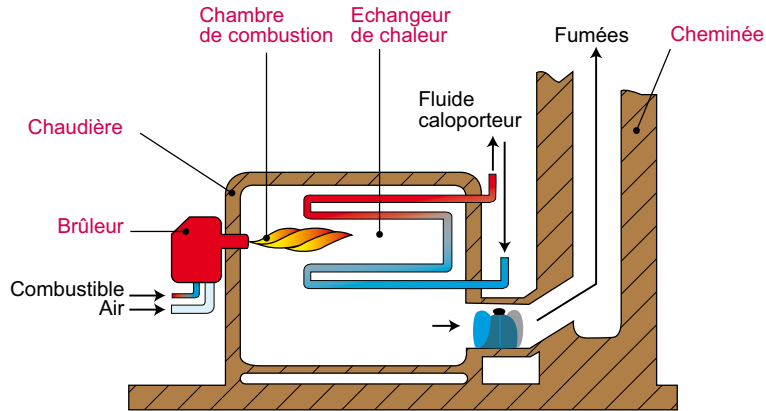


Figure 2 Coupe schématique d'une chaudière  
(source : énergétique du bâtiment, Claude-Alain Roulet)

### 1.1.2. 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.

### 1.1.3. 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 :

Tableau 1. Rendement d'une chaudière

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{Q_{fuel} PCI}$$

$\dot{m}$ :	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%.



## 2. Les pompes à chaleur

### 2.1. Description et principe de fonctionnement

Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermique permettant d'utiliser de l'énergie mécanique (pompes à compresseur) ou thermique (pompes à absorption) pour soutirer de la chaleur à basse température d'un milieu (environnement par exemple) dit "source froide" et de la restituer à une température plus élevée, la rendant utilisable pour les besoins domestiques (chauffage et eau chaude).

Le principe de fonctionnement d'une PAC est similaire à celui d'un réfrigérateur, avec un fluide (réfrigérant) dont le point d'ébullition sous faible pression se situe à basse température (ammoniac, fréon, butane).

La PAC comporte un compresseur (mécanique ou à absorption) qui comprime un gaz. Ce gaz comprimé s'échauffe et cède sa chaleur dans un échangeur appelé condenseur. Dans le condenseur le gaz condense en liquide, qui présente une température  $T_c$  supérieure à la température d'utilisation  $T_u$ .

Le liquide tiède est alors détendu dans une vanne de détente et peut être évaporé à une température  $T_e$  inférieure à la température  $T_f$  de la source froide. La chaleur nécessaire à l'évaporation est prise à la source froide dans l'échangeur de chaleur appelé évaporateur.

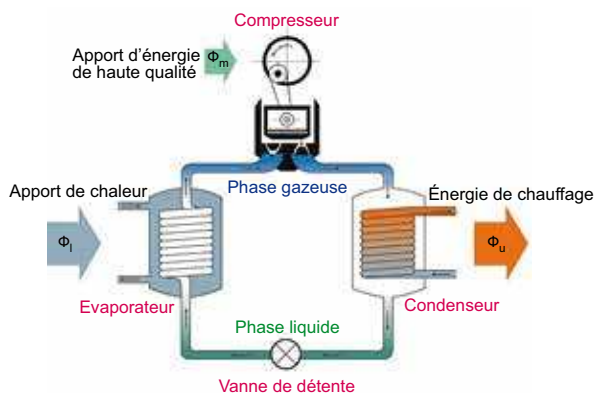


Figure 3 Schéma de principe d'une pompe à chaleur en mode chauffage

L'intérêt d'une PAC réside dans le fait qu'en fournissant une unité d'énergie mécanique on peut soutirer deux à trois unités d'énergie thermique gratuite d'une source à basse température et obtenir trois à quatre unités d'énergie thermique (chaleur) à une température suffisamment élevée pour être utilisée pour le chauffage de locaux.

On utilise ainsi moins d'énergie finale pour obtenir l'énergie utile souhaitée.

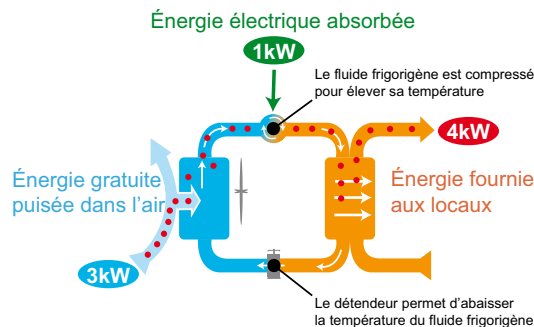


Figure 4 Transfert d'énergie d'une PAC en mode chauffage

La pompe à chaleur peut être réversible pour fournir de la chaleur en hiver et du froid en été.

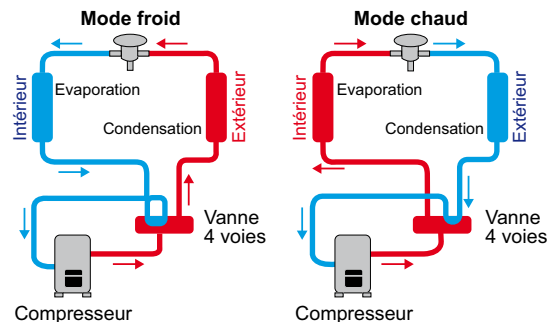


Figure 5 Pompe à chaleur réversible

On distingue trois types d'unités, en fonction de la nature des milieux concernés par l'échange thermique, air ou eau.

## 2.2. Unités Air/Air

Dans ces unités les deux milieux concernés par l'échange thermique sont l'air. La chaleur est puisée dans de l'air frais à travers l'évaporateur pour être rejetée dans de l'air chaud à travers le condenseur.

Ce type d'unité est le plus utilisé et constitue l'essentiel des unités autonomes de climatisation en froid seul ou chaud/froid réversible :

➔ unité individuelle de climatisation (froid seul ou chaud/froid) : monobloc, split système, multi-split, etc.

- 1 : reprise d'air partie haute
- 2 : alimentation électrique
- 3 : sonde de température de reprise d'air
- 4 : commande d'unité intérieure
- 5 : évacuation des condensats
- 6 : télécommande
- 7 : volet réglable
- 8 : air soufflé dans le local
- 9 : filtre à air
- 10 : liaison du fluide frigorigène
- 11 : raccordement électrique
- 12 : air repris à l'extérieur
- 13 : air soufflé à l'extérieur

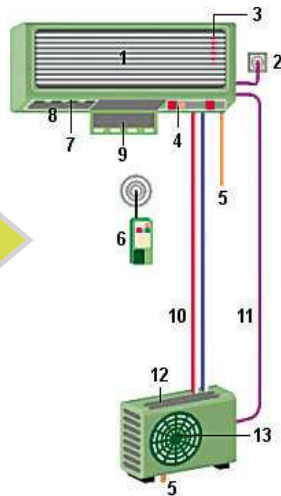


Figure 6 Unité extérieure et intérieure d'un climatiseur individuel de type split système

➔ unité autonome de climatisation (froid seul ou chaud/froid) : roof-top, armoire de climatisation, etc.



Figure 7 Unité autonome de climatisation (air/air) du type mono-bloc (roof-top)

## 2.3. Unités Air/Eau

Dans ces unités les deux milieux concernés par l'échange thermique sont l'air et l'eau. Dans le cas d'une production centralisée l'eau circulant dans l'installation de climatisation est soit refroidie, soit chauffée. En mode refroidissement la chaleur est puisée dans l'eau entrant dans l'unité pour baisser sa température à travers l'évaporateur. Cette chaleur est ensuite rejetée dans de l'air à travers le condenseur. En mode chauffage, le condenseur et l'évaporateur permutent leurs fonctions.

Deux catégories d'unités constituent l'essentiel des unités air/eau :

### 2.3.1. Groupes de production d'eau glacée

L'eau est distribuée dans le bâtiment par un circuit hydraulique vers des équipements équipés d'échangeurs eau/air et d'un dispositif de soufflage (ventilo-convecteurs) pour la production de chaleur ou de froid dans les locaux. Il existe des versions réversibles de production d'eau glacée et d'eau chaude.

### 2.3.2. Pompes à chaleur réversibles sur boucle d'eau

Dans ce type d'installation plusieurs unités de pompe à chaleur air/eau sont réparties dans les bâtiments et montées sur une boucle d'eau qui alimente l'ensemble des unités. Ces pompes à chaleur rejettent ou puisent de la



chaleur dans la boucle d'eau. En mode chauffage les apports thermiques excédentaires de certains locaux sont canalisés vers les locaux ayant besoin de ces apports. Une tour de refroidissement permet de rejeter la quantité de chaleur excédentaire de l'ensemble du bâtiment. Ce type d'installation est très indiqué dans le cas de présence simultanée de besoins de chauffage et d'apports thermiques excédentaires au sein d'un même bâtiment.

**Exemple 1 :**

bâtiment à usage de bureaux avec une zone centrale importante peu exposée sur l'extérieur. En mode chauffage, les zones périphériques auront des besoins de chauffage et la zone centrale sera généralement génératrice d'apports thermiques excédentaires résultants de l'éclairage artificiel, des équipements bureautiques et du métabolisme des occupants.

**Exemple 2 :**

bâtiment avec un taux de vitrage important sur l'orientation sud. En mode chauffage, et par journées ensoleillées, les zones orientées sud pourront facilement être génératrices d'apports thermiques excédentaires résultant des apports solaires.

.....  
L'efficacité énergétique de ces systèmes peut être accrue en recherchant toutes les possibilités de récupération d'énergie.

**2.3.3. Types des ventilateurs**

Les unités air/air et air/eau sont généralement prévues pour une installation à l'air libre. Elles sont dans ce cas équipées de ventilateurs hélicoïdes.

Toutefois, et afin de répondre à certaines exigences où il n'est pas désirable d'avoir des équipements installés à l'extérieur des bâtiments, ces unités peuvent être installées dans des locaux fermés et sont dans ce cas équipées de ventilateurs centrifuges permettant de véhiculer l'air extérieur à travers les unités concernées.



Figure 8 Refroidisseur de liquide à condensation par air et ventilateurs hélicoïdes



Figure 9 Refroidisseur de liquide à condensation par air et ventilateurs centrifuges (source : Trane)

**2.4. Unités Eau/Eau**

Dans ces unités les deux milieux concernés par l'échange thermique sont l'eau. Dans le cas d'une production centralisée, l'eau circulant dans l'installation de climatisation est soit refroidie, soit chauffée. En mode refroidissement, la chaleur est puisée dans l'eau entrant dans l'unité pour baisser sa température à travers l'évaporateur. Cette chaleur est ensuite rejetée dans l'eau à une température plus élevée à travers le condenseur. En mode chauffage, le condenseur et l'évaporateur permutent leurs fonctions. Ces unités peuvent être rencontrées dans deux configurations de systèmes :

- les groupes de production d'eau glacée à condensation par eau, associés à une tour de refroidissement ou un aéro-réfrigérant, ainsi que leurs versions réversibles de production d'eau glacée et d'eau chaude.



- ➔ les groupes de production d'eau glacée à condensation par eau, associés à une nappe phréatique, ainsi que leurs versions réversibles de production d'eau glacée et d'eau chaude.

## 2.5. Les compresseurs

Les unités frigorifiques peuvent être équipées de différents types de compresseurs :

Tableau 2. Différents types de compresseurs

- compresseur alternatif à piston ;
- compresseur rotatif à piston roulant ;
- compresseur centrifuge ;
- compresseur scroll ;
- compresseur à vis.



• Compresseur scroll



• Compresseur alternatif

Les compresseurs scroll et les compresseurs à vis ont les meilleures performances énergétiques, surtout avec les nouveaux réfrigérants, et nécessitent moins de maintenance que les compresseurs à piston. Ces types de compresseurs équipent la majeure partie des groupes pompes à chaleur fabriqués de nos jours.

Les groupes de production frigorifique peuvent être équipés de récupérateurs de chaleur et d'échangeurs leur permettant d'assurer le préchauffage ou la production d'eau chaude sanitaire pendant la saison où ils sont utilisés.

## 2.6. Performance énergétique d'une pompe à chaleur

Les performances énergétiques minimales des installations de climatisations sont données :

- ➔ en mode refroidissement par l'Efficacité Énergétique (EER : Energy Efficiency Ratio)  
Le niveau d'efficacité énergétique (EER) est calculé comme suit :

$$EER = \frac{\text{Puissance totale de refroidissement}}{\text{Puissance électrique absorbée}}$$

- ➔ en mode chauffage par le coefficient de performance (COP : Coefficient of Performance).  
Le coefficient de performance (COP) est calculé comme suit :

$$COP = \frac{\text{Puissance calorifique}}{\text{Puissance électrique absorbée}}$$

Puissance totale de refroidissement	Quantité de chaleur extraite dans l'air par le climatiseur dans un intervalle défini de temps.
Puissance calorifique	Énergie calorifique fournie à l'air par l'inversion du cycle frigorifique durant un intervalle défini de temps.
Puissance électrique absorbée	Puissance électrique moyenne absorbée et composée de : <ul style="list-style-type: none"> <li>• la puissance absorbée par le fonctionnement du compresseur ainsi que pendant le dégivrage ;</li> <li>• la puissance absorbée par tous les organes de contrôle et de sécurité de l'appareil ;</li> <li>• la puissance proportionnelle absorbée par les auxiliaires tels que pompes ou ventilateurs nécessaires pour assurer le transfert du médium de refroidissement à l'intérieur de l'appareil.</li> </ul>



Le tableau ci dessous donne les valeurs réglementaires des performances énergétiques minimales :

Tableau 3. Performances énergétiques minimales

Catégorie	Mode de fonctionnement	Climatiseurs split et multi-Split	Climatiseurs monoblocs
Climatiseurs à condensation par air	Refroidissement	EER > 2,8	EER > 2,6
	Chauffage	COP > 3,2	COP > 3,0
Climatiseurs à condensation par eau	Refroidissement	EER > 3,1	EER > 3,8
	Chauffage	COP > 3,2	COP > 3,0

Les dispositions ci-dessus s'appliquent aux appareils de climatisation de confort de puissance frigorifique inférieure à 20 kW (équivalent à 68 242 Btu/h), fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Ces appareils couvrent tous les types d'appareils de climatisation fixes ou mobiles : appareils split et multi-split et appareils monoblocs.

Les appareils de climatisation concernés par le présent texte peuvent fonctionner en mode refroidissement ou en mode chauffage et sont classés en deux catégories selon le mode de refroidissement du condenseur, à savoir :

- climatiseurs à condensation par air ;
- climatiseurs à condensation par eau.

## 2.7. Les machines à absorption comme source de froid et de chaleur

Les refroidisseurs à absorption peuvent fonctionner avec un système de combustion directe (au gaz naturel ou au fuel) ou à combustion indirecte. Les unités à combustion indirecte utilisent des sources de chaleur telles que la vapeur ou l'eau chaude provenant d'une chaudière, d'un réseau de chauffage, d'un procédé industriel, de panneaux solaires ou de rejets de chaleur. Un refroidisseur classique comprend un évaporateur, un générateur, un condenseur et un absorbeur. Une solution d'eau/ammoniaque ou eau/bromure de lithium est utilisée comme réfrigérant.

Le cycle d'un refroidisseur à absorption à combustion directe est illustré par la Figure 10.

On distingue trois types de refroidisseur à absorption :

- les refroidisseurs à absorption et à combustion directe ;
- les refroidisseurs à absorption et à combustion indirecte ;
- les groupes frigorifiques à moteur thermique.

Les machines à absorption à combustion directe par gaz naturel ou GPL connaissent un regain d'intérêt dû à la disponibilité de ressources importantes de gaz naturel et à des considérations environnementales liées à la présence de CFC dans les réfrigérants des groupes électriques. Certains de ces groupes à combustion directe sont même proposés de nos jours avec une condensation à air.

Les machines à absorption à combustion directe offrent la possibilité de fonctionner en mode chaudière durant la saison froide pour assurer la production d'eau chaude primaire et pour le chauffage des locaux.

A noter la mise sur le marché d'équipements utilisant des capteurs solaires thermiques sous vide comme source de chaleur. Associés à des refroidisseurs à absorption ces équipements forment une technologie efficace et écologique pour la production de froid. Ils sont souvent appelés climatiseurs solaires. Leur diffusion reste limitée à cause de la complexité de leur mise en œuvre.



