

# ***COURS DE THERMIQUE DU BÂTIMENT***

**Dr Edmond Claude VODOUNNOU**  
*Maitre-Assistant des Universités CAMES*

La physique du bâtiment est une notion très importante qui devrait être bien connue par des étudiants en génie mécanique et énergétique (GME), génie civil (GC) (architecte, urbaniste...). Cependant cette notion doit être impérativement bien adaptée pour chaque spécialité car chaque domaine d'expertise nécessite une connaissance bien précise et bien ciblée afin que la formation soit satisfaisante et complète. Pour cette raison, un cours de physique du bâtiment est essentiel pour les étudiants dont les filières sont citées ci-dessus. Un bâtiment n'est pas seulement une façade pour décorer notre environnement mais un microclimat intérieur très important pour le bien être des occupants. Le cours de physique du bâtiment proposé pour les étudiants de GME et GC est composé des chapitres essentiels afin d'assurer la complémentarité de leur formation.

Ainsi **l'objectif général** de ce cours est d'assurer l'isolation thermique et acoustique ainsi que l'étanchéité d'une construction et d'éviter la condensation intérieure et les moisissures.

**Les objectifs spécifiques du cours peuvent être cités comme suit :**

- Connaitre la notion de la thermique du bâtiment en introduisant des notions de base en transfert de chaleur, en thermodynamique dans le bâtiment.
- Introduire des notions de base dans le domaine de l'acoustique ;
- Illustrer chaque chapitre par des figures et des schémas tirés de notre vie quotidienne afin de faciliter la compréhension des étudiants ;
- Présenter les bases physiques de l'éclairage, de la thermique et de l'acoustique pour comprendre leurs applications dans le bâtiment

### **Compétences**

Concevoir et dimensionner les cas élémentaires de maîtrise des ambiances du bâtiment (éclairage artificiel et naturel, isolation thermique et bilan thermique simplifié, et correction et isolation acoustique)

### **Modalités de validation**

Contrôle continu Examen final

# CHAPITRE I : SITUATION MONDIALE DE L'ENERGIE

## 1 - Production mondiale d'énergie primaire

Les différentes sources d'informations statistiques présentent de légères différences dont certaines peuvent s'expliquer<sup>1</sup> et dont d'autres témoignent de la difficulté de l'exercice.

En recherchant les ordres de grandeur, plutôt que la précision arithmétique, la situation dans les premières années du 21<sup>ème</sup> siècle peut se résumer par le tableau 1 ci-dessous, extrait des statistiques de l'IEA<sup>2</sup> pour l'année 2011.

**Tableau 1 – Production mondiale d'énergie primaire en 2015 en millions de tep (Mtep)**

Source: Key World Energy Statistics, IEA – 2017

Source primaire	Mtep	%
Pétrole	4 326	31,7
Charbon	3 835	28,1
Gaz naturel	2 948	21,6
Nucléaire	669	4,9
Hydraulique	341	2,5
Renouvelables + déchets	1 528	11,2
<b>TOTAL</b>	<b>13 647</b>	<b>100</b>

Il ressort de ce tableau que plus de 80% de la production mondiale d'énergie a été basée en 2015 sur les combustibles fossiles avec une augmentation sensible de la production de charbon au détriment des autres sources. On constate, par ailleurs, que 86,8% de la production mondiale d'énergie primaire a été basée sur des ressources non renouvelables, sans changement par rapport à 2010.

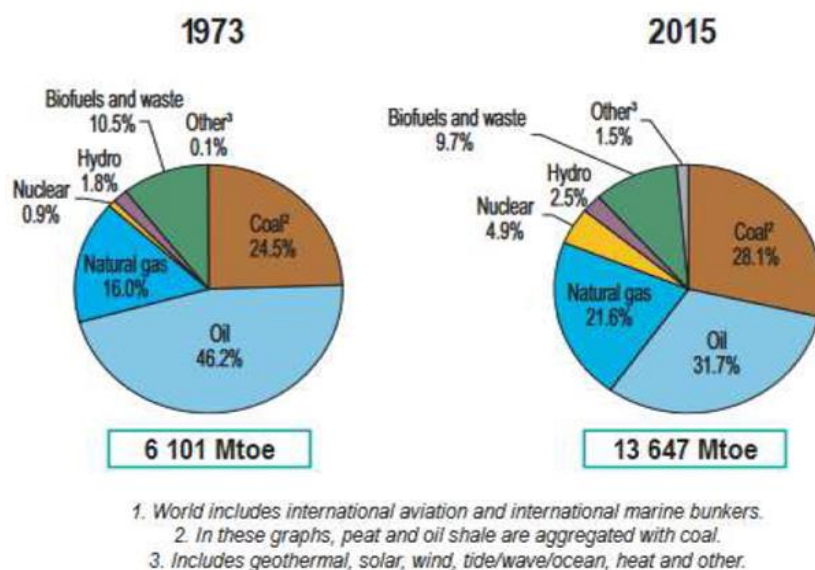
Il est intéressant de voir comment cette production d'énergie primaire a évolué dans le temps depuis 1973. La figure 1 en montre la croissance, ainsi que la part de chaque source ; on notera la part croissante du charbon.

### REMARQUES

<sup>1</sup> Les chiffres peuvent être affectés entre autres par la prise en compte :

- de corrections climatiques,
- de la consommation d'énergie liée à la production (production brute / production nette),
- des emplois à des fins non énergétiques (matières premières pour l'industrie chimique : vapocraquage, production d'ammoniac, d'hydrogène et de méthanol par exemple)

<sup>2</sup> IEA : International Energy Agency



**Figure 1 – Evolution de la production d'énergie primaire (en millions de tep) par source**

Source: Key World Energy Statistics, IEA – 2017

Cette production d'énergie primaire a conduit, en 2015, à une consommation totale d'énergie dans le monde de 9 384 Mtep (Source: Key World Energy Statistics, IEA - 2017)

En 2016, 161 GW d'énergies renouvelables ont été installées : un nouveau record qui augmente la capacité totale de production d'électricité d'origine renouvelable de près de 9% par rapport à 2015, pour atteindre environ 2 017 GW. Le solaire photovoltaïque compte pour environ 47% de ces capacités additionnelles, suivi de l'éolien (34%) et l'hydroélectricité (15,5%), selon le rapport de référence Renewables 2017 Global Status Report (GSR) de l'association REN21.

Au niveau mondial, les énergies renouvelables représentent dorénavant en 2017 19,3 % de la consommation finale d'électricité contre 78,4 % pour les combustibles fossiles et seulement 2,3 % pour le nucléaire

## 2 - Disparités des consommations d'énergie dans les différentes zones économiques

On constate des écarts énormes entre les différentes zones économiques de la planète : environ 1,6 milliards d'habitants n'ont aujourd'hui pratiquement pas accès à l'énergie.

**Tableau 2 – Consommation d'énergie primaire par habitant en 2015, en tep**

Source: Key World Energy Statistics, IEA - 2017

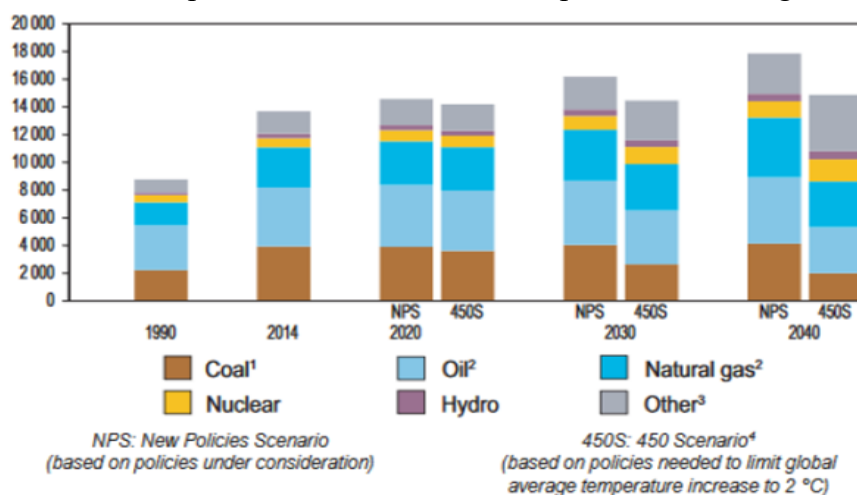
Zone économique	Consommation d'énergie primaire par habitant (tep/hab)
<b>USA</b>	<b>6,80</b>
<b>Amérique Latine</b>	<b>1,28</b>
<b>O.C.D.E.</b>	<b>4,12</b>
dont Allemagne	3,77
France	3,71
<b>Afrique</b>	<b>0,66</b>
<b>Moyen Orient</b>	<b>3,21</b>
<b>Asie</b>	<b>0,73</b>
dont Chine	2,17
Japon	3,38
<b>Moyenne mondiale</b>	<b>1,86</b>

### 3 - Perspectives à moyen et long terme. Evolution de la demande énergétique mondiale

Sous l'effet de :

- l'accroissement de la population mondiale (9 à 10 milliards d'habitants à l'horizon 2050),
- des efforts des pays en voie de développement pour combler leur décalage économique (croissance de 8 à 10% en Chine et en Inde),
- du maintien d'une légère croissance de la demande énergétique dans les pays développés, la demande d'énergie primaire poursuit sa croissance.

La figure 2 précise l'évolution prévisible de cette demande, par source d'énergie, d'ici 2040.

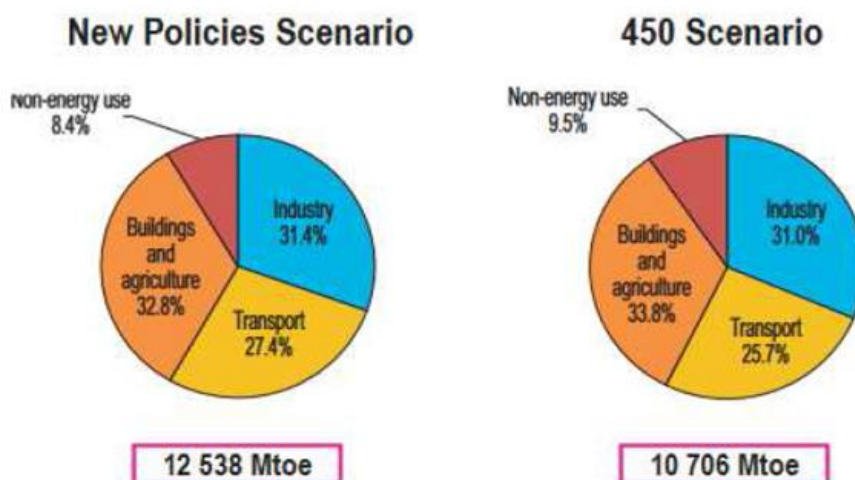


**Figure 2 – Evolution de la production d'énergie primaire en Mtep par type de source d'énergie**

Source: Key World Energy Statistics, IEA – 2017

Les experts tablent sur une croissance moyenne de l'ordre de 1,7% par an pour les prochaines décennies ce qui conduit à prévoir le doublement de la production mondiale soit 20 milliards de tep dans les années 2040 – 2050.

La figure 3 montre les prévisions de consommation, en 2040, selon le secteur d'utilisation, à comparer à une valeur de 8 918 MTep en 2011, et 9 384 en 2015.



1. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
2. Includes international aviation and marine bunkers.
3. Includes biofuels and waste, geothermal, solar, wind, tide, etc.
4. Based on a plausible post-2016 climate-policy framework to stabilise the long-term concentration of global greenhouse gases at 450 ppm CO<sub>2</sub>-equivalent. Source: IEA, World Energy Outlook 2016.

**Figure 3 -Prévisions de consommation d'énergie en 2040, selon les secteurs et le scénario.**

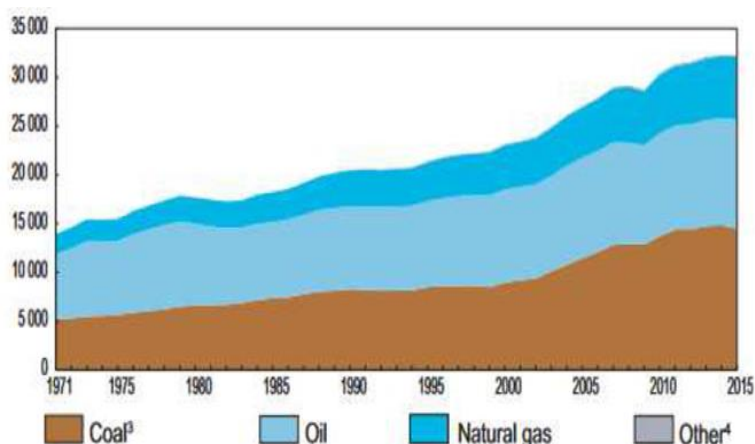
#### 4 - Energie et environnement

L'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> est liée à l'activité humaine et en premier lieu à la production et à la consommation d'énergie par combustion des combustibles fossiles. La teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère terrestre, voisine de 260 ppmv avant la période industrielle, a augmenté de façon nettement perceptible dans le dernier tiers du 20<sup>ème</sup> siècle pour atteindre 405,1 ppmv en mai 2016.

Elle poursuit sa croissance au rythme voisin de 2 à 3 ppmv chaque année (3 ppmv en 2015, d'après les scientifiques américains de la NOAA<sup>3</sup>). La figure 5 montre que l'augmentation récente des émissions est principalement due au développement économique de la Chine et des pays asiatiques.

**NB:** <sup>3</sup> NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

L'accroissement de « l'effet de serre » qui en résulte provoque une élévation de la température moyenne du globe qui va en s'accéléralant.



**Figure 4 –Evolution des émissions de CO<sub>2</sub> par type de combustible (millions de t de CO<sub>2</sub>)**

Source: Key World Energy Statistics, IEA - 2017

C'est ainsi qu'au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, la température moyenne de l'air à la surface du globe a augmenté d'environ 0,75°C. Mais la vitesse de réchauffement au cours des 50 dernières années (0,13°C par décennie) est le double de celle calculée pour l'ensemble du siècle et les 12 dernières années figurent au palmarès des années les plus chaudes depuis 1850. Ce réchauffement induit des changements climatiques dont les conséquences à long terme pourraient être une augmentation de la température moyenne de plusieurs degrés, entraînant une fonte des glaces polaires provoquant une élévation notable du niveau des mers, une modification des courants marins, une augmentation des précipitations, des tornades, une modification de la biodiversité, etc....

Sous l'égide de l'ONU, le sommet de Rio en 1992 et le protocole de Kyoto en 1997 ont conduit à des accords internationaux visant à stabiliser les émissions globales à l'échéance 2008 – 2012 au niveau de celles de l'année 1990. Pour laisser une plus grande latitude aux pays en voie de développement, les pays industrialisés se sont engagés à réduire en moyenne leurs émissions de 5,2% et pour sa part, l'Union Européenne a pris l'engagement d'une réduction moyenne de 20% d'ici 2020, par rapport à 1990.

Cette première phase du protocole de Kyoto n'est qu'une modeste amorce des efforts à déployer pour plafonner à 450 ppmv la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique et limiter à moins de 2°C le réchauffement de la planète au cours du 21<sup>ème</sup> siècle.

Les conférences internationales sur le climat de Durban en 2011, Doha fin 2012 puis Varsovie en 2013, puis la COP 21 à Paris en décembre 2015 ont confirmé la volonté de l'Union Européenne de progresser en retenant la décision d'abaisser de 20% les émissions d'ici 2020.

La concrétisation des accords internationaux visant à diviser par 2 les émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 demandera de longues discussions mais, même si la ratification et l'application de ces accords rencontrent des difficultés, ils auront un impact déterminant sur l'industrie de l'Energie. Ils impliqueront en particulier que la répartition actuelle des sources d'énergie primaire exploitées soit largement modifiée et que soit divisée par 2 la part des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel).

Selon l'Agence internationale de l'énergie, les émissions de CO<sub>2</sub> augmenteront de 130 % d'ici 2050. L'investissement nécessaire pour réduire de moitié les émissions et développer une « révolution internationale des technologies énergétiques » se monte à 45 000 milliards de dollars d'ici à 2050.

### 5 - Les combustibles fossiles : où en sommes-nous des réserves ?

Le simple calcul du ratio R/P (réserves prouvées / consommation constatée) conduit à un chiffre qui caractérise la durée de vie des réserves.

Il ne faut pas donner à ce chiffre - exprimé en années – une signification absolue car les deux termes du ratio comportent des incertitudes :

- d'une part les progrès dans la recherche et l'exploitation des gisements ont tendance à augmenter le taux de récupération et donc, par là même, le volume des réserves prouvées et la « durée » de ces réserves,
- d'autre part, la croissance de la demande dans les prochaines décennies conduit au doublement de la consommation annuelle ce qui a évidemment l'effet inverse sur la « durée » des réserves.

Le tableau 3 résume la situation en ce qui concerne le pétrole, le gaz naturel et les minéraux solides (charbon, bitumineux et lignite).

**Tableau 3 – Réserves d'énergies primaires fossiles (base 2015)**

Source : Mémento sur l'énergie – CEA 2016

	<b>Réserves mondiales prouvées</b>	<b>R/P (au rythme actuel de la consommation) (années)</b>
<b>Pétrole (GTep)</b>	<b>239,4</b>	<b>50,7</b>
<b>Gaz naturel (trillions m<sup>3</sup>)</b>	<b>186,9</b>	<b>52,8</b>
<b>Minéraux solides (milliards tonnes)</b>	<b>892</b>	<b>114</b>

Ces chiffres peuvent paraître préoccupants d'un point de vue géopolitique, puisque les 2/3 des réserves de pétrole sont situées au Moyen Orient dont 80% dans les Pays de l'OPEP.

Néanmoins, les découvertes et les exploitations récentes de gaz de schistes, mieux répartis sur la surface du globe, semblent pouvoir modifier ces conclusions ainsi que la géopolitique associée, en augmentant significativement le R/P du gaz naturel. C'est ainsi, par exemple, que les USA, gros importateurs d'hydrocarbures jusqu'en 2010, deviennent maintenant exportateurs de gaz de schistes !

Dans le domaine nucléaire, avec les technologies utilisées aujourd'hui (réacteurs à eau PWR4 ou EPR et BWR) et sans retraitement des combustibles, les réserves « raisonnablement assurées » d'uranium, en 2013 (source CEA) sont de 3 699 kt, ce qui conduit à un ratio R/P de l'ordre de 60 ans (consommation 2012 : 59 t). Cette valeur, assez faible, explique la volonté des pays industrialisés de développer, au sein de la génération, des réacteurs de type surrégénérateurs, qui pourraient fournir beaucoup plus d'énergie pour la même quantité de combustible nucléaire mis en jeu. Selon les choix technologiques retenus on pourrait ainsi multiplier ce rapport R/P par un facteur 2 à 3, suffisant pour assurer la transition avec la filière nucléaire « fusion contrôlée » qui pourrait déboucher vers la fin de ce siècle si, toutefois, les performances attendues pour cette filière se confirment.



## **CHAPITRE II : RAPPEL DE PHYSIQUE DU BÂTIMENT**

### **1- Rôle de la physique du bâtiment**

La physique du bâtiment est un domaine technique dont le but est d'assurer l'isolation acoustique et thermique ainsi que l'étanchéité d'une construction.

### **2- Importance des principes physiques et physiologiques relatifs au confort**

Depuis quelque temps déjà, beaucoup d'architectes prétendent concevoir et construire des bâtiments durables. Malheureusement, dans la plupart des cas, ces prétentions ne correspondent pas à la réalité. Plusieurs raisons expliquent l'écart entre les intentions et les faits, la principale étant que les architectes n'ont qu'une connaissance sommaire de la physique. En fait, l'architecture durable repose sur la capacité à laisser le produit humain (le bâtiment) communiquer avec l'environnement naturel. Un langage commun est nécessaire à l'établissement de ce dialogue. Le langage que les humains ont élaboré pour communiquer avec l'environnement naturel est la physique, qui a pour filles la chimie, la biologie et l'écologie.

De plus, nous consommons de l'énergie et exerçons une influence sur l'environnement lorsque nous construisons et exploitons nos bâtiments, parce que nous voulons établir et maintenir les conditions nécessaires à notre confort thermique, visuel et acoustique. Mais le confort est un phénomène physiologique (et psychologique), et la physiologie utilise également le langage de la physique.

Enfin, nos bâtiments sont maintenant pleins d'équipements plus ou moins énergivores, qui, tout en optimisant notre qualité de vie, accroissent aussi l'incidence du bâtiment sur son environnement. Le fonctionnement de ces technologies repose lui aussi sur les principes de la physique.

En conséquence, un architecte ne peut concevoir des bâtiments durables que s'il maîtrise au moins les fondements de la physique, en particulier la thermodynamique, et de la physiologie du confort. L'architecte qui a assimilé ces principes de base peut s'engager dans un véritable dialogue avec l'environnement et orienter les spécialistes, les experts en systèmes énergétiques et les techniciens.

### **2-1 Le bâtiment en tant que système thermodynamique**

La thermodynamique est la branche de la physique la plus proche des sciences humaines. Ce n'est pas une simple coïncidence que le concept d'entropie, qui caractérise la seconde loi de la thermodynamique, s'applique également à la théorie de l'information, en économie, ainsi qu'en biologie et en écologie.

Un bâtiment considéré comme un système thermodynamique est un système ouvert, dont la frontière (l'enveloppe) est traversée par des flux d'énergie et de matière. Ces flux varient continuellement, de sorte que le bâtiment est un système dynamique, non seulement parce que la lumière l'éclaire différemment selon le lieu, la saison et l'heure, mais aussi parce qu'il n'y a pas une seule molécule de sa structure qui ne modifie pas continuellement les paramètres thermodynamiques qui influent sur le confort et la demande en énergie.

L'observation d'un bâtiment sous cet angle modifie l'approche de l'architecte face au processus de conception. L'architecte est habitué à dessiner une composante ou un système et à le voir réalisé. Les fonctions hypothétiques et réelles sont les mêmes : les composantes exécutent la fonction qui leur a été attribuée par le concepteur – le dessin d'un mur, d'une fenêtre ou d'un escalier devient un vrai mur et ainsi de suite. Rien de tel avec la thermodynamique. Le flux thermique qui traverse une surface

vitree ou opaque n'est pas nécessairement le même que sur le dessin : c'est la physique qui détermine la nature du flux de chaleur en fonction de l'emplacement, de l'orientation, de l'heure et du matériau utilisé. L'aération naturelle est un cas d'espèce malheureusement trop fréquent : de beaux dessins ornés d'élégantes flèches rouges et bleues expriment l'intention ou le désir de l'architecte à l'égard du flux et des trajectoires du déplacement d'air. Ce qui est dommage (pas tant pour l'architecte que pour ceux qui doivent occuper le bâtiment), c'est que la physique décide souvent que les choses ne se passeront pas comme prévu. Tout comme l'architecte a étudié la loi de la gravité afin de concevoir des structures capables de résister à toutes les contraintes mécaniques possibles, il se doit, pour prendre en compte les contraintes de viabilité environnementale, étudier aussi les lois de la thermodynamique.

Les deux lois les plus connues de la thermodynamique sont la première et la seconde. La première a trait à la conservation de l'énergie, qui est liée à la quantité et donc à l'équilibre énergétique du bâtiment (l'énergie ne peut être ni créée ni détruite ; elle ne peut que changer de forme). La seconde est plus compliquée ; c'est pourquoi elle est moins bien comprise. Elle traite de la qualité de l'énergie. La même quantité d'énergie peut avoir une valeur supérieure ou inférieure. Pour comprendre ce concept, l'analogie hydraulique est d'une grande utilité. S'il n'y a pas de pertes en cours de route, y compris par évaporation, le principe de conservation est également valable pour les débits d'eau : par exemple, quelle que soit la quantité d'eau tirée d'un réservoir situé en amont, cette quantité sera la même au bout de la conduite, dans un réservoir situé en aval, au niveau de la mer. Cependant, cette même quantité d'eau n'a pas la même qualité : l'eau située en amont a plus de valeur que celle qui est au niveau de la mer. On peut se laver, boire, etc. aussi bien avec l'eau d'un réservoir de montagne qu'avec celle d'un lac dans la plaine, mais l'eau de montagne a une possibilité que l'eau au niveau de la mer n'a pas : celle de produire de l'énergie mécanique ou électrique. Cela est dû au fait que l'eau d'un réservoir de montagne a une propriété supplémentaire, à savoir une énergie potentielle élevée. Ainsi, l'eau peut et doit être mesurée en termes de quantité et de qualité. Un million de mètres cubes dans une plaine valent beaucoup moins que quelques milliers de mètres cubes en altitude. Il en est de même pour la chaleur : à des températures élevées, elle a beaucoup plus de valeur qu'à des températures basses ; en effet, dans le premier cas, elle peut produire, à l'aide de technologies appropriées, de l'énergie mécanique ou de l'énergie électrique (la plus précieuse), tandis que dans le second elle ne peut rien produire ou presque. L'équivalent de ce qui est appelé énergie potentielle dans le cas de l'eau porte en thermodynamique le nom d'exergie, c'est-à-dire le potentiel de convertir la chaleur en énergie mécanique au moyen d'un moteur.

Ce qui s'applique à l'eau, à savoir que le fait de dévaler de la montagne jusqu'au niveau de la mer lui fait perdre son énergie de gravité pour toujours, s'applique également à la chaleur : après avoir brûlé une certaine quantité de gaz, de charbon, de pétrole, pour produire de la chaleur à haute température convertible en énergie mécanique, la chaleur à basse température dérivée du processus n'est pas réutilisable pour produire d'autre d'énergie mécanique : elle a perdu son exergie et sa qualité est désormais irréversiblement dégradée.

La quantité est conservée, mais pas la qualité : une fois utilisée, celle-ci disparaît pour toujours.

Dans un bâtiment, la chaleur nécessaire, c'est-à-dire la chaleur qui doit être fournie ou extraite, est à une température basse et n'a donc guère de valeur thermodynamique (bien qu'elle soit suffisante pour nous rendre la vie plus confortable).

Si un bâtiment est considéré comme un système thermodynamique, l'énergie de qualité supérieure qui entre en jeu est l'énergie solaire et électrique ; pour le chauffage et la climatisation des pièces et pour la production d'eau chaude, on utilise une énergie de qualité inférieure.

Le problème, c'est que nous avons besoin de cette énergie, même si elle est de qualité inférieure, et qu'elle n'est pas facilement disponible. En effet, dans la plupart des cas, on consomme de l'énergie de qualité supérieure pour la produire, ce qui est un gaspillage. En outre, dans le cas de l'air conditionné, la deuxième loi de la thermodynamique impose une autre contrainte : tout comme l'élévation de l'eau d'un niveau inférieur à un niveau supérieur ne peut pas se faire spontanément et nécessite un système technologique, la pompe, la chaleur ne peut pas non plus passer spontanément d'un corps froid à un chaud ; ainsi, pour que cela se fasse de manière continue, nous sommes obligés d'utiliser un système technologique et de consommer de l'énergie de qualité supérieure. Le chauffage est donc une opération facile, car il va dans le sens des processus naturels spontanés, mais ce n'est pas le cas de la climatisation. Il n'est pas surprenant que le chauffage soit en usage depuis des millénaires tandis que la climatisation n'est utilisée que depuis un peu plus d'un siècle.

### **3- Transfert de chaleur**

La chaleur peut être transférée sous trois formes :

- la chaleur sensible, conduite par les différences de température ;
- la chaleur radiante, transférée par les ondes électromagnétiques ;
- la chaleur latente, qui est libérée ou absorbée par un corps lors d'un changement de phase (de l'eau à la vapeur ou à la glace et vice versa).

#### **3-1 Chaleur sensible**

La chaleur sensible est la forme d'énergie due au mouvement aléatoire des molécules dans un fluide, ou à la vibration des atomes dans un corps solide. Ces mouvements et vibrations sont appelés l'agitation thermique. Plus l'agitation thermique d'un corps est grande, plus la quantité de chaleur qu'il contient est grande et plus sa température est élevée. La température est, par conséquent, une mesure indirecte de l'état d'agitation thermique d'une substance.

##### **3-1-1 Conduction**

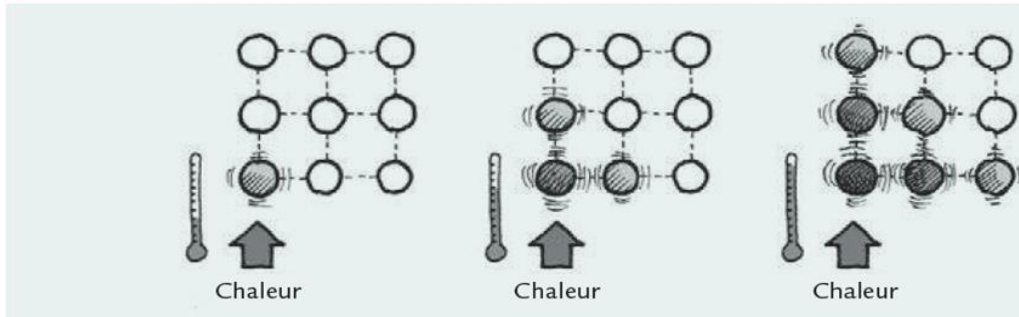
Lorsqu'un solide est chauffé, la chaleur est transmise d'une extrémité à l'autre : les atomes de la partie la plus chaude du solide transmettent leur agitation thermique supérieure aux atomes adjacents, et la température du solide augmente progressivement (figure A.1-1). Ce type de transfert de chaleur est appelé conduction.

La conductivité thermique, qui est le niveau de capacité des atomes à transmettre leur vibration aux atomes adjacents (donc à « conduire » la chaleur d'un point à un autre à l'intérieur du solide) est une propriété spécifique de chaque substance.

La conduction se produit aussi entre des corps différents. Lorsqu'un solide est mis en contact avec un autre, les atomes du solide le plus chaud vibrent davantage et transmettent de l'énergie à ceux du solide le plus froid, accroissant ainsi leur agitation thermique ; par conséquent, la température du solide qui était initialement le plus froid s'élève. Les matériaux ont des capacités de stockage de chaleur différentes, un peu comme les éponges n'ont pas toutes la même capacité d'absorber de l'eau. Plus une substance est capable d'accumuler de la chaleur, plus il faut de chaleur pour élever sa température et, bien sûr, plus elle libère de la chaleur lorsqu'elle refroidit. Cette fonction, la capacité thermique, dépend de la masse du solide et de sa chaleur spécifique, soit la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Celsius la température d'un kilogramme de matière, mesurée en J/kg·K.

Quand la chaleur commence à se diffuser à travers un solide (par exemple une paroi homogène), une partie de la chaleur chauffe d'abord le solide en question, et ce n'est que lorsque celui-ci atteint une certaine température que le flux de chaleur entrant devient égal au flux sortant. Lorsque cela se produit, on dit qu'un état d'équilibre a été atteint.

**FIGURE A.1-1** Transfert de chaleur par conduction



La chaleur nécessaire pour chauffer le solide reste stockée à l'intérieur ; elle en ressort en tout ou en partie lorsque le flux de chaleur entrant est réduit ou s'arrête. Le niveau de capacité d'un corps à accumuler et à diffuser de la chaleur et la rapidité de ces processus se mesurent à l'aide de son coefficient de diffusion  $\alpha$  :

$$\alpha = \lambda / \rho c \quad (\text{A.1-1}) \text{ où}$$

$\lambda$  = la conductivité thermique (en W/m·K) ;

$\rho$  = la masse volumique (en kg/m<sup>3</sup>) ;

$c$  = la capacité de chaleur spécifique, ou chaleur spécifique (en J/kg·K).

En un sens, le coefficient de diffusion thermique est la mesure de l'inertie thermique. La chaleur se déplace rapidement à travers une substance à forte diffusivité thermique, parce que la substance conduit la chaleur rapidement par rapport à sa capacité thermique volumétrique.

Pour chauffer un corps d'un volume  $V$  d'une température initiale  $t_1$  à une température finale  $t_2$ , il est nécessaire de fournir la quantité de chaleur  $q_a$ , donnée par :

$$q_a = c_p V (t_2 - t_1) \quad (\text{A.1-2}) \text{ où}$$

$q_a$  = la quantité de chaleur nécessaire au chauffage du corps (en J) ;

$V$  = le volume du corps chauffé (en m<sup>3</sup>).

La même quantité  $q_a$  va être libérée par le corps lorsqu'il sera refroidi jusqu'à la température  $t_1$ .

Lorsqu'un corps chauffé continuellement d'un côté a atteint l'état d'équilibre, le gradient de température à travers lui est linéaire, comme dans le cas du transfert de chaleur le long d'une barre de métal chauffée à une extrémité ou d'une face à l'autre d'un mur homogène (figure A.1-2). Le flux thermique  $Q_c$ , c'est-à-dire la quantité de chaleur transférée par unité de temps par conduction à travers une plaque plane (ou un mur homogène) d'aire  $S$  et d'épaisseur  $s$  est calculée par l'expression :

$$Q_c = \frac{(t_{s1} - t_{s2})}{R_s} S = \frac{\lambda}{s} (t_{s1} - t_{s2}) S \quad (\text{A. 1-3}) \text{ où}$$

$Q_c$  = le flux thermique (en W) ;

$t_{s1}$  et  $t_{s2}$  = les températures des faces 1 et 2, respectivement (en K) ;

$R_s = s/l$ , soit la résistance thermique du matériau qui constitue le mur (en  $m^2K/W$ ) ;

$S$  = la surface de la cloison ou du mur (en  $m^2$ ) ;

$l$  = la conductivité thermique du matériau (en  $W/mK$ ) ;

$s$  = l'épaisseur de la cloison ou du mur (en m).

Dans le cas d'une dalle multicouche (figure A.1-3), l'équation A.1-3 devient :

$$Q_c = \frac{(t_{s1} - t_{s2})}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n} S = \frac{(t_{s1} - t_{s2})}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}} S \quad (\text{A. 1-4})$$

Si, au contraire, comme c'est souvent le cas dans la réalité, le débit de chaleur à travers le mur n'est pas constant, parce que la température ambiante change de façon cyclique tout au long de la journée, la capacité thermique entre aussi en jeu, et le débit de chaleur à travers le mur varie au fil du temps de façons variées, en fonction de la résistance du matériau et de sa capacité thermique spécifique (figures A.1-4 et A.1-5).

On notera que la courbe du débit de chaleur réel est décalée dans le temps par rapport à la courbe de masse zéro. Le décalage de la crête se mesure en heures. Le débit de chaleur de pointe réel, lorsque la masse est prise en compte, est aussi réduit par l'effet de la masse, et cet effet s'ajoute à celui de la résistance thermique. Le ratio du débit de chaleur de pointe du mur réel par rapport à celui d'un mur idéal de masse nulle est appelé le facteur décrementiel.