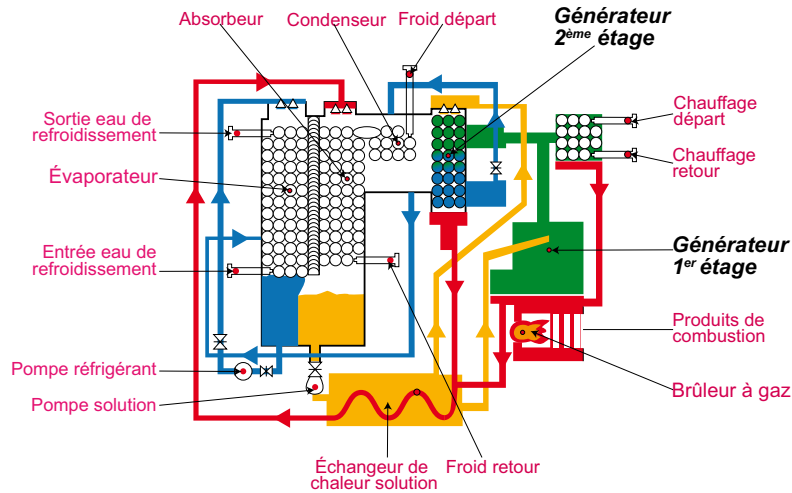


Figure 10 Cycle typique d'un refroidisseur à absorption à combustion directe

### 3. Les équipements de ventilation mécanique contrôlée VMC

La VMC permet d'assurer les débits de ventilation nécessaires aux besoins hygiéniques des occupants par des moyens mécaniques. Elle peut être à simple ou double flux. Elle est assurée par des ventilateurs dont il existe trois types principaux.

#### 3.1. VMC simple ou double flux

##### 3.1.1. VMC simple flux

Le système de VMC est à simple flux lorsque les locaux sont ventilés par extraction d'air vicié, et l'air neuf est introduit par compensation à travers des grilles d'air neuf installées sur les parois extérieures et spécialement conçues à cet effet. Dans ces conditions les locaux sont soumis à une dépression voisine de 10 Pa par rapport à la pression atmosphérique, induisant ainsi l'apport d'air neuf.

##### 3.1.2. VMC double flux

Le système de VMC est à double flux lorsqu'à l'extraction mécanique de l'air vicié est associée une insufflation d'air assurée mécaniquement, à température neutre. Dans ce

cas les locaux à pollution spécifique sont soumis à une légère dépression et les locaux à pollution non spécifique sont mis en surpression.

Le système peut comporter un échangeur thermique entre l'air insufflé et l'air extrait pour augmenter le rendement énergétique : la chaleur ou le froid de l'air extrait est transféré à l'air insufflé.

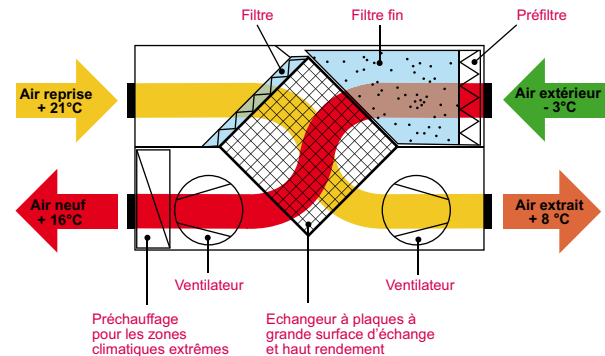


Figure 11 Schéma de fonctionnement d'une ventilation double flux à échangeur thermique

Les réseaux doivent être conçus de façon à permettre toutes les modulations et intermittences envisageables.



## 3.2. Différents types de ventilateurs

### 3.2.1. Ventilateurs centrifuges



Figure 12 Ventilateur centrifuge

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 (720-3600 Pa) ou haute pression (3600-30000 Pa).
- ➔ 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.

### 3.2.2. 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.



Figure 13 Ventilateur hélicoïde

### 3.2.3. Ventilateurs tangentiels



Figure 14 Ventilateur tangentiel

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.



Figure 15 Extracteur tourelle



Figure 16 Extracteur caisson

## 4. Types d'installations de chauffage, climatisation et ventilation mécanique

L'organisation des différents composants varie considérablement d'une installation à une autre, mais peut néanmoins être classée en deux groupes :

- ➔ systèmes centralisés ;
- ➔ systèmes unitaires ou autonomes.

### 4.1. Systèmes centralisés

Les installations 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.

Les installations CVC sont généralement conçues en systèmes qui assurent une, deux ou trois fonctions. Le degré de complexité peut varier considérablement d'une installation à l'autre en fonction des besoins spécifiques du projet et des types d'équipements retenus.

Toutefois on peut retrouver dans chacun de ces systèmes les mêmes éléments de base :

- ➔ composants assurant la production des calories ou frigories pour les locaux concernés (chaudières, pompes à chaleur, groupes d'eau glacée, etc.).
- ➔ composants assurant la distribution des calories ou frigories vers les locaux concernés (pompes, tuyauterie, centrales de traitement d'air, conduits d'air, etc.).
- ➔ composants assurant l'émission des calories ou frigories dans les locaux concernés (radiateurs, ventilo-convecteurs, grilles et diffuseurs d'air, etc.).

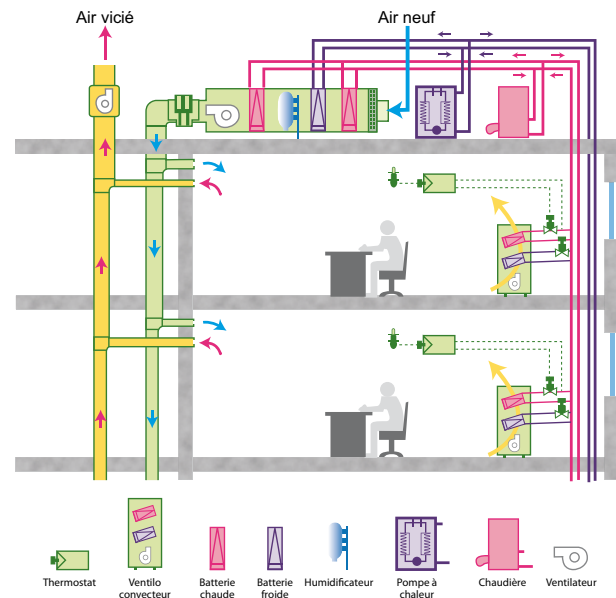


Figure 17 Schéma général d'un système CVC centralisé





Figure 18 Ventilo-convecteur



Figure 19 Pompe à chaleur

Les systèmes centralisés se caractérisent par une spécialisation des différents composants qui constituent le système, ce qui abouti à une hiérarchie de sous-systèmes indépendants mais interconnectés.

La production calorifique ou frigorifique peut être assurée par un sous-système central commun à tout un bâtiment ou un ensemble de bâtiments. À partir de cette plateforme les calories et/ou frigorifiques sont véhiculées par un réseau de distribution, généralement sous forme d'eau chaude primaire ou d'eau glacée, vers des sous-stations de distribution ou des unités terminales. En fin de parcours, des unités terminales assurent l'émission des calories et/ou frigorifiques dans les locaux concernés.

Un système de régulation ou de gestion technique des installations orchestre les fonctions assurées par les différents composants.

#### 4.1.1. Avantages

- centralisation des principaux locaux techniques dans une zone de service du bâtiment, ce qui permet de :
  - faciliter et rationaliser la conduite des installations, ainsi que les interventions d'entretien et de maintenance ;
  - préserver les zones "nobles" du projet pour les activités principales du bâtiment et ne pas les entraver par des installations autonomes qui peuvent être parfois encombrantes ;
  - confiner les sources de nuisance, surtout sonores, qui peuvent être associées aux installations ;
  - permettre un choix moins contraignant, donc plus rationnel, des sources d'énergie ;
  - assurer une disponibilité quasi ininterrompue des services assurés aux locaux les plus sensibles (chaque production étant généralement assurée par au moins deux unités, les éventuelles pannes peuvent être gérées de façon à ne pas affecter les locaux sensibles).
- réduction des puissances calorifiques et/ou frigorifiques installées, par la prise en compte de la non-simultanéité des appels de puissance des différents locaux (cas des besoins de refroidissement) ;
- réduction éventuelle des coûts d'investissement : économies sur les réseaux électriques et puissances calorifiques et/ou frigorifiques installés.

#### 4.1.2. Inconvénients

- consommation d'énergie souvent plus importante que pour les systèmes unitaires : présence d'équipements auxiliaires plus substantiels, nécessité de mise en service de l'installation centrale même en cas d'utilisation partielle des locaux ;
- mobilisation d'un espace plus important pour les locaux techniques ;
- exigence d'un système de régulation ou de gestion technique des installations plus complexe.

### 4.1.3. Liste des équipements centralisés et leur codification

Tableau 4. Équipements centralisés de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire

CH:	Chaudière d'eau chaude,
BECS:	Ballon de stockage d'eau chaude sanitaire,
EC:	Échangeur de chaleur,
CE:	Circulateur d'eau,
R:	Régulation,
RF:	Réseau fluide de circulation et d'évacuation des eaux,
AE:	Adoucisseur d'eau,
DA:	Divers accessoires.



Chaudière (source Oertli)

Tableau 5. Équipements centralisés des installations de climatisation/chauffage

GEG:	Groupe de production d'eau glacée,
PAC:	Pompe à chaleur air-eau et eau-eau,
CTA:	Centrale de traitement d'air,
VCSC:	Ventilo-convecteur,
BT:	Ballon tampon,
R:	Régulation,
RF:	Réseau fluide de circulation et d'évacuation des eaux,
RA:	Réseau aéraulique,
DA:	Divers accessoires.



Ventilo-convecteur

Tableau 6. Équipements centralisés de ventilation, d'extraction d'air et de mise en sécurité incendie

VE:	Ventouse d'extraction d'air,
RA:	Réseau aéraulique,
EA:	Extracteur d'air de ventilation mécanique centralisée,
CCF:	Clapet coupe-feu.



Extracteur

### 4.1.4. Origine et marques des équipements

Les équipements pour les installations de CVC collective centralisée sont disponibles sur le marché sous diverses marques. Les principales sont: CIAT, Trane, Aeremec, Carrier, Lennox, Daikin...

L'origine de ces équipements varie suivant leur nature :

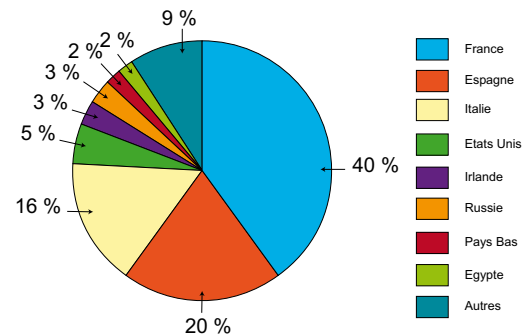


Figure 20 Origine des équipements CVC

- groupes de production d'eau glacée et pompes à chaleur: France, Espagne, Italie, États-Unis...
- centrales de traitement de l'air sans dispositif de réfrigération: France, Pays Bas, Italie, Allemagne...
- ventilo-convecteurs sans dispositif de réfrigération: Italie, France, Hong-Kong...



L'étude et la réalisation des installations de CVC collective centralisée sont des activités professionnelles où seules les entreprises qualifiées peuvent s'engager qualitativement.

## 4.2. Systèmes individuels

Les systèmes individuels se caractérisent par la présence des différentes fonctions qui constituent le système dans un même équipement qui assure à la fois la production calorifique et/ou frigorifique, la distribution et l'émission des calories.

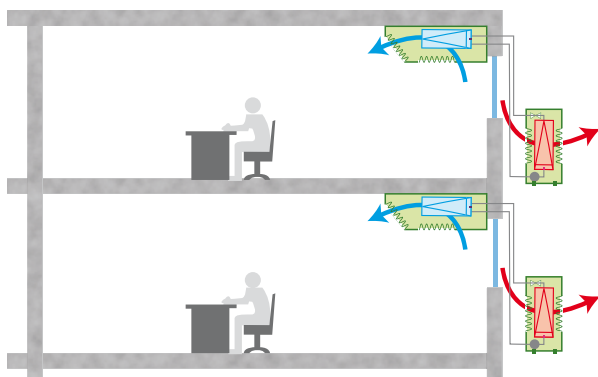


Figure 21 Climatisation individuelle

### 4.2.1. Avantages

- consommation d'énergie souvent moins importante que pour les systèmes centralisés : absence d'équipements auxiliaires, mise en service uniquement des équipements lorsque les locaux sont utilisés.
- mobilisation d'un espace moins important pour les locaux techniques.
- exigence d'un système de régulation ou de gestion technique des installations beaucoup moins complexe.

### 4.2.2. Inconvénients

- éparpillement des équipements dans tout le bâtiment :
  - complique la conduite des installations, ainsi que les interventions d'entretien et de maintenance ;
  - risque d'entraver les zones "nobles" du projet par des installations autonomes qui peuvent être parfois encombrantes ;
  - multiplie les sources de nuisance, surtout sonores, qui peuvent être associées aux installations ;
  - impose un choix plus contraignant, donc moins rationnel des sources d'énergie ;
  - risque de poser des problèmes de disponibilité des services assurés aux locaux les plus sensibles (les éventuelles pannes affectent directement les locaux desservis par l'unité en question).
- puissances calorifiques et/ou frigorifiques installées plus élevées : la prise en compte de la non-simultanéité des appels de puissance des différents locaux non desservis par la même unité n'est pas possible : cas des besoins de refroidissement.
- augmentation éventuelle du coût d'investissement : surcoût sur les réseaux électriques et puissances calorifiques et/ou frigorifiques installés.

Il est à noter que, comme les systèmes centralisés, les systèmes individuels varient en taille et en complexité. Ils peuvent être d'une configuration très simple comme ils peuvent être assez complexes dans leurs conformations.

### 4.2.3. Origine et marques des équipements individuels de chauffage des locaux

De nombreuses marques sont disponibles sur le marché, dont entre autres :

- équipements importés :
  - radiateurs électriques : EMO, EWT, Solac, Dexon, Whirlpool, Rowenta, General, Laminox, Black & Decker...
  - chaudières eau chaude en acier et en fonte : Ferroli, Sticks, de Dietrich, Chappe, Baxi, Riello...

- ➔ fabrication locale des chaudières eau chaude: Hierro, ICAT, Sococharbo (mais arrêt récent de la fabrication). EGFI, Babcock et Unitherme interviennent plutôt dans les grandes chaudières d'eau chaude et les chaudières à vapeur.

Selon les statistiques publiées par l'Office des Changes, l'origine des importations et la répartition entre les différents équipements se présente comme suit :

- ➔ les appareils électriques pour le chauffage des locaux sont essentiellement importés de Chine (51%), d'Espagne (18%), de France (11%),...
- ➔ les chaudières pour le chauffage central en acier sont essentiellement importées de France (33%), d'Italie (31%), du Portugal (18%), d'Espagne (13%),... A ces importations, s'ajoutent les chaudières de fabrication locale développée depuis plusieurs décennies au Maroc.
- ➔ les chaudières pour le chauffage central en fonte sont essentiellement importées de France (58%), d'Italie (23%), d'Espagne (8%),...

#### 4.2.4. Origine et marque des systèmes individuels de climatisation

Plus d'une vingtaine de marques sont commercialisées sur le marché avec des performances frigorifiques contrastées, des qualités et des durées de vie différentes. Plusieurs magasins de grandes surfaces proposent une large variété d'équipements.

Les puissances frigorifiques les plus vendues varient entre 2,64 kWf (9 000 Btu) et 7 kWf (24 000 Btu) .

La plupart de ces équipements proviennent de Chine, Égypte, Corée du Sud, Espagne, Italie, France...

Les principales marques disponibles sur le marché sont : LG Electronics, Unionaire, Samsung, General, Airwell, Ecool, Aeremec, Toshiba, Delchi, Zenithair, Carrier, Mitsubishi, Lennox, York, Fitco, Hitachi, Unithair, DeLonghi, Chico, Pearl, CoolLine, Ciatasa, Aircool, American Standard, Rheos...

Les distributeurs et les professionnels du secteur regroupés au sein de l'Association Marocaine des Professionnels du Froid (AMPF) donnent les estimations suivantes :

##### 4.2.4.1. Répartition indicative par taille d'équipement

- ➔ split-systèmes de 9 000 Btu à 24 000 Btu : 80%
- ➔ split-systèmes professionnels : 20%

##### 4.2.4.2. Répartition indicative par domaine

L'utilisation de la climatisation individuelle est tributaire principalement des besoins des professionnels (pour ceux disposant des moyens et qui recherchent le confort du personnel et des clients), du pouvoir d'achat des ménages, des conditions climatiques...