FIGURE A.1-2 Conduction en état d'équilibre - dalle unicouche

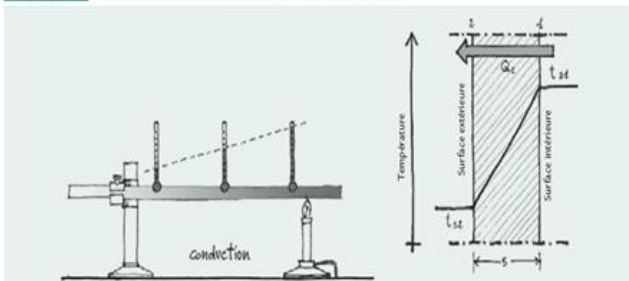
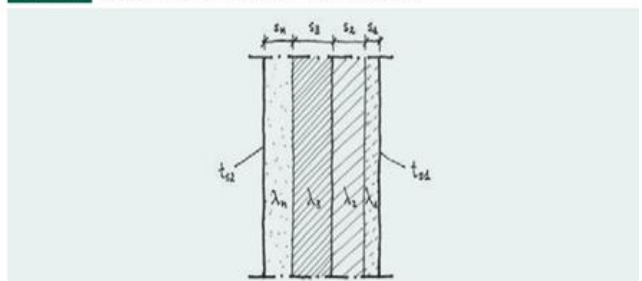


FIGURE A.1-3 Conduction en état d'équilibre - dalle multicouche



Pour une dalle homogène (pour les dalles multicouches, le calcul est plus complexe), le décalage  $\varphi$  et le facteur décrementiel  $\psi$  se calculent comme suit :

$$\varphi = 0,023 \cdot s \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{A. 1-5})$$

$$\psi = \exp\left(-0,003 \cdot s \sqrt{\frac{1}{\alpha}}\right) \quad (\text{A. 1-6}) \text{ où}$$

$\varphi$  = le décalage (en h) ;

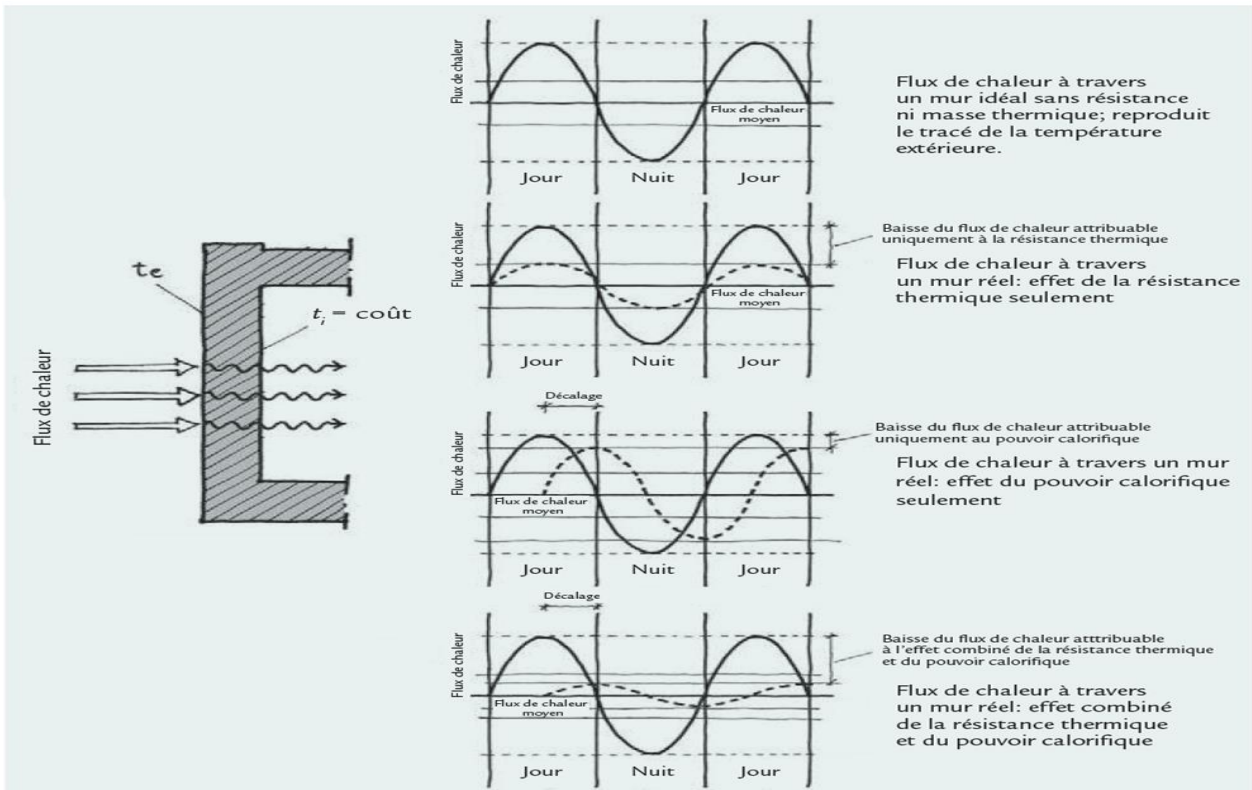
$s$  = l'épaisseur de l'élément (en m) ;

$\alpha$  = le facteur de diffusion du matériau =  $\lambda/\rho c$  (en  $m^2/s$ ) ;

$\psi$  = le facteur décrementiel, sans dimension.

Le tableau A.1-12 présente les propriétés thermiques des matériaux de construction les plus courants ; le tableau A.1-2 indique le décalage et le facteur décrementiel de quelques matériaux de construction courants.

**FIGURE A.1-4** La résistance thermique réduit le flux de chaleur maximal ; la capacité de chaleur le réduit et le retarde



### 3-1-2 Convection

Avec un fluide (liquide ou gazeux), le seul changement est que ses molécules, plutôt que ses atomes, se déplacent d'une façon complètement aléatoire, sans avoir de position obligatoire. De plus, le transfert thermique se fait lors des collisions entre les molécules. La température d'un fluide est une mesure de la vitesse moyenne des molécules dont il est composé. La chaleur spécifique des fluides varie beaucoup plus que celle des solides. Par exemple, avec la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température d'un litre d'eau, on pourrait élever de 1 °C la température de 3 000 litres d'air.

Quand un fluide s'écoule autour d'un solide plus chaud que lui, l'agitation thermique du solide est transmise aux molécules du fluide, dont la vitesse augmente, et le fluide est chauffé. Cependant, dans ce cas, le phénomène physique devient plus compliqué, parce que la partie la plus chaude du fluide, celle qui est en contact avec le solide, a une masse volumique inférieure à celle du reste du fluide et a donc tendance à « flotter », c'est-à-dire se déplacer vers le haut (effet de flottabilité). Au contraire, si le fluide est plus chaud que le solide, la partie en contact perd de sa chaleur et se refroidit ; sa masse volumique devient plus grande que celle du reste du fluide et elle a tendance à « couler », c'est-à-dire à se déplacer vers le bas (figure A.1-6). Contrairement à la conduction, ce phénomène, la convection naturelle, implique un mouvement de masse ; c'est ainsi que se fait le transfert de chaleur entre un solide et un fluide.

FIGURE A.1-5 Flux de chaleur à travers des murs de masses variées

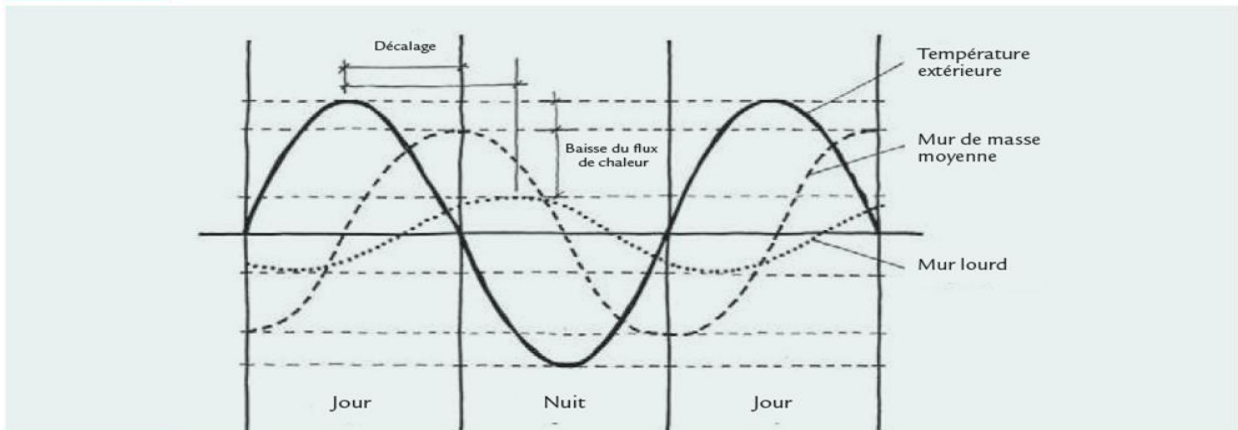
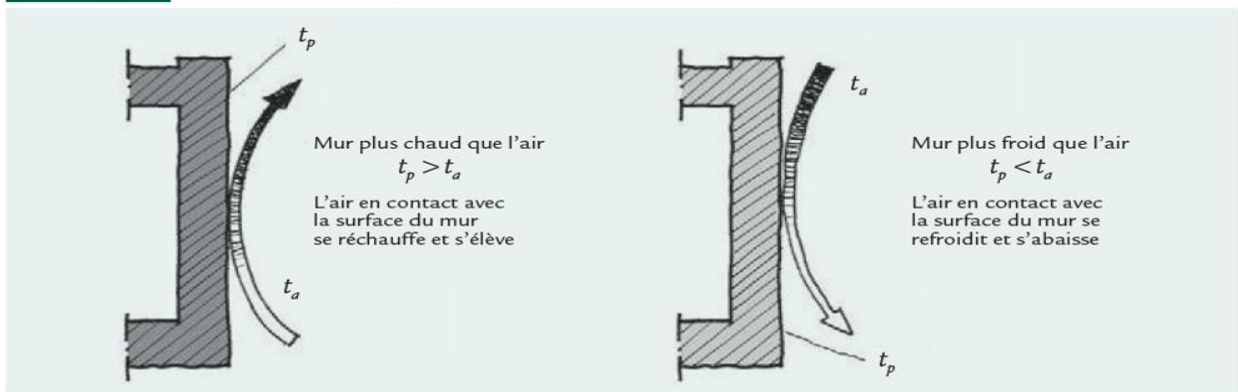


FIGURE A.1-6 Transfert thermique entre un mur et l'air ambiant par convection naturelle



La convection peut aussi être forcée. Ce phénomène se produit quand un fluide est déjà en mouvement au moment de toucher un solide ; si le fluide est de l'air, c'est notamment le cas quand il vente ou que l'air est mis en mouvement par un ventilateur. Le transfert de chaleur associé à la convection forcée est plus important qu'avec la convection naturelle.

Le flux thermique  $Q_c$ , c'est-à-dire la quantité de chaleur transférée par convection, par unité de temps, par un solide de superficie  $S$  à un fluide (ou vice versa) dépend de la température superficielle du solide  $t_s$ , de celle du fluide  $t_f$  et du coefficient de transmission thermique  $h_c$ , qui dépend lui-même du type de fluide et de sa température ; il se calcule à partir de l'expression suivante :

$$Q_c = h_c S (t_s - t_f) \quad (\text{A.1-7}) \text{ où}$$

$Q_c$  = le flux de chaleur transféré par convection (en W) ;

$h_c$  = le coefficient de transmission thermique par convection (en  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ).

### 3-2 Chaleur rayonnante

Nous sommes immergés dans des rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde s'étendent du rayonnement gamma aux ondes hertziennes (figure A.1-7). La gamme de longueurs d'onde pertinentes pour la performance énergétique des bâtiments est appelée la gamme thermique. Selon la théorie corpusculaire, chaque rayonnement d'une longueur d'onde donnée peut également être vu comme un groupe de photons voyageant dans l'espace et possédant une énergie qui est fonction de la longueur d'onde. Quand un photon associé au rayonnement électromagnétique frappe un atome, ce dernier change d'état à cause du transfert d'énergie. Cette énergie se manifeste sous la forme d'une agitation thermique accrue. D'autre part, l'agitation thermique des atomes et la transition des électrons



d'un niveau d'énergie à un autre provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique. Ainsi, tous les corps ont la capacité d'émettre et d'absorber un rayonnement électromagnétique.

Un corps capable d'absorber complètement le rayonnement électromagnétique qui le frappe est appelé un corps noir. Quand la température d'un corps s'élève, la quantité d'énergie radiante  $Q_r$  qu'il émet par unité de temps augmente très rapidement, en proportion de la quatrième puissance de la température absolue (en K), selon la loi de Boltzmann :

$$Q_r = \varepsilon \sigma S T^4 \quad (\text{A.1-8}) \text{ où}$$

$Q_r$  = le flux de chaleur rayonnante (en W) ;

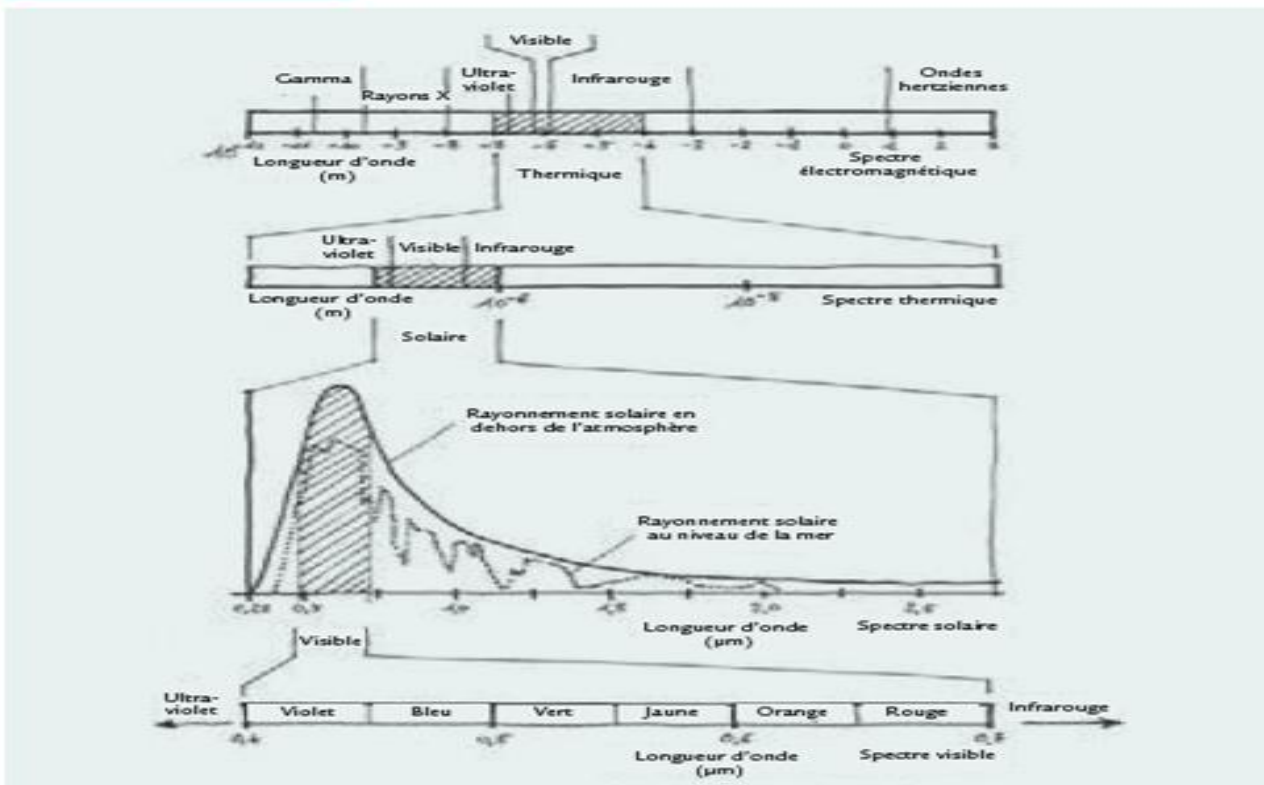
$\varepsilon$  = l'émissivité de la surface, soit le rapport du flux rayonnant émis par le corps réel à celui qu'émet un corps noir à la même température (donc, pour un corps noir,  $\varepsilon = 1$ ) (sans dimension);

$\sigma$  = la constante de Stefan-Boltzmann =  $5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  ;

$S$  = la superficie de la surface d'émission (en  $\text{m}^2$ ) ;

$T$  = la température absolue de la surface d'émission (en K).

**FIGURE A.1-7** Spectre électromagnétique



Un corps ne fait pas qu'émettre de la chaleur rayonnante ; il en reçoit des autres corps qui l'entourent et qui émettent eux aussi de la chaleur. Ce qui compte, donc, c'est l'équilibre énergétique net, c'est-à-dire la différence entre la chaleur rayonnante émise et la chaleur rayonnante reçue. Cet équilibre dépend non seulement de la température et de l'émissivité des corps, mais aussi de leur position, qui détermine les surfaces apparentes réciproques. Par exemple, le rayonnement électromagnétique que nous recevons d'une cheminée varie en fonction de la distance qui nous en sépare et de notre position face à la cheminée ou à côté de celle-ci ; cette variation découle de la surface apparente de la cheminée : plus la surface apparente est grande, plus nous recevons une grande quantité d'énergie rayonnante. C'est pourquoi une cheminée nous réchauffe davantage si nous sommes à proximité et en face d'elle.



Pour quantifier le phénomène, on utilise le facteur de vue  $F_{p,i}$  (aussi appelé facteur de forme), qui indique la proportion du rayonnement quittant la surface A qui atteint la surface B (figure A.1-8). Le rayonnement électromagnétique peut interagir avec la matière de quatre façons : la transmission, la réflexion, l'absorption et l'émission (figure A.1-9). La transmission se produit quand le rayonnement traverse un matériau ; la réflexion, quand le rayonnement est réfléchi par la surface ; l'absorption, quand le rayonnement est absorbé et converti en chaleur sensible ; l'émission, quand le matériau émet un rayonnement à partir de sa surface. La relation suivante se vérifie toujours :

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (\text{A.1-9}) \text{ où } \tau, \rho$$

et  $\alpha$  sont, respectivement, le coefficient de transmission à travers le matériau, le coefficient de réflexion et le coefficient d'absorption, sans dimension.

Pour la plupart des matériaux généralement utilisés dans la construction et la gamme des températures d'exploitation :

$$\varepsilon = \alpha \quad (\text{A.1-10})$$

Chaque matériau présente des caractéristiques spécifiques de transmission, de réflexion et d'absorption (figure A.1-11) par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident (figure A.1-10). Un carreau de verre, par exemple, a une haute capacité de transmission du rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde se trouve dans la gamme visible, tandis qu'une plaque de cuivre le bloque complètement ; une surface métallique polie a une faible capacité d'émission dans l'infrarouge lointain, mais une forte réflectivité dans le spectre visible.

FIGURE A.1-8 Exemples de variation du facteur de vue selon la position d'une surface p (en haut) et d'une personne par rapport aux surfaces d'un volume fermé

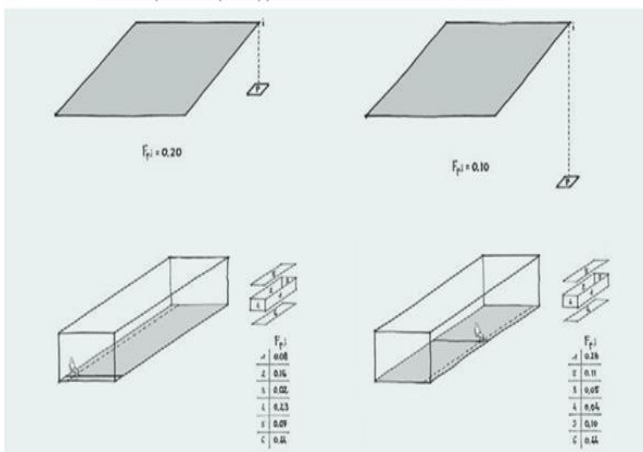
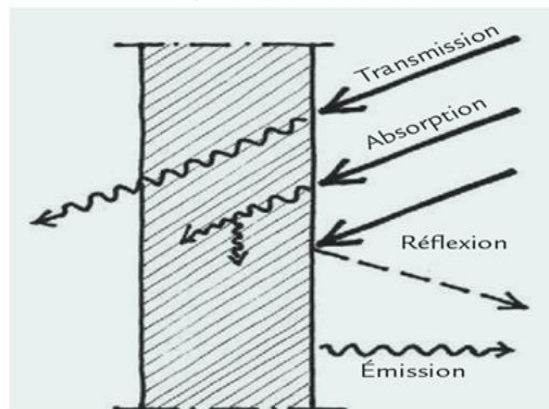


FIGURE A.1-9 Quatre types d'interaction possibles entre l'énergie rayonnante et la matière



Ce sont précisément les propriétés sélectives des matériaux, grâce auxquelles le verre laisse passer le rayonnement solaire, mais absorbe le rayonnement à ondes longues venant des objets, qui rendent possible ce qu'on appelle l'effet de serre. Étant donné que le rayonnement solaire entrant dans un espace fermé à travers le verre est en grande partie absorbé par les objets sur lesquels il tombe, ceux-ci sont chauffés, mais leur émission électromagnétique est bloquée par le verre, emprisonnant ainsi l'énergie dans l'espace. Le tableau A.1-3 présente les coefficients (ou facteurs) d'émission, de réflexion et d'absorption à diverses longueurs d'onde, pour la plupart des matériaux d'usage courant dans les bâtiments.

### 3-2-1 Emission d'ondes longues vers le ciel

L'atmosphère émet aussi un rayonnement d'ondes longues, et l'équilibre net de l'énergie du rayonnement,  $Q_{rs}$ , d'une surface horizontale visible du ciel :

$$Q_{rs} = Q_r - Q_{ciel} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{ciel}^4) S \quad (\text{A.1-11}) \text{ où}$$

$Q_{rs}$  = le flux d'énergie rayonnante net échangé par les surfaces (en W) ;

$Q_r$  = le flux d'énergie rayonnante émis par la surface (en W) ;

$Q_{ciel}$  = le flux d'énergie rayonnante émis par le ciel (en W) ;

$T_s$  = la température absolue de la surface d'émission (en K) ;

$T_{ciel}$  = température absolue du ciel (en K).

La température absolue du ciel clair peut être évaluée au moyen de l'expression suivante :

$$T_{ciel} = 0,0553 T_a^{1,5} \quad (\text{A.1-12}) \text{ où } T_a$$

est la température de l'air (en K) et le ciel a une couverture nuageuse nulle.

Pour le ciel nuageux, l'expression suivante peut être utilisée :

$$T_{ciel} = 0,0553 T_a^{1,5} + 2,625 cc \quad (\text{A.1-13}) \text{ où } cc$$

est la couche de nuages, exprimée en octas (*Cette unité est une estimation de la quantité du ciel couvert par des nuages. Un ciel clair correspond à 0 octa ; un ciel estival parsemé de cumulus, mais laissant voir beaucoup de bleu pourrait avoir une valeur de 1 à 3 octas ; un ciel couvert où des parcelles de bleu sont visibles a une couverture de 7 octas, et un ciel entièrement couvert, de 8 octas.*).

Si la surface n'est pas horizontale,  $Q_{rs}$  est donné par :

$$Q_{rs} = \sigma \varepsilon F_s (T_s^4 - T_{ciel}^4) + F_g (T_s^4 - T_g^4) S \quad (\text{A.1-13a}) \text{ où}$$

$Q_{rs}$  = le flux d'énergie rayonnante émis par la surface (en W) ;

$T_g$  = la température absolue du sol (en K) ;

$F_s$  = le facteur de forme (sans dimension) entre la voûte céleste et la surface, en fonction de l'angle d'inclinaison de la surface  $\psi$ , donné par :

$$F_s = \frac{1 + \cos(\Psi)}{2} \quad (\text{A 1-14})$$

$F_g$  = le facteur de forme entre la surface et le sol, donné par :

$$F_g = 1 - F_s \quad (\text{A.1-15})$$

### 3-2-2 Applications des échanges d'énergie rayonnante aux bâtiments

Le calcul des échanges d'énergie rayonnante est assez complexe, mais pour leurs applications aux bâtiments, c'est-à-dire les températures et des matériaux en jeu, une approche simplifiée peut être utilisée. Le gain ou la perte de chaleur rayonnante de grandes longueurs d'onde  $Q_r$  sur la surface des murs, des toits et des fenêtres peut se calculer au moyen de l'expression :

$$Q_r = h_r S (t_s - t_a) \quad (\text{A.1-16}) \text{ où}$$

$Q_r$  = le flux de chaleur rayonnante (en W) ;

$h_r$  = le coefficient de radiation (en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$S$  = la superficie de la surface (en  $\text{m}^2$ ) ;

$t_s$  = la température de la surface (en K ou en  $^\circ\text{C}$ ) ;

$t_a$  = la température de l'air (en K ou en °C).

### 3-2-3 Echanges de chaleur par convection et par rayonnement

Les échanges de chaleur par convection et par rayonnement qui ont lieu à la surface d'un mur, d'un toit ou d'une fenêtre peuvent se calculer conjointement en les combinant comme suit :

$$\begin{aligned} Q_c &= h_c S (t_s - t_a) \\ Q_r &= h_r S (t_s - t_a) \\ Q_{rs} &= Q_c + Q_r = (h_c + h_r) S (t_s - t_a) \\ Q_s &= h S (t_s - t_a) \end{aligned} \quad (\text{A. 1-17})$$

où

$Q_s$  = le flux de chaleur total (par rayonnement et par convection) à travers la surface (en W) ;

$h$  = le coefficient global de transfert de chaleur de la surface (en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ).

L'équation ci-dessus peut aussi s'écrire :

$$Q_s = \frac{t_s - t_a}{R_b} S \quad (\text{A. 1-18})$$

où  $R_b = 1/h$  est résistance de la surface au flux de la chaleur. Les valeurs de  $h$  sont données au tableau A.1-4.

### 3-2-4 Coefficient global de transfert de chaleur

Dans le cas d'une dalle homogène plane (par exemple un mur ou un toit) séparant deux espaces d'air de températures différentes, la combinaison des équations A.1-1 et A.1-4 donne le flux de chaleur  $Q$  à travers la dalle (*Par convention, le flux de chaleur  $Q$  est considéré comme positif lorsque la température intérieure est supérieure à la température extérieure, donc lorsque le flux de chaleur se fait de l'intérieur vers l'extérieur*) :

$$Q = \frac{t_o - t_i}{R_s + R_{hi} + R_{ho}} S = \frac{t_o - t_i}{R_t} S = k(t_o - t_i) S \quad (\text{A. 1-19})$$

où

$t_o$  = la température extérieure (en °C) ;  $t_i$  = la température intérieure (en °C) ;

$R_s = s/\lambda$  = la résistance thermique du matériau constituant la dalle [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ] ;

$R_{hi} = 1/h_i$   $h_i$  = le coefficient de transmission thermique de la surface intérieure (en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$R_{ho} = 1/h_o$   $h_o$  = le coefficient de transmission thermique de la surface extérieure (en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$k = 1/R_t$  = le coefficient de transmission thermique global (en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ).

Le coefficient de transmission thermique global  $k$  (aussi appelé simplement « coefficient  $k$  ») caractérise le rendement thermique d'un composant de construction (paroi, toit, verre, etc.) ; il s'agit de la quantité de chaleur qui traverse une unité de surface du composant, pour un écart de température de 1 K (ou 1 °C) entre l'air intérieur et l'air extérieur ; plus la valeur est basse, plus le rendement thermique est bon.

Dans le cas d'une dalle multicouche, l'équation A.1-5 devient :

$$Q = \frac{t_0 - t_1}{R_{hi} + R_{l1} + R_{l2} + \dots + R_{ln} + R_{h0}} S = \frac{t_0 - t_i}{R_t} S = k(t_0 - t_i) S \quad (\text{A. 1-20})$$

où  $R_{l1} = s_1/\lambda_1$ ,  $R_{l2} = s_2/\lambda_2$ ,  $R_{ln} = s_n/\lambda_n$  sont les résistances thermiques des couches 1, 2, ... n, et  $R_t$  est la résistance thermique totale de la dalle.

La façon générale la plus courante de calculer le coefficient de transmission thermique global d'une paroi multicouche est la suivante :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{c} + \frac{1}{h_0}} \quad (\text{A. 1-21}) \text{ où}$$

$k$  = le coefficient de transmission thermique global (en  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$C$  = la conductance d'une cavité ou de l'espace d'air (voir le tableau A.1-5).

Pour évaluer le flux de chaleur instantané à travers une dalle dans des conditions sans équilibre, le décalage et le facteur décrémental doivent être pris en compte. Le flux de chaleur instantané  $Q(t)$  à travers une dalle au moment  $\tau$  se calcule comme suit :

$$Q(t) = Q_m + \psi * k * S * (t_{o(\tau-\varphi)} - t_{i(m)}) \quad (\text{A. 1-22}) \text{ où}$$

$Q(t)$  = le flux de chaleur instantané (en W) ;

$Q_m = k \times S (t_{o(m)} - t_{i(m)})$  est le flux moyen de chaleur pour le jour en question (en W) ;

$\psi$  = le facteur décrémental ;

$t_{o(\tau-\varphi)}$  = la température de l'air extérieur au moment  $\tau - \varphi$  (en  $^\circ\text{C}$ ) ;

$\varphi$  = le décalage ;

$t_{o(m)}$  = la température moyenne de l'air extérieur (en  $^\circ\text{C}$ ) ;

$t_{i(m)}$  = la température moyenne de l'air intérieur (en  $^\circ\text{C}$ ).

### 3-2-5 Température de l'air ambiant

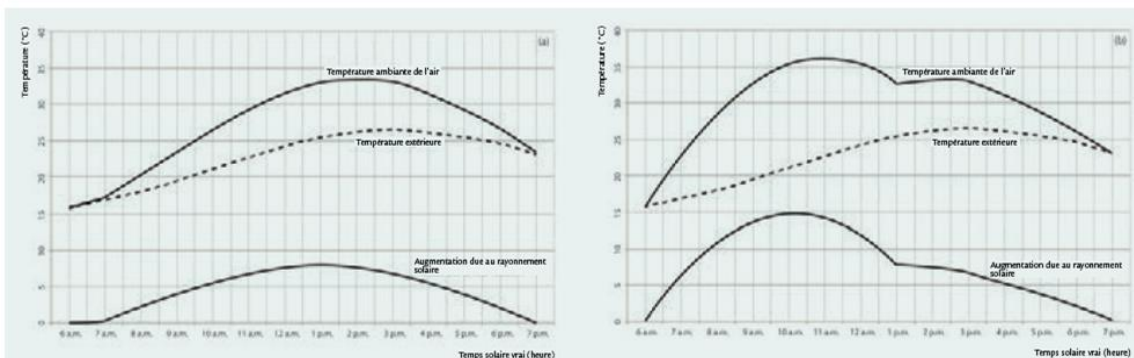
Lorsque les surfaces d'un bâtiment sont atteintes par le rayonnement solaire, un changement dans le flux de la chaleur se produit.

Ce changement vient du fait que la surface extérieure se réchauffe, et l'augmentation de la température dépend du rayonnement solaire incident et du facteur d'absorption de la surface.

Un changement similaire dans le flux de chaleur pourrait se produire en l'absence de rayonnement solaire, si la température de l'air extérieur s'élevait jusqu'à une certaine valeur.

L'augmentation de la température de l'air qui produit le même changement de flux de chaleur que l'effet combiné du rayonnement solaire et de la température réelle de l'air extérieur est appelée la température de l'air ambiant (figure A.1-12).

**FIGURE A.1-12** Températures de l'air ambiant pour Nairobi pendant le mois le plus chaud (mars).  $R_{so} = 0,05 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  et  $\alpha = 0,6$  ; (a) mur face au sud ; (b) mur face à l'est



Ainsi :

$$Q_{sa} = Q + \alpha I_s \quad (\text{A.1-23})$$

où

$Q_{sa} = h (t_{sa} - t_p)$  = le débit du flux de chaleur à travers la surface découlant de la température de l'air ambiant (en W) ;

$Q = h (t_o - t_p)$  = le débit du flux de chaleur attribuable à la température réelle de l'air extérieur (en W) ;

$\alpha I_s$  = le débit du flux de chaleur attribuable au rayonnement solaire (en W) ;

$h$  = le coefficient de transmission thermique de la surface (en W/ m<sup>2</sup>·K) ;

$t_p$  = la température de la surface (en °C) ;

$t_{sa}$  = la température de l'air ambiant (en °C) ;

$t_o$  = la température de l'air extérieur (en °C) ;

$\alpha$  = le coefficient d'absorption de la surface, sans dimension ;

$I_s$  = le rayonnement solaire incident total sur la surface (en W).

*Ainsi (En fait, le rayonnement dégage une certaine chaleur dans l'infrarouge lointain. Il n'en a pas été tenu compte dans le bilan énergétique, car il s'agit d'une très petite quantité comparativement au rayonnement solaire.) :*

$$h (t_{sa} - t_p) = h (t_o - t_p) + \alpha I_s \quad (\text{A.1-24})$$

$$t_{sa} = t_o + \alpha I_s / h \quad (\text{A.1-25})$$

Pour calculer le flux de chaleur instantané à travers une dalle soumise au rayonnement solaire, l'équation A.1-22 devient :

$$Q_{(\tau)} = Q_{msa} + \psi \times k \times S \times (t_{sa}(\tau - \varphi) - t_{sa(m)}) \quad (\text{A.1-26})$$

où

$Q_{msa} = k \times S (t_{sa(m)} - t_{i(m)})$  est le flux moyen de chaleur pour le jour en question (en W) ;

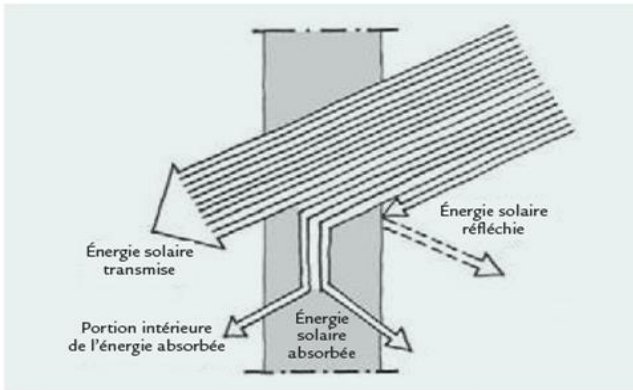
$t_{sa(m)}$  = la température de l'air ambiant (en °C) ;

$t_{sa(\tau - \varphi)}$  = la température de l'air ambiant au moment  $\tau - \varphi$  (en °C).

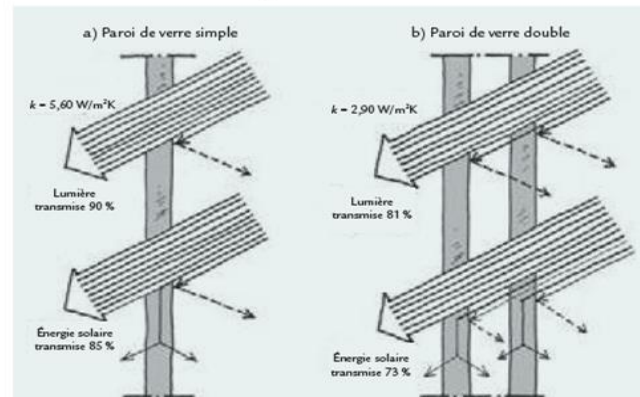
### 3-2-6 Verre et rayonnement solaire

Une partie du rayonnement solaire incident sur une surface de verre est réfléchiée, une autre, absorbée et le reste est transmis ; une partie de l'énergie absorbée retourne à l'extérieur et le reste est diffusé en raison du chauffage du verre (figure A.1-13). Il faut noter que les fractions de l'énergie solaire et de la lumière transmises ne correspondent pas (figure A.1-14). Ce phénomène s'explique par le fait que le verre transmet toutes les longueurs d'onde du spectre solaire et pas seulement celles du spectre visible (figure A.1-15).

**FIGURE A.1-13** Équilibre de l'énergie solaire sur une paroi de verre simple



**FIGURE A.1-14** Énergie et lumière transmises à travers une paroi de verre simple et double



Le verre produit ce qu'on appelle un effet de serre, en raison de sa sélectivité au rayonnement : il transmet les ondes courtes et les ondes de l'infrarouge proche (le rayonnement de longueur d'onde inférieure à  $2,5 \mu\text{m}$ ), mais il bloque les ondes longues. Les ondes courtes de l'infrarouge proche passent à travers le verre et sont absorbées par les surfaces et les objets à l'intérieur.

Ces objets se réchauffent et réémettent des ondes longues, ce qui signifie que le rayonnement thermique (d'une longueur d'onde supérieure à  $2,5 \mu\text{m}$ ) est retenu à l'intérieur, bloqué par le verre, et génère ainsi une élévation de la température.

La transformation de l'énergie solaire en énergie thermique est un facteur ambivalent : d'une part, elle favorise le chauffage de la pièce par l'énergie solaire dans les climats froids ; d'autre part, elle entraîne un apport d'énergie qui doit être évacué pour éviter la surchauffe dans le contexte des climats et saisons chauds.

### 3-2-6-1 Équilibre énergétique de la fenêtre

L'équilibre énergétique d'un carreau de verre (figure A.1-16) est donné par l'équation suivante :

$$Q_{gl} = (A + B + C) S_g \quad (\text{A.1-27}) \text{ où}$$

$Q_{gl}$  = le flux d'énergie total à travers le verre ;

$A$  = le flux de rayonnement solaire par mètre carré transmis à travers le verre (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$B$  = la fraction du flux d'énergie solaire incident absorbée par le verre et transmise à l'intérieur (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$C$  = le flux thermique par mètre carré associé à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$S_g$  = la surface du carreau de verre (en  $\text{m}^2$ ).