- ➔ hôtels, éducation nationale (universités, lycées, écoles de formation...), administration, banques, assurances, magasins... : 60%
- ➔ logements toutes catégories confondus : 40%

##### 4.2.4.3. Répartition indicative par zone géographique

Les pourcentages mentionnés dans les villes ci-dessous indiquées incluent des périmètres plus larges conformément aux différentes organisations régionales commerciales définies pour les distributeurs et installateurs, partenaires des principales sociétés d'importation (LG Electronics, Unionaire, Samsung, Carrier...):

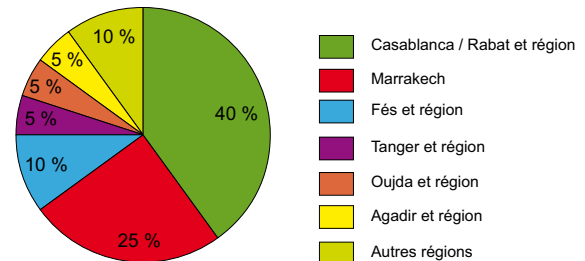


Figure 22 Répartition régionale du parc de climatiseurs individuels



#### 4.2.4.4. Parc estimatif de climatiseurs individuels installés

Le parc est estimé, suivant les statistiques d'importation et les professionnels du secteur, entre 500 000 et 700 000 unités, toutes puissances confondues.

#### 4.2.4.5. Consommation estimée d'énergie des équipements de CVC individuels et part de leur consommation par rapport aux autres équipements

Cette estimation a été réalisée dans le cadre d'une étude menée par l'Aderee en collaboration avec Citech Ingénierie. Il s'agit d'une estimation car les paramètres à prendre en considération sont nombreux et dépendent à la fois :

- ➔ du nombre de personnes ;
- ➔ du lieu (zone climatique et surface habitable) ;
- ➔ du confort du logement (social, économique, standing, villa...);
- ➔ du taux de pénétration en équipements de confort et électroménagers ;
- ➔ du pouvoir d'achat...

En dehors des équipements CVC dont l'utilisation est limitée aux périodes de chauffage et de climatisation, la consommation des ménages est due aux équipements électroménagers dont l'utilisation est permanente : éclairage, production d'eau chaude sanitaire, télévision, machine à laver, ... L'usage du lave-vaisselle est très peu répandu.

L'évaluation de la consommation des équipements de CVC et de production d'eau chaude sanitaire dans l'habitat est basée sur celle des ménages aisés disposant de tous ces équipements : chauffage et climatisation avec appareil réversible (COP de 3 et EER de 2.6) plus un chauffe-eau électrique de bonne qualité.

Les hypothèses suivantes sont prises en considération :

Tableau 7. Hypothèses de consommation pour les bâtiments d'habitation

logement	100 m <sup>2</sup> habitable, dont 36 m <sup>2</sup> chauffés et climatisés	
nombre de personnes	4	
éclairage	7h/j x 365 J puissance 465 W	consommation annuelle : 1 188 kWh/an
téléviseur	8h x 365 J puissance 120 W	consommation annuelle : 350 kWh/an
machine à laver	1h/j puissance 3 kW	consommation annuelle : 1 095 kWh/an

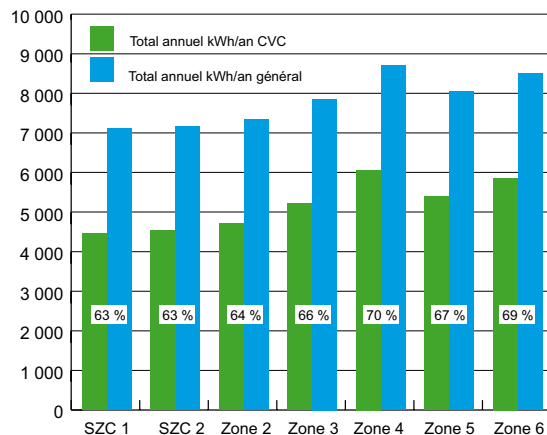


Figure 23 Pourcentage de la consommation énergétique des CVC par rapport à la consommation énergétique totale suivant les zones climatiques du Maroc



Les équipements de climatisation au Maroc commencent à impacter sérieusement la courbe de charge électrique nationale. Il convient donc d'être vigilant sur le degré de performance énergétique de ces équipements, presque tous remplis de fluides frigorigènes utilisant des gaz à effet de serre type HFC. Dès lors qu'une partie de ces gaz s'échappe inévitablement dans l'atmosphère, à cause de fuites ou de mauvaise gestion de la fin de vie des équipements, ces gaz sont 2 000 fois plus destructeurs en termes d'effet de serre que le CO<sub>2</sub>.

Selon les professionnels du secteur, à cause des fortes chaleurs locales et des chocs thermiques, un grand nombre de climatiseurs individuels de qualité douteuse présentent régulièrement des dysfonctionnements au niveau du circuit fermé de gaz et provoquent donc des fuites vers l'atmosphère.

### 4.3. Ventilation mécanique contrôlée (VMC)

#### 4.3.1. Définition

La ventilation mécanique des locaux consiste à assurer le renouvellement d'air d'une manière forcée.

Ce renouvellement d'air permet de maintenir une certaine qualité de l'air en introduisant une quantité d'air extérieur suffisante pour diluer les polluants générés à l'intérieur de façon à maintenir leurs taux à un niveau acceptable. La ventilation doit être assurée avec de l'air pris à l'extérieur, hors des sources de pollution: cet air est désigné sous le terme « d'air neuf ». Le paragraphe 6.3 présente les différents taux d'introduction d'air neuf que les équipements de ventilation mécanique contrôlée doivent assurer.

#### 4.3.2. VMC avec centrale de traitement d'air

Dans les locaux équipés d'installations de traitement d'air, la ventilation mécanique des locaux est assurée par ces installations: soit par un soufflage de 100% d'air neuf traité soit par inclusion d'un pourcentage d'air neuf dans l'air traité d'une manière fixe ou variable. Les cas suivants peuvent se présenter :

- ➔ l'installation de traitement d'air assure aussi bien l'introduction d'air neuf que l'extraction d'air vicié par la centrale de traitement d'air (CTA) (CTA munie d'économiseur);
- ➔ l'installation de traitement d'air assure l'introduction d'air neuf par la CTA et l'extraction d'air vicié est assurée par un ou plusieurs ventilateurs d'extraction asservis à la CTA;
- ➔ l'installation de traitement d'air assure l'introduction d'air neuf par la CTA et l'extraction d'air vicié est assurée par ex-filtration depuis les locaux à pollution spécifique (cuisine, sanitaires...) qui sont équipés ou non de ventilateurs d'extraction.

#### 4.3.3. VMC sans centrale de traitement d'air

Dans les zones de locaux qui ne sont pas équipés par des installations de traitement d'air, la ventilation mécanique contrôlée inclut tout ou en partie des équipements suivants:

- ➔ bouches d'admission d'air neuf et/ou de rejet d'air vicié;
- ➔ ventilateurs d'extraction d'air vicié (associés ou non à des ventilateurs de soufflage);
- ➔ conduits d'air et bouches d'extraction d'air vicié;
- ➔ système de régulation.

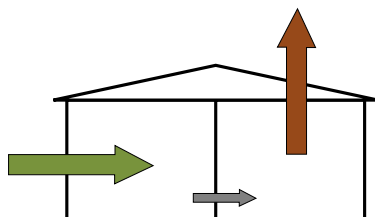
Dans ces zones les extracteurs d'air et leurs réseaux respectifs sont généralement disposés de manière à permettre l'extraction d'air au niveau des locaux à pollution spécifique.



### 4.3.4. Typologie de ventilation

#### 4.3.4.1. Alimentation naturelle + évacuation naturelle

Tableau 8. Ventilation naturelle + évacuation naturelle



##### Principe de fonctionnement

- insufflation : grilles réglables dans les fenêtres et murs
- transfert : fentes sous portes ou grilles dans portes et murs
- extraction : grilles réglables ou départ de conduits verticaux

##### Avantages

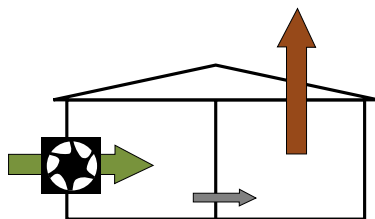
- coût peu élevé
- aucune consommation électrique
- peu d'entretien
- réglage grille par grille

##### Inconvénients

- pas de contrôle des débits
- conduits verticaux et hauteur des débouchés
- réglage manuel et grille par grille
- pas de filtration de l'air entrant
- bruits extérieurs

#### 4.3.4.2. Ventilation à alimentation mécanique

Tableau 9. Ventilation à alimentation mécanique



##### Principe de fonctionnement

- insufflation : un ventilateur envoie l'air dans les pièces via des conduits
- transfert : fentes sous portes ou grilles dans portes et murs
- extraction : grilles réglables ou départ de conduits verticaux

##### Avantages

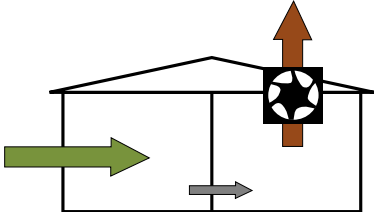
- bonne distribution de l'air neuf et contrôle du débit d'air neuf
- diminution des risques de refoulement et d'infiltration
- filtration de l'air neuf (de manière globale)

##### Inconvénients

- consommation électrique
- 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

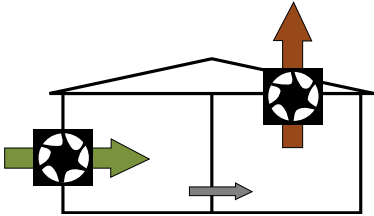
## 4.3.4.3. Ventilation à extraction mécanique

Tableau 10. Ventilation à extraction mécanique

	<p><b>Principe de fonctionnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- insufflation : grilles réglables dans fenêtres ou murs</li> <li>- transfert : fentes sous portes ou grille dans portes ou murs</li> <li>- extraction : un ventilateur extrait l'air des pièces humides via des conduits</li> </ul> <p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'évacuation par des conduits verticaux n'est plus obligatoire</li> <li>- contrôle du débit d'air extrait</li> <li>- diminue les risques de problèmes d'humidité dans les murs et dans les toitures</li> </ul> <p><b>Inconvénients</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- consommation électrique</li> <li>- entretien régulier</li> <li>- pas de contrôle de débits d'air amenés</li> <li>- pas de filtration de l'air entrant</li> <li>- bruits extérieurs</li> </ul>
---	---

## 4.3.4.4. Ventilation mécanique double flux

Tableau 11. Ventilation mécanique double flux

	<p><b>Principe de fonctionnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- insufflation : un ventilateur envoie l'air dans les pièces via des conduits</li> <li>- transfert : fentes sous portes ou grilles dans portes ou murs</li> <li>- extraction : un ventilateur extrait l'air des pièces humides via des conduits</li> </ul> <p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- système très maîtrisable quelles que soient les conditions climatiques</li> <li>- très bonne distribution de l'air</li> <li>- possibilité de commande automatique</li> <li>- possibilité de récupération de chaleur sur l'air extrait pour préchauffer l'air neuf</li> <li>- pas de transmission des bruits extérieurs</li> <li>- filtration de l'air (de manière globale)</li> </ul> <p><b>Inconvénients</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- consommation électrique</li> <li>- entretien régulier</li> <li>- coût élevé</li> <li>- encombrement des gaines et du groupe</li> <li>- bruits de fonctionnement de l'installation.</li> </ul>
---	--



## 5. Notions de confort hygrothermique

Le confort thermique est l'une des composantes de ce qu'on appelle « l'environnement intérieur » ; les autres sont la qualité de l'air, l'éclairage et l'acoustique. Le confort thermique peut être caractérisé de plusieurs manières :

- ➔ absence de plaintes pour inconfort (Fanger) ;
- ➔ sensation de bien-être général ;
- ➔ conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau minimum d'activité (Givoni) ;

D'après la norme EN ISO 7730, il y a situation de confort si deux conditions sont satisfaites.

- ➔ le bilan thermique de l'individu est équilibré sans que ne soient trop sollicités ses mécanismes autorégulateurs
- ➔ il n'existe pas d'inconforts locaux dus :
  - ➔ à la sensation de courant d'air ;
  - ➔ à l'asymétrie du rayonnement ;
  - ➔ au gradient vertical de température ;
  - ➔ à la température du sol.

### 5.1. Différents paramètres régissant le confort hygrothermique

L'homme réagit de manière complexe et différente en fonction des conditions climatiques qui prévalent dans son environnement. Son comportement thermique a fait l'objet de plusieurs recherches. L'étude de ce phénomène passe nécessairement par l'étude du corps humain qui représente lui-même une source de chaleur.

Les processus internes servant à produire de la chaleur et à développer les réactions du corps humain envers les changements de conditions ambiantes ont été étudiés par des physiologistes. Les psychologues se sont intéressés aux interactions entre l'état subjectif d'un individu et ses sensations de confort. Enfin les médecins se sont intéressés au phénomène de transfert de chaleur entre le corps humain et son environnement.

Notons que les différentes propriétés de l'air humide sont décrites en annexe.

Paramètres liés à la sensation de confort : pour que le corps se sente en état de confort thermique, le sujet agit sur plusieurs facteurs objectifs alors que les facteurs subjectifs restent non maîtrisés.

## 5.2. Facteurs objectifs

Les facteurs objectifs se subdivisent en paramètres relatifs à l'ambiance et paramètres relatifs à l'occupant lui-même.

### 5.2.1. Paramètres relatifs à l'ambiance

Il est possible de maîtriser les paramètres de l'environnement grâce à la mise en œuvre d'une technologie adaptée. Des grandeurs physiques liées au local interviennent dans l'équilibre thermique du corps :

- ➔ température de l'air  $T_a$  : elle intervient dans les échanges par convection et par évaporation.
- ➔ température des parois, qu'on exprime souvent par la Température moyenne radiante  $T_{mr}$  : elle intervient dans les échanges par rayonnement entre le corps et les parois avoisinantes.
- ➔ vitesse de l'air  $V_a$  : son rôle est important en convection et évaporation.
- ➔ humidité de l'air (humidité relative : HR, ou humidité absolue : W, ou pression de vapeur d'eau :  $P_v$ ) : elle apparaît dans les lois de l'évaporation et dans une moindre mesure, dans la valeur des constantes physiques de l'air.

#### 5.2.1.1. Température des parois

La température des parois influence les échanges thermiques par rayonnement. La répartition des températures sur une paroi est très complexe. Cependant on admet que la température des parois ( $T_{mr}$ ) est égale à la moyenne des températures des parois avoisinantes pondérée par leurs surfaces respectives. Cette température, qui reflète le confort ressenti, est couramment appelée « température



opérative » ou « température résultante sèche » ( $T_r$ ) ou encore « température globale » notée souvent  $T_g$ . Elle est définie comme la moyenne pondérée de la température de l'air et de la température moyenne radiante.

Cette température est un des facteurs importants qui déterminent le confort. Elle est donnée par:

$T_a$	température sèche	$T_a$	température sèche mesurée par le biais d'un thermomètre ordinaire placé à l'ombre
$T_r = \frac{(h_c \cdot T_a + h_r \cdot T_{mr})}{(h_c + h_r)}$		$T_{mr}$	température des parois ou température moyenne radiante
		$h_c$	coefficient de transfert par convection exprimé en [W/ m <sup>2</sup> .K]
		$h_r$	coefficient de transfert par rayonnement exprimé en [W/ m <sup>2</sup> .K]

La température opérative ou température résultante sèche est mesurée avec un thermomètre ordinaire placé au centre d'une boule d'inertie légère, peinte d'une couleur noire mate et ayant un diamètre de 8 à 13 cm. La boule permet des échanges radiatifs avec les parois similaires à ceux qui ont lieu entre le corps humain et les parois. Cette mesure représente ce que ressent réellement le corps humain dans les conditions de l'ambiance.

Les mécanismes d'autorégulation du corps humain laissent apparaître une zone où la variation du confort thermique est faible: c'est la plage de confort thermique. La température opérative peut varier autour de la température de confort thermique sans que le niveau de confort de l'individu ne soit modifié.

### Exemple:

*Paroi non isolée: la température de surface est d'environ 12 °C. Pour une température de l'air ambiant de 20 °C, la température résultante sèche telle que définie plus haut*

*est de 16 °C. C'est une température inconfortable: c'est ce qu'on appelle « l'effet d'une paroi froide ». Le corps humain perd beaucoup d'énergie vers la paroi froide. Dans ce cas, pour remédier à la basse température des parois et atteindre le confort, il faut chauffer l'air du local jusqu'à 26 à 28 °C afin d'atteindre une température opérative de 18 à 19 °C.*

*Paroi isolée: la température de surface est de 18 °C, la température résultante sèche est de 19 °C. Le corps humain perd toujours vers la paroi, mais d'une manière beaucoup moindre lui permettant d'atteindre un état de confort. Le confort thermique est atteint alors avec une température de l'air ambiant de 20 °C.*

### 5.2.1.2. Humidité de l'air

L'humidité de l'air influence très peu le confort thermique lorsqu'elle se situe entre 30 et 70%. L'activité humaine génère un dégagement d'humidité. Il est souvent nécessaire de limiter la production de vapeur ou de procéder à un renouvellement de l'air intérieur par de l'air plus sec. Le chauffage de l'air intérieur permet de baisser l'humidité relative.