FIGURE A.1-15 Spectre solaire et spectre visible

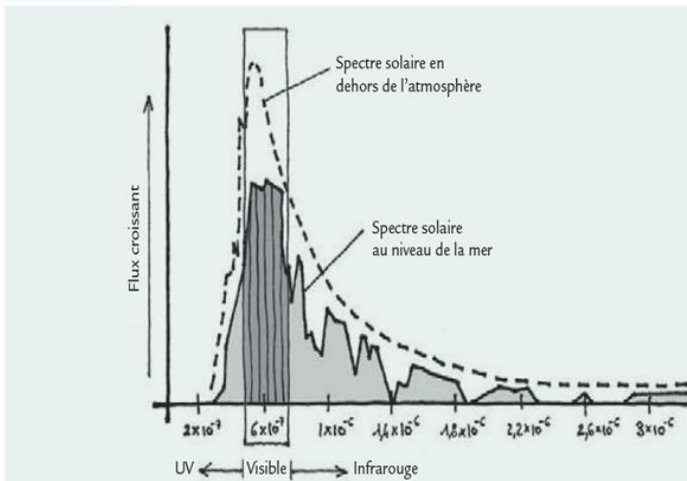
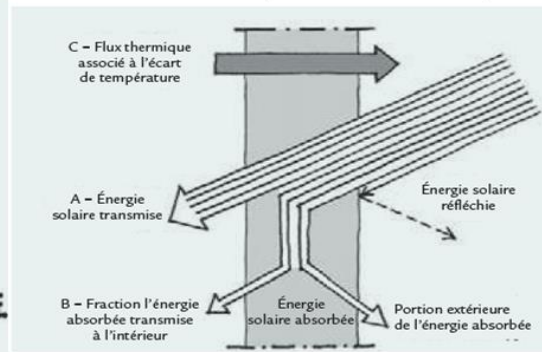


FIGURE A.1-16 Équilibre énergétique d'un carreau de verre (température intérieure > température extérieure)



L'équilibre d'énergie instantané peut s'écrire comme suit :

$$Q_{gl} = \tau I_t + N_i \alpha I_t + k_{gl}(t_o - t_i)S_g \quad (\text{A. 1-28})$$

où les termes  $\tau I$ ,  $N_i \alpha I$  et  $k_{gl}(t_o - t_i)$  correspondent, respectivement, à  $A$ ,  $B$  et  $C$  ;  $\tau$  = le facteur de transmission solaire du verre, fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire (figure A.1-17) ;

$I_t$  = l'éclairement énergétique solaire incident sur la vitre (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$N_i$  = la fraction de l'énergie solaire absorbée par la vitre et diffusée dans l'environnement intérieur par le rayonnement dans l'infrarouge lointain et la convection (Pour un verre clair de 3 mm,  $N_i$  peut être considéré comme étant constant et égal à 0,26) donnée par le rapport  $k_{gl}/h_o$  ;

$k_{gl}$  = le coefficient de transmission thermique global du verre (en  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$h_o$  = le coefficient de transmission thermique de la surface extérieure (en  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$\alpha$  = le coefficient d'absorption du verre ;

$t_o$  = la température de l'air extérieur (en  $^\circ\text{C}$ ) ;

$t_i$  = la température de l'air intérieur (en  $^\circ\text{C}$ ).

Étant donné que les termes  $A$  et  $B$  sont liés au rayonnement solaire, alors que  $C$  existe même en son absence, l'équation A.1-28 peut s'écrire comme suit :

$$Q_{gl} = GCS + k_{gl}(t_o - t_i) \times S_g = CGCS \times I_t + k_{gl}(t_o - t_i) \times S_g \quad (\text{A.1-29})$$

où  $GCS$  est le gain de chaleur solaire à travers la fenestration et  $CGCS$ , le coefficient de gain de chaleur solaire, le rapport sans dimension du gain de chaleur solaire au rayonnement solaire incident :

$$GCS = CGCS \times I_t \quad (\text{A.1-30})$$

Le coefficient de gain de chaleur solaire ( $CGCS$ ) est une caractéristique de chaque type de fenestration et varie en fonction de l'angle incident.

Un autre paramètre utilisé pour caractériser les fenestrations est le coefficient d'ombrage ( $CO$ ), soit le rapport du gain de chaleur solaire à travers la fenestration au gain de chaleur solaire à travers 3 mm de verre clair à une incidence normale :



$$CO = \frac{CGCS \text{ de la fenestration}}{GCS \text{ du verre de référence}} = \frac{CGCS \text{ de la fenestration}}{0,87}$$

Si un pare-soleil (intérieur ou extérieur) est utilisé pour protéger la fenêtre du soleil, le coefficient d'ombrage correspondant peut être calculé. Dans le cas des rideaux ou des stores, le fabricant fournit généralement la valeur du CO (voir le tableau A.1-6, qui présente un exemple de fiche technique d'un fabricant). Le tableau A.1-7 présente certaines valeurs caractéristiques du CGCS et du CO correspondant à un rayonnement solaire incident près de la normale.

### 3-3 Chaleur latente

L'air que nous respirons contient une certaine quantité de vapeur d'eau, qui joue un rôle non négligeable dans l'équilibre énergétique d'un bâtiment. En effet, il faut 4,18 kJ de chaleur pour élever de 1 °C la température de 1 kg d'eau ; ainsi, pour faire passer 1 kg d'eau de 10 à 100 °C, 376 kJ de chaleur sont nécessaires. Cependant, il faut 2 270 kJ pour transformer ce même kilogramme d'eau en vapeur. Le changement de phase nécessite toujours une quantité de chaleur plus élevée, à cause des modifications qui s'opèrent dans la structure moléculaire. Comme on l'a vu plus haut, c'est cette quantité qui est appelée la chaleur latente. On peut déduire de ce qui précède que, s'agissant de la ventilation, pour transformer l'air chaud et humide venant de l'extérieur en air ayant une température et un degré d'humidité confortables, la plus grande quantité d'énergie nécessaire est associée au processus de déshumidification, qui consiste en la condensation d'une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air. En fait, pour condenser la vapeur, il faut soustraire la même quantité d'énergie qui est nécessaire à sa vaporisation : 2 270 kJ par kilogramme d'eau condensée, alors qu'il suffit de 1,2 kJ pour refroidir 1 m<sup>3</sup> d'air sec de 1 °C. Le diagramme psychrométrique sert à évaluer l'effet des transformations possibles de l'air humide.

#### 3-3-1 Air et diagramme psychrométrique

Dans un bâtiment, la chaleur latente entre en jeu, parce que le refroidissement de l'air pour la climatisation et la nécessité de maintenir l'humidité relative en deçà de 70 % (la limite au-delà de laquelle le confort thermique n'est pas assuré) impliquent obligatoirement la condensation d'une certaine quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Les interconnexions entre la température de l'air et l'humidité sont résumées dans un diagramme psychrométrique (figure A.1-18). Les valeurs de la température du thermomètre sec (la température de l'air) sont indiquées sur l'axe des x et l'humidité spécifique, c'est-à-dire la quantité (en grammes) d'humidité contenue dans un kilogramme d'air sec, sur l'axe des y ; la courbe la plus élevée est celle de la saturation, qui indique le lieu géométrique des points où les valeurs de la température du thermomètre sec et de l'humidité absolue sont telles que l'humidité relative est égale à 100 %, et la vapeur d'eau présente dans l'air commence à se condenser (point de rosée). À ce point, la température du thermomètre sec et la température humide sont égales, la température humide étant définie comme celle qu'aurait une parcelle d'air refroidie jusqu'à saturation (humidité relative de 100 %) par évaporation de l'eau dans cette parcelle, la chaleur latente étant fournie par cette parcelle. Pour une parcelle d'air donnée à une pression et à une température du thermomètre sec connues, la température humide correspond à des valeurs uniques d'humidité relative, de température au point de rosée et d'autres propriétés. Le diagramme représente les propriétés de l'air dans une pièce ou à l'extérieur par une paire de données, par exemple la température du thermomètre sec et l'humidité spécifique, la température humide et l'humidité relative, ou encore la température du thermomètre sec et la température humide. Avec une seule paire de ces valeurs, il est possible de lire toutes les autres valeurs, y compris l'enthalpie spécifique (l'énergie contenue dans 1 kg d'air aux conditions données, qui correspond à la somme de la chaleur sensible et de la chaleur latente).

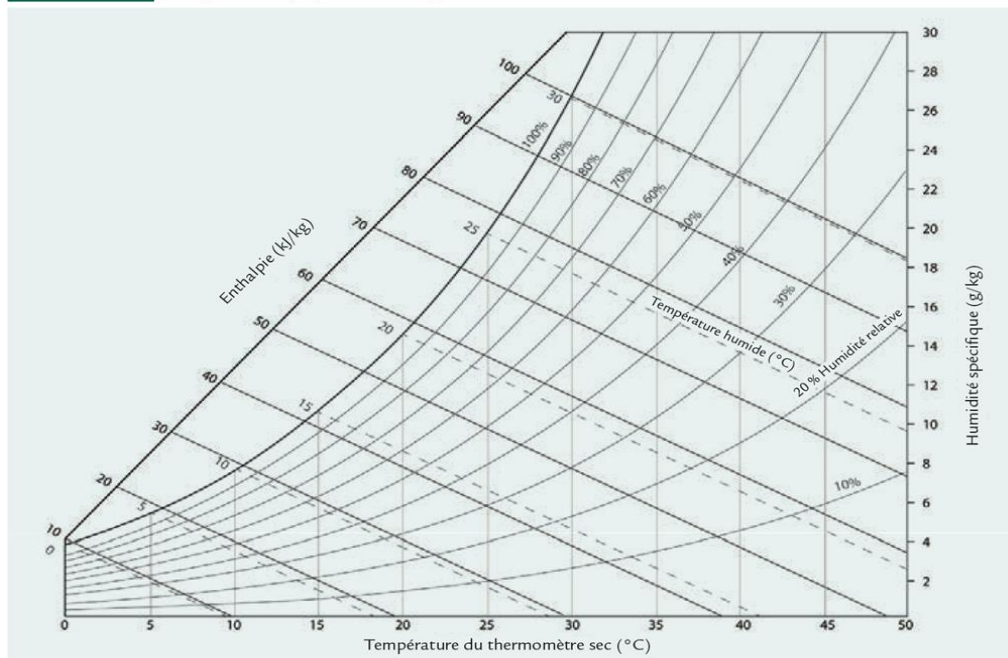


Par conséquent, un point marqué dans le diagramme représente les conditions de l'air pour un moment et un lieu donnés. Si un air extérieur à 32 °C et à 60 % d'humidité relative est refroidi à 26 °C, le processus qui en résulte est représenté dans le diagramme de gauche de la figure A.1-19. On appelle ce processus le refroidissement sensible. Comme on peut le voir, l'humidité relative qui en résulte est trop élevée pour être confortable.

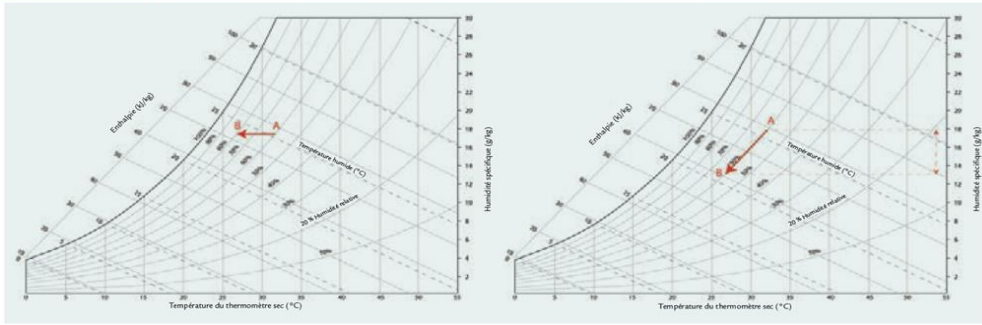
Pour maintenir cette humidité relative à une valeur acceptable, il faut extraire de la vapeur d'eau de l'air, comme l'indique la transformation illustrée dans le diagramme de droite de la figure A.1-19, où environ 5 grammes d'eau par kilogramme d'air sec sont condensés. La transformation qui se produit en fait dans les systèmes de climatisation n'est pas celle qu'indique le diagramme de droite de la figure A.1-19 ; elle consiste plutôt à refroidir l'air jusqu'à la courbe de saturation, puis à se déplacer le long de cette courbe jusqu'au point où la quantité requise de vapeur est condensée pour atteindre l'humidité relative désirée (diagramme de gauche de la figure A.1-20). Si on évalue le changement d'enthalpie nécessaire aux deux transformations, c'est-à-dire l'énergie à fournir pour 1 kg d'air traité, on remarque que dans la climatisation, l'extraction de chaleur latente (c'est-à-dire la condensation de la vapeur d'eau) nécessite plus d'énergie que l'extraction de chaleur sensible (diagramme de droite de la figure A.1-20).

Enfin, une dernière transformation se produit afin d'extraire la chaleur de l'environnement, au prix d'une augmentation de l'humidité relative ; c'est ce qu'on appelle l'humidification adiabatique, qui a lieu lorsqu'on vaporise de l'eau dans le flux d'air. En s'évaporant, l'eau absorbe de la chaleur provenant de l'air ; celui-ci se refroidit et son humidité augmente (figure A.1-21). Dans les climats très chauds et secs, ce moyen permet d'améliorer les conditions de confort dans un espace clos.

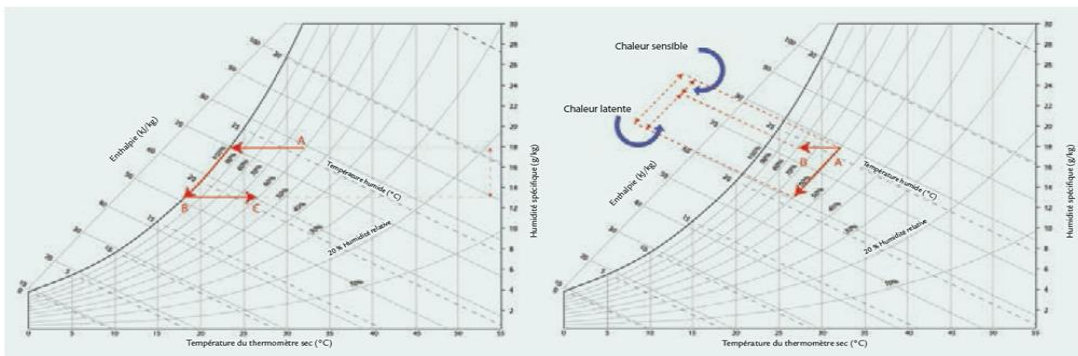
FIGURE A.1-18 Diagramme psychrométrique au niveau de la mer



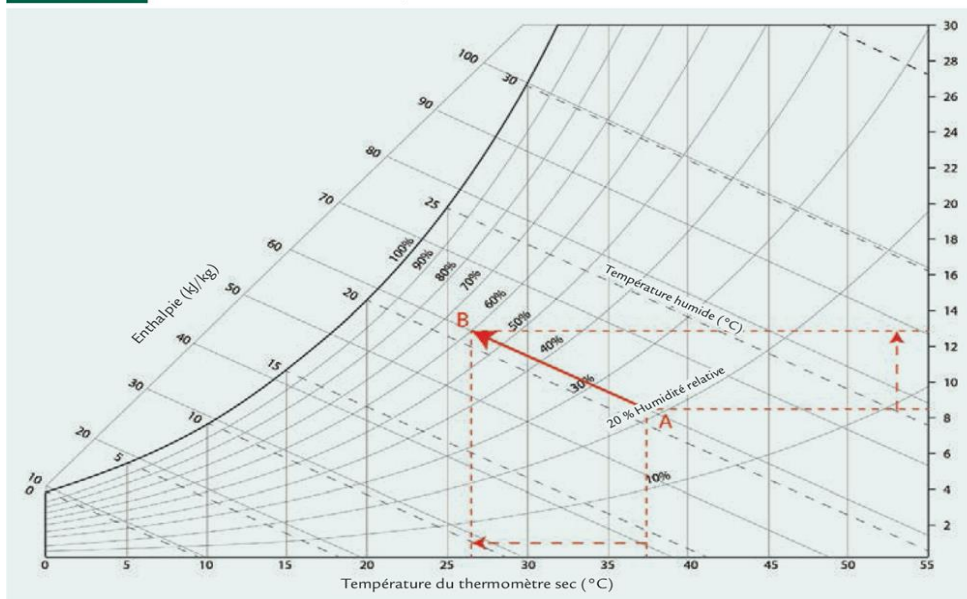
**FIGURE A.1-19** Refroidissement sensible (à gauche) ; refroidissement et déshumidification (à droite)



**FIGURE A.1-20** Refroidissement sensible et déshumidification : processus réel (à gauche) ; énergie nécessaire au refroidissement sensible et à la déshumidification (à droite)

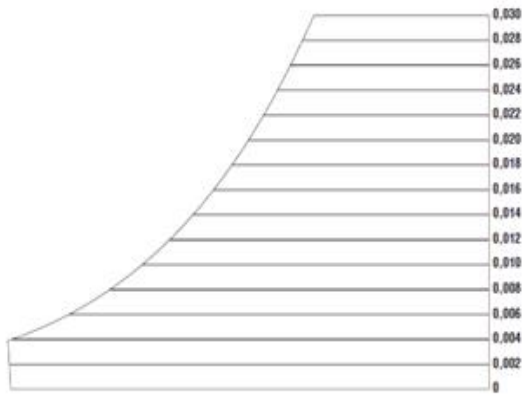


**FIGURE A.1-21** Humidification adiabatique

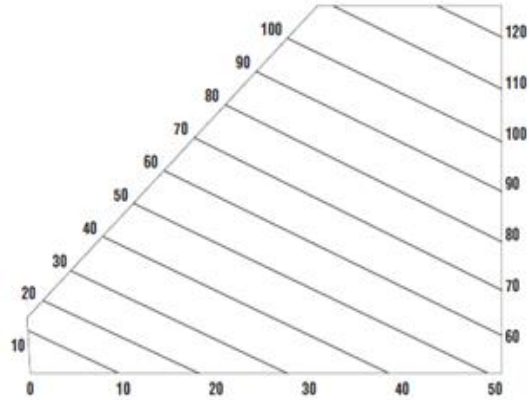


### REMARQUE

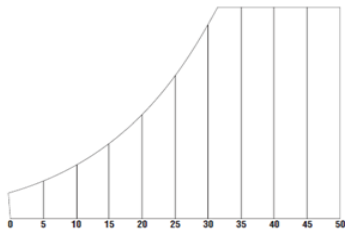
Le diagramme est une représentation graphique des propriétés thermodynamiques de l'air humide. Il se compose de huit éléments principaux :



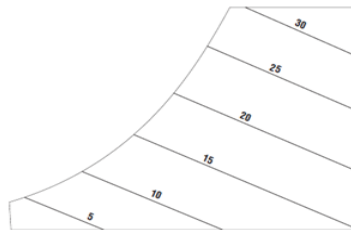
1. Les valeurs de taux d'humidité sont représentées verticalement sur l'échelle de droite, partant de 0 kg/kg d'air sec jusqu'à 0,03 kg/kg d'air sec.



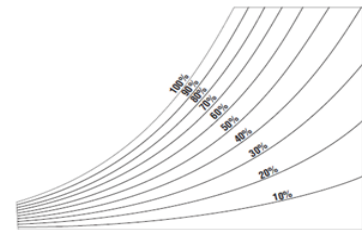
2. L'enthalpie, ou chaleur totale, est représentée le long de droites obliques, à intervalles de 10kJ/kg d'air sec et allant de gauche à droite et de haut en bas.



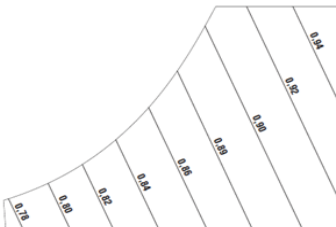
3. Les températures sèches sont représentées par des droites verticales à intervalles de 1°C.



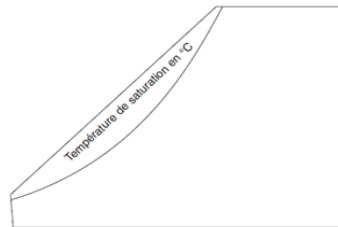
4. Les températures humides sont représentées par des droites obliques pratiquement parallèles aux lignes d'enthalpie. Elles sont tracées à intervalles de 1°C.



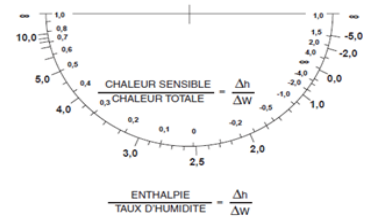
5. Les courbes d'humidité relative sont tracées de gauche à droite à intervalles de 10%. Elles commencent en bas à 10% et se terminent en haut à la courbe de saturation (100%).



6. Les lignes de volume indiquant le nombre de mètres cubes par kilogramme d'air sec sont tracées à intervalles de 0,01m<sup>3</sup>.



7. La région diphasique comporte une zone hachurée étroite, à gauche de la zone de saturation correspondant à un mélange en équilibre d'eau condensée et de vapeur.

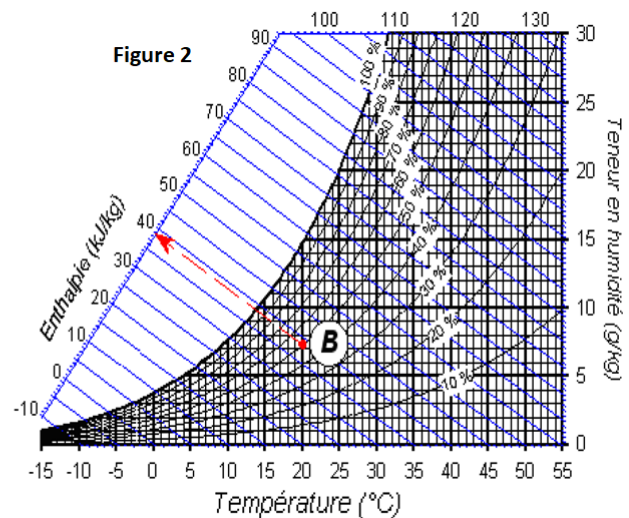
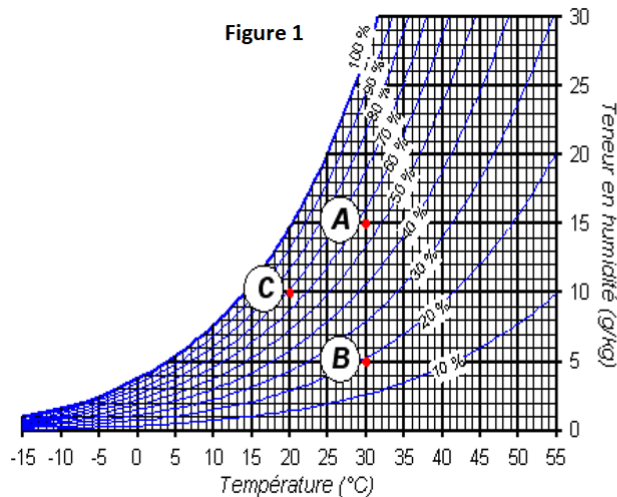


8. Le rapporteur en haut à gauche du diagramme présente une double échelle. L'une correspond au rapport des différences d'enthalpie. L'autre indique le rapport entre la chaleur sensible et la chaleur totale. Le rapporteur donne l'angle de la droite le long de laquelle se déroule un processus.

## EXERCICES D'APPLICATION

### Exercice 1 (Figure 1)

1- Quelle est la température de l'air représenté par le point B du diagramme ci-dessous (Figure 1) ? Quelle est sa teneur en humidité (humidité absolue) ? Quelle est son hygrométrie (humidité relative) ?



- 2- L'air représenté par le point C du diagramme est-il plus humide que l'air représenté par le point A ?
- 3- Quelle quantité de vapeur d'eau (en [gvapeur/kgair sec]) faut-il ajouter à l'air représenté par le point C du diagramme pour qu'il atteigne la saturation à température constante ?
- 4- Quelle est l'hygrométrie de l'air si sa température est de 30 [°C] et sa teneur en humidité de 13 [gvapeur/kgair sec] ?
- 5- Quelle est la teneur en humidité de l'air si sa température est de 18 [°C] et son hygrométrie de 60 [%] ?
- 6- Quelle est la température de l'air si sa teneur en humidité est de 8 [gvapeur/kgair sec] et son hygrométrie de 40 [%] ?

### Exercice 2 (Figure 2)

- 1- Quelle est l'enthalpie de l'air si sa température est de -5 [°C] et son hygrométrie de 70 [%] ? Quelle est l'enthalpie de l'air si sa température est de 20 [°C] et son hygrométrie de 50 [%] ?
- 2- Que devient l'enthalpie de l'air représenté par le point B sur ce diagramme si sa teneur en humidité augmente de 5 [g/kg] ? Que devient l'enthalpie de l'air représenté par le point B sur ce diagramme si sa température augmente de 10 [°C] ?
- 3- On veut réchauffer et humidifier de l'air dans les conditions suivantes :
  - Caractéristiques initiales : température de 10 [°C], teneur en humidité de 4 [g/kg] ;
  - Caractéristiques finales : température de 35 [°C], teneur en humidité de 7 [g/kg]. Déterminer le supplément d'enthalpie à fournir à l'air.

### Exercice 3 (Figure 3)

#### Remarques

- **La température de rosée** est la température à partir de laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser quand l'air se refroidit. Son étude permet d'étudier les problèmes de condensation sur les parois, les tuyauteries, les équipements, etc..



- **La température humide** est la température mesurée à l'aide d'un thermomètre légèrement ventilé et entouré d'un chiffon imbibé d'eau. Elle est toujours inférieure (ou égale) à la température  $t$  de l'air, car l'évaporation de l'eau imbibant le chiffon provoque un refroidissement du bulbe du thermomètre. Sa mesure était autrefois le moyen d'évaluer l'humidité des ambiances. On rencontre encore cette notion dans les documentations techniques de certains équipements (tours de refroidissements, climatiseurs, ventilo-convecteurs etc.).

- 1- Quelle est la température de rosée de l'air si sa température est de 25 [°C] et son hygrométrie de 50 [%] ? Quelle est sa teneur en humidité ? Si on refroidit cet air jusqu'à 8 [°C], quelle proportion de la vapeur qu'il contient se condensera ?
- 2- Quelle est la température humide de l'air si sa température est de 26 [°C] et sa teneur en humidité de 8 [g/kg] ?
- 3- Quelle est l'hygrométrie de l'air si sa température est de 35 [°C] et sa température humide de 27 [°C] ?
- 3- Comparer la température humide et la température de rosée pour de l'air à 15 [°C] contenant 6 grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air sec.

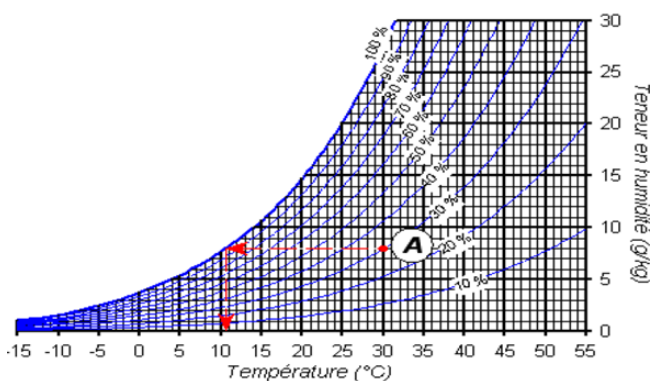
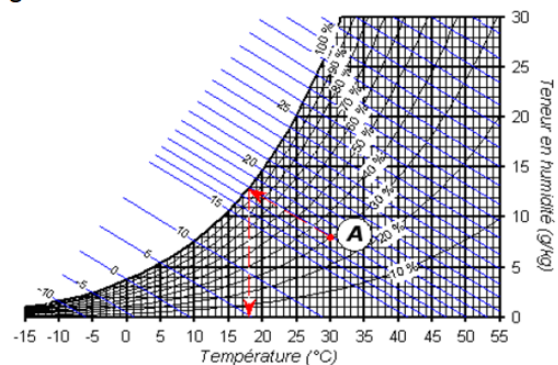


Figure 3



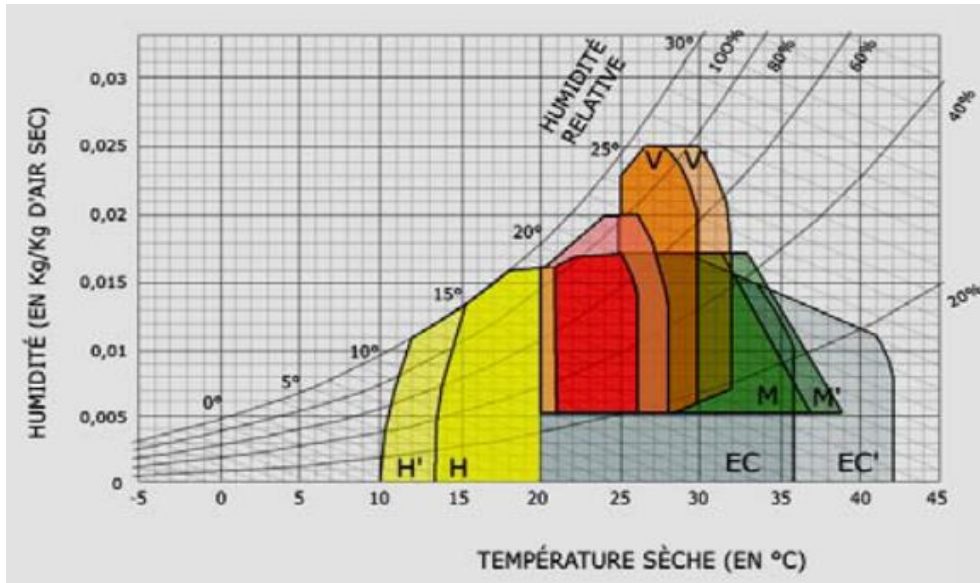
### 3-3-2 Les méthodes de conception en climat chaud à partir de modélisation des zones de confort hygrothermique

Les diagrammes bioclimatiques se sont des méthodes pour analyser le climat d'une région en utilisant les données climatiques et cela permet de prédire la zone de confort humain, ils proposent également, des moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent rétablir la zone de satisfaction thermique.

L'intérêt principal du diagramme bioclimatique réside sur la possibilité d'avoir des réponses qui peuvent aider les concepteurs dans leurs tâches, en d'autres termes, les moyens architecturaux de contrôle climatique.

#### 3-3-2-1 Définition du diagramme bioclimatique

Le diagramme bioclimatique est construit sur un diagramme psychrométrique (appelé aussi diagramme de l'air humide).



**Figure II.17 : Diagramme bioclimatique du bâtiment : Limites de la zone du confort thermique (rose), de la zone d'influence de la ventilation à 0,5m/s (VV' orangé) et de l'inertie thermique (MM' vert), de la zone d'influence du refroidissement évaporatif (EC et EC' gris), de la zone de non-chauffage par la conception solaire passive (H et H' jaune).**

Sur ce diagramme sont représentées :

- la zone de confort hygrothermique tracée pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (en général 0,1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été ;
- l'extension de la zone de confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air de 0,1 à 1,5m/s ;
- la zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire et à l'utilisation d'enduits clairs ;
- la zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire et à l'utilisation d'enduits clairs que l'on cumule avec une ventilation nocturne
- la zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation ;
- la zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air ;
- la zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment ;

Par défaut, on peut donc repérer d'un seul coup d'œil les conditions hygrothermiques extérieures qui, quoi qu'on fasse au niveau de l'architecture, nécessitent le recours à un système de chauffage ou de climatisation (zones sans couleurs sur le diagramme).

Le diagramme bioclimatique n'est pas un outil de dimensionnement précis du projet, comme peuvent l'être des outils de simulation numériques mais il constitue bien un guide pour aider l'architecte à prendre les bonnes décisions en phase esquisse.

Sous réserve que les conditions du confort thermo hygrométrique soient bien celles relatives à l'activité, à la tenue vestimentaire et à la culture des futurs occupants du bâtiment en projet, le

diagramme bioclimatique est un outil dont la validité est universelle. Il peut donc être utilisé indifféremment en climat tempéré ou tropical.

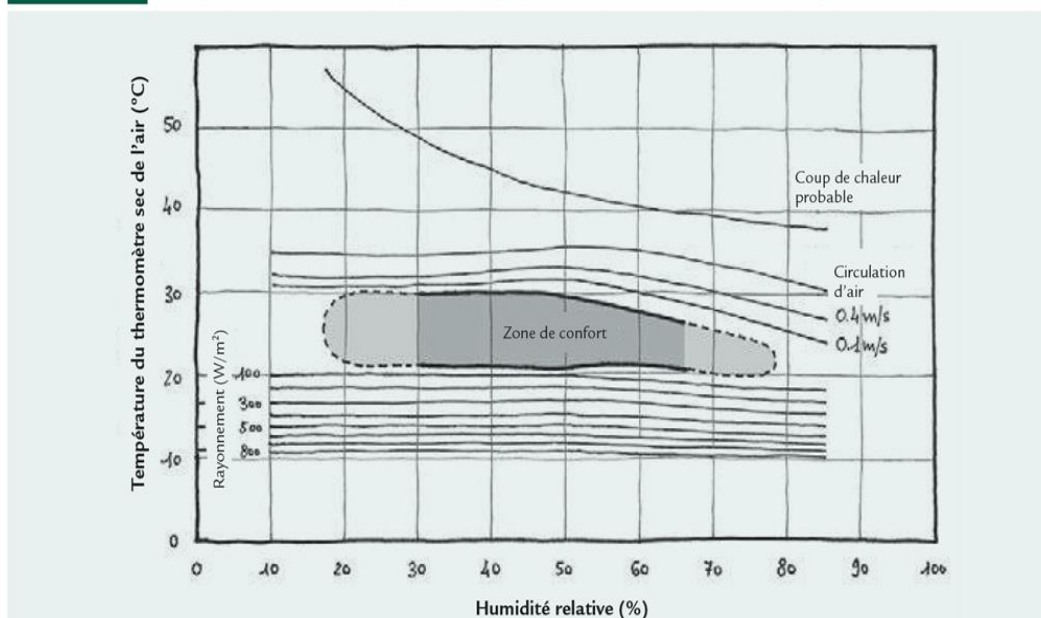
Parmi les outils les plus connus dans ce domaine, on peut citer le diagramme bioclimatique d'Olgay, celui de Givoni et les tables de Mahomey et la méthode de Szokolay. Mais seules les méthodes d'Olgay et de Givoni seront abordées dans le cadre de ce cours.

### 3-3-2-2 Le diagramme bioclimatique d'Olgay

Dans les années 1950, afin d'aider le concepteur à choisir les stratégies de conception les mieux adaptées aux conditions climatiques locales, Victor Olgay a mis au point ce qu'il a appelé un « diagramme bioclimatique ».

Le diagramme bioclimatique d'Olgay (figure 3.2-1) est un simple outil d'analyse du climat d'un lieu donné.

FIGURE 3.2-1 Diagramme bioclimatique d'Olgay, converti en mesures métriques



Il indique les zones de confort humain à partir de la température et de l'humidité ambiantes, de la température radiante moyenne, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et du refroidissement par évaporation. Le diagramme porte la température du thermomètre sec en ordonnée et l'humidité relative en abscisse. La température du thermomètre sec et l'humidité d'un lieu correspondent donc à un point sur le diagramme. Si ce point se trouve dans la zone de confort, alors les conditions sont confortables. Pour tout point se trouvant hors de cette zone, des mesures correctives doivent être prises pour restaurer la sensation de confort. Par exemple, pour une température du thermomètre sec de 25 °C et une humidité relative de 50 %, aucune mesure n'est nécessaire, car ce point se trouve dans la zone de confort. S'il se trouvait au-dessus de cette zone, la climatisation serait nécessaire ; au-dessous, on aurait besoin de chauffage. Par exemple, à une température du thermomètre sec de 15 °C et une humidité relative de 50 %, le besoin se chiffre à 500 W/m<sup>2</sup> de rayonnement solaire. Si le point est plus élevé que le périmètre de la zone de confort, il y a lieu d'augmenter la circulation d'air. Par exemple, avec une température du thermomètre sec de 30 °C et une humidité relative de 70 %, il faut un vent de 0,4 m/s pour atteindre la zone de confort. Lorsque la température est élevée et l'humidité relative basse, la circulation d'air ne suffit pas. Si le point est situé au-dessous du périmètre de la zone de confort, le

chauffage est nécessaire pour contrecarrer la faible température du thermomètre sec. Si le point est situé à gauche de la zone de confort, un chauffage radiant ou une climatisation est nécessaire. Ainsi, le diagramme bioclimatique donne de l'information sur les conditions d'obtention du confort à un moment précis. Les décisions concernant la conception peuvent être prises en conséquence.

### 3-3-2-2 Le diagramme bioclimatique de Givoni

En 1969, Givoni a mis au point un diagramme bioclimatique pour les bâtiments en corrigeant certaines insuffisances du diagramme d'Olgay. Alors qu'Olgay appliquait son diagramme aux conditions extérieures, le diagramme de Givoni repose sur la température intérieure du bâtiment et propose des stratégies de conception pour adapter l'architecture au climat. Le diagramme utilise comme base un diagramme psychrométrique sur lequel sont tracées les données de température et d'humidité (mensuelle, journalière ou horaire) pour un site donné.

#### *Remarques :*

- La façon la plus fiable d'utiliser le diagramme bioclimatique de Givoni consiste à y reporter des données horaires, car les moyennes quotidiennes et mensuelles égalisent trop les valeurs réelles de température et d'humidité relative et que les conditions les plus inconfortables ne sont pas consignées, même si elles sont fréquentes. Par exemple, dans un climat où les variations quotidiennes de température et d'humidité sont importantes, les moyennes quotidiennes ou mensuelles ne représentent pas correctement les conditions climatiques réelles pour ce qui est du niveau de confort résultant et, partant, des stratégies de conception à mettre en œuvre.
- Climate Consultant, <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu>.

Le diagramme de Givoni identifie une technique appropriée de chauffage et de climatisation, sur la base des conditions climatiques extérieures.

Il existe plusieurs types de diagrammes de Givoni, adaptés à des climats précis et proposant de nombreuses stratégies (figure 3.2-2). De plus, un logiciel permet de reporter sur le diagramme, à partir d'une base de données climatiques, des valeurs de température et d'humidité, propose les meilleures stratégies et présente les améliorations des conditions de confort correspondant à chaque stratégie.

Le diagramme de Givoni comprend six zones associées à des stratégies de conception passive (figure 3.2-2) :

1. la zone de confort ;
2. la zone d'aération naturelle ;
3. la zone de refroidissement par évaporation ;
4. la zone de masse thermique élevée ;
5. la zone de masse thermique élevée et ventilation nocturne ;
6. la zone de chauffage passif.

Trois autres zones correspondent à des stratégies différentes, soit la climatisation, l'humidification et le chauffage artificiel, qui ne sont pas des stratégies de conception passives et ne seront, par conséquent, pas abordées ici. Les données climatiques (température et humidité relative extérieures)



peuvent être reportées directement dans le diagramme, ce qui nous permet de vérifier à laquelle des six zones ces conditions correspondent.

Les zones du diagramme sont définies comme suit :

### Zone de confort

Dans les conditions définies pour cette zone, on suppose qu'une personne se trouve dans des conditions garantissant le confort thermique dans l'espace intérieur (figure 3.2-3). Selon Givoni, on peut remarquer que le confort thermique d'une personne peut être assuré à l'intérieur d'une plage de valeurs d'humidité relative (de 20 % et 80 %) et de températures de l'air (de 20 à 26 °C). Lorsque la température de l'air intérieur s'approche de 20 °C, l'effet du vent doit être empêché, car il pourrait être une source d'inconfort. Lorsque la température de l'air s'approche de 26 °C, le contrôle du rayonnement solaire est nécessaire pour éviter la surchauffe ; le confort thermique est censé être voisin de 26 °C si les personnes présentes portent une tenue légère et s'il y a un peu de ventilation.

FIGURE 3.2-2 Diagramme bioclimatique de Givoni

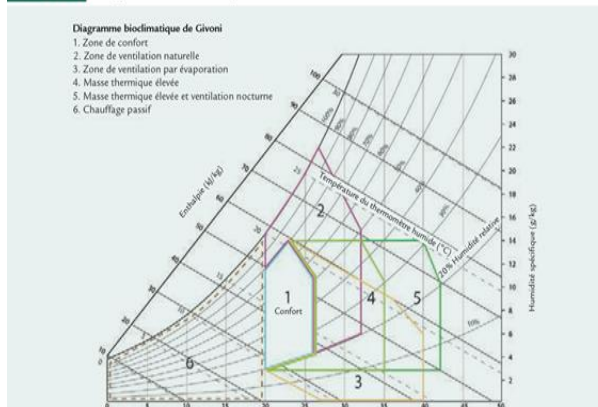
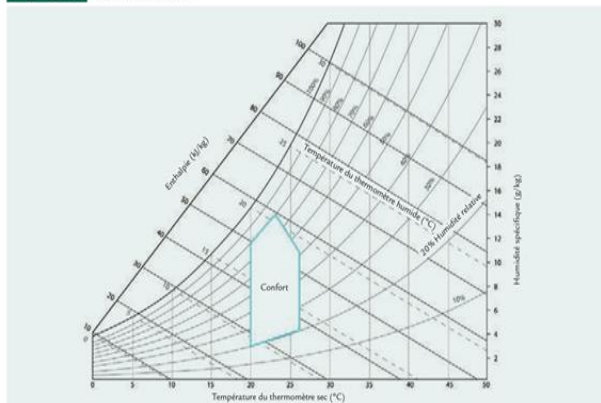


FIGURE 3.2-3 Zone de confort



### Zone de ventilation naturelle

Si la température intérieure d'une pièce est supérieure à 26 °C ou que l'humidité relative est plutôt élevée, la ventilation naturelle peut améliorer le confort thermique (figure 3.2-4). Dans les climats chauds et humides, la ventilation transversale est la stratégie la plus simple à adopter si la température intérieure est presque égale à la température extérieure. Givoni postule que la vitesse maximale permmissible de l'air intérieur est d'environ 2 m/s. La ventilation maintient ainsi le confort jusqu'à une limite de température extérieure de 32 °C.

FIGURE 3.2-4 Zone de ventilation naturelle

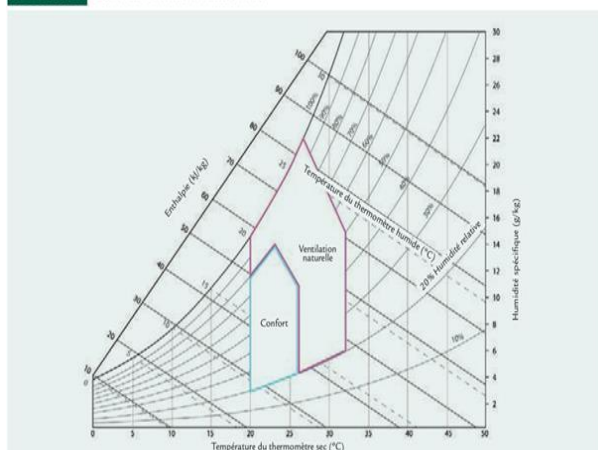
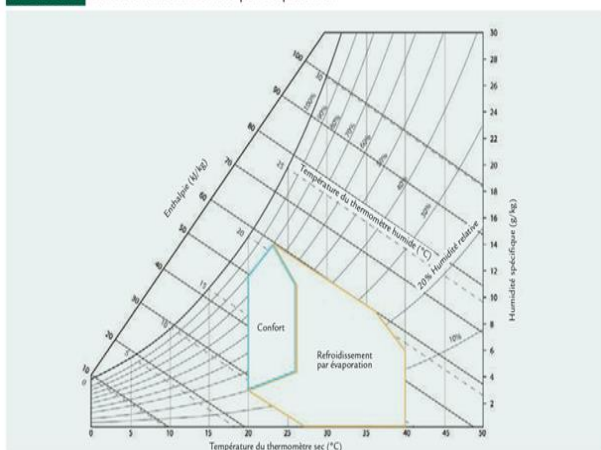


FIGURE 3.2-5 Zone de refroidissement par évaporation



Lorsque la température est nettement supérieure à 26 °C et que l'humidité relative est inférieure à 50 %, le refroidissement nocturne est plus approprié que la ventilation diurne. Ce scénario s'observe dans les régions chaudes et arides, où la température diurne est comprise entre 30 et 36 °C et la température nocturne est inférieure à 20 °C. Dans ces conditions, la ventilation diurne n'est pas appropriée parce qu'elle réchaufferait le bâtiment. La meilleure stratégie consiste à limiter la ventilation pendant la journée pour réduire l'apport d'air chaud dans le bâtiment et d'utiliser la ventilation nocturne en exploitant l'air plus froid pour rafraîchir l'intérieur.

### ***Zone de refroidissement par évaporation***

L'évaporation de l'eau peut réduire la température de l'air tout en augmentant l'humidité relative d'un espace habitable. Le refroidissement direct des pièces par évaporation nécessite un bon taux de ventilation pour éviter l'accumulation de vapeur d'eau.

Dans le processus de refroidissement par évaporation, la température et l'humidité de l'air changent en fonction d'une température humide et d'une enthalpie constante. Il n'y a pas de changement dans le contenu calorifique, l'énergie étant simplement convertie de la forme sensible à la forme latente (figure 3.2-5).

### ***Zone de masse thermique élevée***

L'utilisation d'une masse thermique élevée dans un bâtiment peut réduire la variation de la température intérieure comparativement à la température extérieure, en réduisant les crêtes. Cette solution peut être utilisée avec succès dans les régions où la température et l'humidité relative sont dans les limites de la zone de masse thermique élevée (figure 3.2-6). L'équilibrage de la température intérieure est attribuable aux phénomènes suivants :

- la chaleur emmagasinée dans la structure du bâtiment pendant la journée est libérée dans l'espace intérieur pendant la nuit, lorsque la température extérieure s'abaisse ;
- de façon complémentaire, la structure thermique se refroidit pendant la nuit et reste froide pendant une grande partie de la journée, tempérant ainsi la température intérieure diurne.

Outre la masse thermique de l'enveloppe, on peut aussi exploiter la masse thermique provenant du sol.

FIGURE 3.2-6 Zone de masse thermique élevée pour le refroidissement

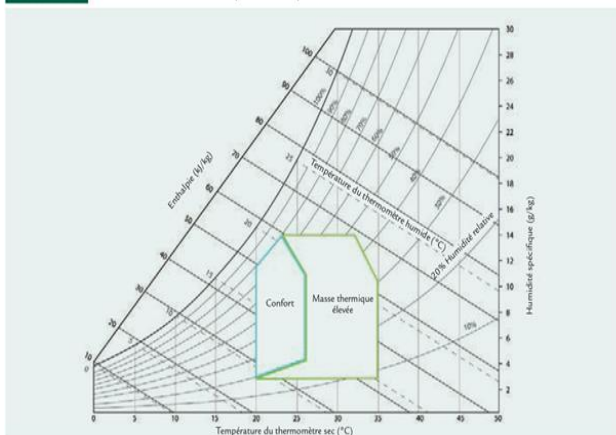
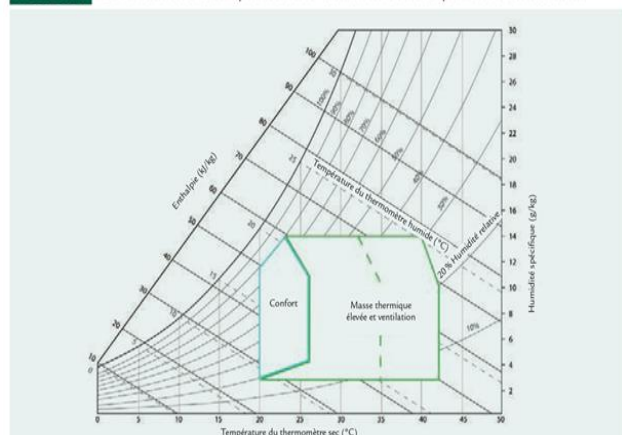


FIGURE 3.2-7 Zone de masse thermique élevée et ventilation nocturne pour le refroidissement



### ***Zone de masse thermique élevée et ventilation nocturne***

La masse thermique peut être utilisée avec une ventilation nocturne pour produire un refroidissement passif (figure 3.2-7).

La nuit, on fait circuler l'air extérieur à travers le bâtiment, ce qui en refroidit l'enveloppe. La fraîcheur stockée dans l'enveloppe du bâtiment est alors disponible pour compenser les gains de chaleur le lendemain et conserver les températures près des limites de confort. La ventilation nocturne est surtout efficace dans un climat chaud et aride, où la température diurne fluctue beaucoup et les températures nocturnes chutent sous les 20 °C. La combinaison de la masse thermique et de la ventilation nocturne peut servir à réduire ou éliminer le besoin de refroidissement artificiel. Cette solution peut s'appliquer aux régions où les conditions de température et d'humidité relative sont dans les limites de la zone de masse thermique élevée et ventilation nocturne.

### Zone de chauffage solaire passif

L'utilisation du chauffage solaire passif est surtout appropriée pour les régions où les températures saisonnières de l'air sont inférieures à 20 °C (figure 3.2-8). On recommande alors une isolation thermique du bâtiment à cause des pertes de chaleur, ainsi que l'installation de fenêtres vitrées de taille appropriée qui font face au soleil pendant la période plus froide de la journée.

FIGURE 3.2-8 Zone de chauffage passif

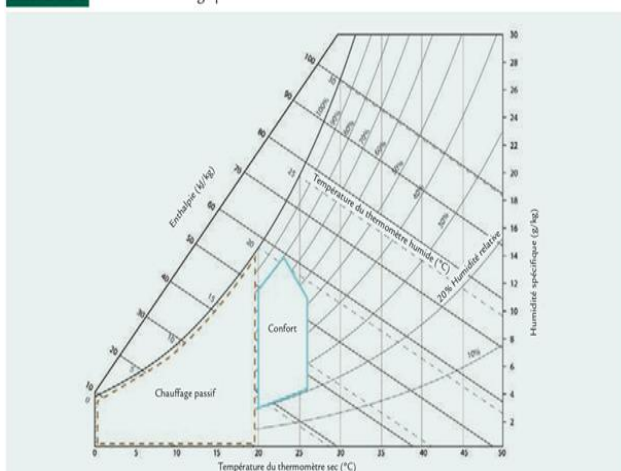
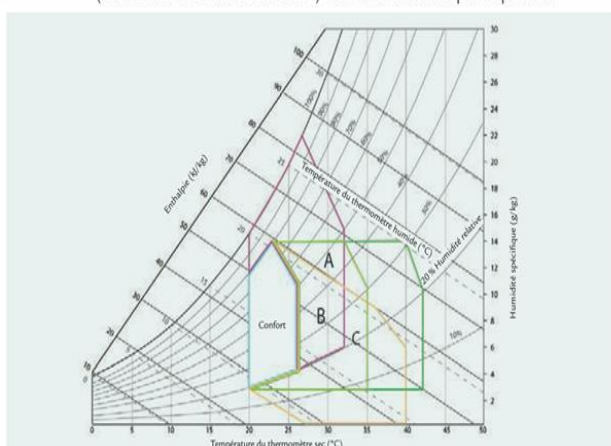


FIGURE 3.2-9 Intersection entre les zones d'aération naturelle, de masse thermique élevée (combinée à la ventilation nocturne) et de refroidissement par évaporation



### 3-3-2-3 Stratégies combinées

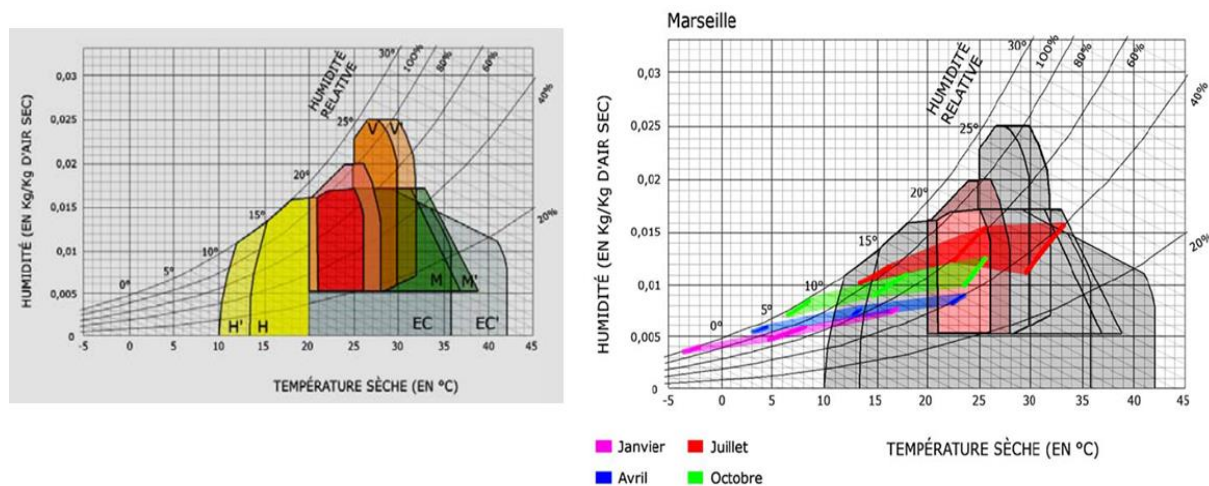
On trouve certaines intersections entre les zones d'aération naturelle (2), de refroidissement par évaporation (3), de masse thermique élevée (4) et de ventilation nocturne (5), comme l'illustre la figure 3.2-9. La région A représenté l'intersection entre la zone d'aération naturelle et la zone de masse thermique élevée (combinée à la ventilation nocturne). Pour cette situation, les deux stratégies peuvent être adoptées en même temps. Dans le même ordre d'idées, dans la région B, on peut exploiter à la fois les avantages de la masse thermique élevée (associée à une ventilation nocturne) et ceux du refroidissement par évaporation. Dans la région C, les trois stratégies peuvent être adoptées séparément ou ensemble.

### 3-3-2-4 Utilisation du diagramme bioclimatique

Le diagramme bioclimatique étant universel, ce qui lui donne un caractère local est la superposition d'un profil hygrothermique d'une journée-type de la station météorologique représentative du site où l'on construit. Tout peut être imaginé : une journée froide d'hiver, une journée chaude d'été, une journée ensoleillée, une journée sans soleil, une journée ventée...etc.

Pour les périodes d'été, il est intéressant d'utiliser le profil moyen des 5 jours consécutifs les plus chauds, de manière à voir quelles sont les solutions architecturales susceptibles de "couvrir" le risque lié à cette probabilité météorologique.

On peut aussi reporter l'ensemble des valeurs d'un mois de l'année, comme dans l'exemple suivant.



**Figure II.18 : Diagramme bioclimatique avec les profils thermo-hygométriques de la station de Marignane**

Les zones de couleur reportées sur le diagramme psychrométrique sont constituées par les situations thermo-hygométriques (couples température-humidité relative) de tous les jours d'un même mois (janvier, avril, juillet, octobre).

Dans le cas de Marseille, on voit sur le diagramme :

- Qu'il est nécessaire de chauffer en Janvier (limites H et H' franchies)
- Qu'il n'est pas nécessaire de chauffer en avril avec une conception bioclimatique et qu'il en est de même en octobre (majeure partie de profil en deçà des limites H et H') ;
- Qu'il n'est pas nécessaire de climatiser en juillet avec une inertie thermique et une protection solaire suffisantes ainsi qu'une ventilation nocturne durant certaines nuits (limites M et M' non franchies).
- Que l'on peut aussi utiliser les ressources du refroidissement évaporatif (EC et EC')
- Qu'en définitive, la climatisation n'est pas une nécessité dans les conditions climatiques de Marignane, sauf si les solutions architecturales mises en jeu par les limites indiquées par le diagramme bioclimatique ne peuvent être mises en œuvre.

### 3-3-2-5 Application du diagramme bioclimatique de Givoni au climat de l'Afrique de l'Est

#### *Climat chaud et humide (Dar es-Salaam, Tanzanie)*

Selon le diagramme bioclimatique de Givoni (figure 3.2-10), dans un climat chaud et humide comme celui de Dar es-Salaam, la ventilation naturelle et la protection solaire sont les stratégies de conception passive les plus efficaces pour l'amélioration du confort thermique.



FIGURE 3.2-10 Diagramme bioclimatique de Givoni pour Dar es-Salaam

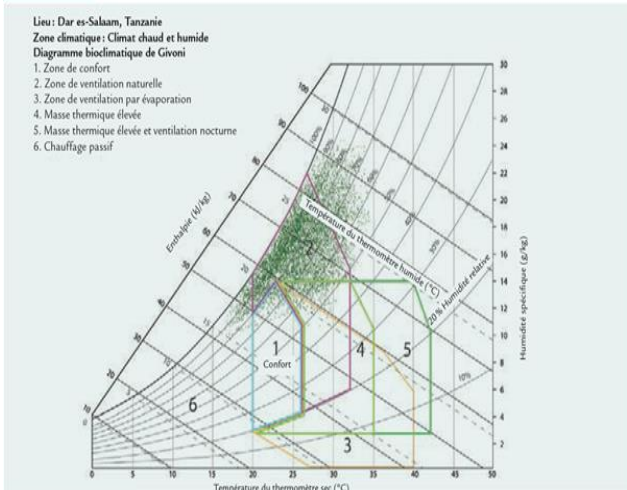
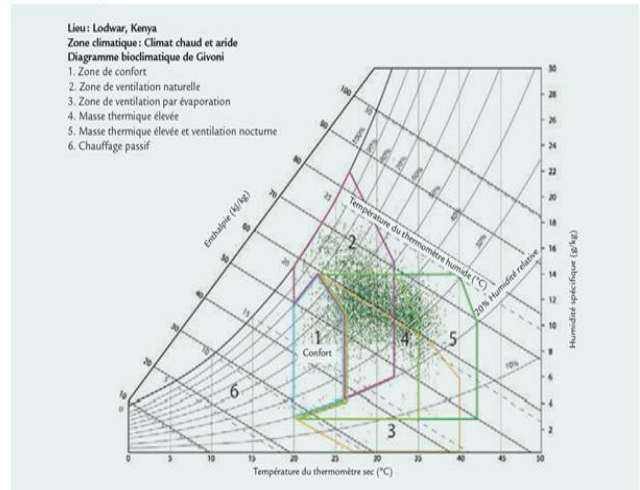


FIGURE 3.2-11 Diagramme bioclimatique de Givoni pour Lodwar



### Climat chaud et aride (Lodwar, Kenya)

Dans une zone climatique chaude et aride comme à Lodwar (figure 3.2-11), la ventilation naturelle (nocturne), la masse thermique élevée, la protection solaire et le refroidissement par évaporation sont les stratégies de conception passive les plus efficaces pour l'amélioration du confort thermique.

### 4- Equilibre énergétique du bâtiment

Au cours de la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle, on croyait toujours que la chaleur était un fluide dit calorique, et un corps chaud était vu comme un réservoir plein de ce fluide. L'analogie avec le fluide le plus courant, l'eau, était complète. En effet, tout comme l'eau coule d'un réservoir à un autre s'il y a une différence d'altitude, la chaleur se diffuse d'un corps à un autre s'il y a une différence de température. Il s'est avéré, plus tard, que cette analogie ne tient la route que jusqu'à un certain point, et le concept de fluide calorique a été abandonné. L'analogie de l'eau, cependant, est utile dans la mesure où elle nous aide à comprendre l'équilibre d'énergie d'un bâtiment.

Si nous imaginons un seau dont le fond et les côtés sont percés de trous (figure A.1-22a), nous savons que si on le remplit d'eau et qu'on veut le maintenir à un certain niveau, il va falloir fournir autant d'eau qui se perd. Pour maintenir une certaine température à l'intérieur d'un bâtiment pendant une période froide, étant donné qu'il y a des pertes de chaleur (les trous dans le seau), il faut fournir autant de chaleur que le corps en perd, ce que fait le système de chauffage qui fournit la chaleur nécessaire pour compenser les pertes (figure A. 1-23a).

Les « trous » du bâtiment, en hiver, sont les pertes de chaleur par transmission à travers les murs, les fenêtres, les portes et le toit, les pertes dues à l'infiltration de l'air à travers les portes et fenêtres, et celles qui sont associées à la ventilation qui garantit l'apport d'air frais dans la pièce. En fait, il n'y a pas que des pertes de chaleur dans cette relation entre le bâtiment et l'environnement : il y a aussi des apports solaires, comme si (pour poursuivre notre analogie) on plaçait le seau à l'extérieur, où la pluie contribue à le remplir. S'ajoutent à ces apports les apports internes (la chaleur produite par les occupants, l'éclairage et les équipements).

En été, la situation est similaire, mais inverse (figure A.1-22b), comme dans une barque dont la coque fuit. Pour que le bateau continue de flotter, il faut pomper l'eau. De même, dans un bâtiment en été, la chaleur pénètre et il faut la faire sortir (figure A.1-23b). La pénétration se fait à travers les murs, le toit et les fenêtres, de même que par l'infiltration et la ventilation.

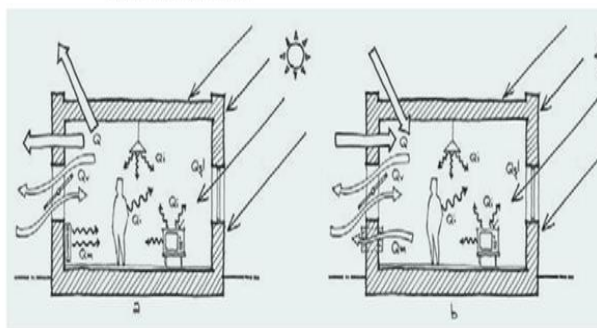
Dans ce cas, il y a aussi des apports solaires, mais ils ne sont d'aucune utilité : au contraire, ils ont tendance à augmenter la température de l'espace intérieur, tout comme la pluie remplirait la barque plus rapidement et élèverait le niveau d'eau à l'intérieur. Cette analogie est également utile pour expliquer la nécessité de modifier l'approche culturelle qui a dominé le 20<sup>e</sup> siècle. Selon cette approche, au lieu de tenter de boucher les trous, on a plutôt essayé de verser ou de pomper de plus en plus d'eau ; au lieu de réduire les pertes en hiver et les gains en été, on a préféré fournir ou extraire de plus en plus d'énergie. Cette voie doit être abandonnée ; le chemin principal, en accord avec la durabilité, vise à réduire ou éliminer les trous, c'est-à-dire des pertes de chaleur en hiver et les apports de chaleur en été.

Bien qu'utile, cette analogie simplifie beaucoup le problème, dont la résolution adéquate exige la mise à contribution de plusieurs domaines de connaissance, dont la thermodynamique et le transfert de chaleur sont les principaux.

FIGURE A.1-22 Analogie de l'eau



FIGURE A.1-23 Équilibre énergétique à travers l'enveloppe du bâtiment par temps froid (a) et par temps chaud (b)



#### 4-1 Équilibre énergétique d'un bâtiment

L'équilibre énergétique d'un bâtiment (figure A.1-23) au temps  $\tau$  se calcule comme suit :

$$\Sigma Q_{(\tau)} + \Sigma Q_{gl(\tau)} + Q_{v(\tau)} + Q_{i(\tau)} + Q_{m(\tau)} = 0 \quad (\text{A.1-31}) \text{ où}$$

$\Sigma Q_{(\tau)}$  = la somme des flux de chaleur à travers le toit, chaque mur et le sol (en W) ;

$Q_{(\tau)}$  est calculé à partir de l'équation A.1-26 ;

$\Sigma Q_{gl(\tau)}$  est la somme des apports de chaleur à travers chaque fenêtre (en W) ;

$Q_{gl}$  est calculé à partir de l'équation A.1-29 ;

$Q_{v(\tau)} = 1200 \times V \times (t_o - t_i)$  = le flux de chaleur de ventilation (en W) ;

$V$  = le taux de ventilation (en m<sup>3</sup>/s ; voir tableau A.1-8) ;

$Q_{i(\tau)}$  = l'apport de chaleur intérieur associé aux personnes, aux appareils ménagers et aux équipements (en W ; voir le tableau A.1-9) ;

$Q_{m(\tau)}$  = la demande en chaleur sensible compensée par le système de chauffage ou de refroidissement (en W).

Pour évaluer la demande mensuelle de chaleur sensible du bâtiment,  $Q_{mm}$ , l'équation A.1-31 peut être réutilisée sous la forme suivante :

$$Q_{mm} = \Sigma Q_m + \Sigma Q_{glm} + Q_{vm} + Q_{im} \quad (\text{A.1-32}) \text{ où}$$

$Q_m$  = le flux mensuel de chaleur à travers les surfaces opaques, calculé à partir de la moyenne mensuelle des températures quotidiennes (air et air ambiant), au lieu des températures au temps  $\tau$ , en multipliant cette moyenne par le nombre d'heures du mois (en MJ ou en kWh) ;

$Q_{glm}$  = l'apport solaire mensuel à travers les fenêtres, calculé en multipliant la moyenne mensuelle des éclairissements solaires incidents quotidiens sur le verre et par le nombre de jours du mois (en MJ ou en kWh) ;

$Q_{vm}$  = le flux mensuel de chaleur de ventilation, calculé à partir de la moyenne mensuelle des températures quotidiennes de l'air, au lieu de la température au temps  $\tau$ , en multipliant cette moyenne par le nombre de jours du mois (en MJ ou en kWh) ;

$Q_{im}$  = les charges intérieures mensuelles, calculées en multipliant la moyenne mensuelle des charges intérieures quotidiennes par le nombre de jours du mois (en MJ ou en kWh).

Si l'espace est climatisé, le diagramme psychométrique peut servir à évaluer la demande en chaleur totale (sensible + latente) causée par la ventilation, à ajouter à la chaleur latente associée à la présence d'occupants dans l'espace climatisé.

## 5- Energie primaire

L'équilibre énergétique de l'enveloppe du bâtiment concerne le flux d'énergie thermique nécessaire pour maintenir les conditions de températures et d'humidité à l'intérieur. Les choix architecturaux sont importants pour la partie de l'équilibre qui couvre la chaleur sensible. En réalité, comme l'équilibre de la chaleur latente dépend uniquement des sources intérieures (occupants, plantes et cuisine) et des conditions de l'air extérieur, les caractéristiques de l'enveloppe n'exercent aucune influence sur lui.

L'objectif d'une conception écoénergétique doit être d'assurer les meilleures conditions de confort dans le bâtiment, en ayant à fournir (lorsqu'il fait froid) ou à soustraire (lorsqu'il fait chaud) le moins d'énergie thermique possible. Toutefois, l'aspect important pour la durabilité énergétique d'un bâtiment est ce qu'on appelle l'énergie primaire.

L'énergie primaire est une forme naturelle d'énergie n'ayant subi aucun processus de conversion ou de transformation. C'est l'énergie contenue dans les combustibles bruts et dans d'autres formes d'énergie reçues comme intrants dans un système. L'énergie primaire peut être renouvelable ou non. Les sources d'énergie primaire subissent des processus de conversion qui les transforment en formes directement utilisables par la société, telles que l'énergie électrique ou les carburants raffinés, par exemple.

L'énergie consommée dans un bâtiment est communément appelée énergie finale, soit l'énergie disponible après le processus de conversion. Ainsi, la quantité d'énergie primaire consommée dépend du processus de conversion (*Par exemple, il faut environ 3 kWh d'énergie primaire pour fournir 1 kWh d'électricité à une prise de courant. Si cette électricité sert à chauffer de l'eau avec un chauffe-eau à résistance thermique, il faudra environ 3 kWh d'énergie primaire pour fournir 1 kWh à l'eau. Si, au contraire, on utilise une chaudière à gaz ayant un rendement de conversion de 80 %, il suffit de 1,25 kWh d'énergie primaire pour fournir 1 kWh d'énergie à l'eau. Si on utilise de l'électricité pour alimenter un chauffe-eau à pompe thermique, qui possède un taux d'efficacité d'environ 300 %, 1 kWh d'énergie primaire suffira pour fournir 1 kWh d'énergie à l'eau.*).

Il va sans dire que plus la demande en énergie thermique de l'enveloppe est faible, moins il faut fournir d'énergie primaire ; mais le système technologique d'approvisionnement est tout aussi important. Par

exemple, dans le cas d'une chaudière, les pertes associées à son fonctionnement doivent être prises en compte. C'est pourquoi, en termes de consommation primaire d'énergie, une pompe à chaleur est plus efficace qu'une chaudière pour produire de la chaleur. Et ce n'est pas tout. En fait, pour la distribution du fluide chaud ou froid dans un système de climatisation, il faut des pompes et des ventilateurs, qui consomment de l'énergie ; or, comme nous l'avons vu, la production d'électricité exige beaucoup d'énergie. Comme la quantité d'énergie nécessaire aux pompes et aux ventilateurs (les composantes auxiliaires d'un système de climatisation) dépend aussi de la disposition technique du système de distribution, qui, lui, dépend des fonctions attribuées aux différentes zones, et dans la mesure où cette distribution des fonctions fait partie intégrante de la conception architecturale, l'architecte influe indirectement sur la consommation d'énergie de cette façon aussi.

### **5-1 L'énergie intrinsèque des matériaux de construction**

L'énergie intrinsèque d'un matériau de construction comprend toute l'énergie consommée dans l'acquisition des matières premières, leur transformation en produits finis et leur transport au lieu d'installation ou au chantier de construction. Le cycle de vie des matériaux met en séquence les divers stades d'un matériau et précise où se fait la consommation d'énergie à chaque stade, de l'acquisition des matières premières à la production, à l'installation, à l'utilisation et à l'exploitation, puis à l'élimination et à sa réutilisation ultime (figure A.1-24 et tableau A.1-10).

Les statistiques officielles affectent cette consommation d'énergie au secteur industriel, mais en fait, il serait plus adéquat de l'attribuer au secteur de construction, qui en est la cause. Dans le cas d'un bâtiment, il faut ajouter à cette énergie celle qui est requise pour le transport des matériaux, pour la construction et pour la démolition.

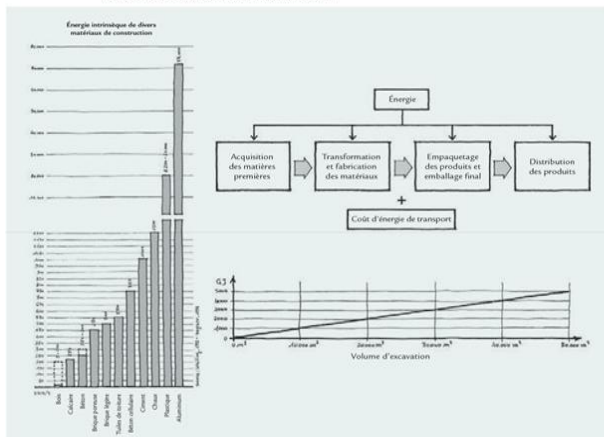
Il convient de noter que les valeurs présentées à la figure A.1-24 et au tableau A.1-10 sont indicatives : l'énergie intrinsèque d'un matériau dépend du mode d'extraction et de transport. Pour une composante, nous devons également ajouter la diversification des procédés de fabrication. Un autre aspect est le recyclage. À titre d'exemple, l'aluminium, qui possède la valeur d'énergie intrinsèque la plus élevée, est recyclable (tout comme l'acier), et son énergie intrinsèque, dans le cas où il est recyclé à 100 %, est réduite à un peu plus de 10 % de celle de l'aluminium « vierge ». Cette valeur demeure élevée comparativement à d'autres matériaux (légèrement inférieure à l'énergie intrinsèque de l'acier « vierge ») ; l'aluminium n'est pas un matériau écoénergétique. En réalité, aucune composante d'aluminium n'est faite de matériau recyclé à 100 % ; en Italie, par exemple, la proportion d'aluminium recyclé n'est que de 45 %. Le recyclage repose sur deux facteurs : le premier est l'efficacité du système de collecte, et le deuxième est dérivé du taux de croissance économique, lequel est lié à la croissance de la consommation d'aluminium. Par exemple, dans des pays comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, où l'économie croît très rapidement, l'amélioration des ressources financières amène un grand nombre de personnes à avoir accès à des produits qui n'étaient pas là auparavant. Dans ce cas, le taux de recyclage est négligeable comparativement à la quantité de matériaux vierges nécessaires, et l'utilisation de l'aluminium devrait être réservée aux cas où il est vraiment impossible de le remplacer par un autre matériel. Le verre peut aussi être recyclé, mais les couches d'oxydes métalliques utilisées pour améliorer son rendement sont des contaminants du sol ; pour la même raison, même quand ils sont recyclés et acheminés au site d'enfouissement, les panneaux de verre doivent être traités avec le plus grand soin pour éviter la contamination du sous-sol.