À une température donnée, l'air ne peut absorber qu'une quantité donnée de vapeur: au contact des parois froides, l'air se condense. Pour éviter ou au moins limiter ce phénomène, il faut isoler les parois.

### 5.2.1.3. Vitesse de l'air

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection et favorise aussi l'évaporation à la surface de la peau. La vitesse de l'air commence à avoir un effet sur la sensation de confort des êtres humains à partir de 0,2 m/s. Sous des vitesses élevées (supérieures à 1 m/s), une personne normalement habillée ressent une gêne thermique étant donné qu'une partie du corps est soumise à des pertes importantes alors que le reste du corps est protégé par les habits. Pour assurer un bon confort thermique, il faut donc réduire la vitesse de l'air.



Les courants d'air peuvent agir positivement sur le confort thermique dans une ambiance chaude et humide. En effet, sous de telles conditions, le corps perd peu par convection, rayonnement et se rafraîchit peu par transpiration car l'humidité très élevée empêche l'évaporation de la sueur à la surface de la peau. Un courant d'air améliore les échanges par convection à la surface de la peau et favorise l'élimination de la transpiration.

En général, l'air pénètre dans le bâtiment par renouvellement d'air volontaire (permettant d'assurer une qualité de l'air correspondant aux règles d'hygiène) et/ou d'une manière involontaire par infiltration à travers les fentes des portes et fenêtres essentiellement. Le renouvellement d'air volontaire peut être contrôlé par l'ouverture des ouvrants ou la mise en place de systèmes de ventilation mécanique tenant compte du confort des occupants.

Le taux d'infiltration de l'air dans un bâtiment dépend de la qualité d'exécution de ce dernier. Il est susceptible de produire un inconfort.

## 5.2.2. Paramètres relatifs à l'occupant

Le but essentiel du chauffage et de la climatisation est de créer dans les locaux un climat permettant aux occupants d'y trouver facilement leur équilibre thermique. On place ainsi les utilisateurs dans les conditions de confort thermique définies par la température opérative. Pour la détermination de la température résultante idéale, deux facteurs interviennent :

### 5.2.2.1. Activité physique

L'activité physique est liée à l'utilisation normale des locaux. La quantité de chaleur dégagée par l'individu dépend de l'activité : travail de bureau, travail physique léger, activité sportive, etc.

L'activité physique des occupants est très souvent exprimée en [met]. C'est le flux de chaleur dégagé par une personne adulte assise au repos. (1 met = 58,15 W/m<sup>2</sup>).

Le tableau suivant donne les niveaux en [met] pour quelques activités types :

Tableau 12. Taux de métabolisme moyen correspondant à diverses activités [EN ISO 7730]

Activité	Dégagement de chaleur		
	[met]	[W/m <sup>2</sup> ] ■	[W/pers] ♦
Couché, inactif, sommeil	0,8	46	83
Assis inactif	1,0	58	104
Activité sédentaire (bureau, lecture, études)	1,2	70	126
Debout, inactif	1,2	70	126
Activité légère, debout (magasin, établi, laboratoire)	1,6	93	167
Travail debout (ménage, atelier)	2,0	116	209
Marche (4 km/h)	2,8	162	292
Travail intensif (mécanique lourde)	3,0	174	313
Marche (5 km/h)	3,4	197	354
Course (10 km/h)	8,0	464	834

■ par rapport à la surface du corps.

♦ valable pour une personne de 1,8 m<sup>2</sup> de surface corporelle (par ex. taille 1,7 m, poids 69 kg).

### 5.2.2.2. Vêtement

La protection qu'apportent les vêtements correspond à la spécificité des locaux (vêtements d'extérieur, vêtement de travail, cas particulier des locaux hospitaliers, etc.). Le vêtement a une résistance thermique exprimée en [clo]. Un clo représente l'isolation thermique d'un vêtement qui permet au corps humain de se mettre dans les conditions



de confort à  $T_c = 21\text{ °C}$ . Un habit ayant une telle isolation représente la tenue normale que porte un homme en hiver au sein d'un local chauffé. Par ailleurs, le vêtement est caractérisé par sa perméabilité, il a donc des effets sur les pertes de chaleur selon les différents modes et sur la sudation du corps. (1 clo = 0.155 [m<sup>2</sup>. K/W])

Le tableau suivant donne les niveaux d'isolation en [clo] de quelques tenues types :

Tableau 13. Valeurs en clo pour quelques tenues types  
[EN ISO 7730]

Tenue vestimentaire	[clo]	[m <sup>2</sup> K/W]
Nu, debout	0,0	0,00
Shorts, costume de bain	0,1	0,015
Tenue tropicale : slip, chemise courte à col ouvert, shorts, chaussettes légères et sandales	0,3	0,045
Tenue d'été : slip, chemise courte, pantalons longs légers ou jupe, chaussettes légères et chaussures	0,5	0,08
Tenue de travail légère : sous-vêtements légers, chemise courte à col ouvert, pantalons de travail, chaussettes et chaussures	0,7	0,11
Tenue d'intérieur d'hiver : sous-vêtement, chemise à manches longues, pull-over, pantalons ou robe, chaussettes épaisses et chaussures	1,0	0,15
Tenue de ville d'hiver : idem mais sous-vêtements à manches et jambes longues, et veste	1,5	0,23
Tenue d'hiver fourrée	3,0	0,45

### 5.2.3. Facteurs subjectifs

Outre les facteurs objectifs, il existe des facteurs subjectifs qui diffèrent d'une personne à une autre. C'est pourquoi il est difficile de répondre aux exigences de confort de chaque individu, mais on peut s'appuyer sur des enquêtes pour connaître les conditions pouvant satisfaire le plus grand nombre de personnes. Parmi les facteurs subjectifs, on peut citer :

- l'âge et le sexe
- l'état psychologique
- la volonté de réaliser des économies de chauffage (peut jouer sur la détermination de la sensation de l'individu).

Il est usuel de quantifier la sensation de confort en utilisant l'échelle suivante [Fanger, 1982 ; EN ISO 7730] :

Tableau 14. Échelle de sensation de confort  
[Fanger, 1982 ; EN ISO 7730]

-3	très froid	non satisfait parce que trop froid
-2	froid	
-1	frais	satisfait
0	confortable	
1	tiède	
2	chaud	non satisfait parce que trop chaud
3	très chaud	

Une autre méthode consiste à compter le pourcentage de personnes insatisfaites des conditions de confort. Ce pourcentage est directement lié au vote moyen d'une population donnée.



On a ainsi deux paramètres permettant de mesurer le confort thermique :

- ➔ le vote moyen prévisible, appelé PMV (Predicted Mean Vote), qui est l'appréciation moyenne d'une population dans un environnement donné, sur l'échelle de -3 à +3. Le confort optimal correspond à un PMV nul.
- ➔ le pourcentage prévisible d'insatisfaits, appelé PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui exprime la part des sujets insatisfaits dans une condition donnée.



Figure 24 Appareil de mesure du confort thermique (Thermal Comfort Meter)

L'équation proposée par Fanger permet de calculer la valeur du PMV et du PPD. Ces grandeurs peuvent être mesurées sur site par des appareils de mesure.

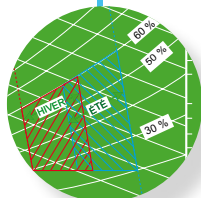
Ces équipements contiennent des sondes pour mesurer la vitesse de l'air, la température de l'air, la température moyenne radiante et l'humidité relative. En spécifiant manuellement les valeurs de met et clo, l'appareil calcule le PMV et le PPD correspondant aux conditions de la pièce.

#### 5.2.4. Qualité de l'air : confort olfactif et hygiénique

Le renouvellement continu de l'air à l'intérieur des locaux est nécessaire pour assurer non seulement l'apport d'oxygène indispensable à la vie mais encore pour éliminer au fur et à mesure les divers gaz générés dans les locaux et qui polluent l'atmosphère, la rendant malodorante et toxique.

La sensibilité aux polluants est généralement telle que le besoin d'air se fait sentir bien avant le manque d'oxygène. Les besoins en air frais dépendent des émissions de polluants et de la tolérance pour chacun des polluants.

Un taux de renouvellement d'air de 15% est généralement admis dans un logement résidentiel. On choisira de préférence une ventilation mécanique double flux à récupération de chaleur (efficacité 50% à 85%) pour réaliser cet apport d'air neuf avec le minimum de pertes de chaleur ou de froid.



Conditions de calcul :  
sèche

Humidité Relative
60 %
55 %

## Partie 2 : Dimensionnement des installations



## 6. Paramètres déterminant le dimensionnement des installations de chauffage, de climatisation et de ventilation

Les différents aspects liés au confort hygrothermique des personnes ont été présentés au chapitre 4.

Les conditions de confort sont résumées sur le diagramme de l'air humide où les zones hachurées correspondent aux zones de confort hygrothermique d'hiver et d'été.

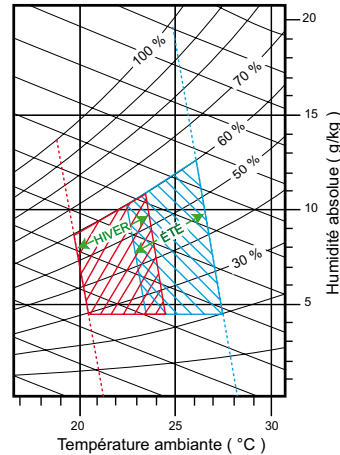
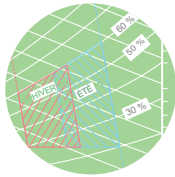


Figure 25 Plages de confort hygrothermiques pour des activités de bureau

Les écarts qui différencient la sensation de confort en été de celle d'hiver sont dus essentiellement aux caractéristiques vestimentaires usuelles qui diffèrent selon les saisons.

Ce diagramme définit les conditions de température et d'humidité de l'air pour des valeurs fixes d'activité métabolique, de résistance thermique des vêtements et de vitesse de l'air rencontrées typiquement dans des espaces à usage de bureaux.

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 résidentiels et tertiaires sera conforme aux dispositions de la norme marocaine NM EN 15265, ainsi qu'aux normes EN12831 et ANSI/

Paramètres de calcul : sèche	
Humidité Relative	
	60 %
	55 %



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 au Maroc 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
- ➔ Coefficient de sécurité
- ➔ Régimes transitoires

### 6.1. Conditions internes de température et d'hygrométrie

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

Tableau 15. Conditions intérieures de calcul: humidité et température sèche

Période	Température sèche	Humidité Relative
Été	26°C	60%
Hiver	20°C	55%

Ces conditions intérieures de calcul sont conformes aux dispositions de la norme marocaine NM ISO 7730.

### 6.2. Conditions extérieures de calcul

Les conditions extérieures de base pour le calcul des charges thermiques sont définies dans les tableaux et dans les cartes en annexe 3 à 12. Pour les localités non spécifiées, on se référera à la station météorologique la plus proche.

On entend par:

- ➔ conditions standards d'hiver sans exigences de confort particulières: la température sèche extérieure de base d'hiver définie comme la température sèche dépassée vers le bas au maximum quatre fois par an par les températures minimales journalières (moyenne sur 30 ans).
- ➔ conditions standards d'été sans exigences de confort particulières: la température sèche extérieure de base d'été définie comme la température sèche dépassée vers le haut au maximum quatre fois par an par les températures maximales journalières (moyenne sur 30 ans).

### 6.3. Taux de renouvellement d'air et les déperditions ou apports associés

Les échanges thermiques liés au renouvellement de l'air découlent du fait que de l'air extérieur est constamment introduit dans le local, d'une manière volontaire ou involontaire. Cet air neuf déplace vers l'extérieur une quantité équivalente d'air intérieur qui est déjà aux conditions hygrothermiques de consigne. L'air neuf introduit doit être ramené aux conditions hygrothermiques du local.

#### 6.3.1. Taux de renouvellement d'air suivant la nature du local

Les échanges d'air avec l'extérieur sont dus:

- ➔ à la ventilation naturelle et aux infiltrations d'air non contrôlées qui sont liées essentiellement à la perméabilité à l'air de la construction (grilles d'aération, huisseries...) en l'absence d'une ventilation mécanique.



➔ à la ventilation mécanique qui doit assurer un débit minimal d'air neuf conforme aux valeurs fixées dans le tableau ci-après (en tenant compte des interdictions de fumer). Ce débit est exprimé en mètre cube par heure et par occupation normale :

Tableau 16. Taux de renouvellement d'air appliqué pour le dimensionnement par type de local et par occupant

Type de locaux		Locaux avec interdiction de fumer	Locaux sans interdiction de fumer
		Par occupant	Par occupant
Locaux d'enseignement : classes, salles d'études, laboratoires (sauf ceux à pollution spécifique)	Maternelles, primaires et secondaires du premier cycle	15 m <sup>3</sup> /h	-
	Secondaires du deuxième cycle et universitaires	18 m <sup>3</sup> /h	25 m <sup>3</sup> /h
	Ateliers d'enseignement	18 m <sup>3</sup> /h	25 m <sup>3</sup> /h
Locaux d'hébergement	Chambres collectives (plus de trois personnes, dortoirs, cellules, salles de repos...)	18 m <sup>3</sup> /h	25 m <sup>3</sup> /h
Bureaux et locaux assimilés	Locaux d'accueil, bibliothèques, bureaux de poste, banques...	18 m <sup>3</sup> /h	25 m <sup>3</sup> /h
Locaux de réunion	Salle de réunion, de spectacle, de culte, clubs, foyers ...	18 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
Locaux de vente	Boutiques, supermarchés ...	22 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
Boutiques, supermarchés	Cafés, bars, restaurants, cantines, salles à manger ...	22 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
Locaux à usage sportif	Piscine (par sportif)	22 m <sup>3</sup> /h	-
	Autres locaux (par sportif)	25 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h
	Par spectateur	18 m <sup>3</sup> /h	30 m <sup>3</sup> /h

Dans les locaux à pollution non spécifique, lorsque l'aération est assurée par des dispositifs de ventilation, le débit minimal d'air neuf à introduire par occupant est fixé dans le tableau ci après.

Tableau 17. Débit minimal d'air neuf des locaux à pollution non spécifique par occupant

Type de locaux	Par occupant
Bureaux et locaux assimilés sans travail physique	25 m <sup>3</sup> /h
Locaux de réunions, spectacles, vente, restauration	30 m <sup>3</sup> /h
Ateliers et locaux avec travail physique léger	45 m <sup>3</sup> /h
Autres ateliers et locaux	60 m <sup>3</sup> /h



Le débit total de renouvellement d'air  $\dot{V}_t$ , sera calculé sur la base de sa partie contrôlée  $\dot{V}_c$ , et de sa partie non-contrôlée  $\dot{V}_{nc}$

Tableau 18. Détermination du débit total de renouvellement d'air

$$\dot{V}_t = \dot{V}_c + \dot{V}_{nc}$$

$\dot{V}_t$	débit total de renouvellement d'air [m <sup>3</sup> /sec]
$\dot{V}_c$	débit correspondant aux taux minimaux de renouvellement d'air [m <sup>3</sup> /sec]
$\dot{V}_{nc}$	débit correspondant aux apports d'air neuf non-contrôlés [m <sup>3</sup> /sec], avec : <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\dot{V}_{nc} = 0</math> en cas de présence d'une ventilation mécanique des locaux</li> <li>• <math>\dot{V}_{nc}</math> est à déterminer dans le cas d'absence de ventilation mécanique des locaux</li> </ul>

Le tableau suivant donne, à titre indicatif, les valeurs de  $\dot{V}_c$  par m<sup>2</sup> de surface pour des configurations typiques de locaux à usage de bureaux sur la base des tableaux présentés dans le paragraphe précédent. Il y a lieu de se référer au programme du Maître de l'Ouvrage pour une évaluation précise du taux d'occupation et des débits d'air neuf correspondants.

Tableau 19. Débit minimal d'air neuf (à 1,2 kg/m<sup>3</sup>) en [m<sup>3</sup>/h] suivant la nature du local

Types de locaux	Densité moyenne d'occupation	Local avec interdiction de fumer	Local sans interdiction de fumer
Bureau individualisé (<15 m <sup>2</sup> )	1 personne/local	18 m <sup>3</sup> /h par local	25 m <sup>3</sup> /h par local
Bureau individualisé (15-20 m <sup>2</sup> )	2 personnes/local	36 m <sup>3</sup> /h par local	50 m <sup>3</sup> /h par local
Bureau collectif cloisonné	10 m <sup>2</sup> /personne	1,8 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>	2,5 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>
Bureau collectif paysager	14 m <sup>2</sup> /personne	1,3 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>	1,8 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>
Salle de réunion	3,5 m <sup>2</sup> /personne	5,1 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>	7,1 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>
Hall recevant du public	7 m <sup>2</sup> /personne	2,6 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>	3,6 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>
Poste d'accueil	10 m <sup>2</sup> /personne	1,8 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>	2,5 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>
Salle d'attente	2 m <sup>2</sup> /personne	9,0 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>	12,5 m <sup>3</sup> /h par m <sup>2</sup>

### 6.3.2. Échanges thermiques dus au renouvellement d'air

Les échanges thermiques dus au renouvellement d'air sont formés de deux composantes :

- ➔ une composante sous forme de chaleur sensible, liée au changement de température.
- ➔ une composante sous forme de chaleur latente, liée au changement d'hygrométrie.