Du point de vue environnemental, le bois semble être le meilleur matériau de construction, non seulement à cause de sa faible énergie intrinsèque, associée uniquement à son abattage, à son transport et à son traitement, mais aussi parce que son utilisation se solde par l'extraction de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, sous forme d'énergie absorbée pendant la croissance de l'arbre et préservée dans les billes de bois. En fait, d'autres facteurs devraient être pris en compte, par exemple le déboisement



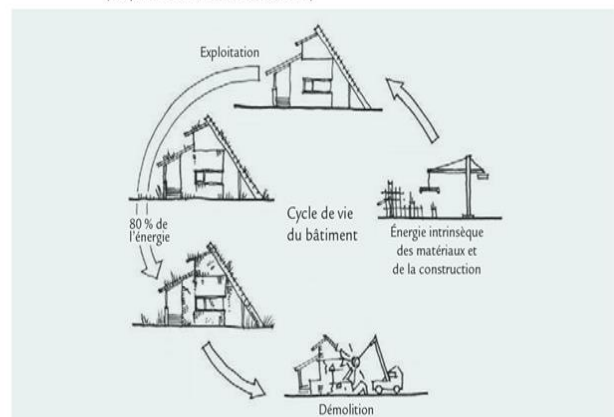
induit si le cycle déboisement-reboisement n'est pas suivi correctement et l'incidence environnementale des substances utilisées pour son traitement et sa transformation. Enfin, nous devons considérer les propriétés thermophysiques du bois : il fournit une bonne isolation thermique, mais possède une inertie thermique plutôt faible, qui le rend peu recommandable pour les climats ou périodes chauds et les grandes fluctuations de température entre le jour et la nuit. Dans ces climats, le confort thermique réalisable est nettement moindre qu'avec des matériaux plus lourds, ce qui se traduit par une hausse de la consommation associée à la climatisation. Pour atténuer cet effet, il est nécessaire d'utiliser des cloisons ou des sols faits entièrement ou partiellement de matériaux lourds, afin d'augmenter l'inertie thermique du bâtiment.

**FIGURE A.1-24** Énergie intrinsèque de certains matériaux de construction\* et dépenses énergétiques associées à l'excavation et au remblai\*\*



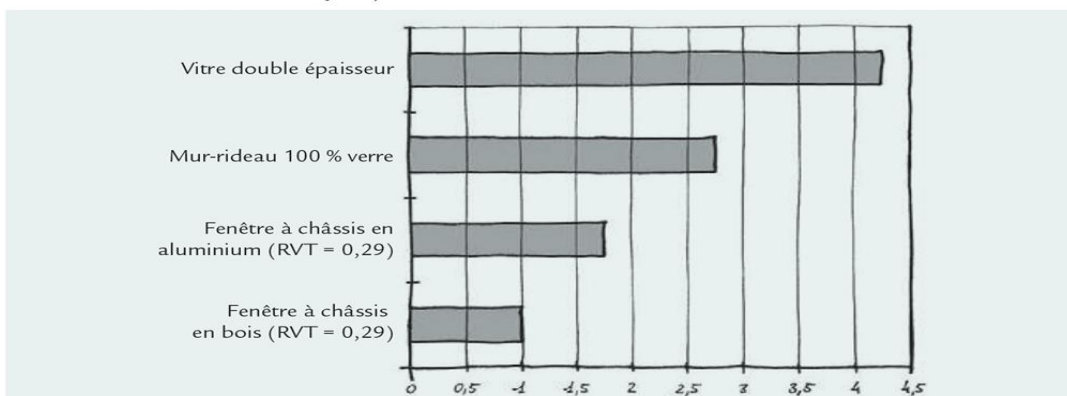
\* T. Herzog (dir.), *Solar Energy in Architecture and Urban Planning*, Prestel, 1996.  
 \*\* R. Sepp, U. Houser, T. Rabbe, S. Tanner et J. Schürle, *Sustainable Building Design Guidebook*, Siemens Real Estate, 2006.

**FIGURE A.1-25** Énergie utilisée dans le cycle de vie d'un bâtiment en Europe (moyenne des bâtiments existants)



La consommation d'énergie associée à un bâtiment construit en Europe avec des techniques propres au 20<sup>e</sup> siècle, en supposant un cycle de vie de 80 ans, provient à 80 % de son exploitation et à 20 % de l'énergie intrinsèque des matériaux de construction, y compris l'entretien et la rénovation (figure A.1-25). La consommation énergétique des nouveaux bâtiments et de ceux qui ont fait l'objet de rénovations considérables est beaucoup plus faible quand une réglementation sur la performance énergétique des bâtiments est mise en application. Dans ces conditions, la part de l'énergie intrinsèque augmente à cause de la baisse de la consommation associée à l'exploitation, jusqu'à atteindre 100 % de l'énergie nécessaire pour la nouvelle construction dans le cas des bâtiments à consommation énergétique zéro. Le choix des matériaux et composants prend ainsi de plus en plus d'importance dans la conception énergétique, ce qui a des répercussions significatives sur les choix architecturaux liés au revêtement, notamment à cause de l'énergie intrinsèque élevée du verre qui, par unité de surface, est plus élevée que celle d'un puits de maçonnerie isolé (figure A.1-26).

**FIGURE A.1-26** Valeurs relatives de l'énergie intrinsèque de certains types de façades. Façade à charpente en bois = 1 (RVT: rapport de la surface vitrée à la surface totale de la façade)



## CHAPITRE III : PRINCIPES DU CONFORT THERMIQUE ET VISUEL

### 1- Principes du confort thermique

La perception du confort thermique d'une personne dans un environnement est essentiellement influencée par six paramètres : l'activité physique, la tenue vestimentaire, la température et l'humidité de l'air, la vitesse relative de l'air et la température des surfaces entourant l'environnement en question (murs, plafonds, planchers, fenêtres) ; le temps passé dans cet environnement ; enfin, la température moyenne saisonnière. La dépendance à ces paramètres repose sur le besoin primaire de maintenir la température des parties internes du corps humain dans une fourchette de 36 à 38 °C. Un écart prolongé de la température interne hors de cette plage risque de causer des dégâts irréversibles et même la mort de l'organisme. Autrement dit, il doit y avoir un équilibre thermique entre la chaleur produite par notre métabolisme et notre activité et celle qui est libérée dans l'environnement (figure A.2-1).

FIGURE A.2-1 Le confort thermique est maintenu quand la chaleur produite par le métabolisme est égale à la chaleur dégagée par le corps

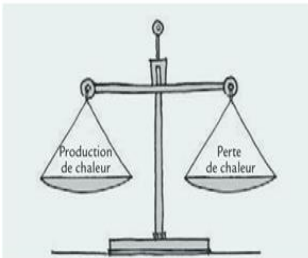


FIGURE A.2-2 Facteurs déterminant le confort thermique

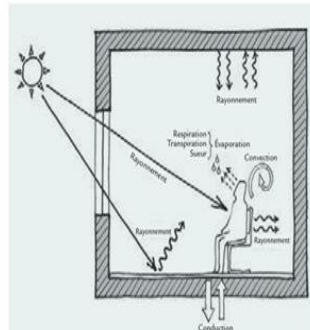
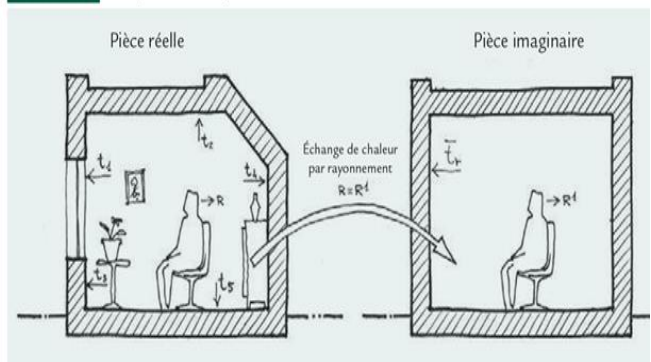


FIGURE A.2-3 Température moyenne radiante



La perception du manque de confort thermique (le fait d'avoir chaud ou froid) est un signal par lequel notre organisme nous informe que l'équilibre thermique n'est pas respecté et que cette situation est pour lui une source de stress. Quand nous avons froid, cela signifie que nous dissipons plus de chaleur dans l'environnement que nous n'en produisons : notre température interne a alors tendance à s'abaisser. Quand nous avons chaud, cela veut dire que nous dissipons moins de chaleur que nous n'en produisons : notre température interne a donc tendance à s'élever. La quantité de chaleur échangée entre le corps humain et son environnement immédiat dépend du niveau d'activité physique. Une personne produit beaucoup moins de chaleur en étant confortablement assise qu'en courant. Le corps humain échange de la chaleur avec son environnement immédiat par plusieurs processus (figure A.2-2) :

- la convection (l'air en contact avec la peau est chauffé, extrayant ainsi de la chaleur), qui dépend de la température de la peau ainsi que de la température et de la vitesse de l'air ;
- la transpiration (qui peut se transformer en sueur) et la respiration, qui entraînent l'évaporation d'eau, associée à un déplacement de chaleur de la peau ou des poumons, selon l'humidité relative de l'air ;
- la conduction : si une partie du corps humain est en contact avec un objet solide, elle transfère de la chaleur à travers la surface de contact. La quantité de chaleur transférée dépend de la température de la peau et de l'objet ainsi que des caractéristiques thermophysiques de l'objet ;
- les échanges de chaleur rayonnante, qui dépendent de la température de la peau et de celle des surfaces entourant l'environnement.

La tenue vestimentaire influence grandement le transfert de la chaleur, en raison de la résistance thermique supplémentaire qu'elle génère, de la modification de la température superficielle et du processus de transpiration. Pour déterminer si un corps subit un gain net ou une perte nette d'énergie rayonnante, la surface apparente de chaque surface rayonnante doit être prise en compte en plus de la température superficielle. C'est ce que représente le facteur de vue  $F_{p,i}$ .

Pour prendre ce phénomène en compte de manière synthétique, un indice spécifique appelé la température moyenne radiante ( $t_{mr}$ ) a été introduit. Par définition, la température moyenne radiante est la température uniforme d'un environnement imaginaire dans lequel le transfert thermique radiant du corps humain est égal au transfert thermique radiant dans l'environnement réel non uniforme (figure A.2-3). Elle se calcule comme suit :

$$t_{mr} = \sum t_i F_{p,i} \quad (\text{A.2-1}) \text{ où la}$$

somme est étendue à toutes les surfaces visibles par le sujet. La température moyenne radiante à un point P placé au barycentre d'une pièce parallélépipédique est donnée par :

$$t_{mr} = \frac{t_1 A_1 + t_2 A_2 + \dots + t_n A_n}{A_{tot}} \quad (\text{A. 2-2}) \text{ où } t_1,$$

$t_2, \dots, t_n$  sont les températures des surfaces entourant le point (y compris les fenêtres),  $A_1, A_2, \dots, A_n$  sont les superficies des mêmes surfaces et  $A_{tot} = A_1 + A_2 + \dots + A_n$  est la superficie totale de l'enveloppe vue du point P. À cause de l'influence importante de la température des surfaces entourant une pièce sur les échanges de chaleur et, partant, le confort thermique, un autre indice a été introduit, la température opérative ( $t_{op}$ ), qui, dans des conditions normales [circulation d'air nulle et  $(t_{mr} - t_{air}) < 4 \text{ °C}$ ], est moyenne de la température de l'air  $t_a$  et de la température moyenne radiante  $t_{mr}$ . La température opérative représente mieux la température perçue que la température de l'air, parce qu'elle prend en compte les échanges convectifs et radiatifs du corps avec l'environnement.

**Remarque :**

- Par exemple, dans une pièce où la température de l'air est de 26 °C, une personne assise directement à côté d'une grande surface de verre est inconfortable (elle a chaud) parce que le verre se chauffe rapidement en absorbant le rayonnement solaire (direct ou diffus) et sa température s'élève facilement jusqu'à 40 °C ou même davantage. La température moyenne est plus élevée que si cette personne était assise dans le coin le plus reculé de la pièce (figure A. 2-4). Cela implique aussi que la température opérative est elle aussi élevée. Dans la mesure où le confort thermique dépend de la température opérative, la personne assise près d'une surface vitrée ressentira la chaleur, alors qu'en s'assoiant loin, elle sera confortable. Pour qu'une personne assise près d'une surface vitrée soit confortable, il est important d'abaisser la température opérative. La température moyenne radiante et, par conséquent, la température opérative est d'une importance capitale dans les bâtiments vitrés en grande partie ; pour garder la température opérative à des valeurs confortables, il faut abaisser la température de l'air, ce qui implique une augmentation de la consommation d'énergie.
- La température des parois couplée à la température de l'air donne une idée sur le confort ressentie (appelée aussi température résultante sèche ou température opérative), cette dernière se détermine selon l'équation suivante :  $T_{rs} = (T_a + T_p) / 2$

FIGURE A.2-4 Effet de la position et de la température des surfaces sur la température moyenne radiante ( $t_{mr}$ ) et la température opérative ( $t_{op}$ )

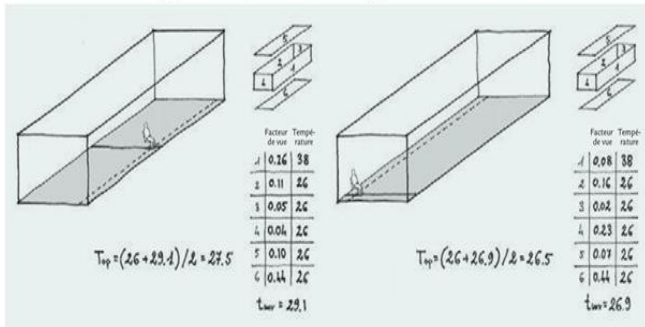
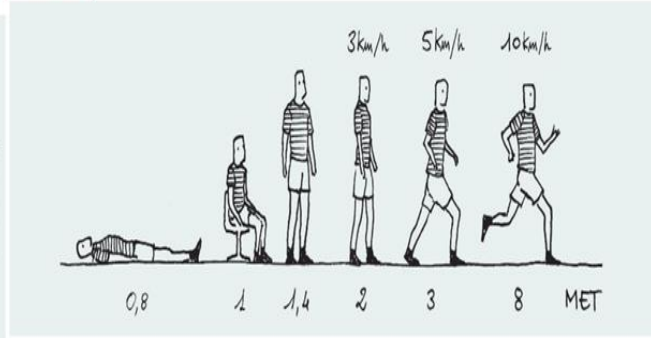


FIGURE A.2-5 Taux métabolique de diverses activités (en MET)



La sensation de confort dépend non seulement des conditions environnementales, mais aussi de l'état de santé de la personne, de l'activité qu'elle effectue et de sa tenue vestimentaire. L'activité physique se mesure par l'énergie thermique produite (le taux métabolique) qui doit être dissipée dans l'environnement (figure A.2-5) et s'exprime soit en MET (1 MET = 50 kcal/h par mètre carré de superficie du corps, l'homme moyen ayant une aire superficielle de 1,8 m<sup>2</sup>), soit en watts par mètre carré. Une personne assise produit 1 MET (58 W/m<sup>2</sup>). L'habillement est mesuré en fonction de sa résistance thermique (figure A.2-6) et s'exprime en clos (1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>·K/W). Une valeur de 1 clo correspond à une tenue hivernale normale. La valeur la plus basse est de 0 clo (une personne nue), et 0,5 clo correspond à une tenue estivale normale.

FIGURE A.2-6 Valeurs de la résistance thermique de divers types de vêtements (en clo)

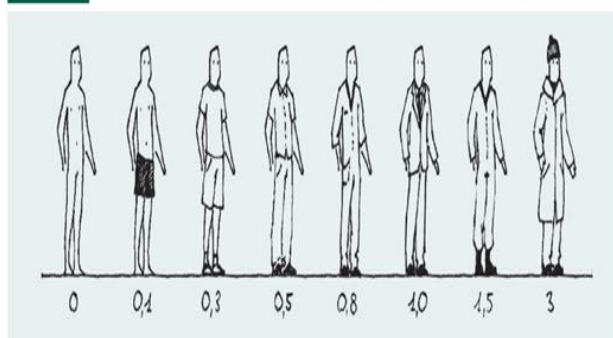
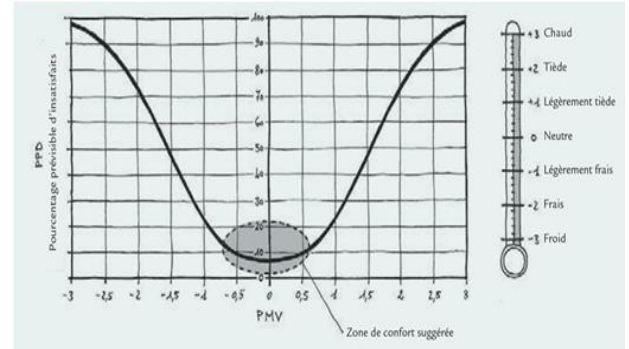


FIGURE A.2-7 Échelle de sensation thermique et indices PMV et PPD



### 1.1 Indice PMV

L'indice PMV (predicted mean vote ou vote moyen prévisible) est une mesure globale du confort thermique qui correspond à la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes exposées au même environnement, en fonction de l'échelle de sensation thermique présentée à la figure A.2-7. L'indice PMV, dont la valeur se situe entre -3 et +3, prend en compte tous les facteurs liés à l'environnement (la température, la vitesse et l'humidité de l'air, la température moyenne radiante), l'activité effectuée par la personne et sa tenue vestimentaire.

Pour prévoir le nombre de personnes qui susceptibles de ressentir de l'inconfort dans un environnement donné, l'indice PPD (predicted percentage of dissatisfied ou pourcentage prévisible d'insatisfaits) a été mis sur pied. L'indice PPD donne une prévision quantitative du nombre de personnes thermiquement insatisfaites. Les indices PMV et PPD sont interdépendants, comme l'indique la figure A.2-7. À cause des différences individuelles, il est impossible d'obtenir un environnement thermique satisfaisant pour tout le monde. Même quand l'indice PMV est de zéro, il y a toujours 5 % d'insatisfaits.

La norme EN 15 251 définit un classement en quatre catégories de la qualité d'un environnement chauffé ou climatisé mécaniquement, en fonction du niveau de confort thermique (tableau A.2-1).

**TABLEAU A.2-1** Catégories recommandées pour la conception de bâtiments chauffés et climatisés mécaniquement

Catégorie	Caractéristiques	PMV	PPD (%)
I	Niveau d'attente élevé; recommandé pour les espaces occupés par des personnes sensibles et fragiles ayant des exigences spécifiques: personnes handicapées, malades, très jeunes ou âgées	-0,2 < PMV < 0,2	< 0,6
II	Niveau d'attente normal à appliquer aux bâtiments nouveaux et rénovés	-0,5 < PMV < 1,0	< 0,5
III	Niveau d'attente acceptable et modéré, applicable aux bâtiments existants	-0,7 < PMV < 0,7	< 15
IV	Valeurs hors des critères des catégories ci-dessus; niveau acceptable uniquement pour une période limitée de l'année	PMV < -0,7 ou 0,7 < PMV	> 15

Remarques :

- Le bilan thermique entre l'homme et son environnement est établi comme suit :

$$(M - W) - (E_{vap} + R_{esp} + K + C + R) = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} = S$$

Avec :

**S** : la charge thermique calculée en fonction des variables de l'ambiance (température d'air, de rayonnement, vitesse d'air et humidité) et celles de l'individu (métabolisme, habillement). Si celle-ci est nulle, l'individu est en situation d'équilibre thermique. Si cet équilibre est atteint avec peu de réactions physiologiques, le corps est à la thermoneutralité : le confort est alors possible. Dans le cas contraire, la thermorégulation physiologique puis comportementale se met en marche.

**M** : l'énergie reliée au métabolisme. Le métabolisme est l'énergie thermique produite par le corps humain. Il permet la production de chaleur indispensable aux fonctions vitales et dépend de la physiologie de l'individu (poids, taille, âge, sexe), de son activité et de l'ingestion de nourriture. La puissance thermique dégagée par le corps en fonction de son activité s'exprime en met où 1 met = 58 W/m<sup>2</sup> de surface corporelle, correspondant à celle d'un homme « standard » assis au repos (le sommeil requiert 0,7 met tandis que jouer au basket requiert 5 à 8 met). La surface corporelle ( $A_{DU}$ ) se calcule en fonction du poids ( $P$ ) et de la taille ( $H$ ) de l'individu :

$$A_{DU} = 0,203 * P^{0,425} H^{0,725}$$

**W** : le travail mécanique extérieur fourni par le corps, il est généralement pris égal à zéro.

**E<sub>vap</sub>** : l'énergie reliée à l'évaporation cutanée

**R<sub>esp</sub>** : les échanges de chaleur par voie respiratoire

**K** : l'énergie de conduction

**C** : l'énergie de convection thermique

**R** : le rayonnement

- Le bilan thermique très simplifié présenté ci-dessus a permis de développer les indices internationalement reconnus pour qualifier une ambiance : PMV (Predicted Mean Vote) et PPD



(Predicted Percentage of Dissatisfied), fournis par les normes ISO 7730 (1994), et développés dans les années 1970 par Fanger. Leurs expressions sont les suivantes :

$$PMV = (0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028) \cdot S$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)]$$

## 1.2 Confort thermique dans les bâtiments climatisés

Dans les espaces climatisés où la vitesse de l'air est inférieure à 0,2 m/s et l'humidité relative est comprise entre 30 et 70 %, et pour un certain type d'habillement et d'activités, il existe une corrélation directe entre le PMV et la température opérative, qui est un indice plus facile à comprendre, parce qu'il coïncide avec la température de l'air si celle-ci coïncide avec la température moyenne radiante. Compte tenu de ce qui précède, la norme EN 15 251 fournit les températures de conception internes de fonctionnement recommandées pour différentes catégories de confort et d'environnement, à utiliser pour la conception des systèmes CVC (tableau A.2-2).

**TABLEAU A.2-2** Valeurs de conception recommandées des températures intérieures pour la conception des bâtiments et des systèmes CVC

Type de l'espace	Catégorie	Température opérative (°C)	
		Minimum pour le chauffage	Maximum pour le refroidissement
		Habillement: 1 clo	Habillement: 0,5 clo
Bâtiments résidentiels: séjour, chambres, salon, cuisine Activité sédentaire ~ 1,2 MET	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
Bâtiments résidentiels: autres espaces (entrepôts, salles, etc.) Activité debout et en marchant ~ 1,5 MET	I	18,0	
	II	16,0	
	III	14,0	
Bureau seul, bureau ouvert, salle de conférence, auditorium Activité sédentaire ~ 1,2 MET	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Cafétéria ou restaurant Activité sédentaire ~ 1,2 MET	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Salles de cours Activité sédentaire ~ 1,2 MET	I	21,0	25,0
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
Jardin d'enfants Activité debout et en marchant ~ 1,6 MET	I	19,0	24,5
	II	17,5	25,5
	III	16,5	26,0
Grand magasin Activité debout et en marchant ~ 1,6 MET	I	17,5	24,0
	II	16,0	25,0
	III	15,0	26,0

Même si les valeurs présentées au tableau A.2-2 sont maintenues, par exemple en compensant une forte température de rayonnement par une température plus basse de l'air intérieur, il faut encore tenir compte d'autres facteurs :

■ un large écart de température entre les surfaces intérieures cause une asymétrie du rayonnement qui accroît l'inconfort ;



■ un large écart de température entre les surfaces intérieures et l'air pourrait causer des courants d'air inconfortables.

Pour cette raison, il convient de maintenir l'écart de température entre l'air et les surfaces le plus bas possible, et la vitesse de l'air frais introduit dans l'espace climatisé doit demeurer inférieure à 0,19 m/s. En augmentant la vitesse de l'air, le confort est atteint même si les valeurs de la température opérative sont plus élevées que celles du tableau A.2-2, comme le montre la figure A.2-8. Cette approche (utilisation de systèmes de contrôle de la vitesse de l'air, ventilateurs ou autres) peut aussi servir à compenser les températures excessives qui pourraient régner dans les bâtiments climatisés, ou à élever la température de l'air, réduisant ainsi la consommation énergétique sans incidence sur le niveau de confort.

Le tableau A.2-3 présente des données sur la corrélation entre la vitesse de l'air et l'agréabilité. La vitesse maximale de la circulation d'air avant que des feuilles de papier ne se mettent à voler d'une table est de 1,0 m/s.

FIGURE A.2-8 Effet de la vitesse aérienne croissante sur le confort dans des pièces climatisées (1 MET, 0,5 clo)

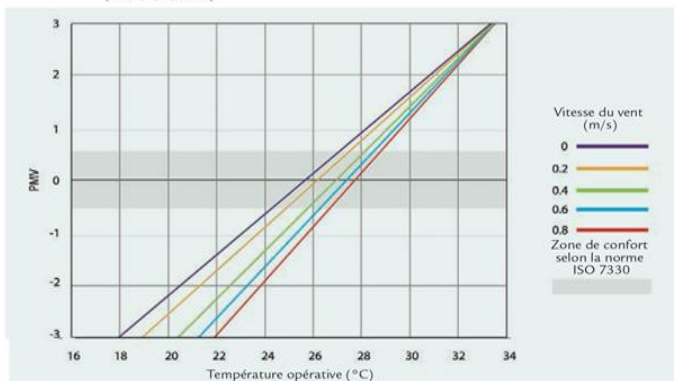


TABLEAU A.2-3 Vitesse de l'air et agréabilité

Vitesse de l'air (m/s)	Effet
Moins de 0,25	Imperceptible
De 0,25 à 0,5	Agréable
De 0,5 à 0,8	Généralement agréable, mais la circulation d'air est perceptible
De 0,8 à 1,5	De légèrement à très désagréable
> 1,5	Exige des mesures correctives pour maintenir le confort et la productivité

## 1.2 Confort thermique dans les bâtiments non climatisés

La norme ANSI/ASHRAE 55-2004 a traité à la question du confort dans les bâtiments non climatisés, ou pendant les périodes où la climatisation n'est pas en fonction. Dans ces cas, les principes de confort adaptatif s'appliquent. Ces principes prennent en compte non seulement les facteurs purement physiologiques, mais aussi des facteurs sociaux, psychologiques, culturels et climatiques.

La norme applique les principes du confort adaptatif aux conditions climatiques de tièdes à chaudes dans les espaces non climatisés (ou quand la climatisation est éteinte) et quand les conditions thermiques de l'espace sont réglées principalement par les occupants, en ouvrant ou en fermant des fenêtres. Les températures opératives intérieures permises pour les espaces respectant ces critères peuvent être déterminées à partir de la figure A.2-9. Cette figure comprend deux ensembles de températures opératives limites, l'une pour une acceptabilité de 80 %, l'autre pour une acceptabilité de 90 %. Les limites d'acceptabilité de 80 % servent aux applications normales et s'appliquent en l'absence d'autres données. Les limites d'acceptabilité de 90 % sont applicables lorsqu'on recherche une norme de confort thermique plus élevée.

Les valeurs limites de température indiquées à la figure A.2-9 sont conçues et utilisées pour empêcher la surchauffe en été sans moyens artificiels ; par exemple, au moyen de fenêtres dimensionnées et orientées adéquatement, de pare-soleil et de la capacité thermique du bâtiment. Quand il est impossible d'atteindre les valeurs limites par des moyens passifs, l'utilisation d'un système de refroidissement mécanique est inévitable. Dans ce cas, les valeurs limites de confort deviennent celles qui sont

indiquées au tableau A.2-2. Comme dans le cas des bâtiments climatisés, la vitesse de l'air accroît la valeur de la température opérative à laquelle le confort thermique est obtenu, comme le montre la figure A. 2-10, où  $\Delta t_{op}$  est l'augmentation de la température opérative (en K) et  $V_a$  est la vitesse de l'air (en m/s), lorsque l'humidité relative est entre 60 et 70 %. La ligne horizontale indique la valeur de la vitesse de l'air au-delà de laquelle la circulation de l'air est perçue comme désagréable. L'augmentation de la vitesse de l'air exigera pour les occupants l'utilisation d'un dispositif de contrôle de la circulation d'air locale. Si les différentes valeurs d'humidité relative sont prises en compte, le décalage de la température de l'air peut être obtenu à partir du graphique reproduit à la figure A.2-11.

FIGURE A.2-9 Température opérative acceptable pour les pièces climatisées naturellement

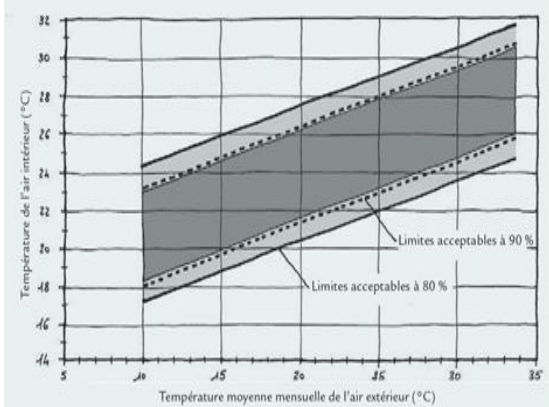


FIGURE A.2-10 Vitesse de l'air nécessaire pour compenser une élévation de la température (EN ISO 7730)

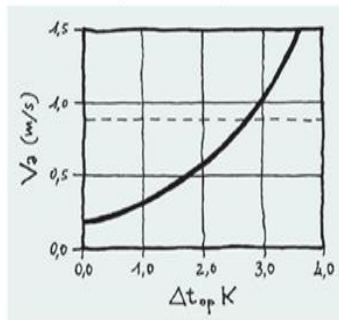
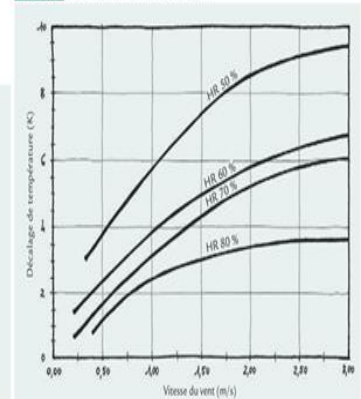


FIGURE A.2-11 Effet refroidissant de la circulation de l'air

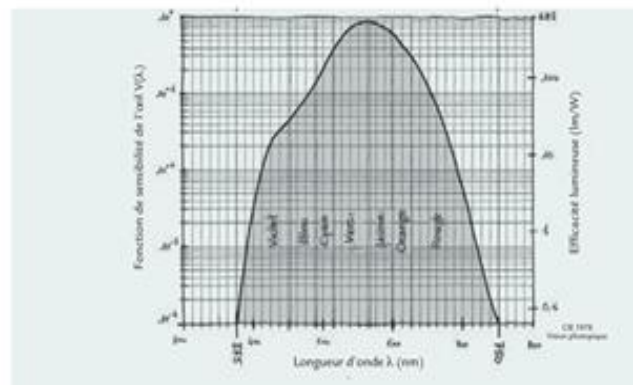
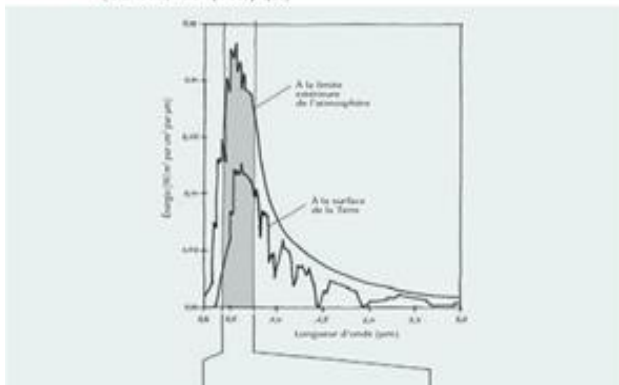


## 2- Principes du confort visuel

### 2-1 Généralités

Ce que nous appelons la lumière est la partie perceptible par notre œil du rayonnement solaire qui atteint la Terre ; elle correspond à environ la moitié de toute l'énergie solaire qui nous atteint. L'échelle de longueurs d'onde à laquelle notre rétine est sensible est comprise entre 380 et 780 nm. Dans cet intervalle, une couleur est attribuée pour chaque longueur d'onde. Mais notre œil n'est pas sensible de la même manière à toutes les couleurs ou longueurs d'onde. Il est peu sensible au bleu, au violet et au rouge, mais très sensible au jaune et au vert (figure A.2-12).

FIGURE A.2-12 Spectre solaire, zone de sensibilité et sensibilité de l'œil aux couleurs (CIE 1978, vision photopique)



## UNITÉS DE PHOTOMÉTRIE

**Flux lumineux - Unité: lumen (lm)** - Quantité d'énergie lumineuse émise par unité de temps (1 seconde) à partir d'une source; puissance lumineuse de la source. L'énergie lumineuse est l'énergie rayonnante émise dans la zone de longueurs d'onde de 380 à 780 nm.

**Intensité lumineuse - Unité: candela (cd)** - Intensité de la lumière émise dans une direction donnée, sachant qu'une source de lumière émet habituellement son flux lumineux dans des directions et à des intensités variées.

**Éclairement lumineux - Unité: lux (lx = lm/m<sup>2</sup>)** - Rapport du flux lumineux reçu par une surface à la superficie de la surface elle-même; quantité de lumière qui atteint une unité de superficie.

**Luminance - Unité: candela par mètre carré (cd/m<sup>2</sup>)** - Rapport de l'intensité lumineuse émise par une surface dans une direction donnée à la superficie apparente de cette surface. La

superficie apparente est la projection de la surface sur un plan normal à la direction considérée (figure A.2-13).

En pratique, la luminance indique la sensation reçue d'une source lumineuse primaire ou secondaire. Une source est dite primaire quand elle émet directement le rayonnement; une source secondaire réfléchit le rayonnement provenant d'une source primaire.

Il est important de préciser la différence entre l'éclairement lumineux et la luminance. L'éclairement lumineux est la quantité de lumière émise par une source affectant la surface considérée, tandis que la luminance est la sensation de brillance perçue à partir de cette surface. Cela signifie que sur deux surfaces différentes, l'une blanche et l'autre noire, la même valeur d'éclairement lumineux, 500 lux par exemple, pourra donner des sensations de brillance, donc des valeurs de la luminance, complètement différentes, puisque ces deux surfaces réfléchent la lumière différemment.

FIGURE A.2-13 Définition de la luminance

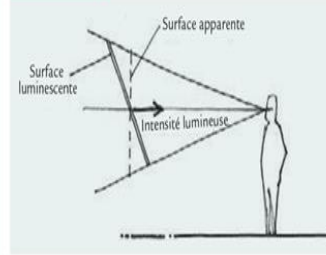


TABLEAU A.2-4 Luminance de quelques sources

Source	Luminance (cd/m <sup>2</sup> )
Soleil	2 300 000 000
Ampoule d'une lampe à incandescence	50 000
Neige au soleil	25 000
Plage claire ensoleillée	15 000
Lampe fluorescente	6 000-8 000
Pleine lune	4 000
Cette page, sur un bureau éclairé normalement	120
Surface d'une route éclairée par des lampadaires	0,5-2

Dans la mesure du possible, un bon éclairage est basé sur la lumière naturelle et n'est complété qu'en cas de besoin par une lumière artificielle. Les facteurs déterminant la qualité de l'éclairage sont la distribution de la luminance, le niveau d'éclairement, le coefficient d'éclairage diurne, la dépendance à la lumière artificielle, l'éblouissement, la couleur des sources lumineuses et leur rendu de couleur. L'exploitation de la lumière naturelle a une forte incidence sur la consommation d'énergie, en particulier dans les bâtiments commerciaux, parce qu'elle réduit les besoins en éclairage artificiel.

## 2-2 Variables et facteurs de l'environnement visuel

L'éclairage et sa distribution influencent grandement la perception de la tâche visuelle et le niveau de rapidité, d'assurance et de confort de sa réalisation.

### 2-2-1 Distribution de la luminance

Bien que l'œil soit capable de s'adapter à de larges variations de luminance (tableau A.2-4), il ne peut pas s'adapter simultanément à deux niveaux très différents. L'œil atténue le problème en essayant de se concentrer sur un niveau de luminance à la fois. Cependant, si deux surfaces de luminances différentes se trouvent dans la partie centrale du champ visuel, la concentration sur l'une d'entre elles seulement devient difficile, voire impossible, ce qui provoque la fatigue oculaire. Cette sensation est désagréable en raison des accommodements continuels auxquels l'œil est contraint pour s'adapter aux différentes luminances. Pour éviter cette situation, il faut tout d'abord éviter la présence de surfaces de luminosité très différentes dans le champ visuel et contenir le rapport de luminance dans les limites indiquées au tableau A.2-5.

TABLEAU A.2-5 Valeurs maximales recommandées du rapport de luminance

Valeur maximale	Situation	Exemple
3:1	Foyer et surface environnante immédiate	Livre et bureau
5:1	Foyer et surface environnante	Livre et mur voisin
10:1	Foyer et zone plus éloignée	Livre et mur plus éloigné
20:1	Source lumineuse et surface adjacente	Fenêtre et surface adjacente

TABLEAU A.2-6 Bureaux: valeurs d'éclairement recommandées

Type d'intérieur, tâche, activité	Éclairement lumineux moyen (lux)
Classement, photocopie	300
Écriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500
Dessin technique	750
Poste de travail de CAO	500
Salle de réunion ou de conférence	500
Réception	300
Archives	200

Cela signifie, par exemple, que si on travaille à un ordinateur dont l'écran a une luminance moyenne d'environ 100 cd/m<sup>2</sup>, la luminance maximale admissible d'une fenêtre dans le champ visuel est de 1

000 cd/m<sup>2</sup>. Cette valeur peut aussi être obtenue par temps couvert. Pour cette raison, les postes de travail doivent être disposés de manière à ce que l'écran de l'ordinateur soit perpendiculaire au mur percé d'une fenêtre.

### 2-2-2 Eclairage lumineux

Dans des conditions d'éclairage normales, il faut environ 20 lux pour bien percevoir les caractéristiques d'un visage humain. Cette valeur a été adoptée comme l'échelle d'éclairage lumineux la plus basse. L'échelle d'éclairage lumineux recommandé (en lux) est :

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – de 1 000 à 1 500 – 2 000 – de 3 000 à 5 000

Le tableau A.2-6 présente, à titre d'exemple, les valeurs d'éclairage lumineux recommandées par la norme EN 12464-1 pour les bureaux (*EN 12464-1 : « Éclairage des lieux de travail »*. Cette norme européenne a trait aux aspects de la qualité de l'éclairage des postes de travail et de leur environnement direct. Elle contient aussi des tableaux des exigences d'éclairage en fonction du type de travail et de la tâche visuelle).

Cependant, des études récentes démontrent que la valeur de 500 lux recommandée pour le travail de bureau ou les salles de cours est trop élevée et qu'il est plus raisonnable de recommander de 300 à 400 lux, car seul un faible pourcentage des occupants ressentent le besoin d'allumer la lumière artificielle si le niveau de lumière naturelle sur la table est d'environ 300 lux, à condition que la température de couleur ne soit pas trop élevée, comme dans le cas du bleu, du vert et des verres à spectre sélectif.

#### 2-2-2-1 Coefficient d'éclairage diurne

Le coefficient d'éclairage diurne (c. é. d.) est une mesure de la quantité de lumière du jour disponible dans une pièce. Il est défini comme le rapport de l'éclairage lumineux de la surface de travail  $E_{int}$ , dans une position donnée, à l'éclairage lumineux  $E_{ext}$  qui serait observé, dans les mêmes conditions de temps et de lieu, sur une surface horizontale exposée en plein air de manière à recevoir la lumière de tout le ciel, sans soleil direct (figure A.2-14). Le coefficient d'éclairage diurne s'exprime généralement en pourcentage.

$$c. \text{ é. d. } (\%) = (E_{int} / E_{ext}) \times 100 \quad (\text{A.2-3})$$

Le calcul de  $E_{int}$  passe par l'évaluation de trois composants :

■ ■ Le composant du ciel (*sky component* ou SC) est la lumière qui vient directement de la partie du ciel visible à partir du point considéré ; plus la fenêtre est large et le verre transparent, plus SC est élevé.

■ ■ Le composant du reflet extérieur (*external reflected component* ou ERC) est la lumière reflétée par les objets externes tels que les bâtiments ; la taille de la fenêtre et la transparence du verre (comme pour SC), ainsi que la couleur (claire, sombre, moyenne) du sol et des bâtiments environnants ont une incidence sur ERC.

■ ■ Le composant du reflet intérieur (*internal reflected component* ou IRC) comprend toute la lumière qui entre par la fenêtre et qui n'atteint la surface de travail qu'indirectement, après avoir été réfléchiée par les surfaces intérieures. Plus les couleurs des murs et du plafond sont claires, plus la valeur d'IRC est élevée.

Le calcul de  $E_{int}$  se fait selon formule suivante (figure A.2-15) :

$$E_{int} = SC + ERC + IRC \quad (A.2-4)$$

Par conséquent, pour une superficie et une transparence du verre et des conditions extérieures données, le coefficient d'éclairage diurne à un point de la pièce augmente avec la clarté de la surface intérieure et le coefficient de transmission de la lumière du verre. Les trois composants peuvent être évalués au moyen d'un logiciel spécialisé ou à l'aide de diverses méthodes graphiques, analytiques ou tabulaires. Comme l'indique la figure A.2-16, le c. é. d. diminue rapidement à mesure qu'on s'éloigne de la fenêtre. Pour cette raison, le rapport de la valeur minimale à la valeur maximale de l'éclairage lumineux associé à la lumière naturelle doit être maintenu au-dessus de 0,16. Le calcul du c. é. d. correspond à un ciel couvert. Le modèle utilisé pour décrire la luminance du ciel couvert est la norme de la Commission internationale de l'éclairage (CIE). Pour déduire le niveau d'éclairage lumineux intérieur en lux à partir de la valeur du c. é. d., il faut connaître le niveau d'éclairage lumineux extérieur du ciel couvert, qui n'est pas le même partout dans le monde, car il décroît à mesure que la latitude augmente.

Le coefficient d'éclairage diurne ne doit jamais être le seul indicateur utilisé pour la conception des bâtiments écoénergétiques à éclairage de qualité supérieure, surtout en milieu tropical, où le nombre d'heures d'ensoleillement par an est plus élevé que dans les pays d'Europe et d'Amérique septentrionales où cet indice a été mis au point.

FIGURE A.2-14 Coefficient d'éclairage diurne

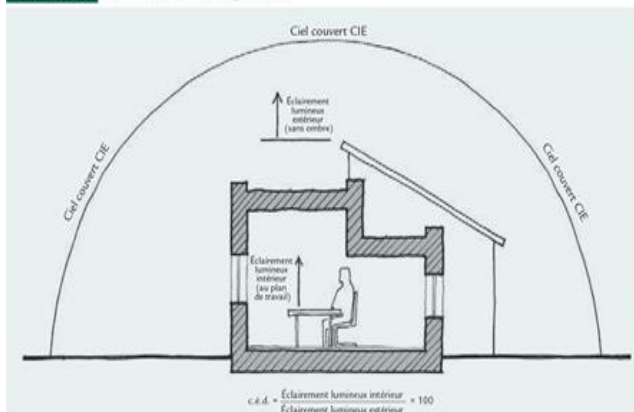


FIGURE A.2-15 Composants de l'éclairage lumineux d'un point ( $E_{int} = SC + ERC + IRC$ )

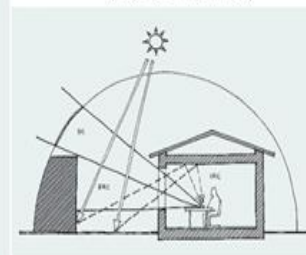
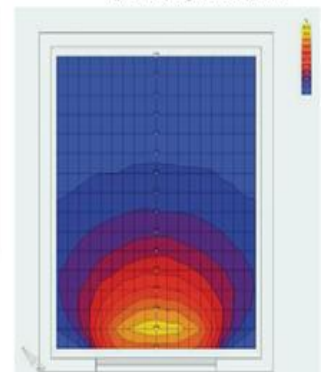


FIGURE A.2-16 Évolution du coefficient d'éclairage diurne à mesure qu'on s'éloigne de la fenêtre



En fait, une fenêtre dont les dimensions sont établies sur la base du ciel couvert CIE est trop grande pour les milieux tropicaux, car elle produit des niveaux d'éclairage lumineux excessifs la plupart du temps et, par-dessus tout, un supplément d'apports solaires. Tout cela entraîne une augmentation des coûts d'investissement et d'exploitation, sans contrepartie acceptable en termes de confort de l'éclairage.

### 2-2-2-2 Coefficient d'éclairage diurne moyen

Le coefficient d'éclairage diurne moyen (c. é. d.<sub>m</sub>) d'un espace clos est défini comme la valeur moyenne des coefficients d'éclairage diurne mesurés au niveau du plan de travail par un réseau de capteurs étendu à toute la pièce. Le coefficient d'éclairage diurne moyen peut être estimé à partir de l'équation suivante :

$$c. \text{ é. } d. _m = \frac{\tau_{vis} \cdot \theta \cdot A_{vitrage}}{2 \cdot A_{totale} (1 - \rho_m)} \quad (A.2-5) \text{ où}$$

$\tau_{vis}$  = le facteur de transmission de la transmission visible du vitrage (voir l'annexe 1) ;



$\theta$  = l'angle d'ouverture sur le ciel, soit l'angle d'obstruction mesuré au milieu de la fenêtre (90 degrés moins l'angle d'obstruction réel sur la section ; voir la figure 3.6-3) ;

$A_{vitrage}$  = la superficie nette de la surface vitrée (en  $m^2$ ) ;

$A_{totale}$  = la superficie totale de toutes les surfaces intérieures, y compris les fenêtres (en  $m^2$ ) ;

$\rho_m$  = le facteur de réflexion moyen des surfaces, pondéré en fonction de la superficie ;  $\rho_m = 0,5$  peut servir de première approximation.

Le tableau A.2-7 présente des gammes de facteurs de réflexion des surfaces et le tableau A.2-8, des exemples de valeurs du coefficient d'éclairage diurne moyen recommandées pour les ciels équatoriaux.

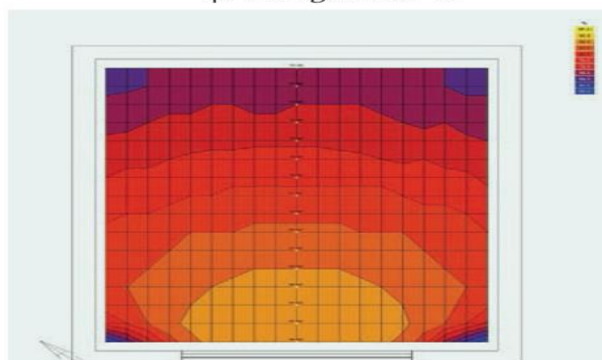
**TABLEAU A.2-7** Valeurs moyennes du facteur de réflexion de diverses surfaces

Plafond, murs, plancher, meubles	Facteur de réflexion
Couleurs claires	De 0,6 à 0,8
Couleurs moyennes	De 0,3 à 0,6
Couleurs sombres	De 0,1 à 0,3

**TABLEAU A.2-8** Valeurs du coefficient d'éclairage diurne moyen recommandées

Type d'espace	c. é. $d_m$ recommandé
Bureau ou boutique	De 1,0 à 2,0%
Salle de cours ou de conférence	De 1,0 à 2,0%
Zone de transit	Moins de 1%

**FIGURE A.2-17** Autonomie lumineuse dans le même environnement qu'à la figure A.2-16



### 2.2.2.3 L'autonomie lumineuse

Pour pallier le surdimensionnement découlant du fait de ne prendre en compte que le c. é. d. pour la conception des fenêtres en vue d'un éclairage naturel optimal, un autre indice, l'autonomie lumineuse, a été développé. L'autonomie lumineuse en un point d'un espace est le pourcentage des heures d'occupation du bâtiment pendant lesquelles l'éclairage naturel suffit à assurer le niveau minimal d'éclairement requis. Contrairement au c. é. d., l'autonomie lumineuse considère toutes les conditions du ciel au cours de l'année et pas seulement le ciel couvert. Ainsi, elle constitue un indicateur complet qui permet d'évaluer la disponibilité de la lumière naturelle tout au long de l'année à un point donné. Par exemple, une autonomie lumineuse de 70 %, en un point donné d'un espace utilisé chaque jour de la semaine de 8 h à 18 h et où un niveau minimal d'éclairement de 300 lux est nécessaire, indique qu'à ce point précis, on peut travailler pendant 70 % de l'année sans avoir recours à l'éclairage artificiel (figure A.2-17). L'avantage principal de l'autonomie lumineuse par rapport au coefficient d'éclairage diurne est qu'elle prend en compte non seulement toutes les conditions du ciel en un point donné, mais aussi l'orientation et le profil d'occupation de l'espace analysé.

D'autre part, le calcul de l'autonomie lumineuse nécessite des simulations sur ordinateur et risque de donner des résultats imprécis si on y introduit des projections mobiles que le logiciel utilisé n'est pas en mesure de traiter, ou s'il est impossible d'anticiper le comportement des occupants avec une précision raisonnable lorsque le fonctionnement du pare-soleil n'est pas automatique, mais plutôt laissé à la discrétion des occupants.



### 2.2.3 Eblouissement

Selon la définition de la norme EN 12464-1, l'éblouissement est la sensation visuelle produite par les surfaces qui produisent de grands gradients de luminance dans le champ visuel. On distingue deux formes générales d'éblouissement : l'éblouissement d'inconfort et l'éblouissement d'incapacité. L'éblouissement d'inconfort suscite le désir instinctif de détourner le regard d'une source lumineuse brillante ou la difficulté à voir une tâche. L'éblouissement d'incapacité compromet la vision des objets. L'éblouissement d'inconfort réduit la capacité de percevoir les détails, sans nécessairement provoquer de gêne visuelle.

Cette situation se produit quand une personne a une ligne de vue directe sur une source de lumière telle qu'une fenêtre ou un appareil d'éclairage ; elle peut également résulter d'une réflexion excessive sur une feuille de papier qu'on lit ou sur un écran d'ordinateur. L'œil est forcé de s'ajuster constamment à deux luminances différentes, ce qui induit une fatigue oculaire pénible. L'éblouissement d'inconfort survient quand la présence de sources excessivement brillantes dans le champ visuel cause un état de malaise, même s'il n'y a pas de réduction significative de la capacité visuelle. Les sources peuvent être soit trop lumineuses comparativement à un environnement plus sombre, soit désagréablement brillantes dans l'absolu.

Il est important de limiter l'éblouissement pour éviter les erreurs, la fatigue et les accidents. Si les limites sont respectées, l'inconfort sera négligeable. Les effets de l'éblouissement d'inconfort peuvent être atténués en réduisant la luminance de la source lumineuse et en augmentant celle de l'objet observé, au moyen d'une meilleure répartition de la lumière et de l'application de couleurs claires sur les murs, dont les caractéristiques de réflexion ont une importance considérable. Habituellement, l'éblouissement est une conséquence inévitable dans une pièce contenant de grandes surfaces en verre, et les occupants réagissent en réduisant la luminance de la source par l'utilisation des rideaux qui finissent par rester fermés même quand le phénomène n'est plus présent ; il en résulte un blocage de la vue sur l'extérieur et la nécessité d'utiliser la lumière artificielle.

Pour évaluer le niveau d'éblouissement, l'indice d'éblouissement de la lumière du jour (*daylight glare index* ou DGI) (*En effet, tous les individus ne perçoivent pas selon les mêmes termes le même niveau de lumière éblouissante provoquant l'inconfort. Des études récentes ont conduit à l'élaboration d'un nouvel indice, la probabilité d'éblouissement (daylight glare probability ou DGP), qui permet d'évaluer la probabilité d'éblouissement selon la perception de l'occupant*) a été développé. Le DGI permet de prédire l'éblouissement causé par la lumière naturelle grâce à un indice d'éblouissement unifié (*unified glare rating* ou UGR), qui sert également à évaluer l'éblouissement causé par une source de lumière artificielle.

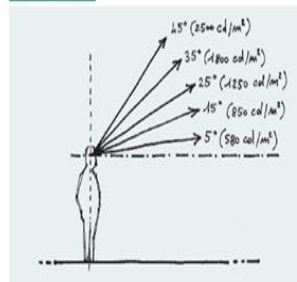
Sur la base de la valeur résultante du DGI, on peut évaluer le niveau d'éblouissement selon la classification présentée au tableau A.2-9.

Le niveau maximal acceptable de luminance d'une fenêtre sans causer d'éblouissement à une personne qui lit, écrit ou utilise un ordinateur est d'environ 2 500 cd/m<sup>2</sup>. L'œil humain a de la difficulté à traiter des niveaux élevés de luminance directement dans le champ visuel qui tombe dans la fovéa. Quand la source d'une lumière susceptible de provoquer l'éblouissement se déplace vers la zone centrale du champ visuel, le niveau de luminance acceptable décroît, comme l'indique la figure A.2-18.

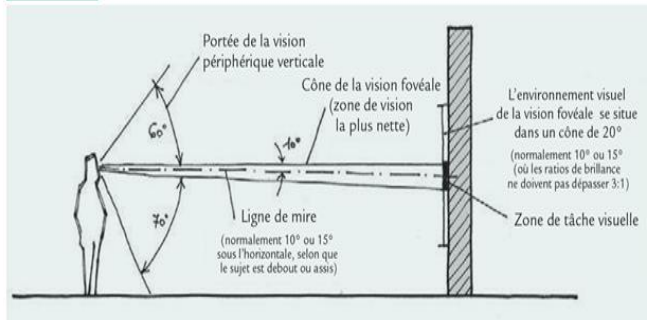
**TABEAU A.2-9** UGR, DGI et catégories d'éblouissement correspondantes

Catégories d'éblouissement	UGR	DGI
À peine perceptible	10-13	8-16
Acceptable	16-19	20-22
Génant	22-25	24-26
Insupportable	28	28

**FIGURE A.2-18** Limites de la luminance



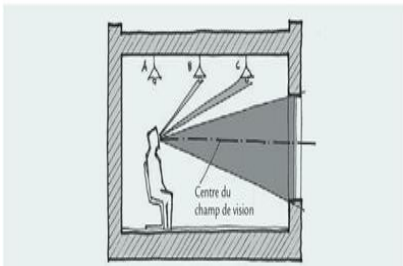
**FIGURE A.2-19** Le champ visuel



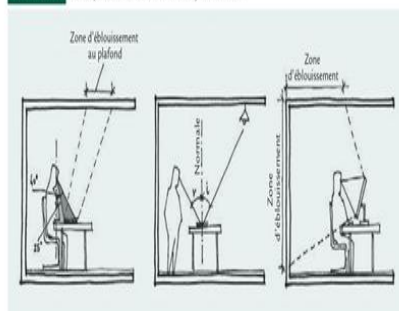
### 2.2.3.1 Éblouissement direct et par réflexion

L'éblouissement direct dépend des caractéristiques de l'espace et des sources lumineuses (naturelles ou artificielles) qui se trouvent directement dans le champ visuel d'une personne. Par exemple, quand la lumière du soleil entre directement dans le champ visuel (qui couvre 180° horizontalement et 60° au-dessus de l'horizon ; voir la figure A.2-19), nous ne faisons que la remarquer, mais quand elle entre dans le centre du champ visuel (une zone définie par un cône de 40° ayant l'œil pour sommet), il en résulte un éblouissement (figure A.2-20).

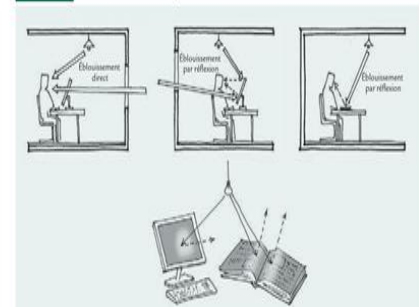
**FIGURE A.2-20** Plus on se rapproche du centre du champ visuel, plus les sources lumineuses risquent de provoquer un éblouissement. Dans la figure, les sources sont de plus en plus problématiques, de A (aucun problème) jusqu'à la fenêtre (cause d'éblouissement)



**FIGURE A.2-21** Quelques cas d'éblouissement par réflexion

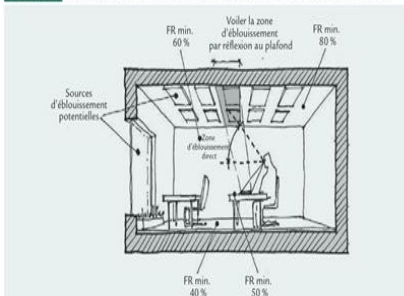


**FIGURE A.2-22** Éblouissement direct et par réflexion

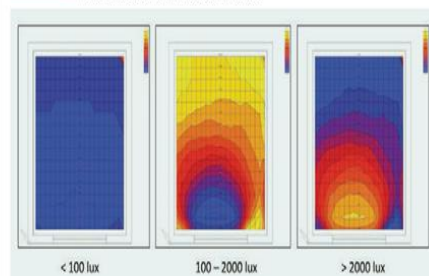


L'éblouissement par réflexion est causé par le reflet d'une source lumineuse sur une surface brillante jusque dans les yeux du sujet. Il se produit quand l'angle incident de la lumière sur un plan de travail horizontal tombe dans l'angle de vision de l'observateur (figures A.2-21 et A.2-22). Dans des conditions d'éclairage naturel, la vue du ciel à travers une fenêtre peut avoir un effet perturbateur (figure A.2-23) ; cette situation se produit quand on regarde vers le mur adjacent à la fenêtre ou qu'on essaie de voir les détails d'un objet placé contre une surface fortement réfléchissante sur laquelle les sources lumineuses sont réfléchies.

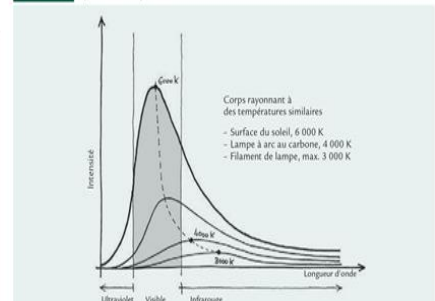
**FIGURE A.2-23** Sources potentielles d'éblouissement et facteurs de réflexion (FR) recommandés



**FIGURE A.2-24** Éclairage naturel utile d'un espace ; la probabilité d'un éblouissement est élevée, même à une certaine distance de la fenêtre



**FIGURE A.2-25** Spectre du corps noir



### 2.2.3.2 Éclairage naturel utile

L'éclairage naturel utile (*useful daylight illuminance* ou UDI) est une mesure du rendement dynamique de l'éclairage naturel, qui repose également sur le niveau d'éclairage lumineux du plan

de travail. Comme son nom l'indique, cet indice a pour but d'établir si le niveau d'éclairage est « utile » pour les occupants, c'est-à-dire qu'il n'est ni trop sombre ( $< 100$  lux) ni trop clair ( $> 2\ 000$  lux). La limite supérieure correspond aux périodes où un excès de lumière pourrait provoquer un inconfort visuel. L'UDI s'exprime par trois pourcentages : celui de la période de travail au cours de laquelle les valeurs d'éclairage lumineux en un point se situent dans l'intervalle de 100 à 2 000 lux ; celui des heures où les valeurs sont inférieures à 100 lux et celui des heures où elles sont supérieures à 2 000 lux (figure A.2-24). Cette dernière valeur a son importance, car elle représente un indice indirect de la probabilité de l'éblouissement.

## **2.2.4 Couleur de la lumière**

La lumière peut être plus ou moins blanche, froide ou chaude. Les couleurs des objets paraissent différentes en fonction du type de source lumineuse. Pour apprécier et classer qualitativement les sources de lumière, on utilise deux paramètres principaux : la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs. Ces mêmes paramètres peuvent et doivent servir au choix du verre (les fenêtres sont des sources de lumière) : le verre teinté en bleu ou en vert et le verre à spectre sélectif filtrent et transforment la lumière naturelle, changeant donc la température de couleur et le rendu des couleurs ; ainsi, le choix du verre est déterminant pour la qualité de l'environnement visuel.

### **2.2.4.1 Température de couleur**

La température de couleur est un paramètre qui sert à individualiser et à catégoriser objectivement la couleur de la lumière d'une source lumineuse, comparativement à une source de référence (le corps noir). Dire qu'une lampe a une température de couleur de 3 000 K signifie que le corps noir, à cette température, émet de la lumière avec le même spectre d'émission (figure A.2-25). Le corps noir est la référence utilisée pour évaluer une source lumineuse qui émet d'une manière similaire (flamme, lampes incandescentes), c'est-à-dire dans un spectre continu. Le spectre d'une lampe à décharge (à vapeur de mercure, fluorescente) ou d'une lampe à DEL a une forme plutôt différente de celle d'un corps noir (figure A.2-26). Dans ce cas, on utilise la température de couleur corrélée (*correlated colour temperature* ou CCT), soit la température du corps noir à laquelle le spectre se rapproche le plus de celui de la lampe à l'étude.

Les sources lumineuses sont divisées en trois groupes, selon la température de couleur :

- de 3 000 à 3 500 K : couleur blanche chaude ;
- de 4 000 à 5 000 K : couleur blanc neutre ;
- de 5 500 à 7 000 K : couleur blanche froide.

FIGURE A.2-26 Spectres de sources courantes de lumière visible

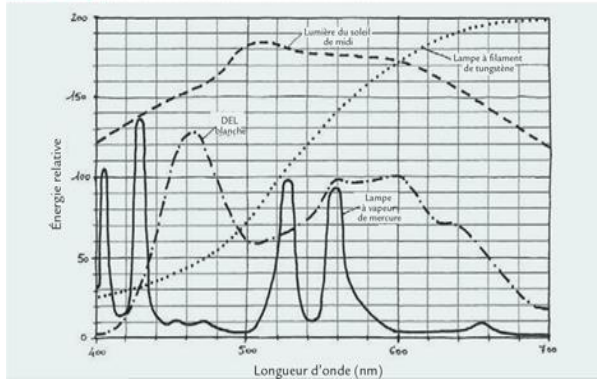
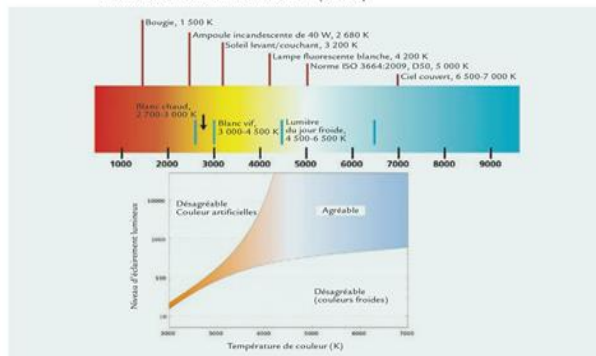


FIGURE A.2-27 Echelle des températures de couleur (en haut) ; courbe de Kruthof illustrant la relation entre l'agréabilité d'un environnement visuel, la « chaleur » de la source lumineuse et le niveau d'éclairage (en bas)



Les sources de lumière à faible température de couleur aident à créer un environnement « chaud » si les niveaux d'éclairage sont bas, comme ceux qu'on observe à l'intérieur des maisons et pour l'éclairage général des bureaux. Un éclairage d'intérieur agréable s'obtient avec une source lumineuse ayant une température de couleur pas supérieure à 3000 K. Si le niveau général d'éclairage lumineux dépasse 500 lux, il pourrait être préférable d'utiliser des sources de 4 000 K. Les sources ayant une température de couleur plus élevée créent une atmosphère « froide » et désagréable lorsqu'elles sont combinées à un niveau d'éclairage inférieur à 500 lux (figure A. 2-27).

Des valeurs élevées de température de couleur devraient être associées avec des niveaux élevés d'éclairage lumineux, comme c'est le cas pour la lumière naturelle à l'extérieur. Il ne faut pas confondre la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs (IRC, voir ci-dessous), car la température de couleur indique la couleur de la lumière émise, mais ne donne aucune information sur le rendu des couleurs.

## CHAPITRE IV : VENTILATION NATURELLE

Le terme ventilation naturelle désigne la circulation d'air intentionnelle à travers les fenêtres, les portes et les autres ouvertures conçues à cette fin, obtenue sans l'aide d'un ventilateur ; cette ventilation est créée par les différences de pression causées par le vent ou les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur.

La ventilation naturelle a une incidence sur trois enjeux : la santé des occupants, l'équilibre énergétique du bâtiment et le confort thermique.

Elle influe sur la santé à cause de la relation entre les échanges d'air et la qualité de l'air. Elle influe sur l'équilibre énergétique du bâtiment, car le flux d'air extérieur enlève ou ajoute de la chaleur à l'espace intérieur : elle en enlève si la température de l'air est plus basse à l'extérieur qu'à l'intérieur et elle en ajoute dans le cas contraire. Le confort thermique est aussi directement affecté par le changement de la température intérieure dû à la ventilation. Elle influe directement sur le confort thermique, parce que la vitesse de l'air affecte l'équilibre énergétique de l'organisme par l'échange convectif et la transpiration : plus la vitesse de l'air est élevée, plus la perte de chaleur de l'organisme est importante.

À cause de leurs effets sur l'équilibre énergétique du bâtiment et sur le confort thermique, les stratégies de ventilation naturelle diffèrent en fonction du climat local. Un bon afflux d'air et, partant, une bonne vitesse de l'air, sont bénéfiques toute la journée sous un climat chaud et humide, tandis que dans celles de climat chaud et aride où la variation quotidienne de la température est importante, seule la ventilation nocturne devrait être utilisée. En effet, une forte ventilation pendant la journée réchaufferait la structure du bâtiment, qui libérerait cette chaleur pendant la nuit, créant un environnement intérieur inconfortable ; en revanche, la ventilation nocturne, à cause de la température basse de l'air pendant la nuit, refroidit la structure du bâtiment, rendant l'intérieur confortable le lendemain, surtout si les fenêtres restent fermées.

Dans les hautes terres, par contre, la ventilation nocturne doit être maintenue au minimum compatible avec les besoins en qualité de l'air, et la ventilation diurne doit être modulée en fonction de la température extérieure.

### 1- Principes de base de la ventilation naturelle

La ventilation naturelle est régie par certains principes de base que nous rappelons ci-dessous :

- a) L'air se déplace toujours d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression.
- b) Un flux d'air est dit laminaire lorsque la vitesse est basse et que les lignes de courant se déplacent en parallèle (figure 3.5-1a) ; lorsque la vitesse augmente ou qu'il y a un changement de direction prononcé, le mouvement devient turbulent et les lignes de courant cessent de se déplacer en parallèle, donnant lieu à des changements de direction et à des contre-courants (figure 3.5-1b).
- c) L'air, comme tous les fluides, est sujet à l'effet Bernoulli, de sorte qu'une augmentation de la vitesse s'accompagne d'une réduction de la pression ; cet effet est exploité dans les ailes d'avion, dont la forme force l'air qui passe au-dessus d'elle à suivre une trajectoire plus longue, ce qui engendre une vitesse plus grande que celle de l'air circulant au-dessous (figure 3.5-2) ; la pression exercée sur l'aile est alors inférieure à celle qui s'exerce sous elle, provoquant une poussée du bas vers le haut.

FIGURE 3.5-1 Flux laminaire et flux turbulent

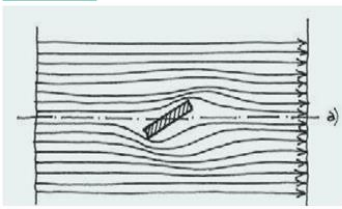
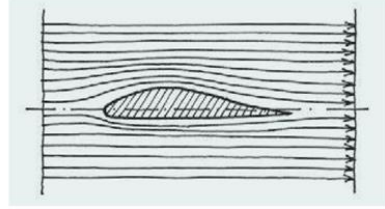


FIGURE 3.5-2 Effet de Bernoulli



d) À cause de l'effet Venturi, lorsqu'un courant d'air est forcé de traverser un espace plus étroit (figure 3.5-3), il se produit une augmentation de la vitesse et une diminution de la pression en fonction du rétrécissement.

e) Une combinaison des facteurs décrits plus haut a pour effet que lorsque le vent frappe un bâtiment, il des zones de basse pression se créent le long des côtés parallèles à sa direction et sur le côté exposé au vent (figure 3.5-4).

f) Lorsque l'air à l'intérieur d'une pièce ou d'un bâtiment est plus chaud que l'air de l'extérieur, il se produit un effet de cheminée (figure 3.5-5) : la pression est plus basse à l'intérieur qu'à l'extérieur, parce que l'air chaud est moins dense que l'air froid.

FIGURE 3.5-3 Effet de Venturi

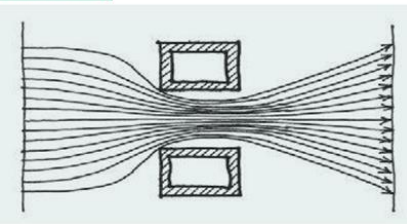


FIGURE 3.5-4 Distribution de la pression autour d'un bâtiment

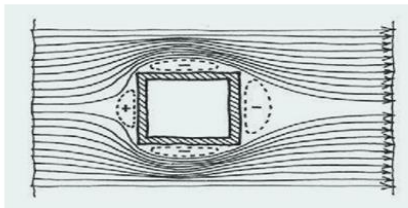
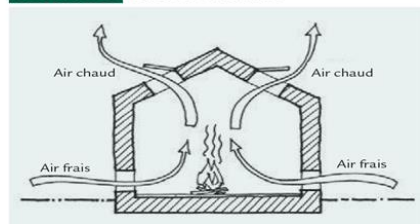


FIGURE 3.5-5 Effet de cheminée



## 2- Circulation d'air engendrée par le vent

Bien que les lois de la physique qui causent ces phénomènes soient connues et clairement définies, il n'est pas facile de prédire la circulation de l'air autour et à travers les bâtiments, en particulier par rapport à la trajectoire des lignes de courant. Par le passé, les connaissances dans ce domaine se sont principalement fondées sur des maquettes, des tests de fumée et des tunnels de vent. Depuis peu, grâce à l'analyse informatique de la dynamique des fluides, les urbanistes prédisent les effets de leurs choix avec un très bon niveau de précision. Un large éventail de règles générales a été dérivé de ces études :

FIGURE 3.5-6 Bâtiment bas au vent d'un bâtiment haut

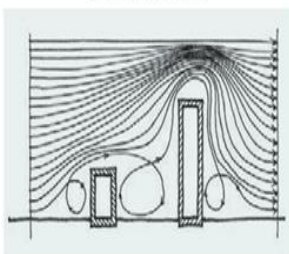


FIGURE 3.5-7 Bâtiment sur pilotis

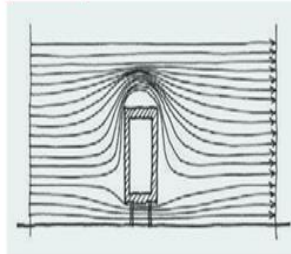
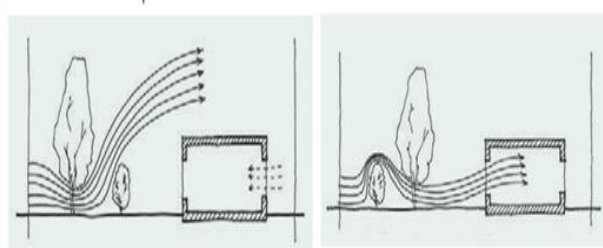


FIGURE 3.5-8 Effet sur le vent des arbres à canopée élevée et des arbustes



■ ■ Lorsqu'un bâtiment bas est sous le vent d'un bâtiment plus haut que lui, une turbulence considérable est créée entre les deux (figure 3.5-6).