La part sensible et la part latente de l'échange thermique entre le local et l'extérieur, associé au renouvellement d'air (contrôlé et non-contrôlé), sont déterminées comme suit :

Tableau 20. Détermination des échanges thermiques du renouvellement d'air

**Part sensible de l'échange thermique associé au renouvellement d'air (contrôlé et non-contrôlé)**

Dépense en mode chauffage	$q_{s,air-neuf} = \rho_{air} \cdot c_p \cdot \dot{V}_t (T_i - T_e)$
Apports en mode refroidissement	$q_{s,air-neuf} = \rho_{air} \cdot c_p \cdot \dot{V}_t (T_e - T_i)$
<b>Part latente de l'échange thermique associé au renouvellement d'air (contrôlé et non-contrôlé)</b>	
Dépense en mode chauffage ♦	$q_{l,air-neuf} = \rho_{air} \cdot c_p \cdot \dot{V}_t (W_i - W_e) \cdot 10^3$
Débit massique de vapeur d'eau en cas d'humidification de l'air ♦	$\dot{m}_{eau} = \rho_{air} \cdot \dot{V}_t (W_i - W_e)$
Apports en mode refroidissement ♦♦	$q_{l,air-neuf} = \rho_{air} \cdot h_g \cdot \dot{V}_t (W_e - W_i) \cdot 10^3$

$\rho_{air}$	densité de l'air [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	chaleur spécifique de l'air sec
$C_p$	1,0065 [kJ/kg-°C]
$T_i$	température de l'air à l'intérieur du local [°C]
$T_e$	température de l'air à l'extérieur du local [°C]
$Q_{s,air-neuf}$	part sensible latente de l'échange thermique par renouvellement d'air [Watt]
$Q_{l,air-neuf}$	part latente de l'échange thermique par renouvellement d'air [Watt]
$h_g$	enthalpie de la vapeur d'eau [kJ/kg]
$W_i$	humidité absolue de l'air à l'intérieur du local [kg d'eau/kg d'air sec]
$W_e$	humidité absolue de l'air à l'extérieur du local [kg d'eau/kg d'air sec]
$\dot{m}_{eau}$	débit massique de vapeur d'eau [kg/sec]

♦ cette quantité est uniquement prise en compte dans le cas où l'humidité relative de l'air à l'intérieur du local est contrôlée par le biais d'un humidificateur. Dans ce cas de figure on s'intéresse plutôt au débit de vapeur d'eau à injecter pour atteindre les conditions d'humidité relative de consigne.

♦♦ cette quantité est généralement prise en compte dans tous les cas de figure, car le refroidissement de l'air neuf est presque toujours accompagné par une déshumidification de cet air.

Toutefois, dans certains cas particuliers où le climat est assez aride, et où l'apport d'air neuf est assez faible, la déshumidification de l'air neuf peut ne pas avoir lieu. Dans ce cas, la chaleur latente liée aux apports d'air neuf peut ne pas être prise en compte. Il en est de même dans le cas où il est procédé uniquement à un rafraîchissement de l'espace.



- ➔ Dans le cas où l'humidité relative est contrôlée, les échanges thermiques globaux (Watt) (chaleur sensible + chaleur latente) dus au renouvellement d'air  $q_{tot, air-neuf}$  peuvent être exprimés comme suit :

Tableau 21. Détermination des échanges thermiques du renouvellement d'air en présence de contrôle d'humidité

Dépense en mode chauffage	$q_{tot\ air-neuf} = \rho_{air} \cdot \dot{V}_t (h_i - h_e) \cdot 10^3$
Apports en mode refroidissement	$q_{tot,air-neuf} = \rho_{air} \cdot \dot{V}_t (h_e - h_i) \cdot 10^3$
$h_i$	enthalpie de l'air à l'intérieur du local [kJ/kg]
$h_e$	enthalpie de l'air à l'extérieur du local [kJ/kg]

## 6.4. Apports internes et les apports à travers les parois extérieures dans le cas des installations de refroidissement

L'intérieur d'une zone à climatiser est le sujet de plusieurs sources de production d'énergie comme illustré par la figure ci-dessous.

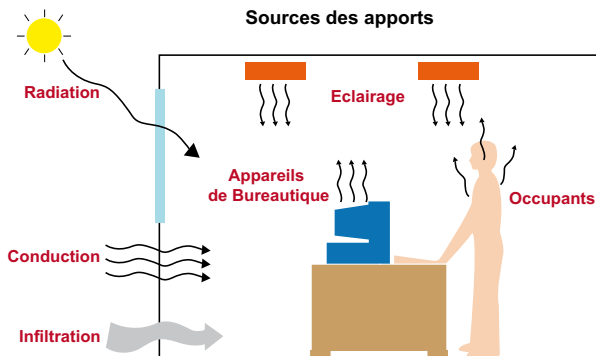


Figure 26 Apports internes et externes de chaleur

Pour maintenir les conditions de confort le système de climatisation doit avoir pour objectif principal d'enlever cette énergie et de garder un régime permanent avec un peu de fluctuations.

Comme pour le renouvellement d'air, ces apports thermiques sont constitués de deux composantes : une composante sous forme de chaleur sensible et une autre sous forme de chaleur latente.

Les apports thermiques peuvent être catégorisés comme suit :

- ➔ apports thermiques par conduction, y compris apports dus à l'ensoleillement des parois opaques (chaleur sensible) ;
- ➔ apports thermiques dus à l'ensoleillement des parois translucides de l'enveloppe (chaleur sensible) ;
- ➔ apports thermiques dus à l'éclairage artificiel des locaux (chaleur sensible) ;
- ➔ apports thermiques dus au fonctionnement des équipements situés à l'intérieur des locaux (chaleur sensible + chaleur latente dans certains cas) ;
- ➔ apports thermiques dus au métabolisme des occupants (chaleur sensible + chaleur latente).

### 6.4.1. Apports thermiques par conduction

Les apports thermiques par conduction sont dus à la différence de température entre l'air ambiant à l'intérieur du local et la température à la surface extérieure de la paroi. Ils varient en fonction de plusieurs paramètres :

- ➔ l'ensoleillement frappe les parois extérieures : la température des surfaces externes de ces parois est plus élevée que la température de l'air extérieur (elle est d'autant plus élevée que l'absorptivité de la surface externe de la paroi est plus importante : attention à la couleur de la paroi externe) ;
- ➔ la variation au cours d'une journée de l'ensoleillement d'une paroi dépend de son orientation et la valeur maximale de cet ensoleillement ne coïncide pas nécessairement avec la valeur maximale de la température extérieure ;



- ➔ la paroi, par l'action de son inertie thermique, transmet les apports thermiques avec un certain délai (ce délai est d'autant plus important que l'inertie thermique effective est plus importante);
- ➔ les apports en provenance des parois en contact avec le sol sont négligés, étant donné que la température du sol est en général beaucoup moins élevée que la température extérieure maximale.

### 6.4.2. Apports sensibles solaires à travers les parois vitrées

Ces apports thermiques sont dus à la partie de l'ensoleillement qui est transmise par les éléments translucides de l'enveloppe (vitrages) vers l'intérieur du local.

### 6.4.3. Apports sensibles dus à l'éclairage artificiel

Ces apports thermiques sont dus au dégagement calorifique associé à l'éclairage artificiel des locaux.

Une fois transmis dans l'espace, le comportement de ces apports dans le local est similaire à celui dû aux apports solaires à travers les parois translucides.

### 6.4.4. Apports dus aux équipements

Ces apports thermiques sont dus au dégagement calorifique associé au fonctionnement des équipements installés dans les locaux. Il est à noter que ces équipements peuvent générer :

- ➔ soit de la chaleur sensible exclusivement : cas des équipements bureautiques, des moteurs électriques, des appareils de réfrigération...
- ➔ soit de la chaleur sensible et de la chaleur latente : cas des équipements de cuisson, certains équipements de laboratoires...

Les équipements peuvent être munis ou non d'une hotte d'aspiration et/ou conduits d'évacuation des gaz brûlés, permettant d'évacuer directement vers l'extérieur une partie des apports générés (cas des équipements de cuisson et certains équipements de laboratoire).

Dans le cas de locaux à usage de bureaux la chaleur sensible dégagée par les équipements bureautiques varie entre 10 et 50 W/m<sup>2</sup> selon les activités. Dans les salles d'informatique (locaux des serveurs, ordinateurs de puissance importante), les apports instantanés peuvent atteindre 200 à 500 W/m<sup>2</sup>.

- ➔ estimation de la chaleur sensible contribuant au bilan thermique de refroidissement : à la chaleur sensible introduite dans le local, il faut appliquer un « coefficient de charge frigorifique » (CLF) qui doit tenir compte de l'effet dynamique des échanges thermiques.
- ➔ estimation de la chaleur latente contribuant au bilan thermique de refroidissement : la chaleur latente transmise vers le local ne subit aucune correction et doit être prise en compte sans atténuation. L'apport en chaleur latente d'un équipement  $q_{Eq-latent}$  est exprimé en fonction de la puissance nominale de chaque équipement  $P_{Eq}$  par la formulation générale suivante :

Tableau 22. Apport en chaleur latente des équipements

$$q_{Eq-latent} = P_{Eq} \cdot f_{u,loc}$$

$q_{Eq-latent}$	apport thermique en chaleur latente
$f_{u,loc}$	part latente des apports calorifiques dégagés par l'équipement qui est transmise au local.
$f_{u,loc}$	= 34% : cas des équipements de cuisson sans hotte d'aspiration.

### 6.4.5. Apports dus aux occupants

Ces apports thermiques sont dus au dégagement calorifique associé au métabolisme des occupants. Ces apports sont sous forme de chaleur sensible et de chaleur latente et sont générés à un rythme qui dépend du niveau d'activité des occupants.

Le comportement des apports en chaleur sensible générés dans le local par les occupants est similaire à celui dû à d'autres apports sensibles.



- ➔ la chaleur sensible dégagée par les occupants varie de 60 W par personne (personne au repos) à 185 W par personne (activité sportive intense).
- ➔ la chaleur latente dégagée par les occupants varie de 40 W par personne (personne au repos) à 635 W par personne (activité sportive intense).
- ➔ dans les locaux à usage de bureaux les valeurs typiques sont de 65-75 W/personne pour la chaleur sensible et de 55-75 W/personne pour la chaleur latente.

Par leur dégagement de chaleur sensible et de chaleur latente, les occupants participent au bilan thermique de refroidissement.

- ➔ estimation de la chaleur sensible contribuant au bilan thermique de refroidissement : à la chaleur sensible, il faut appliquer un « coefficient de charge frigorifique » (CLF) qui doit tenir compte de l'effet dynamique des échanges thermiques.
- ➔ estimation de la chaleur latente contribuant au bilan thermique de refroidissement : la chaleur latente transmise vers le local ne subit aucune correction et doit être prise en compte sans atténuation. L'apport en chaleur latente  $q_{Oc-latent}$  des dégagements calorifiques des occupants est calculé en fonction du nombre de personnes dans le local et de la part latente du métabolisme  $P_{Met-latent}$  correspondant au niveau d'activité de ces personnes, par la formulation suivante :

Tableau 23. Apport en chaleur latente des occupants

$$q_{Oc-latent} = P_{Met-latent} \cdot Nbr_{Oc}$$

$q_{Oc-latent}$	apport thermique en chaleur latente
$P_{Met-latent}$	part latente du métabolisme par occupant (dépend du niveau d'activité) en [W/occupant]
$Nbr_{Oc}$	nombre d'occupants

## 6.5. Charge frigorifique de pointe des équipements terminaux de refroidissement

Pour dimensionner les équipements terminaux de refroidissement d'un local, il est nécessaire d'évaluer la charge frigorifique de pointe qui est censée avoir lieu dans le local. Cette charge de pointe correspond à l'heure de la journée où la somme de tous les apports thermiques (sensibles + latents) est à son maximum.

Afin de ne pas surdimensionner inutilement les équipements, ce qui impliquerait des coûts supplémentaires à l'investissement et des consommations d'énergie plus importantes lors de l'exploitation, il est très important de noter que le maximum horaire de la somme des apports calorifiques d'une journée n'est pas égal à la somme des maximums horaires de chaque apport de cette journée.

Pour déterminer la charge frigorifique de pointe d'un local, il y a lieu d'examiner l'évolution de  $Q_{apports}$  au cours des heures d'occupation pendant les mois de fonctionnement du système de refroidissement d'air. En général, et sauf pour des cas très particuliers, les mois concernés sont ceux de juin, juillet, août et septembre. Pour chaque mois on procède à l'évaluation de  $Q_{apports}$  pour chaque heure d'occupation pendant une journée type (le 21 de chaque mois), en se basant sur ce qui suit :

- ➔ les températures extérieures de base ( $T_{bref}$ ) pour le calcul des charges thermiques sont définies dans les tableaux et cartes en annexe. Pour les localités non spécifiées, on se réfère à la station météorologique la plus proche.
- ➔ l'humidité absolue de l'air extérieur est maintenue constante pendant les horaires d'occupation du local. Son évaluation se fait sur la base de l'humidité relative coïncidente avec  $T_{bref}$ .
- ➔ pour les apports à travers les parois translucides et opaques, l'évolution des apports solaires est déterminée en se basant sur un ciel clair pendant toute la journée.



- ➔ les évolutions des apports dus à l'éclairage artificiel, aux équipements et aux occupants sont déterminées à partir des données propres du projet concernant les puissances installées et le nombre d'occupants (métabolisme selon niveau d'activités et débits de renouvellement d'air), auxquels seront affectés les coefficients de charge frigorifique (CLF) appropriés.

La charge frigorifique de pointe du local correspond au maximum de  $Q_{\text{apports}}$  qui a été enregistré pendant l'une des heures de fonctionnement du système de refroidissement d'air au cours des journées types examinées.

Vu le nombre important de paramètres à prendre en compte et le processus d'itération que peut engendrer une éventuelle recherche de solution pour minimiser  $Q_{\text{apports}}$ , l'utilisation d'un progiciel de calcul s'impose. Ceci est particulièrement recommandé quand le calcul concerne l'ensemble des locaux d'un projet.

### 6.6. Déperditions à travers les parois extérieures dans le cas des installations de chauffage

Le transfert de chaleur pendant la saison d'hiver s'effectue de l'intérieur des locaux vers l'extérieur. En effet,

- ➔ soit la température est maintenue à une température de consigne plus élevée que la température extérieure si le local est équipé d'un système de chauffage ;
- ➔ soit les apports calorifiques générés par l'ensoleillement des parois et les activités des occupants (éclairage, cuisson, métabolisme, etc.) résultent en une élévation de la température intérieure des locaux par rapport à la température extérieure.

Ceci crée un flux de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur à travers les diverses parois de l'enveloppe qui sont exposées aux conditions extérieures.

### 6.7. Dimensionnement des équipements de chauffage :

Pour dimensionner les équipements de chauffage d'un local, la puissance à installer  $P_{\text{ch-local}}$  correspond à  $Q_{\text{dép-ext}}$ , évaluée pour ( $T_i = T_c$  et  $T_e = T_{\text{bch}}$ ) à laquelle il faut ajouter les déperditions vers d'éventuels locaux non chauffés :

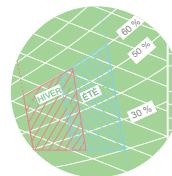
Tableau 24. Dimensionnement des équipements de chauffage

$$P_{\text{ch-local}} = Q_{\text{dép-ext}} | T_i = T_c, T_e = T_{\text{bch}} + \sum \text{Déperditions à travers parois internes} | T_i = T_c$$

$$\begin{aligned} & \diamond \sum \text{Déperditions à travers parois internes} | T_i = T_c \\ & = \sum [\sum (U_{\text{paroi interne}} \cdot S_{\text{paroi interne}}) \cdot (T_c - T_{\text{LA}})] \end{aligned}$$

$T_{\text{bch}}$	température extérieure de base pour le dimensionnement des équipements de chauffage pour le site d'implantation du bâtiment en [°C]
$T_c$	température de confort en [°C]
$T_{\text{LA}}$	température du local adjacent en [°C]
$T_i$	température intérieure en [°C]
$T_e$	température extérieure en [°C]

- ◆ Déperditions à travers les parois des locaux adjacents qui ne sont pas conditionnés, ayant une température  $T_{\text{LA}} < T_i$ .



Cas de calcul : sèche	
Humidité Relative	60 %
	55 %



## 7. Réseaux de distribution

Ces dispositions doivent être prises en considération par les bureaux d'études et de contrôle dans leurs opérations de dimensionnement des installations de chauffage, de ventilation et de climatisation.

### 7.1. Réseaux aérauliques

#### 7.1.1. Dispositions générales

Le réseau de distribution sera dessiné de manière à ce que la distance entre le ventilateur et la bouche la plus éloignée soit la plus courte possible.

L'étude du tracé des réseaux de distribution tiendra compte des impératifs liés à la présence éventuelle d'une récupération de chaleur sur l'air extrait.

Les brusques changements de direction ou de section sont à éviter. Le cas échéant, il faudra recourir par exemple à des raccords convergents ou divergents, à d'ailettes directionnelles.

#### 7.1.2. Isolation thermique des réseaux aérauliques

##### 7.1.2.1. Épaisseur minimale

Toutes les gaines aérauliques et plénums faisant partie d'une installation de chauffage, ventilation et de refroidissement d'air doivent être isolées thermiquement conformément au Tableau 25.

Tableau 25. Isolation minimale des gaines d'air

Différence absolue entre la température de calcul dans la gaine et la température de l'air ambiant [°C]	Épaisseur minimale [mm]	
	Polystyrène◆	Laine de verre◆◆
0 - 4	pas d'exigence	pas d'exigence
4 - 15	15	20
15 - 30	25	30
Au-dessus de 30	40	46

◆ ou matériau équivalent de conductivité thermique  $\lambda = 0,036 \text{ W/m. K}$

◆◆ ou matériau équivalent de conductivité thermique  $\lambda = 0,042 \text{ W/m. K}$

Exceptions :

- ➔ les plénums, caissons et gaines installés en usine sur des équipements de chauffage, ventilation et conditionnement d'air ;
- ➔ lorsqu'il peut être montré que le gain ou la perte de calories dû à l'absence d'isolation sur les gaines n'augmente pas le coût de l'énergie dans le bâtiment.

Notes :

- ➔ lorsque les parois extérieures sont utilisées comme des plénums, les isolations sont calculées conformément à ce tableau ;
- ➔ les espaces non climatisés comprennent aussi les vides sanitaires et les combles.

##### 7.1.2.2. Mise en œuvre

L'isolation doit disposer d'une protection mécanique appropriée et doit être installée conformément aux règles de l'art.

## 7.2. Réseaux hydrauliques

### 7.2.1. Isolation thermique des tuyauteries de chauffage, de ventilation et climatisation

#### 7.2.1.1. Épaisseur minimale

Tout réseau de tuyauteries équipant une installation de chauffage, de ventilation et refroidissement d'air dont la température du fluide transporté est inférieure à 18°C ou supérieure à 40°C doit être isolé thermiquement.

Pour des isolants dont la conductivité thermique moyenne est comprise entre 0,035 et 0,04 W/m.°C à la température considérée (par exemple: polystyrène expansé), les épaisseurs minimales d'isolation (mm) sont indiquées dans le Tableau 26.



Tableau 26. Épaisseurs minima d'isolation pour différents diamètres de canalisation

Intervalle de température (°C)	Diamètre des tuyauteries [mm] [pouce]				
	< 25,4	> 25,4 (1") < 50,8 (2")	> 50,8 (2") < 101,6 (4")	> 101,6 (4") < 152,4 (6")	> 152,4 (6")
	Tuyauteries de chauffage				
> 40°C	25,4 ( 1")	25,4 (1")	38,1 (1"1/2)	38,1 (1"1/2)	38,1 (1"1/2)
	Tuyauteries de froid (eau glacée, saumure, réfrigérants, condensats)				
4-18°C	12,7 (1/2")	19,1 (3/4")	25,4 (1")	25,4 (1")	25,4 (1")
< 4°C	25,4 (1")	38,1 (1"1/2)	38,1 (1"1/2)	38,1 (1"1/2)	38,1 (1"1/2)

Source : Adel Mourtada, Ecotech.

Si l'isolation des tuyauteries est constituée de plusieurs couches successives, celle-ci sera réalisée à joints alternés.

Exceptions :

- ➔ tuyauteries installées en usine à l'intérieur des appareils destinés au conditionnement d'air ;
- ➔ lorsqu'il est prouvé que le gain ou la perte de calories dues à l'absence d'isolation sur les tuyauteries n'augmente pas le coût de l'énergie dans le bâtiment et ne provoque pas de condensation superficielle.

Notes :

- ➔ ce tableau s'applique aux isolants dont la conductibilité thermique est comprise entre 0,035 et 0,04 W/mK établie sur une surface plane à une température de 24°C ;
- ➔ s'applique aux parties de l'installation d'eau chaude sanitaire lorsqu'il existe une recirculation, et aux 2,4 premiers mètres à partir du ballon de stockage pour les installations sans recirculation ;
- ➔ les épaisseurs d'isolation demandées ne prennent pas en compte la diffusion de vapeur ;
- ➔ un pare vapeur peut être requis pour limiter la diffusion de vapeur d'eau et la condensation.

Pour un isolant ayant une conductivité en dehors de l'intervalle considéré pour la température moyenne dans la gamme de température envisagée, l'épaisseur minimum est déterminée par :

Tableau 27. Calcul de l'épaisseur d'isolation en fonction du type d'isolant

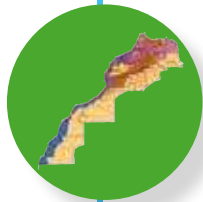
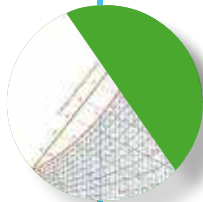
$$e = R [(1 + e^{\circ}/R) K/k^{\circ} - 1]$$

e	épaisseur minimum d'isolation pour le matériau de conductivité K, en [mm]
R	rayon extérieur effectif de la conduite, en [mm]
e°	épaisseur d'isolation de référence, issue du Tableau 26, en [mm]
K	conductivité du matériau considéré à la température moyenne du fluide, en [W/m.K]
k°	conductivité du matériau de référence = 0,04 W/m. K

### 7.2.1.2. Mise en œuvre

L'isolation doit disposer d'une protection mécanique appropriée et doit être installée conformément aux règles de l'art.





T humide [°C]
22,8
21,6
22,1
18,7

# Annexes



## Annexe 1. Le cycle de combustion comme source de chaleur

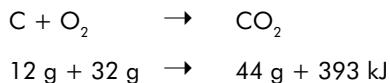
La chaleur utilisée dans les secteurs tertiaire et résidentiel, hors électricité, résulte en partie de la combustion d'hydrocarbures. Un hydrocarbure est, par définition, une molécule formée uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène; ils se différencient par leur composition (nombre d'atomes de chaque sorte) et par leur structure. Les plus courants sont la paraffine ( $C_nH_{2n+2}$ ), l'oléfine ( $C_nH_{2n}$ ), le benzène ( $C_nH_{2n-6}$ ).

La plupart des hydrocarbures liquides sont obtenus par distillation et craquage de pétrole brut. Selon les caractéristiques du processus de transformation (température, pression) et l'origine du brut on obtient différents dérivés tels que le kérosène, le gazole et l'essence.

Le principal hydrocarbure gazeux est le gaz naturel, constitué essentiellement de méthane ( $CH_4$ ).

Le processus de combustion implique l'oxydation de tous les éléments oxydables du combustible. C'est une réaction exothermique, c'est-à-dire accompagnée d'un dégagement de chaleur.

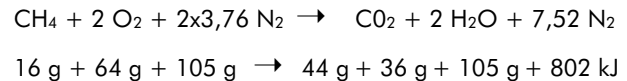
Considérons par exemple la réaction simple suivante :



Cette équation signifie qu'une mole de carbone (C) réagit avec une mole d'oxygène (O) pour former une mole de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Par conservation de la masse, 12 g de carbone (12 = masse atomique du carbone) et 32 g d'oxygène forment 44 g de  $CO_2$ , tout en dégageant 393 kJ sous forme de chaleur.

L'oxygène nécessaire à la combustion est fourni par l'air qui contient approximativement 79% d'azote ( $N_2$ ) et 21% d'oxygène ( $O_2$ ). Donc, pour chaque mole d'oxygène impliquée dans une combustion, 3,76 (79/21) moles d'azote sont associées.

Par exemple, pour la combustion du méthane, il vient :



La réaction ci-dessus est valable pour une combustion complète, c'est-à-dire lorsque chaque molécule de carbone, d'hydrogène ou d'azote réagit avec exactement la quantité d'oxygène nécessaire (conditions stœchiométriques).

Le bilan énergétique de la réaction de combustion fait intervenir les chaleurs de formation des composants : un combustible est caractérisé par son pouvoir calorifique qui est dénoté :

- supérieur (PCS) si les fumées sont ramenées à 0°C, et donc l'eau à l'état liquide;
- inférieur (PCI) si l'eau demeure sous forme de vapeur.

Pour que l'eau demeure sous forme de vapeur, il faut éviter que la température des fumées ne s'abaisse sous le point de rosée.

Les valeurs PCS et PCI des combustibles utilisés dans les chaudières sont données dans le Tableau 28

Tableau 28. Valeurs PCI et PCS typiques pour les combustibles utilisés dans les chaudières

		PCI [MJ/ kg]	PCS [MJ/ kg]
Combustible liquide	Fuel domestique	42,7	46,0
	Fuel lourd No.2	40,6	43,1
Gaz de pétrole	Propane	46,2	50,0
	Butane	45,7	49,4
Gaz naturel	Lacq	48,3	54,7
	Groningue	38,2	42,4



## Annexe 2. Propriétés de l'air humide

L'air est composé d'un certain nombre de gaz, d'humidité, de poussières et de bactéries : c'est l'air humide pollué.

Pour l'ensemble des relations exposées, on considèrera que :

- ➔ l'air sec est un air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie et totalement dépourvu d'humidité ;
- ➔ l'air humide est un air pur ne contenant aucune poussière ou bactérie mais ayant une certaine teneur en humidité sous forme de vapeur d'eau. C'est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau.

L'air sec peut être considéré comme un gaz parfait. De même, l'air humide est un mélange idéal de gaz parfaits.

Les lois des gaz parfaits vont permettre d'établir les expressions littérales permettant de calculer les caractéristiques de l'air humide.

Dans le domaine du bâtiment, les évolutions que subit l'air humide, dans un site bien déterminé, concernent principalement les changements de sa température (chauffage/refroidissement) et de sa teneur en eau (humidification/déshumidification). Connaître les caractéristiques physiques d'un air permet donc de le

juger en termes de confort hygrothermique et de quantifier les échanges thermiques et hydriques impliqués dans sa transformation pour aboutir à certaines conditions finales à partir de son état initial. Ceci est primordial dans la démarche de dimensionnement des systèmes de conditionnement d'air.

Les principales propriétés thermodynamiques de l'air sont les suivantes :

- ➔ humidité absolue : dénote la teneur en eau de l'air humide. Elle est exprimée en [kg d'eau par kg d'air sec] ;
- ➔ humidité relative qui est exprimée en [%] ;
- ➔ température sèche en [°K] ou [°C] ;
- ➔ température humide en [°C] ;
- ➔ volume spécifique en [m<sup>3</sup> d'air humide par kg d'air sec] ;
- ➔ masse volumique exprimée en [kg d'air humide par m<sup>3</sup> d'air humide] ;
- ➔ enthalpie exprimée en [kJ par kg d'air sec] ;
- ➔ température de rosée exprimée en [°C].

Une représentation graphique des propriétés de l'air humide est donnée par le diagramme de l'air humide :

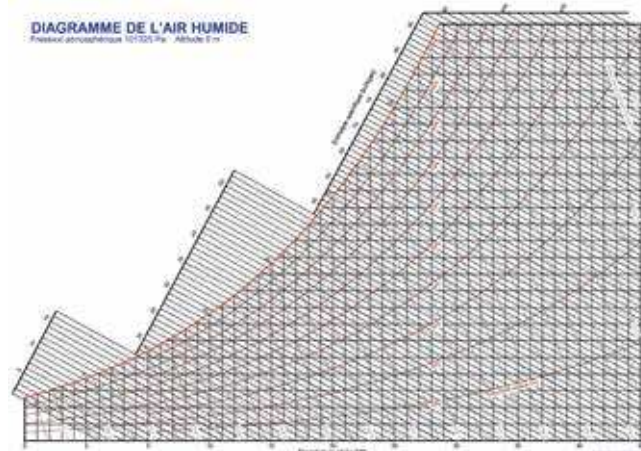


Figure 27 Diagramme psychrométrique pour l'air humide



Pour une pression atmosphérique de référence, le diagramme de l'air humide se compose principalement des éléments suivants :

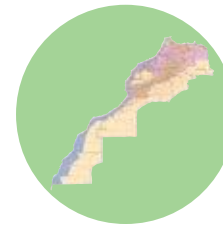
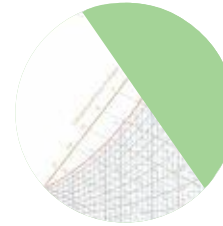
- ➔ en abscisse, l'axe des températures en [°C],
- ➔ en ordonnées, l'axe des humidités absolues en [kg d'eau par kg d'air sec].

En fonction des coordonnées de température et d'humidité absolue, sont représentés :

- ➔ des courbes de valeurs constantes d'humidité relative [%], variant de 10% à 100% (courbe de saturation) ;
- ➔ des droites obliques de valeurs constantes d'enthalpie [kJ par kg d'air sec] ;
- ➔ des droites obliques de valeurs constantes de volume spécifique [m<sup>3</sup> d'air humide par kg d'air sec] ;
- ➔ des droites obliques de valeurs constantes de températures humides [°C].

Le diagramme contient des informations complémentaires relatives au processus de conditionnement d'air.

Ces diagrammes sont disponibles pour diverses altitudes (pressions atmosphériques de référence) : ils permettent de déterminer avec une précision adéquate, quasiment toutes les caractéristiques nécessaires pour décrire les transformations que peut subir un air. Pour une pression atmosphérique de référence, deux paramètres suffisent pour caractériser un air et déterminer le reste de ses propriétés thermodynamiques.



T humide [°C]
22,8
21,6
22,1
18,7



### Annexe 3. Conditions extérieures de calcul de la charge frigorifique

Tableau 29. Conditions extérieures de calcul de la charge frigorifique

Nom de la ville	Longitude	Latitude	Altitude [m]	T sèche [°C]	T humide [°C]
Agadir	-9,57	30,38	23	37	22,8
Al-Hoceima	-3,85	35,18	12,1	33	21,6
Béni-Mellal	-6,40	32,37	468	43	22,1
Bouarfa	-1,95	32,57	1142	40	18,7
Casablanca	-7,67	33,57	57	32	23,2
Chefchaouen	-5,30	35,08	300	38	25,9
Dakhla	-15,93	23,72	11	32	22,4
El-Jadida	-8,52	33,23	270	29	21,7
Essaouira	-9,78	31,52	7,1	29	16,9
Fès	-4,98	33,97	571,3	41	21,7
Guelmim	-10,05	29,02	300	44	23,9
Ifrane	-5,17	33,50	1663,8	34	18,6
Kasba-Tadla	-6,27	32,60	507	44	23,1
Kénitra	-6,60	34,30	5	36	23,8
Khouribga	-6,90	32,88	785	41	23,6
Laayoune	-13,22	27,17	64	38	23,4
Larache	-6,13	35,18	46,7	37	24,3
Marrakech	-8,03	31,62	463,5	43	24,6
Meknès	-5,53	33,88	548,2	40	22,7
Midelt	-4,73	32,68	1508	36	19,4
Mohammedia	-7,40	33,72	5	28	22,2
Nador	-2,92	35,15	6,9	34	22,9
Nador-Aroui	-3,02	34,98	178	37	25,6
Nouasseur	-7,58	33,37	200	38	23,5
Ouarzazate	-6,90	30,93	1136	40	20,7
Oujda	-1,93	34,78	465	40	23
Rabat-Salé	-6,77	34,05	75	35	22,2
Errachidia	-4,40	31,93	1037,2	41	20,2
Settat	-7,62	32,95	480	40	22,7
Sidi-Ifni	-10,18	29,37	49,5	35	23
Sidi-Slimane	-6,05	34,23	52	43	25,5
Smara	-11,67	26,67	110	46	26,7
Tanger	-5,90	35,72	15,4	35	22,8
Tan-Tan	-10,93	28,17	45	37	23,2
Taroudant	-8,82	30,50	264	45	23,6
Taza	-4,00	34,22	509,2	42	24,4
Tétouan	-5,33	35,58	5	35	21,5
Tiznit	-9,73	29,68	260,5	39	22,8