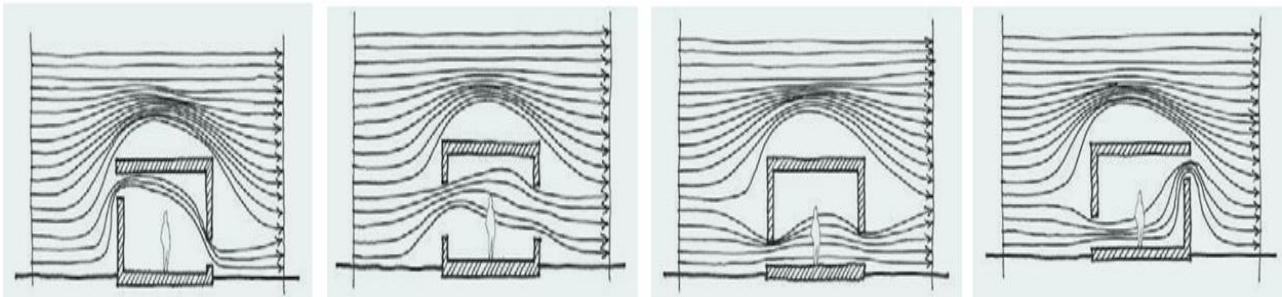
■ ■ Dans un bâtiment sur pilotis, la pression sous le vent est réduite et, selon le type de pilotis, la vitesse du vent augmente de façon significative (figure 3.5-7).



■ ■ Pour maximiser l'effet rafraîchissant du vent, on utilise des arbres ayant une canopée élevée et on évite de placer des arbustes à proximité du bâtiment (figure 3.5-8) ;

■ ■ Le type de débit d'air dû au vent dépend de la position relative des ouvertures. Pour obtenir les meilleures conditions, les ouvertures de sortie doivent être plus élevées et plus larges que les ouvertures d'entrée et, idéalement, leurs superficies doivent être égales (figure 3.5-9).

FIGURE 3.5-9 Disposition du flux d'air selon la position relative des ouvertures



■ ■ Un surplomb horizontal au-dessus d'une ouverture dévie le flux vers le haut. Si le surplomb est espacé par rapport au mur, le flux est dévié à mi-hauteur (figure 3.5-10).

FIGURE 3.5-10 Effet d'un surplomb horizontal au-dessus de l'ouverture

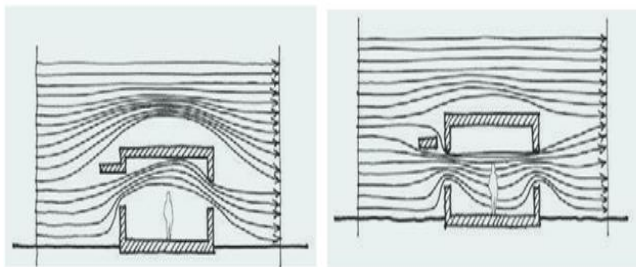
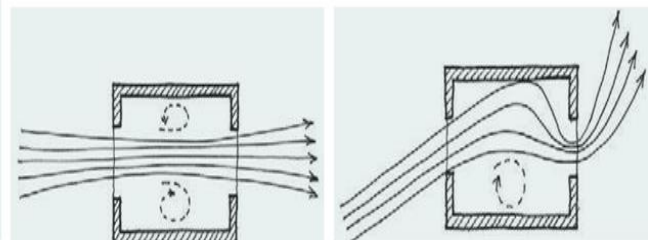


FIGURE 3.5-11 Effet de l'alignement des ouvertures sur la ventilation transversale



■ ■ Lorsque les ouvertures d'entrée et de sortie sont alignées, une ventilation transversale est activée par le vent. Si les ouvertures sont alignées dans la direction du vent, le flux d'air passe tout droit à travers la pièce ; ainsi, son influence se limite à une petite portion de cette pièce et ne produit qu'une faible circulation d'air. Si, par contre, le vent souffle en oblique, la ventilation implique une zone plus large et provoque une circulation d'air plus importante. Si le vent souffle parallèlement aux ouvertures, il n'y a pas de circulation d'air significative dans la pièce (figure 3.5-11).

■ ■ Si la pièce a des ouvertures sur des murs adjacents, les murs en aile augmentent de façon significative l'efficacité de la ventilation naturelle (figure 3.5-12).

FIGURE 3.5-12 Amélioration de la ventilation par l'aménagement d'ouvertures sur les murs adjacents et de murs en aile

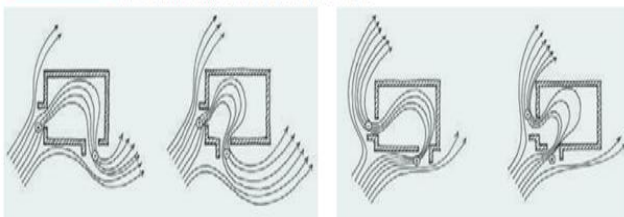
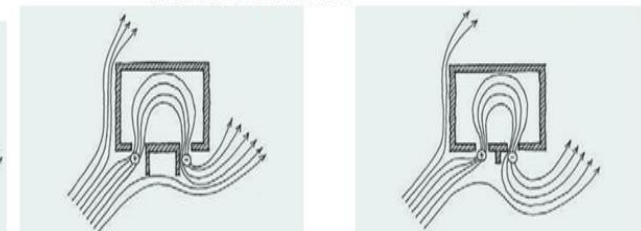


FIGURE 3.5-13 Ventilation, avec des murs en aile et deux ouvertures, dans une pièce dont un seul mur donne sur l'extérieur



La plupart des pièces n'ont qu'un mur donnant sur l'extérieur et une seule ouverture ; la ventilation est dérivée uniquement de la turbulence induite par les fluctuations du vent, et la circulation d'air qui en

résulte est très faible (si la fenêtre est face au vent, la vitesse du vent disponible correspond à environ 10 % de sa vitesse à l'extérieur, jusqu'à une distance équivalant au sixième de la largeur de la pièce ; au-delà, la vitesse du vent diminue rapidement, et la circulation d'air dans la portion de la pièce sous le vent est pratiquement nulle). Pour améliorer cette situation, on sépare l'ouverture en deux parties éloignées le plus possible l'une de l'autre ; si le mur fait face au vent, une amélioration supplémentaire consiste à construire un mur en aile (figure 3.5-13).

### 2-1 Dimensionnement des ouvertures pour la ventilation transversale

L'équation suivante peut servir à estimer la taille des ouvertures (opposées) dans le cas de la ventilation transversale :

$$V = K A v \tag{3.5-1} \text{ où}$$

$V$  = le débit d'air (en  $m^3/s$ ) ;

$K$  = le coefficient d'efficacité ;

$A$  = la surface libre nette des ouvertures d'entrée, égale à celle des ouvertures de sortie (en  $m^2$ ) ;

$v$  = la vitesse du vent à l'extérieur (en  $m/s$ ).

Le coefficient d'efficacité dépend de la direction du vent par rapport à l'ouverture et du rapport entre les superficies des deux ouvertures. Il est maximal lorsque le vent souffle directement sur l'ouverture, et il augmente avec la dimension relative de l'ouverture la plus grande.

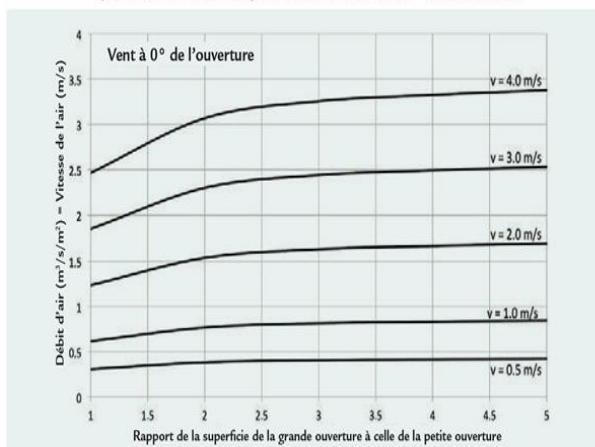
Pour des ouvertures opposées de surfaces égales,  $K = 0,6$  pour un vent perpendiculaire à l'ouverture ( $0^\circ$ ) et  $K = 0,3$  pour un vent à  $45^\circ$ .

Les changements de direction du vent jusqu'à  $30^\circ$  de chaque côté de la normale au mur de la fenêtre ont peu d'effet sur les valeurs de  $K$ . Pour les directions en dehors de ces limites, on peut considérer que la valeur de  $K$  varie en fonction linéaire de la direction du vent.

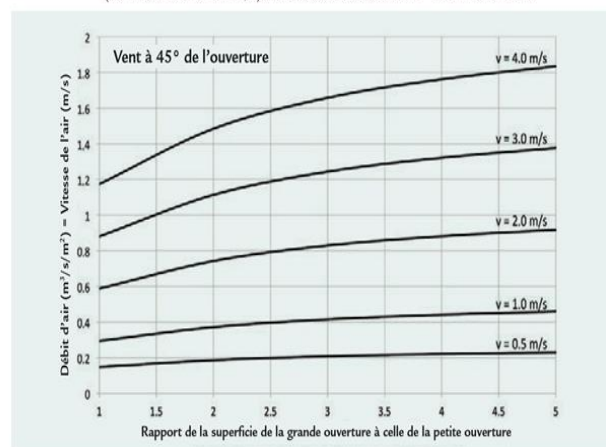
La superficie libre nette d'une ouverture varie selon le type de fenêtre (à jalousie, à guillotine, à battant, etc. ; voir la figure 3.4-21) ; elle s'obtient en multipliant la superficie brute de l'ouverture par la perméabilité de la fenêtre.

Le débit d'air peut aussi être obtenu à l'aide des courbes des figures 3.5-14 (vent à  $0^\circ$  de l'ouverture) et 3.5-15 (vent à  $45^\circ$  de l'ouverture), qui présentent le débit d'air par mètre carré à travers l'ouverture la plus petite (qui coïncide avec la vitesse de l'air en  $m/s$ ) pour diverses vitesses du vent.

**FIGURE 3.5-14** Débit d'air par mètre carré à travers l'ouverture la plus petite (ou vitesse de l'air en  $m/s$ ) à diverses vitesses du vent - vent incident à  $0^\circ$



**FIGURE 3.5-15** Débit d'air par mètre carré à travers l'ouverture la plus petite (ou vitesse de l'air en  $m/s$ ) à diverses vitesses du vent - vent incident à  $45^\circ$



### 2-2 Vitesse de l'air à l'intérieur

Lorsque le débit de l'air est connu, en l'associant à la température intérieure et externe, il est possible de calculer la quantité de l'apport ou de la perte de chaleur dans l'espace intérieur, c'est-à-dire la

charge thermique associée à la ventilation ; cette information est liée à l'équilibre énergétique du bâtiment. Mais la ventilation a aussi un effet bénéfique sur le confort thermique, cet effet étant lié à la vitesse de l'air dans la pièce où se trouve le sujet. Comme nous l'avons vu précédemment, les valeurs locales de la vitesse de l'air dépendent de plusieurs facteurs (la vitesse du vent, la dimension et la position des ouvertures, etc.) et elles ne peuvent être prédites avec précision qu'au moyen d'une simulation informatique ou d'une évaluation expérimentale.

L'évaluation de la vitesse moyenne du vent est un compromis entre l'absence d'information sur la vitesse de l'air et la connaissance détaillée des valeurs de la vitesse de l'air dans chaque partie de l'espace intérieur. À partir de la vitesse moyenne du vent, il est possible de déduire, comme première approximation, une indication de l'effet du flux d'air sur le confort. La figure 3.5-16 illustre la relation entre la surface des ouvertures et la vitesse de l'air intérieur, exprimée en pourcentage de la vitesse de l'air extérieur, dans une pièce munie d'une ventilation transversale par des ouvertures centrées et opposées, pour diverses valeurs du rapport en pourcentage de la surface d'entrée à la surface de fenestration nette totale (entrée + sortie), afin de prendre en compte l'effet de la différence entre les dimensions de l'entrée et de la sortie.

Les valeurs de la vitesse de l'air intérieur dérivées de la figure 3.5-16 varient si on modifie la position des fenêtres, c'est-à-dire si celles-ci ne sont pas centrées et opposées. Pour une vitesse de l'air extérieur donnée, la valeur de la vitesse moyenne de l'air intérieur doit être corrigée selon les indications du tableau 3.5-1.

**TABLEAU 3.5-1** Effet de la position des fenêtres sur la circulation de l'air intérieur

Orientation Position de la fenêtre	Variation (%)	
	Vent 0°	Vent 45°
	0	0
	-10	+40
	-10	-15
	-15	0
	-15	0
	0	0
	-10	+40
	-10	-15
	0	-60
	-20	-10
	-20	-60

**TABLEAU 3.5-2** Effet de la position des persiennes sur la circulation de l'air intérieur

Type de persienne	Variation de la vitesse de l'air intérieur (%)
	0°
Horizontales (pare-soleil)	-20
En L (horizontales et verticales)	+5
Horizontales multiples	-10
Verticales multiples	-15

**TABLEAU 3.5-3** Effet des vérandas sur la circulation de l'air intérieur

Type de véranda	Position	Variation de la vitesse de l'air intérieur (%)
		0°
Ouverte sur trois côtés	Au vent	+15
	Sous le vent	+15
Ouverte sur deux côtés	Au vent	0
	Sous le vent	0
Côté ouvert parallèle au mur de la pièce	Au vent	-10
	Sous le vent	0
Côté ouvert perpendiculaire au mur de la pièce	Au vent	-50
	Sous le vent	0

### Effet des persiennes

Les persiennes servant de protection contre les apports solaires directs affectent la vitesse moyenne de l'air intérieur et la disposition des lignes de courant. Le tableau 3.5-2 résume l'effet de quelques types simples de persiennes sur la circulation d'air dans la pièce, exprimé sous forme de facteur de correction applicable à la vitesse moyenne de l'air intérieure obtenue avec la figure 3.5-16.

### Effet des vérandas

La présence d'une véranda du côté exposé au vent ou sous le vent d'une pièce influe sur la circulation d'air. Le facteur de correction applicable à la vitesse moyenne de l'air intérieur obtenue avec la figure 3.5-16 est donné au tableau 3.5-3.

### Effet des moustiquaires

Les moustiquaires sont absolument nécessaires, non seulement dans les régions infestées par le paludisme, mais aussi lorsqu'on utilise une lampe à l'intérieur la nuit, pour empêcher l'afflux d'insectes attirés par la lumière. Les moustiquaires réduisent la circulation d'air de façon substantielle. Un filet en coton peut causer une réduction de 70 % de la vitesse de l'air.

Un filet en nylon lisse donne un meilleur rendement, avec une réduction d'environ 40 % du débit d'air et d'environ 35 % la vitesse moyenne de l'air intérieur. Ce dernier taux de réduction augmente, mais pas de façon dramatique, avec la vitesse du vent extérieur, et il subit aussi l'incidence de l'angle du vent, comme le montre la figure 3.5-17.

FIGURE 3.5-16 Vitesse moyenne de l'air intérieur dans une ventilation transversale à travers des ouvertures de dimensions différentes

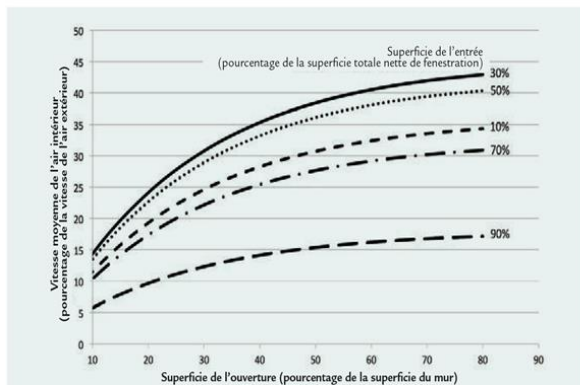
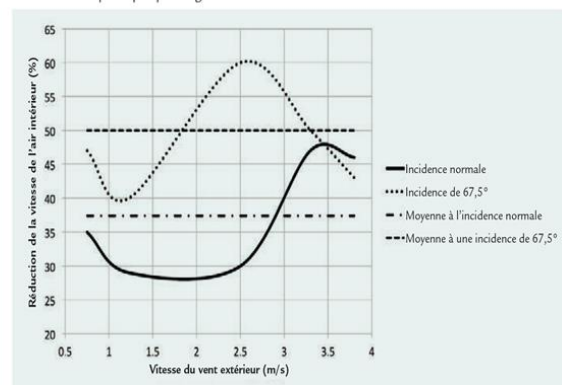


FIGURE 3.5-17 Réduction de la vitesse de l'air à travers un moustiquaire pour quelques angles incidents



### 3- Effet de cheminée

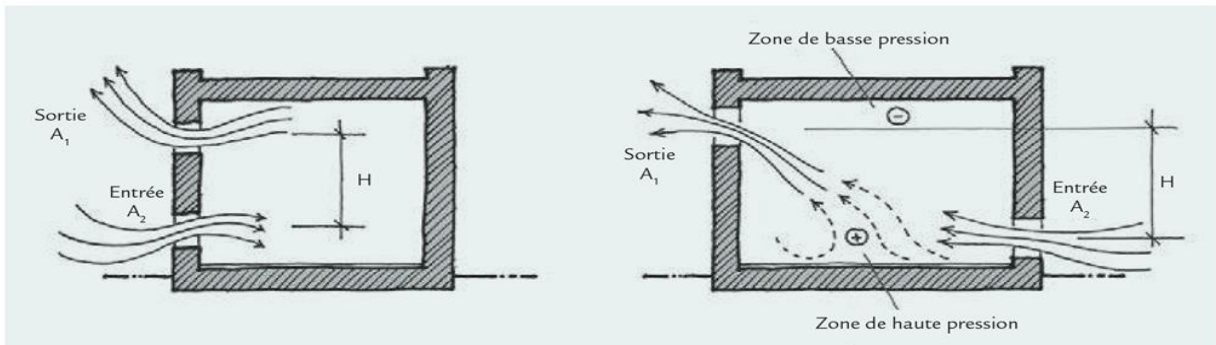
Réchauffé par les charges internes (les personnes, les lumières, l'équipement), l'air pénétrant un bâtiment non climatisé a tendance à s'élever, parce qu'il se réchauffe et que sa masse volumique est inférieure à celle de l'air extérieur. S'il y a une ouverture au sommet, l'air chaud s'y échappe et est remplacé par l'air venant de l'extérieur, plus froid et plus lourd, qui entre par le bas.

En l'absence de vent, si la résistance interne au flux n'est pas significative, le flux d'air  $V$  traversant par effet de cheminée deux ouvertures de mêmes dimensions à des hauteurs différentes dépend de l'écart entre la température intérieure moyenne  $T_i$  et la température extérieure moyenne  $T_o$  (en K), de la différence de hauteur  $H$  (en m) entre les ouvertures et de leur surface nette égale  $A$  (en  $m^2$ ,  $A_1 = A_2$ ), et peut être calculé selon la formule suivante (figure 3.5-18) :

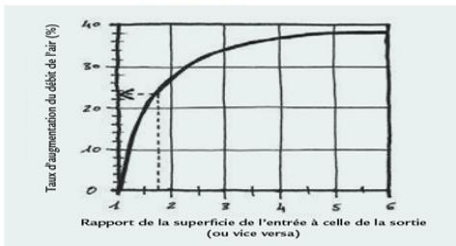
$$V = 2,88 A \sqrt{\frac{T_i - T_o}{T_i}} \quad (3.5-2)$$



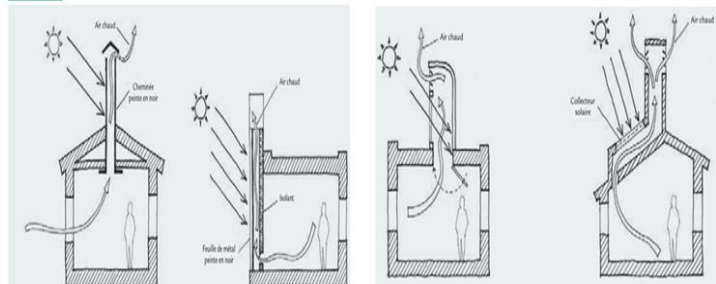
**FIGURE 3.5-18** Flux d'air dû à la différence de hauteur entre les ouvertures et à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur, en l'absence de vent



**FIGURE 3.5-19** Augmentation du débit de la cheminée en raison de la différence de dimension entre les ouvertures



**FIGURE 3.5-20** Types de cheminées solaires



Si l'entrée et la sortie ne sont pas de superficie égale, le flux d'air est d'abord déterminé en fonction de la plus petite des deux surfaces, puis en fonction du rapport de la superficie d'entrée à celle de sortie, ou vice versa, le pourcentage d'augmentation du flux est donné par le graphique de la figure 3.5-19.

S'il y a lieu, les facteurs de correction relatifs aux persiennes et au moustiquaire dans le cas de la ventilation transversale s'appliquent ici aussi. Étant donné que le flux d'air augmente avec la hauteur de la cheminée et l'écart de température, la différence de hauteur  $H$  entre les ouvertures doit être maximisée, tout comme leurs dimensions. Pour augmenter le débit, une solution efficace consiste à accroître l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur à l'aide de la cheminée solaire, de manière à exploiter l'énergie solaire pour réchauffer le flux d'air qui s'élève (figure 3.5-20).

#### 4- Ventilation due à l'effet combiné des forces du vent et de la chaleur

L'écoulement d'air réel dans un bâtiment résulte de l'effet combiné des forces du vent et de la chaleur (effet de cheminée). Les deux forces peuvent se combiner ou s'opposer, selon la direction du vent et selon que la température intérieure ou extérieure est la plus élevée. Lorsqu'elles agissent simultanément, le débit d'air qui en résulte à travers le bâtiment peut se calculer comme suit :

$$V = \sqrt{V_w^2 + V_s^2} \quad (3.5-3) \text{ où}$$

$V$  = le débit d'air résultant (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;

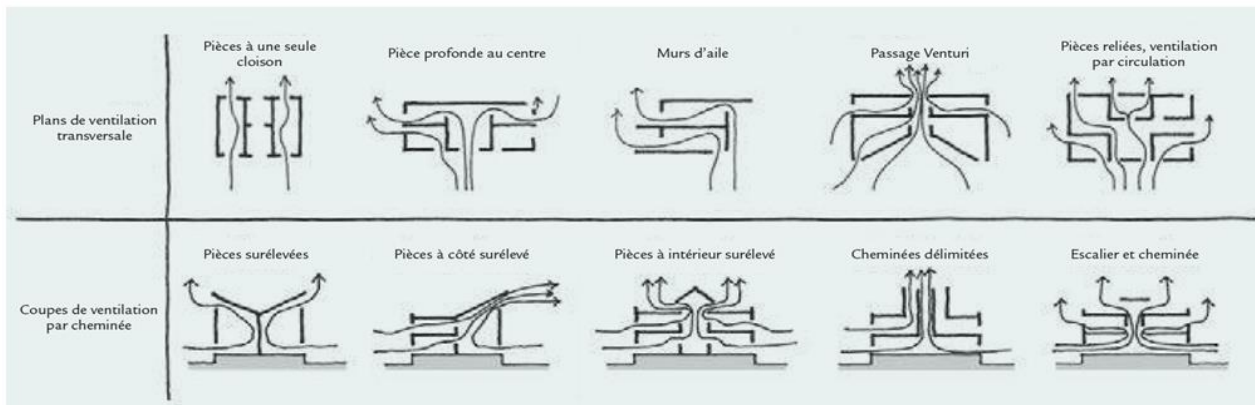
$V_w$  = le débit d'air attribuable au vent (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;

$V_s$  = le débit d'air attribuable à l'effet de cheminée (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

#### 5- Stratégies d'organisation des pièces

Lorsque l'on conçoit un bâtiment de manière à tirer le meilleur parti possible des avantages de la ventilation naturelle passive et transversale, l'organisation des pièces joue un rôle important. Les meilleures stratégies sont illustrées à la figure 3.5-21.

**FIGURE 3.5-21** Stratégies d'organisation des pièces facilitant à la fois la ventilation passive et transversale



## 6- Capteurs de vent

Dans certains cas, il est difficile de fournir une ventilation adéquate même si le site est plutôt venteux : dans les agglomérations basses et denses, où il est difficile d'avoir un bon accès au vent parce que les bâtiments au vent bloquent la brise ; lorsque le conflit entre la meilleure orientation pour l'ombrage et le vent oblige à favoriser la protection solaire ; ou lorsque la forme du terrain empêche d'orienter le bâtiment de façon à profiter de la direction du vent dominant.

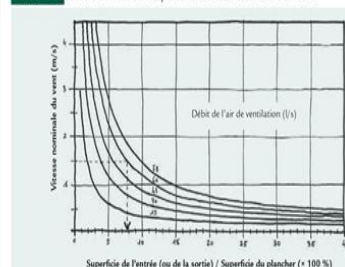
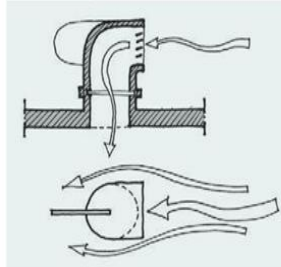
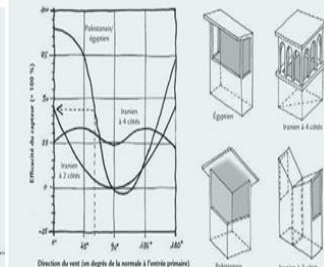
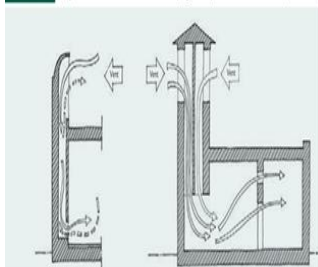
Dans certains pays, une solution traditionnelle à ce type de problème est le capteur de vent, une tour capable de capter les vents au-dessus du bâtiment et d'amener à l'intérieur l'air frais venant de l'extérieur (figure 3.5-22). Une condition préalable à l'utilisation d'un capteur de vent est que le site doit avoir des vents constants d'une bonne vitesse. On distingue deux catégories de capteurs de vent : les capteurs de vent traditionnels (figure 3.5-23) et les capteurs de vents modernes ou commerciaux (figure 3.5-24). Le fondement de ces types de capteurs de vent est presque le même.

**FIGURE 3.5-22** Capteurs de vent unidirectionnel (à gauche) et multidirectionnel (à droite)

**FIGURE 3.5-23** Efficacité de divers modèles de capteurs de vent

**FIGURE 3.5-24** Capteur de vent à moulinet

**FIGURE 3.5-25** Dimensionnement des capteurs de vent destinés au refroidissement



Les entrées du capteur de vent, pour s'élever au-dessus de la couche de turbulence et de traînée, doivent être à au moins 2,4 m au-dessus de la hauteur des bâtiments et obstructions voisins. La superficie de l'ouverture du capteur nécessaire pour atteindre un débit d'air donné, exprimée en pourcentage de la superficie du plancher, peut être déterminée à partir du graphique de la figure 3.5-25.

On entre la vitesse nominale du vent sur l'axe vertical du graphique, on se déplace horizontalement jusqu'à l'intersection de la courbe correspondant au débit d'air nécessaire, puis on descend jusqu'à l'axe horizontal pour lire la dimension de l'ouverture d'entrée en pourcentage de la superficie du plancher. Le graphique est basé sur un angle incident compris entre 0° (normale) et 40° par rapport à



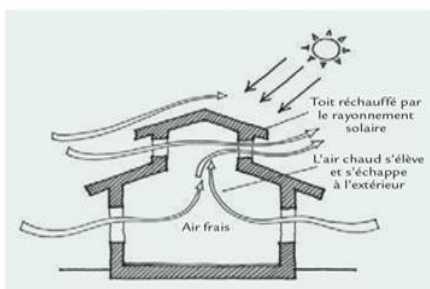
l'ouverture du capteur de vent. Pour les modèles de capteurs de vent à plusieurs ouvertures orientées différemment, l'ouverture dans chaque direction doit être dimensionnée de façon à obtenir le débit d'air nécessaire. L'entrée dans chaque direction ne doit pas être plus grande que la surface de coupe transversale de la tour, et les fenêtres mobiles utilisées aux sorties doivent être environ deux fois plus grandes que les entrées. Malgré tous les avantages qu'offre un capteur de vent, on peut opposer à son utilisation le fait que son orifice laisse facilement entrer les insectes et la poussière. Ce problème est particulièrement grave en Afrique, où la dengue et le paludisme tuent des milliers de personnes par année. Il faut donc installer des moustiquaires aux ouvertures d'entrée et de sortie, ce qui a pour effet de réduire le flux d'air d'environ 50 %.

Une autre faiblesse du capteur de vent est que le contrôle du débit volumétrique est presque nul, à moins d'utiliser des régulateurs de tirage. Sous un climat chaud et aride, on n'utilise les capteurs de vent que pendant la nuit ; toutefois, si de l'eau est disponible, ils peuvent aussi être efficaces pendant la journée, si on exploite le principe de refroidissement par évaporation.

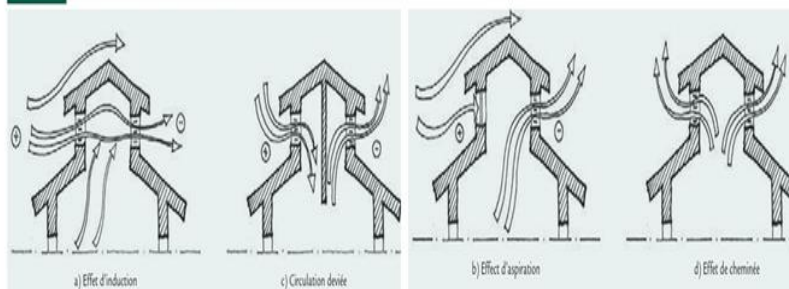
## 7- Ventilation induite

La ventilation induite peut être très efficace dans les zones de climat chaud et humide ou chaud et aride. La ventilation peut être induite de trois façons. La première consiste à chauffer l'air dans une zone restreinte par rayonnement solaire, afin de créer un écart de température et de provoquer une circulation d'air, comme dans les cheminées solaires. Le tirage force l'air chaud à s'élever et à s'échapper vers l'extérieur ; l'air froid qui le remplace cause le refroidissement (figure 3.5-26).

**FIGURE 3.5-26** Ventilation induite : effet de cheminée



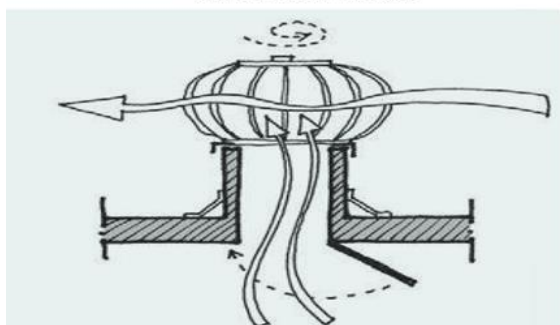
**FIGURE 3.5-27** Ventilation induite : canalisation du flux d'air



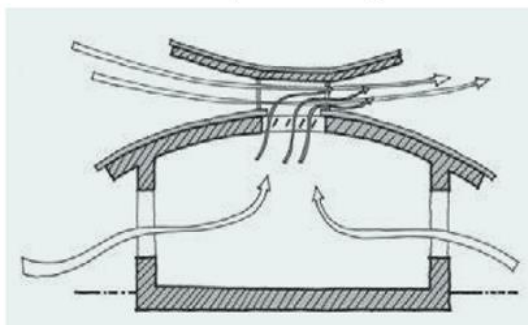
La seconde façon exploite la vitesse du vent, soit en canalisant le flux d'air intérieur (figure 3.5-27), soit en créant une dépression au moyen d'un appareil rotatif actionné par le vent pour extraire l'air du bâtiment (figure 3.5-28).

La troisième façon exploite l'effet Venturi, comme l'illustre la figure 3.5-29, où l'air est extrait du bâtiment à cause de la basse pression créée par le vent au sommet d'une cheminée.

**FIGURE 3.5-28** Ventilation induite : ventilateur de toit



**FIGURE 3.5-29** Ventilateur passif de Venturi, avec persiennes réglables



Dans les secteurs venteux, cette méthode peut s'avérer une solution de remplacement efficace aux capteurs de vent.

## **8- Recommandations pour une exploitation optimale de la ventilation naturelle**

■ ■ Orienter le bâtiment de manière à maximiser l'exposition des surfaces aux vents dominants. Il n'est toutefois pas nécessaire d'orienter le bâtiment perpendiculairement au vent dominant. On peut l'orienter à n'importe quel angle pratique compris entre 0 et 30 degrés sans perdre aucun des aspects bénéfiques de la brise.

■ ■ Considérer, dans l'orientation du bâtiment et le dimensionnement des fenêtres, les différents besoins selon le climat : une ventilation diurne pour un climat chaud et humide, une ventilation nocturne pour un climat chaud et aride où les variations quotidiennes de la température sont importantes ; une ventilation modérée pour le climat froid des hautes terres.

■ ■ L'élévation d'un bâtiment sur des pilotis est un avantage : le bâtiment capte ainsi davantage de vent.

■ ■ Les haies et les arbustes dévient l'air des ouvertures d'entrée et provoquent une réduction de la circulation d'air à l'intérieur. Ils doivent être plantés à au moins 8 m du bâtiment, sinon la circulation d'air induite serait réduite au minimum. En revanche, on peut accroître la circulation d'air du côté sous le vent en plantant des haies basses à 2 m du bâtiment.

■ ■ Les arbres ayant une grande masse foliaire et un tronc dépourvu de branches jusqu'au-dessus de la fenêtre dévient le vent extérieur vers le bas et favorisent la circulation d'air dans la partie sous le vent des bâtiments.

■ ■ Un modèle de ventilation transversale efficace commence par une limitation de la profondeur du bâtiment, afin de faciliter le flux d'air vers l'intérieur sur une façade et vers l'extérieur sur l'autre. Des éléments architecturaux peuvent aider à exploiter les vents dominants : les murs en aile et les parapets créent des zones de pression positive ou négative qui induisent la ventilation transversale.

■ ■ La vitesse de l'air dans une pièce varie de façon significative en fonction de la position des ouvertures. La stratégie la plus efficace est de pratiquer des ouvertures décalées sur les murs opposés. Limiter la largeur des pièces s'il est impossible de pratiquer des ouvertures sur deux murs.

■ ■ Les grandes ouvertures (portes et fenêtres) sont un avantage seulement si elles sont protégées efficacement du rayonnement solaire.

■ ■ Les ouvertures d'entrée et de sortie en hauteur ne serviraient qu'à faire sortir l'air à ce niveau, sans produire de circulation d'air à la hauteur des occupants. Pour maximiser la circulation d'air sur un plan particulier, on garde la hauteur d'allège de l'ouverture à 85 % de la hauteur critique (celle de la tête). Les niveaux suivants sont recommandés selon le type d'usage :

— assis sur une chaise = 0,75 m ;

— assis sur un lit = 0,60 m ;

— assis sur le plancher = 0,40 m.

■ ■ Le flux maximal par unité de superficie s'obtient en utilisant des ouvertures d'entrée et de sortie de superficies presque égales et à la même hauteur.

■ ■ Dans les pièces de taille normale munies de fenêtres identiques sur les murs opposés, la vitesse moyenne de l'air intérieur augmente rapidement si on élargit la fenêtre jusqu'aux deux tiers de la largeur du mur. Au-delà de ce seuil, l'augmentation de la vitesse de l'air intérieur est proportionnellement beaucoup plus petite que l'augmentation de la largeur de la fenêtre.

■ ■ Dans les pièces ayant un seul mur donnant sur l'extérieur, il est préférable de pratiquer deux fenêtres qu'une seule sur ce mur.

■ ■ Une fenêtre pratiquée sur un seul côté peut ventiler une pièce jusqu'à une profondeur de 6 à 7 m. Avec la ventilation transversale, la ventilation naturelle peut atteindre une profondeur de 15 m. L'intégration à un atrium ou à un puits de cheminée pour accroître l'effet de cheminée aide aussi à ventiler les pièces profondes.

■ ■ L'installation de châssis inclinés à 45 degrés dans une direction appropriée favorise la circulation de l'air à l'intérieur. Les châssis projetant vers l'extérieur sont plus efficaces que ceux qui projettent vers l'intérieur.

■ ■ Les surplombs du toit favorisent la circulation d'air dans les espaces de travail à l'intérieur des bâtiments. Une véranda ouverte sur trois côtés est préférable, car elle augmente la circulation d'air dans la pièce par rapport au vent extérieur, pour la plupart des orientations du bâtiment.

■ ■ La circulation d'air dans un bâtiment n'est pas affectée par la construction d'un autre bâtiment de hauteur égale ou inférieure sous le vent du premier, mais elle est légèrement réduite lorsque le bâtiment sous le vent est plus haut que celui qui est au vent.