## Annexe 4. Conditions extérieures de calcul de la charge de chauffage

Tableau 30. Conditions extérieures de calcul de la charge de chauffage

Nom de la ville	Longitude	Latitude	Altitude [m]	T sèche [°C]
Agadir	-9,57	30,38	23	4
Al-Hoceima	-3,85	35,18	12,1	5
Béni-Mellal	-6,40	32,37	468	-1
Bouarfa	-1,95	32,57	1142	-2
Casablanca	-7,67	33,57	57	5
Chefchaouen	-5,30	35,08	300	-1
Dakhla	-15,93	23,72	11	12
El-Jadida	-8,52	33,23	270	5
Essaouira	-9,78	31,52	7,1	8
Fès	-4,98	33,97	571,3	-1
Guelmim	-10,05	29,02	300	5
Ifrane	-5,17	33,50	1663,8	-6
Kasba-Tadla	-6,27	32,60	507	0
Kénitra	-6,60	34,30	5	2
Khouribga	-6,90	32,88	785	1
Laayoune	-13,22	27,17	64	8
Larache	-6,13	35,18	46,7	4
Marrakech	-8,03	31,62	463,5	3
Meknès	-5,53	33,88	548,2	1
Midelt	-4,73	32,68	1508	-3
Mohammedia	-7,40	33,72	5	7
Nador	-2,92	35,15	6,9	2
Nador-Aroui	-3,02	34,98	178	1
Nouasseur	-7,58	33,37	200	1
Ouarzazate	-6,90	30,93	1136	-1
Oujda	-1,93	34,78	465	-1
Rabat-Salé	-6,77	34,05	75	4
Errachidia	-4,40	31,93	1037,2	-2
Settat	-7,62	32,95	480	1
Sidi-Ifni	-10,18	29,37	49,5	11
Sidi-Slimane	-6,05	34,23	52	1
Smara	-11,67	26,67	110	7
Tanger	-5,90	35,72	15,4	3
Tan-Tan	-10,93	28,17	45	9
Taroudant	-8,82	30,50	264	4
Taza	-4,00	34,22	509,2	2
Tétouan	-5,33	35,58	5	4
Tiznit	-9,73	29,68	260,5	5

## Annexe 5. Zonage climatique

## Zonage climatique du Maroc adapté au Règlement Thermique de Construction au Maroc

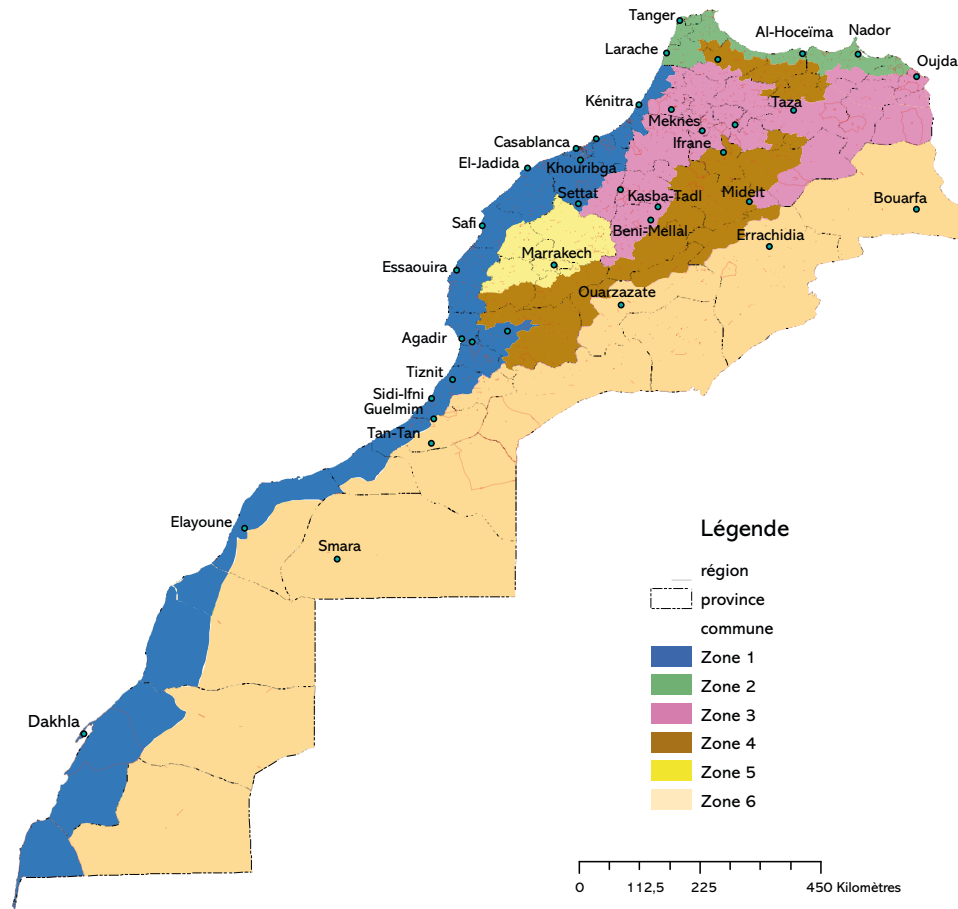


Figure 28 Carte du zonage climatique au Maroc adapté aux besoins du RTCM



## Annexe 6. Carte des températures sèches de base de l'été

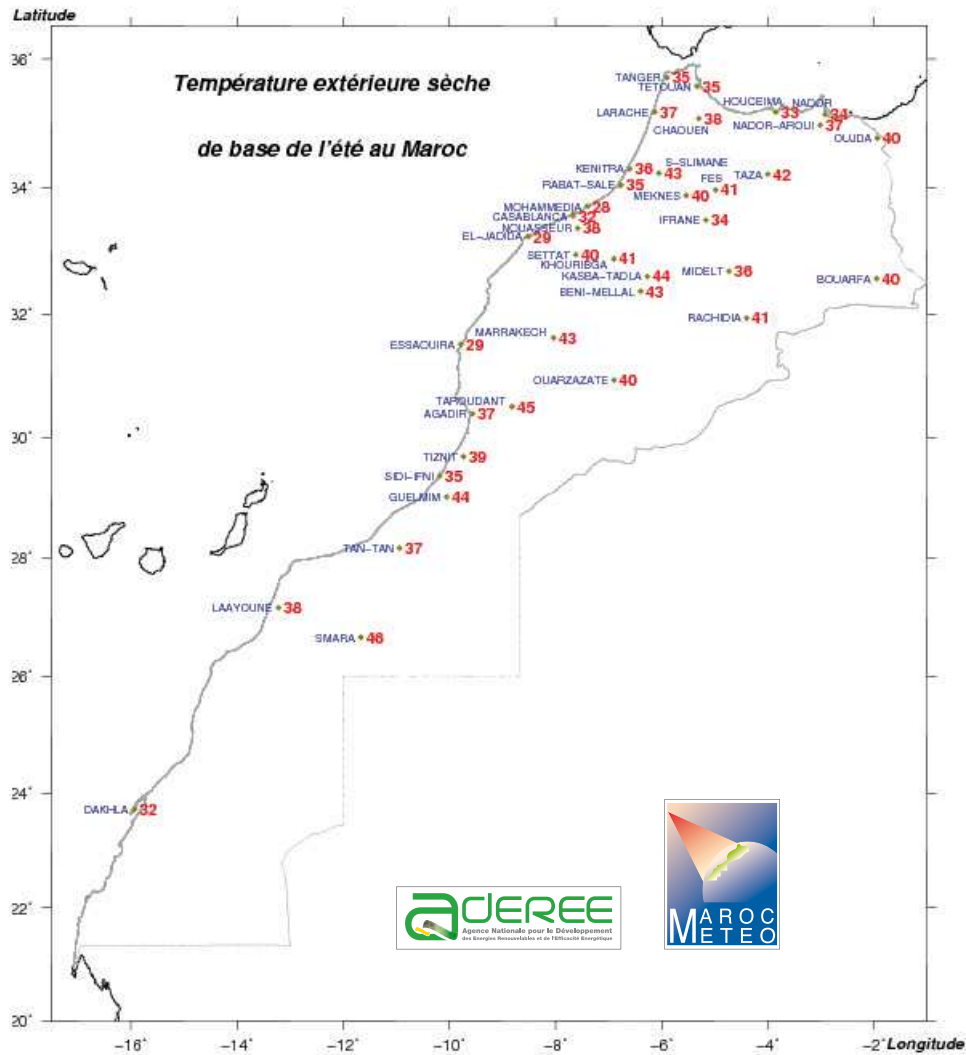


Figure 29 Carte des 38 stations météorologiques et leurs températures sèches de base de l'été



## Annexe 7. Carte des températures humides de base de l'été

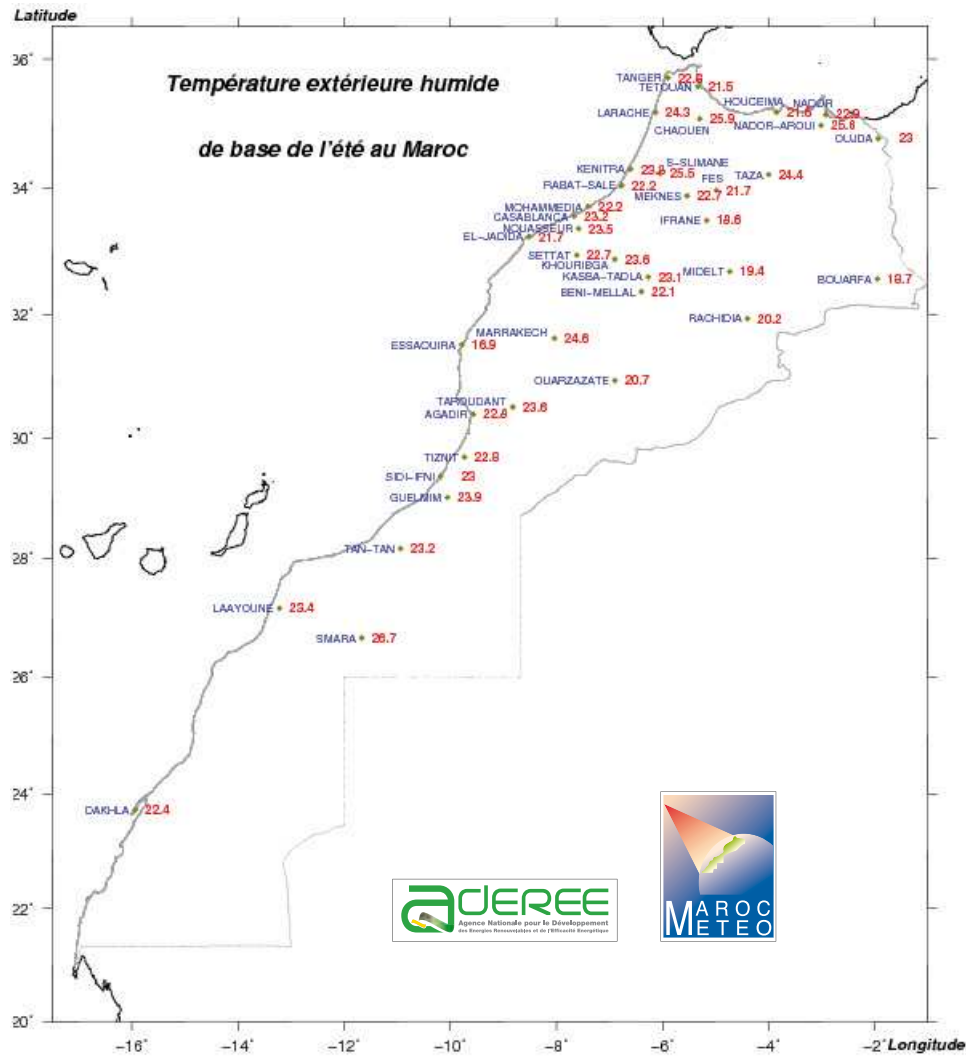


Figure 30 Carte des 38 stations météorologiques et leurs températures humides de base de l'été



## Annexe 8. Carte des températures sèches de base de l'hiver

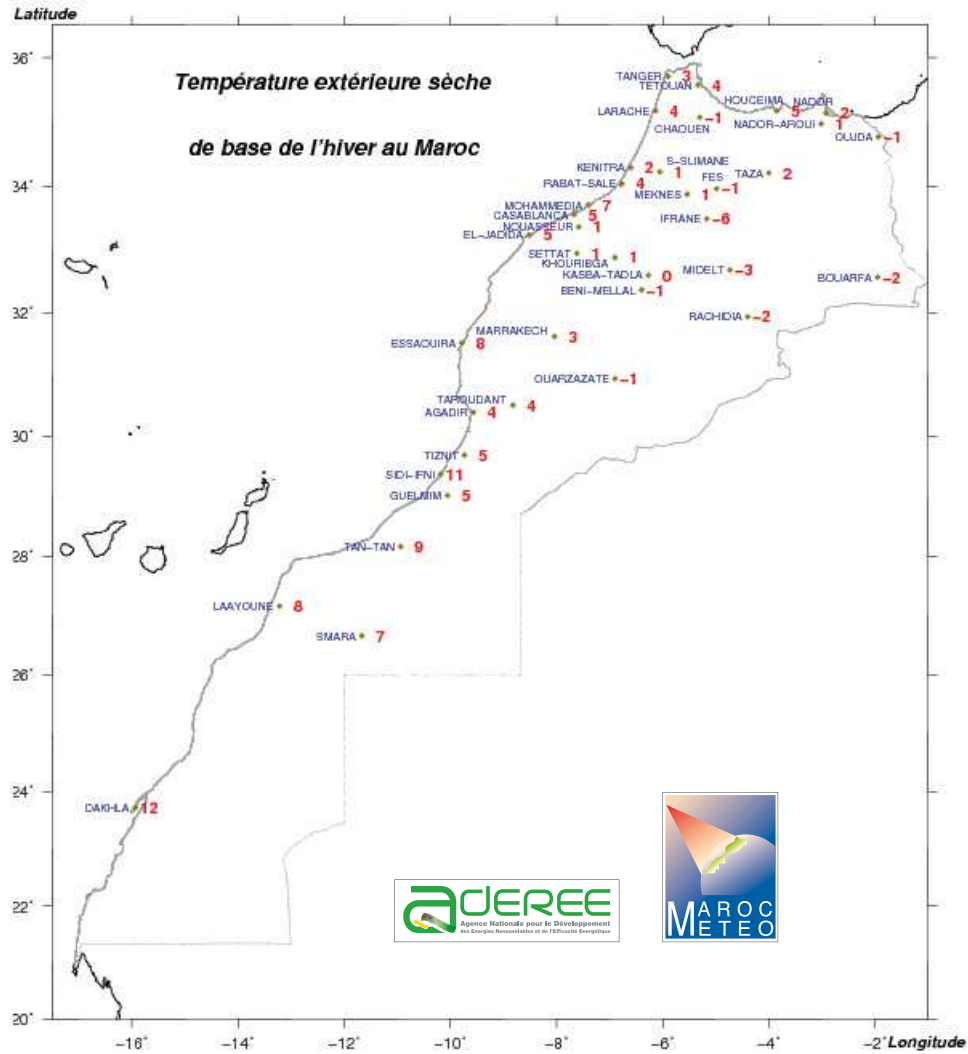


Figure 31 Carte des 38 stations météorologiques et leurs températures sèches de base de l'hiver



## Annexe 9. Carte des humidités relatives minimales moyennes correspondant aux températures extérieures sèches de base de l'été

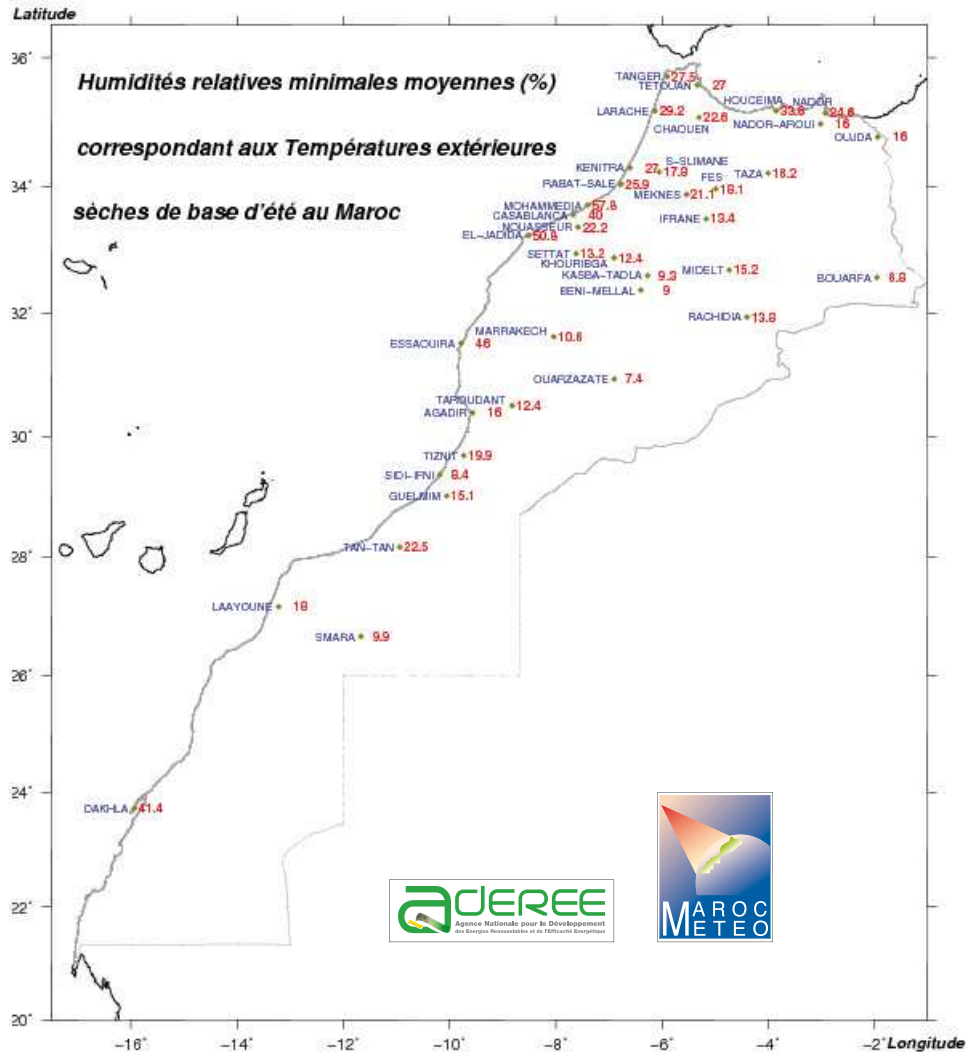


Figure 32 Carte des humidités relatives minimales moyennes correspondant aux températures extérieures sèches de base de l'été.



## Annexe 10. Carte des isolignes de température sèche de base de l'été

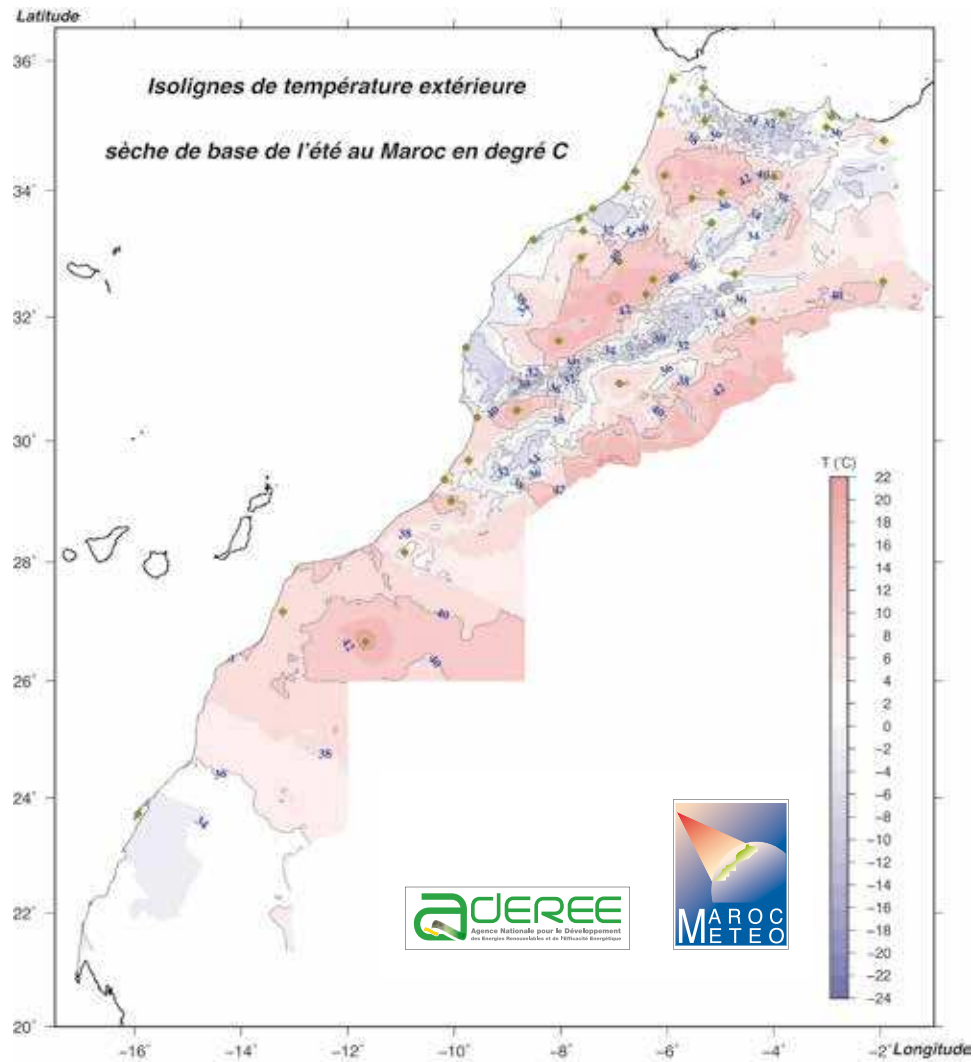


Figure 33 Carte des iso-températures extérieures sèches de base de l'été calculées en se basant sur la correction par rapport à l'altitude.

## Annexe 11. Cartes des Isolignes de température extérieure humide de base de l'été

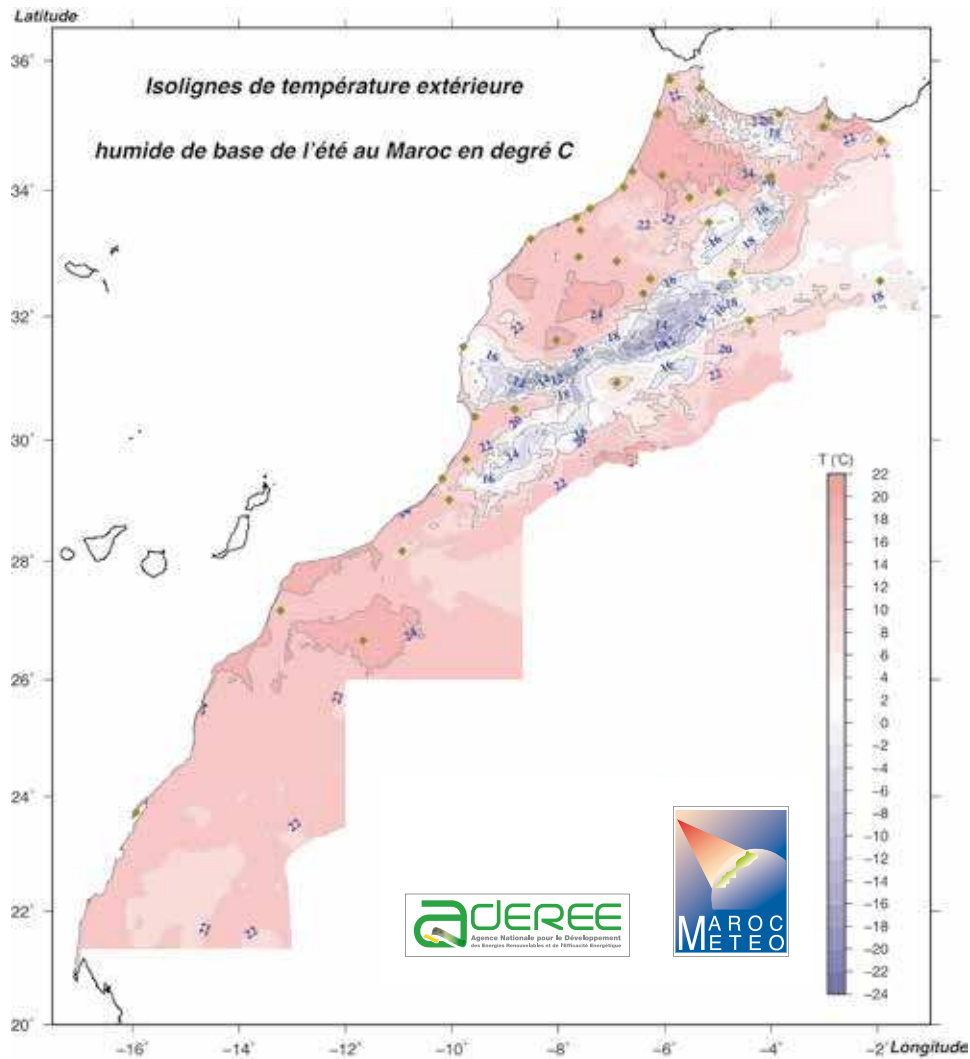


Figure 34 Carte des iso-températures extérieures humides de base de l'été calculées en se basant sur la correction par rapport à l'altitude.



## Annexe 12. Cartes des Isolignes de température extérieure sèche de base de l'hiver

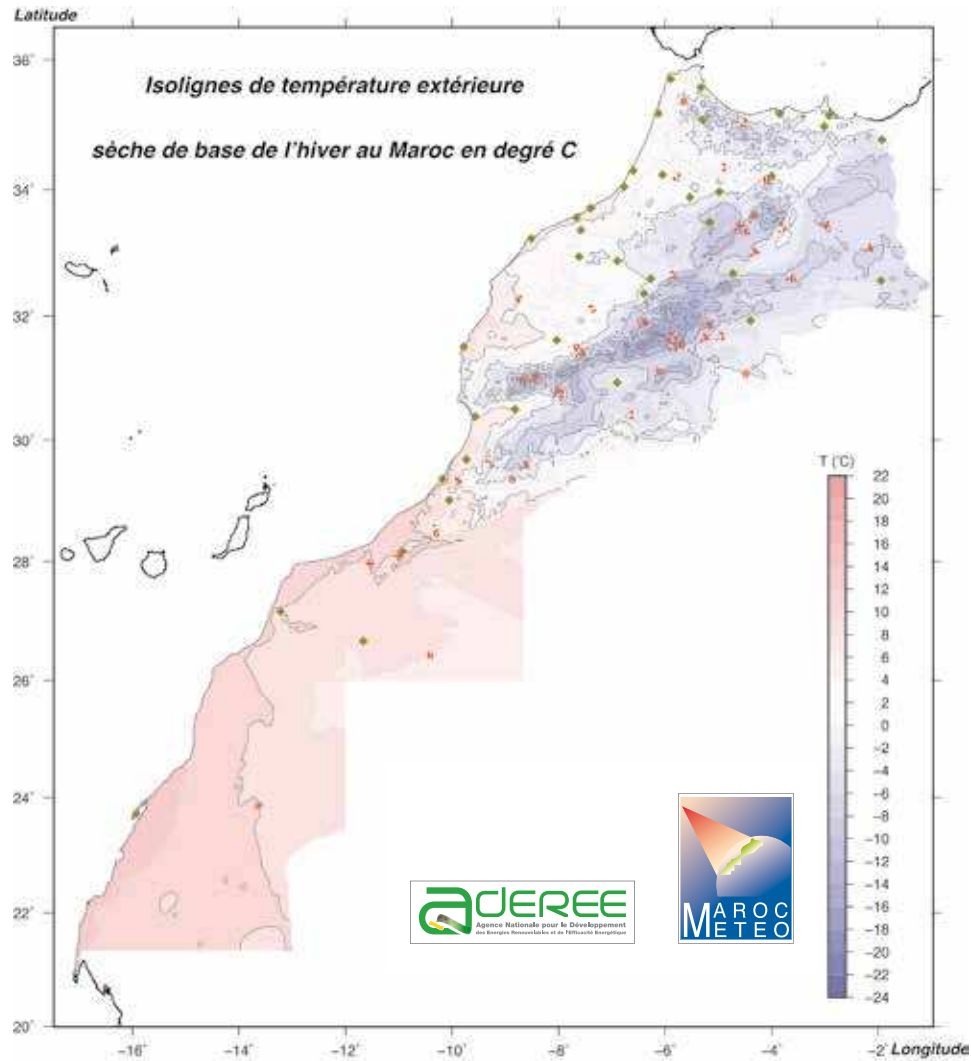
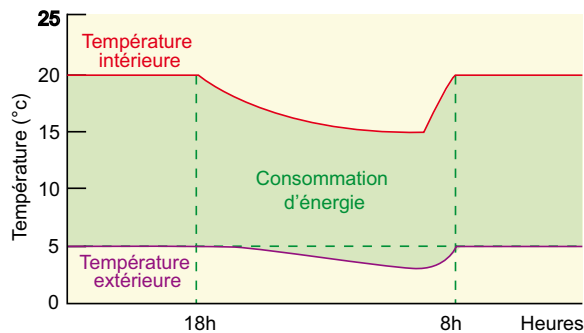


Figure 35 Carte des iso-températures extérieures sèches de base de l'hiver calculées en se basant sur la correction par rapport à l'altitude.

## Annexe 13. Fiche de vérification des installations de chauffage

- ➔ vérifier la combustion optimale dans le brûleur ;
- ➔ vérifier les paramètres thermo-physiques des circuits hydrauliques des chaudières (températures, débits) ;
- ➔ vérifier la qualité, le débit et la température du système de fumée des chaudières ;
- ➔ installer un contrôle sur la chaudière lié à la température extérieure ;
- ➔ régler: modifier les consignes dans le temps et pratiquer un chauffage intermittent: il est toujours préférable de couper une installation de chauffage en dehors des périodes d'occupation et de ne pas maintenir la chaudière en température.

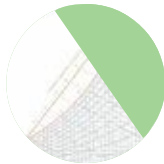
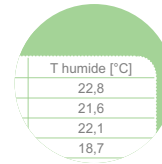


- ➔ inspecter l'isolation thermique des tuyauteries et chaudières ;
- ➔ calorifuger les vannes ; calorifuger les accessoires ;
- ➔ installer des pompes de circulation à vitesse variable à commande thermostatique ;
- ➔ inspecter et vérifier les travaux d'exécution.



## Annexe 14. Fiche de vérification des installations de conditionnement d'air

- ➔ équipements de régulation :
  - vérifier le réglage des thermostats ;
  - revoir l'emplacement des thermostats et les installer près de l'air de retour ;
  - vérifier le débit d'air frais variable/constant ;
  - vérifier la mise à l'heure des horloges des équipements de régulation ;
  - faire une analyse critique du système de gestion d'énergie (building management system-BMS) ;
  - vérifier que la climatisation est à l'arrêt pendant les heures de non-occupation.
- ➔ ventilation et distribution d'air :
  - inspecter les gaines de ventilation, nettoyer les filtres, ...
  - vérifier l'équilibre aéraulique des gaines de ventilation ;
  - régler le débit de l'air neuf au minimum conforme à la réglementation ;
  - revoir le fonctionnement des ventilateurs d'extraction d'air : bannir le fonctionnement continu et mettre en place un fonctionnement intermittent ;
  - vérifier l'isolation des tuyauteries d'eau chaude et glacée ;
  - vérifier l'isolation des plenums et gaines d'air.
- ➔ équipements de climatisation/chauffage :
  - vérifier que le démarrage des compresseurs est fonction de la demande au lieu de démarrer simultanément ;
  - vérifier que les températures de fonctionnement de l'évaporateur et du condenseur sont conformes aux recommandations du fabricant et aux réglages ;
  - vérifier les conditions de confort (température, humidité, débit d'air) de chaque zone afin de réajuster le système d'équilibrage ;
  - dépoussiérer les condenseurs à air ;
  - vérifier l'absence de fuites sur les accessoires et les tuyauteries.

T humide [°C]
22,8
21,6
22,1
18,7

# Conclusion

La hausse du nombre de logements construits au Maroc, conjuguée à la baisse des prix des appareils de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC) a induit une tendance haussière dans l'acquisition de ces équipements par le consommateur marocain.

La forte progression du parc des systèmes CVC, couplée à la faible performance énergétique de la majorité des modèles existants sur le marché marocain, est une contrainte supplémentaire sur la courbe de charge électrique nationale. Il convient de ce fait d'être vigilant quant au choix de ces équipements, notamment en ce qui concerne leur performance énergétique.

À travers ce guide, l'ADEREE met à la disposition des ingénieurs, des gestionnaires de l'énergie et des techniciens de contrôle et d'installation, l'essentiel de l'information relative à la mise en place et au fonctionnement des systèmes CVC.

Ce guide décrit les composants, le fonctionnement, la structure et la régulation des différents types de systèmes. Il aborde les critères de choix des équipements qui garantissent l'optimisation de leur performance énergétique et la maîtrise de leur consommation, permettant ainsi de réduire jusqu'à 45% de leur consommation.

Nous rappelons également dans ce guide que l'optimisation et la maîtrise des différents paramètres des équipements sont fondamentales pour garantir leur fiabilité et leur durabilité.







**ADEREE**  
Agence Nationale pour le Développement  
des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique



[www.aderee.ma](http://www.aderee.ma)



 Imprimé sur papier recyclé

[www.filiarenmaroc.com](http://www.filiarenmaroc.com)