## CHAPITRE V : ECRAIRAGE NATUREL

L'éclairage naturel est essentiel à une architecture écologique, quelles que soient les conditions climatiques, pour assurer le confort visuel et réduire la consommation d'énergie conventionnelle tout en réduisant les apports thermiques causés à l'intérieur par l'éclairage artificiel. La luminosité du ciel et, par conséquent, les stratégies de conception passive sont différentes selon que le climat est chaud et humide ou chaud et aride. Sous le ciel clair des climats chauds et arides, la clarté n'est pas uniforme ; elle diminue de l'horizon au zénith et augmente considérablement près de la position du soleil. Sous le ciel nuageux caractéristique des climats chauds et humides, la luminosité du ciel est plus uniforme ; en revanche, elle augmente de l'horizon au zénith. On distingue généralement les besoins en lumière du jour selon qu'ils sont quantitatifs ou qualitatifs. Les besoins quantitatifs renvoient au niveau d'éclairement à l'intérieur et les besoins qualitatifs, à la distribution de luminance dans le champ visuel.

### *Niveau d'éclairage naturel*

La quantité de lumière ou le niveau d'éclairement à l'intérieur varie principalement en fonction de la distance de l'ouverture par où pénètre la lumière. Le niveau d'éclairement en un point donné de la pièce est la somme de la lumière directe venant du ciel, de la lumière réfléchiée par les surfaces des bâtiments voisins ou sur le sol et de la lumière réfléchiée par les surfaces intérieures de la pièce (plafond, murs et plancher). Comme la luminance du ciel varie au cours de la journée et de l'année et que, par conséquent, l'éclairage naturel à l'intérieur est lui aussi variable, les spécialistes ont mis au point un indice, le facteur d'éclairage naturel (« Principes du confort thermique et visuel »). Le facteur d'éclairage naturel est le rapport du niveau d'éclairement en un point à l'intérieur au niveau d'éclairement à l'extérieur sur un plan horizontal, sans obstruction. Le facteur d'éclairage naturel est régi par des normes établies, et sa conformité avec ces normes dépend de la dimension des fenêtres, de la profondeur de la pièce, de la forme, de la position et du type des fenêtres et des pare-soleil, de l'obstruction provenant du contexte, ainsi que de la couleur des surfaces extérieures et intérieures.

Les couleurs claires à l'extérieur contribuent à l'éclairage naturel à l'intérieur, car elles augmentent la quantité de lumière réfléchiée qui y pénètre ; ainsi, la superficie de fenêtre requise est inférieure lorsque les surfaces de bâtiments voisins sont de couleurs claires. Les surfaces intérieures de couleur claire augmentent le niveau d'éclairement à l'intérieur, ce qui permet d'utiliser des fenêtres plus petites. La dimension adéquate des fenêtres est souvent estimée en fonction des normes prescrites. Elle dépend de la superficie du plancher et de la profondeur de la pièce, dans la mesure où une pièce profonde nécessite des fenêtres plus grandes pour une même superficie de plancher. Les proportions et l'emplacement des fenêtres influent aussi sur l'éclairage naturel à l'intérieur. Des fenêtres horizontales ou deux fenêtres séparées sur le même mur sont plus efficaces pour l'éclairage naturel qu'une seule fenêtre de même superficie, mais de forme verticale, allant du plancher au plafond. Enfin, le cadre de la fenêtre influe sur l'éclairage naturel en fonction du coefficient de réduction, soit le rapport de la superficie réelle disponible pour la pénétration de la lumière à la superficie totale de l'ouverture.

### *Qualité de l'éclairage naturel*

En plus des besoins quantitatifs relatifs au niveau minimal d'éclairement à l'intérieur, les besoins qualitatifs ont trait à la distribution uniforme de l'éclairage naturel à l'intérieur. Le rapport entre les niveaux d'éclairement minimal et maximal à l'intérieur doit être contrôlé pour éviter les grands écarts de luminance dans le champ visuel. Un autre effet sur les besoins qualitatifs du confort visuel découle de la lumière directe du soleil, dont la réflexion peut causer l'éblouissement.

Dans la zone de climat chaud et aride et de savane, à cause de la nature éblouissante de la lumière réfléchi par le sol ou par les bâtiments de couleur claire, les ouvertures doivent être formées de manière à orienter la vision vers le ciel plutôt que vers l'horizon ou le sol. Par conséquent, les fenêtres doivent être pratiquées au-dessus du niveau visuel ou protégées par des stores vénitiens, de manière à empêcher une vision directe sur l'extérieur tout en laissant entrer par les stores une lumière indirecte réfléchi par le sol extérieur qui sera de nouveau réfléchi par le plafond, produisant un éclairage naturel indirect uniforme. Dans ce cas, il est préférable que la couleur des stores ne soit pas trop claire, pour éviter l'éblouissement.

La lumière réfléchi à l'intérieur est la meilleure forme d'éclairage naturel, de sorte qu'une fenêtre positionnée en hauteur, au-dessus du niveau des yeux par exemple, présente l'avantage de réfléchir la lumière vers le plafond. Un plafond peint en blanc assure à son tour une diffusion adéquate de la lumière à l'intérieur, même si les ouvertures sont relativement petites (figure 3.6-1). Les fenêtres basses sont également acceptables si elles donnent sur une cour ombragée ou sur des surfaces non éblouissantes.

FIGURE 3.6-1 Types d'ouvertures favorisant la réduction de l'éblouissement dans une zone de climat chaud et aride

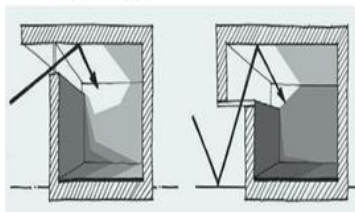


FIGURE 3.6-2 Dans une zone de climat chaud et humide, les toits en surplomb réduisent l'éblouissement provenant du ciel

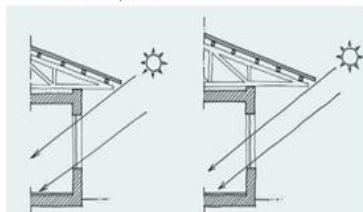
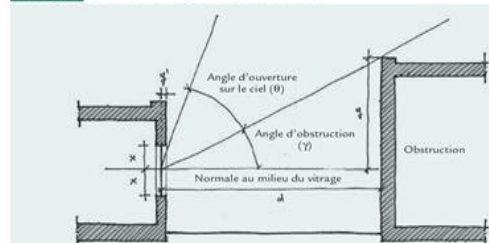


FIGURE 3.6-3 Évaluation de l'angle d'ouverture sur le ciel



Dans les zones de climat chaud et humide et des grands lacs, comme la principale source d'éblouissement est le ciel et non le sol, les pièces offrant une vue directe sur l'extérieur sont plus appropriées, mais les ouvertures doivent être positionnées de manière à éviter la vue directe sur le ciel. On peut aménager un toit avec surplomb ou une grande véranda pour obstruer la vue directe du ciel (figure 3.6-2).

## 1. Conception des fenêtres et confort visuel

Dans les pratiques de conception actuelles, le dimensionnement des fenêtres a souvent pour unique contrainte la réglementation sur la santé, qui exige une superficie minimale. Si cette exigence est respectée, la dimension et la forme des fenêtres dépendant généralement beaucoup plus de l'esthétique que de critères fonctionnels, bien que la conception des fenêtres implique des choix qui ont une forte incidence sur la consommation d'énergie et le confort visuel.

La première préoccupation de l'architecte devrait donc être de dimensionner les fenêtres selon leur fonction primordiale, l'éclairage naturel, puis de contrôler si la satisfaction de cette exigence correspond à l'autre fonction importante des fenêtres, soit de procurer aux occupants une vue sur l'extérieur.

### 1-1 Méthode en cinq étapes à appliquer au début du processus de conception

La méthode décrite ci-après permet de procéder à un premier dimensionnement approximatif des fenêtres (au début du processus de conception) afin d'obtenir un niveau d'éclairage raisonnable. Comme cette méthode repose uniquement sur l'apport du rayonnement diffus et réfléchi, elle ne s'applique que dans les cas suivants : i) les fenêtres qui ne reçoivent pas de rayonnement direct,

notamment celles qui sont protégées par un écran solaire efficace ; ii) tous les cas où des obstructions empêchent la plupart du temps la pénétration du rayonnement direct.

Sous un climat ensoleillé, si les fenêtres ne sont ni obstruées ni complètement ombragées, les pièces seront trop éclairées (ce qui en fera des sources d'éblouissement et de surchauffe) ; dans ce cas, le concepteur aura recours à des modèles de simulation pour prendre en compte l'effet du rayonnement direct sur les valeurs annuelles de l'éclairement, sur l'éblouissement et sur l'équilibre énergétique de la zone.

Même si les fenêtres sont toujours protégées de la lumière directe du soleil, la méthode risque de surestimer la dimension des fenêtres dans les climats tropicaux, à cause du niveau élevé d'éclairement à l'extérieur et du nombre de jours clairs. Ainsi, le concepteur doit garder à l'esprit le fait que le réglage du processus d'optimisation, effectué à l'aide d'outils de simulation, pourrait l'amener à réduire la dimension du vitrage. De toute façon, même si les perfectionnements ultérieurs ne sont pas effectués faute de temps ou d'argent, il est toujours préférable d'utiliser cette méthode simple que de ne pas en utiliser du tout.

Les étapes de la méthode se déclinent comme suit :

- a. Évaluer la quantité de lumière naturelle reçue par la pièce, en calculant l'angle d'ouverture sur le ciel.
- b. Évaluer la quantité d'éclairage nécessaire dans la pièce, en fixant la valeur moyenne souhaitée du coefficient d'éclairage diurne (c. é. d.) ;
- c. Calculer le rapport fenêtre/mur (RFM) nécessaire pour obtenir le coefficient d'éclairage diurne souhaité ;
- d. Évaluer les contraintes de dimensionnement imposées par le c. é. d. cible établie à la deuxième étape, en calculant la profondeur maximale de la pièce et la couleur des murs ;
- e. Déterminer la superficie de vitrage requise.

### ***Étape 1 – Calculer l'angle d'ouverture sur le ciel***

L'angle d'ouverture sur le ciel est déterminé soit graphiquement (figure 3.6-3), soit analytiquement, avec la formule :

$$(\theta) = 90^\circ - \arctan(\gamma/x) - \arctan(\gamma/d) \quad (3.6-1)$$

Si la position de la fenêtre n'est pas encore connue, le calcul de l'angle d'exposition au soleil se fait simplement à partir du point central de la façade. Les conditions d'obstruction complexes peuvent être analysées à l'aide d'un modèle en 3D et d'un lancer de rayons (*ray-tracer*).

### ***Étape 2 – Déterminer la valeur moyenne du c. é. d. ( $DF_m$ )***

Selon les niveaux moyens d'éclairement à l'extérieur dans les pays d'Afrique de l'Est par temps nuageux, une pièce ayant un coefficient d'éclairage diurne moyen compris entre 1 et 2 % peut être considérée comme étant bien éclairée et ne nécessite guère d'éclairage supplémentaire pendant la journée. Une première hypothèse raisonnable de cette valeur est  $DF_m = 1,5 \%$ .

### ***Étape 3 – Calculer le rapport fenêtre-mur (RFM) nécessaire***

Le rapport fenêtre-mur (RFM) correspond à :



$$RFM = \frac{\text{Aire des ouvertures extérieures (sauf les montants et cadres de fenêtre)}}{\text{Aire totale de la façade extérieure (Largeur} \times \text{Hauteur du sol au plafond)}} = \frac{A_n}{A_t} \quad (3.6-2)$$

La valeur minimale du *RFM* nécessaire à l'éclairage latéral, compte tenu des obstructions externes, du type de vitrage et de la valeur cible du coefficient d'éclairage diurne moyen, est donnée par :

$$RFM = \frac{0,088 DF_m}{\tau_{vis}} \times \frac{90^\circ}{\theta} \quad (3.6-2) \text{ où}$$

$DF_m$  = le coefficient d'éclairage diurne moyen (en %) ;

$\theta$  = l'angle d'ouverture sur le ciel (en degrés) ;

$\tau_{vis}$  = le facteur de transmission de la lumière visible du vitrage.

La valeur maximale de *RFM* est 0,8, car les meneaux et le cadre des fenêtres représentent environ 20 % de la superficie de l'ouverture.

#### **Étape 4 – Calculer la profondeur maximale de la pièce et le facteur de réflexion des surfaces**

Outre l'exigence relative au coefficient d'éclairage diurne, trois facteurs limitant la profondeur de la pièce doivent être pris en compte dans la conception de l'éclairage naturel :

- ■ l'uniformité de l'éclairage (la distance à laquelle l'uniformité du niveau d'éclairage naturel dans l'espace diminue) ;
- ■ la profondeur limite de l'ouverture sur le ciel (la distance de la fenêtre à partir de laquelle le ciel n'est plus visible) ;
- ■ la profondeur de la zone d'éclairage naturel (la distance jusqu'à laquelle une quantité significative d'éclairage naturel se propage dans la pièce).

Dans une pièce profonde, le coefficient d'éclairage diurne moyen devient une représentation inadéquate du niveau d'éclairage naturel sous un ciel couvert, car le niveau d'éclairage est très élevé près des fenêtres et très bas au fond de la pièce. Il y a donc lieu d'établir la profondeur maximale de la pièce. Une première approximation de la profondeur maximale acceptable de la pièce en ce qui a trait à l'uniformité de l'éclairage naturel est donnée par la formule :

$$\text{Profondeur limite de l'éclairage naturel} = \frac{2/(1-\rho_m)}{\frac{1}{l} + 1/h} \quad (3.6-4) \text{ où}$$

$\rho_m$  = le facteur de réflexion moyen de la surface, pondéré en fonction de la superficie. En l'absence de données disponibles,

$\rho_m = 0,5$  peut servir d'approximation initiale ;

$l$  = la largeur de la chambre (en m) ;

$h$  = la hauteur de la fenêtre au niveau du linteau (en m).

Les pièces ayant une profondeur inférieure à cette limite affichent généralement un niveau d'éclairage naturel uniforme toute la journée. Pour accroître la profondeur limite, on peut appliquer des couleurs très claires sur les murs, de manière à augmenter le facteur de réflexion moyen des surfaces. La profondeur limite de l'ouverture sur le ciel, soit la distance depuis la fenêtre au-delà de laquelle il n'y a plus de vue directe sur le ciel (à la hauteur du plan de travail) est définie comme suit (figure 3.6-4) :

$$\text{Profondeur limite de l'ouverture sur le ciel} = h' \cdot \tan(\alpha) \quad (3.6-5) \text{ où}$$

$\alpha \approx \theta$ , quand  $h \gg x$

FIGURE 3.6-4 Évaluation de la profondeur limite de l'ouverture sur le ciel

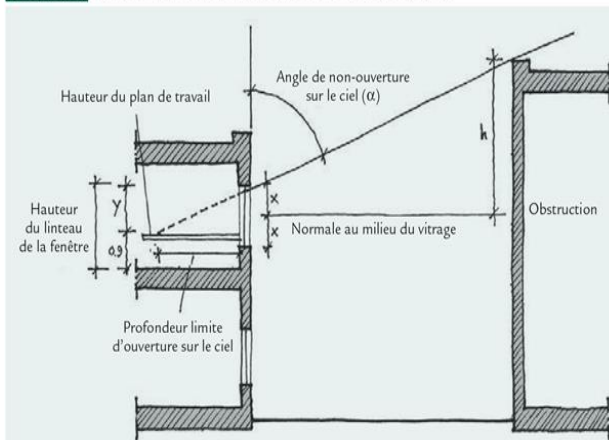
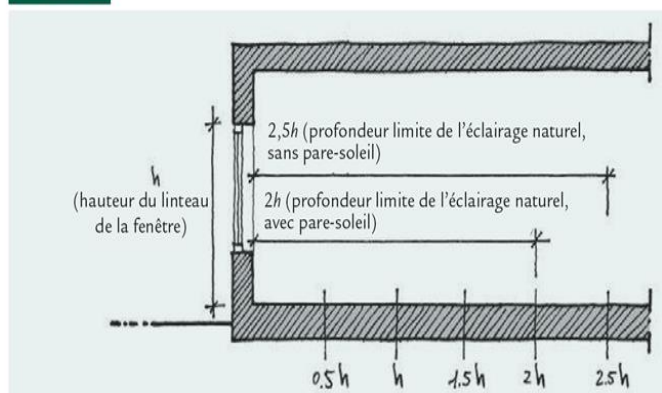


FIGURE 3.6-5 Profondeur limite



La pénétration de l'éclairage naturel dans une pièce varie linéairement avec la hauteur du linteau de la fenêtre. Le facteur de relation varie selon que la fenêtre est munie ou non d'un pare-soleil (rideaux, volets, etc.). La profondeur limite de l'éclairage naturel, est donnée par la formule suivante (figure 3.6-5) :

Profondeur limite de l'éclairage naturel =  $2,5 h$  sans pare-soleil

Profondeur limite de l'éclairage naturel =  $2 h$  avec pare-soleil

Pris ensemble, les trois facteurs de limitation produisent l'équation suivante pour déterminer la profondeur limite de la pièce :

Profondeur < le moindre de :  $h' \tan(\alpha)$

$2,5 h$  sans pare-soleil

$2 h$  avec pare-soleil

La profondeur maximale de la pièce pour ce qui est de l'éclairage naturel est la plus petite des trois valeurs correspondant à la contrainte d'uniformité de l'éclairage, à la profondeur limite de l'ouverture sur le ciel et à la profondeur limite de l'éclairage naturel.

### Étape 5 – Déterminer la superficie de vitrage requise

Pour calculer l'aire minimale du vitrage,  $A_{\text{vitrage}}$ , nécessaire pour chaque pièce à éclairage naturel, on peut supposer que la profondeur de la zone est la profondeur limite de l'éclairage naturel calculée à l'étape 4. On calcule l'aire intérieure totale (y compris les fenêtres),  $A_{\text{totale}}$ , selon cette « profondeur virtuelle », puis on déduit  $A_{\text{vitrage}}$  à l'aide de la formule :

$$A_{\text{vitrage}} = \frac{DF_m \cdot 2A_{\text{totale}}(1 - \rho_m)}{\tau_{\text{vis}} \cdot \theta} \quad (3.6.6) \text{ où } A_{\text{totale}}$$

est l'aire totale de toutes les surfaces intérieures, y compris les fenêtres ; si la profondeur réelle de la pièce est supérieure à la valeur maximale calculée à l'étape 4, c'est cette dernière qui sert à calculer  $A_{\text{totale}}$ . Pour obtenir l'aire totale de la fenêtre, y compris le cadre et les meneaux, on multiplie la première approximation par 1,20. L'aire de vitrage nette peut être réduite en augmentant la transmission lumineuse  $\tau_{\text{vis}}$ , en sélectionnant correctement le type de verre, en modifiant la forme des

ouvertures pour accroître l'angle d'ouverture sur le ciel, ou en choisissant des couleurs très claires pour les murs et le plafond.

### **1-2 Liste de vérification**

Si la réduction de la consommation énergétique n'est pas une priorité :

- a. Réduire au minimum les surfaces de verre sur la façade est et, surtout, sur la façade ouest.
- b. Maintenir le *RFM* autour de 0,3 ou 0,4.
- c. Si on ignore qui occupera le bâtiment, utiliser une bande de fenêtres horizontales.
- d. Fournir des murs et des finitions intérieurs de couleur claire.

Si la réduction de la consommation énergétique est un paramètre relativement important, ajouter les éléments suivants à la liste ci-dessus :

- a. Réviser la dimension des fenêtres avec l'aide d'un énergéticien.
- b. S'il n'est pas possible de demander conseil à un spécialiste, explorer d'autres conceptions de l'enveloppe pouvant incorporer des pare-soleil ou des tablettes éclairantes.
- c. À l'aide d'un modèle simple (physique ou informatique), vérifier la qualité de la lumière et contrôler l'éblouissement.

Si la réduction de la consommation énergétique est un aspect prioritaire, ajouter les éléments suivants aux listes ci-dessus :

- a. Utiliser un modèle précis et affiner les choix en fonction des résultats de l'analyse.
- b. Demander à l'énergéticien d'effectuer une analyse paramétrique à l'aide de modèles de simulation afin d'optimiser la conception de la façade du point de vue de la qualité de l'éclairage naturel et de la consommation énergétique.

## **2- Systèmes de mise en valeur de l'éclairage naturel**

Même si les fenêtres sont dimensionnées de manière à maximiser l'éclairage naturel, celui-ci peut s'avérer insuffisant ou mal distribué. Lorsqu'il est impossible d'obtenir l'éclairage naturel ou la pénétration de lumière voulus à cause d'obstructions, de l'éblouissement dû aux dimensions excessives de la surface vitrée ou d'un conflit avec les apports solaires, il existe des solutions pour mieux contrôler l'éclairage naturel.

### **2-1 Tablette éclairante**

La tablette éclairante est un moyen bien établi (depuis l'Égypte ancienne) de faciliter la pénétration de la lumière dans une pièce. Cette tablette est conçue pour procurer de l'ombrage, diffuser la lumière plus également dans la pièce et assurer une protection contre l'éblouissement direct. Une tablette éclairante est généralement constituée d'une tablette horizontale ou presque, disposée à l'extérieur, à l'intérieur ou de part et d'autre d'une fenêtre, dans sa partie supérieure. Elle doit être positionnée de façon à éviter l'éblouissement et à maintenir la vue sur l'extérieur. En règle générale, plus la tablette éclairante est basse, plus l'éblouissement est grand.

Les tablettes éclairantes ont une incidence considérable sur la conception architecturale du bâtiment, de sorte qu'il faut en tenir compte dès le début du processus de conception, car, pour être efficaces, elles nécessitent un plafond élevé ; elles doivent être conçues spécialement en fonction de l'orientation

de la fenêtre, de la configuration de la pièce et de la latitude. Les tablettes éclairantes se prêtent particulièrement bien fenêtres faisant face au sud ou au nord, sous les climats très ensoleillés des latitudes proches de l'équateur.

L'orientation de la tablette éclairante, sa position, le type de tablette (intérieure, extérieure ou les deux à la fois ; figure 3.6-6) et sa profondeur sont toujours un compromis entre les besoins en éclairage naturel et la protection solaire. Une tablette éclairante uniquement intérieure réduit la quantité totale de lumière reçue dans la pièce.

FIGURE 3.6-6 Positions possibles d'une tablette éclairante

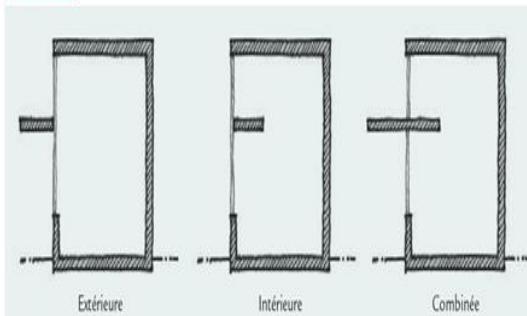


FIGURE 3.6-7 Dimensionnement d'une tablette éclairante

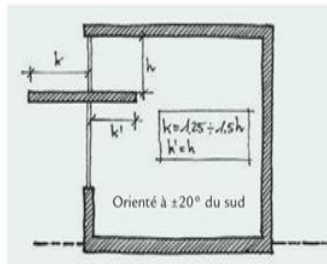
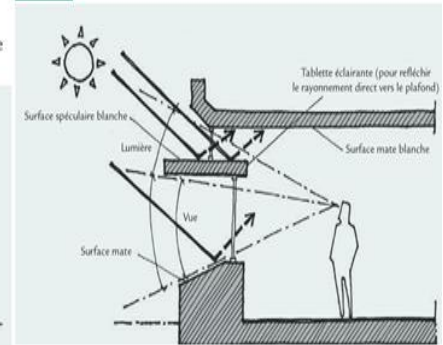


FIGURE 3.6-8 Tablette éclairante et fenêtre renfoncée



La profondeur minimale d'une tablette éclairante extérieure est déterminée par les exigences en matière d'ombrage ; plus la tablette est profonde, mieux elle ombrage la fenêtre au-dessous, empêchant ainsi la pénétration du rayonnement direct, source d'éblouissement et d'apports solaires. Pour ce qui est de la tablette intérieure, le facteur limitant est encore l'éblouissement ; il est en effet nécessaire d'empêcher la pénétration du rayonnement direct.

La profondeur nécessaire est plus grande sur les façades est et ouest, et elle varie avec l'orientation. Sur une façade orientée à moins de  $\pm 20^\circ$  du sud ou du nord dans les latitudes proches de l'équateur, la tablette éclairante intérieure doit avoir une profondeur comprise entre 1,25 et 1,5 fois la hauteur de la bande de fenêtres située au-dessus ; pour une orientation au-delà de  $\pm 20^\circ$  du sud ou du nord, cette proportion doit être augmentée jusqu'à 1,5 ou 2,0. Pour les pièces orientées vers le sud ou le nord, selon la trajectoire du soleil, la profondeur de la tablette éclairante intérieure pourrait être égale à la hauteur de la bande de fenêtres située au-dessus (figure 3.6-7). En fait, pour obtenir un bon résultat, la hauteur de la fenêtre, la profondeur de la tablette et la hauteur de la bande de fenêtres située au-dessus doivent être calculées à l'aide d'outils adaptés, en fonction de la latitude, du climat et de l'orientation.

Si la profondeur optimale de la tablette éclairante externe est excessive par rapport à d'autres exigences, on peut obtenir le même résultat en renfonçant la fenêtre vers l'intérieur (figure 3.6-8) ; avec ce type de solution, on peut encore accroître l'apport en éclairage naturel en inclinant adéquatement le seuil.

La profondeur de la tablette éclairante intérieure peut être allongée de manière à toujours intercepter le rayonnement direct à travers la fenêtre au-dessus ; dans le cas des fenêtres orientées vers l'est ou l'ouest, il peut arriver que le rayonnement direct soit à même de pénétrer l'espace entre la tablette et le plafond ; il devient alors impératif de trouver une façon de produire de l'ombrage.

Aux latitudes basses, si la tablette éclairante orientée vers le sud ou le nord est inclinée vers le haut (figure 3.6-9), l'apport en éclairage naturel augmente, mais la partie extérieure doit être allongée pour ombrager la fenêtre de façon satisfaisante. L'angle d'inclinaison optimal aux latitudes proches de l'équateur dépend du ratio  $X/H$  (figure 3.6-10).

FIGURE 3.6-9 Tablette éclairante inclinée

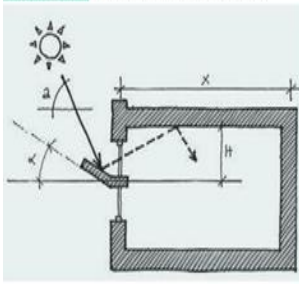


FIGURE 3.6-10 Angle optimal d'inclinaison de la tablette éclairante en fonction de X/H

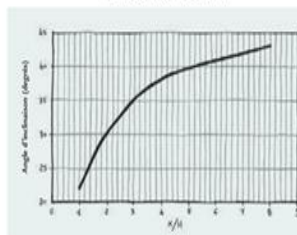


FIGURE 3.6-11 Réduction de la profondeur de la tablette éclairante

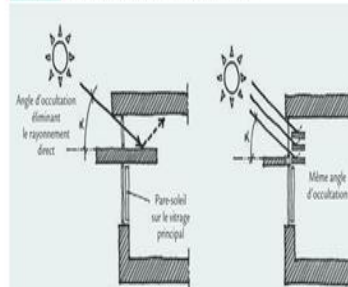
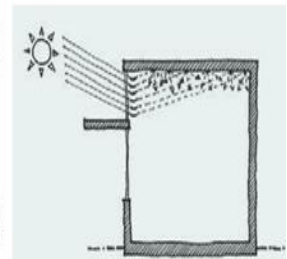


FIGURE 3.6-12 Remplacement de la tablette éclairante intérieure par des lames réfléchissantes



L'utilisation d'une tablette éclairante (si la bande de fenêtres au-dessus de la tablette a des dimensions adéquates et si la profondeur de la tablette intérieure empêche le rayonnement direct de pénétrer dans la pièce) assure l'éclairage naturel même lorsque, pour éviter l'éblouissement, la surface vitrée au-dessous est protégée par un écran solaire. Pour les façades orientées vers le sud-est ou le sud-ouest (ou vers nord-est ou le nord-ouest), la profondeur résultante de la tablette intérieure pourrait être excessive ; dans ce cas, on pourra utiliser une série de tablettes plus petites et correctement espacées (figure 3.6-11).

Une autre solution consiste à installer un store vénitien muni de lames réfléchissantes fixes ou mobiles à l'intérieur (figure 3.6-12) ou à l'extérieur de la bande de fenêtres. Dans ce cas, la tablette externe sert uniquement à assurer la protection solaire de la fenêtre qu'elle surplombe. L'efficacité d'une tablette éclairante pour améliorer l'éclairage naturel peut être bonifiée en courbant la surface qui reçoit les rayons du soleil (figure 3.6-13). Comme dans toutes les autres configurations, les caractéristiques de la surface supérieure de la tablette sont déterminantes pour son efficacité. La surface doit être blanche ou réfléchissante, et elle nécessite un entretien périodique pour conserver son efficacité.

FIGURE 3.6-13 Tablette éclairante à surface profilée

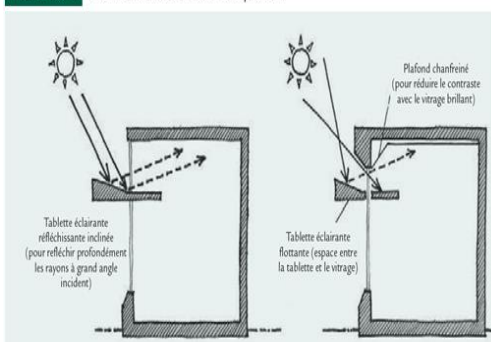


FIGURE 3.6-14 Store vénitien à lames réfléchissantes pour rediriger la lumière

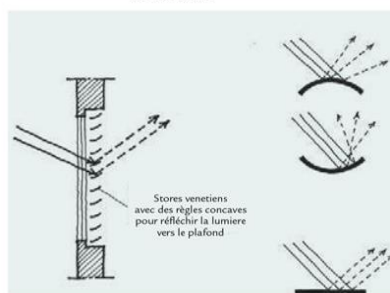
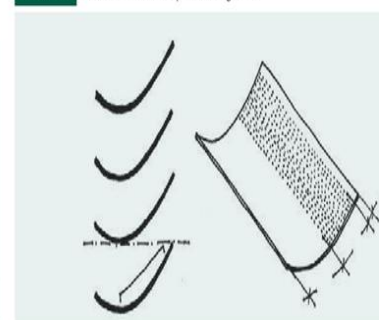


FIGURE 3.6-15 Lames réfléchissantes perforées réglables



### Astuces pour l'utilisation de la tablette éclairante

L'utilisation des tablettes éclairantes est à considérer dans la mesure où elles améliorent la distribution de l'éclairage et réduisent l'éblouissement, tout en gardant à l'esprit qu'outre leur utilité pour l'éclairage naturel, elles peuvent aussi servir d'écran solaire. Le verre de la bande au-dessus de la tablette doit être transparent. Les tablettes éclairantes et les persiennes peuvent être opaques ou translucides. Si une tablette éclairante opaque n'est pas combinée à une fenêtre inférieure avec vue, il risque d'y avoir un espace sombre sur le mur directement sous la tablette.

Pour résoudre ce problème, on laisse un espace entre la tablette et le mur. Les tablettes translucides donnent une lumière diffuse au-dessous, mais il faut les aménager de manière à éviter que les occupants qui les voient par en dessous ne soient gênés par l'éblouissement. Après une conception préliminaire initiale, il est conseillé d'optimiser les tablettes éclairantes à l'aide de modèles de simulation, ce qui constitue le seul moyen de prédire leur effet et leur rendement avec une précision raisonnable.

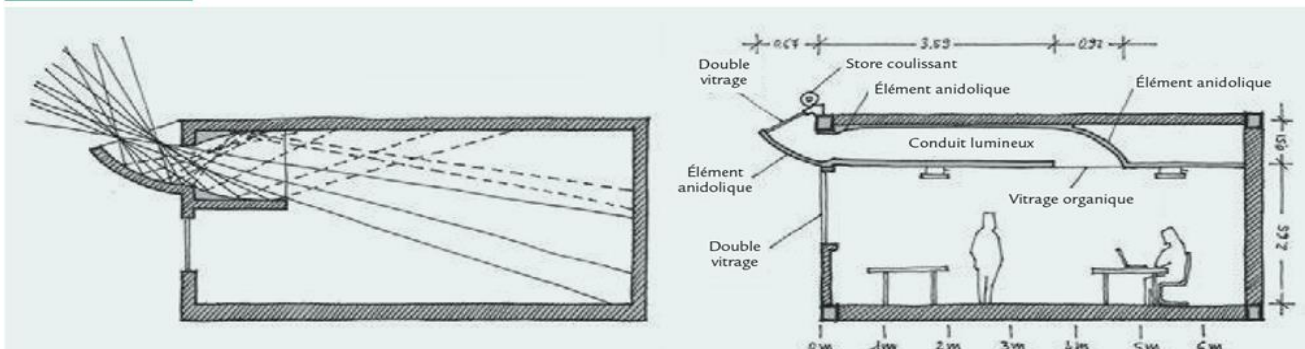
## 2-2 Stores vénitiens à lames réfléchissantes

Les stores vénitiens sont un moyen classique de contrôler la lumière du soleil, mais ils peuvent aussi servir à la rediriger. Dans certains cas, les lames ont des formes et des finitions de surface perfectionnées. Les lames peuvent être plates ou arrondies (figure 3.6-14) ; on peut les placer à l'extérieur, à l'intérieur ou entre deux parois de verre (ce qui n'est pas recommandé, car elles deviennent alors très chaudes et réémettent la chaleur sur la paroi interne). Quelle que soit leur position, ces lames doivent être réfléchissantes pour rediriger la lumière. Il existe plusieurs types de lames capables de rediriger la lumière : les lames fixes ou mobiles, solides ou microperforées. Le système le plus simple est le store vénitien classique, dont la surface supérieure des lames est réfléchissante ; lorsque l'inclinaison est réglée en fonction de la position du soleil, les lames réfléchissent les rayons sur le plafond (de couleur claire), créant ainsi un éclairage diffus. Les lames microperforées laissent passer un niveau d'éclairage raisonnable et une certaine vue sur l'extérieur, même si elles sont complètement fermées (figure 3.6-15).

## 2-3 Systèmes à plafond anidolique

Fondés sur l'optique à image floue, les systèmes à plafond anidolique tirent parti des propriétés optiques du concentrateur parabolique composé (CPC) pour recueillir la lumière diffuse du ciel et l'acheminer dans la partie la moins éclairée de la pièce (figure 3.6-16). À l'extérieur du bâtiment, un concentrateur anidolique optique capte et concentre la lumière diffuse du sommet de la voûte céleste, qui est la portion du ciel la plus brillante par temps couvert ; un conduit lumineux aménagé dans le plafond achemine la lumière au fond de la pièce.

FIGURE 3.6-16 Système anidolique



À la sortie du conduit, un réflecteur parabolique diffuse la lumière vers le bas de la pièce. Par temps clair, on peut contrôler la pénétration de la lumière directe du soleil par un store coulissant qui se déploie au-dessus de la vitre extérieure de l'ouverture.



## CHAPITRE VI : OMBRAGE

Dans une pièce climatisée ou non, l'objectif principal est de contrôler le rayonnement solaire direct de manière à assurer le confort thermique, l'éclairage et la réduction au minimum de la consommation énergétique. Le pare-soleil idéal bloque le rayonnement solaire tout en laissant l'éclairage naturel et la brise pénétrer par la fenêtre et en ménageant une vue sur l'extérieur. L'ombrage est principalement associé à la composante directe du rayonnement, tandis que le rayonnement diffus et réfléchi (sauf si la réflexion se fait sur un miroir), qui se propage d'une manière presque isotrope, entre beaucoup moins en ligne de compte.

L'ombrage est parfois non intentionnel ou indépendant des choix de conception ; il peut aussi être spécialement conçu pour contrôler le flux d'énergie solaire dans le bâtiment. Dans le premier cas, la principale cause d'ombrage est le profil orographique environnant et la présence d'éléments d'ombrage tels que les arbres ou les autres bâtiments. Dans le second cas, on fait appel à des éléments et composantes spécifiques tels que les surplombs et les pare-soleil (figure 3.7-1). Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des ombres projetées sur une surface par les éléments en saillie ou les obstructions environnantes, à l'aide de diagrammes ou d'outils d'analyse.

FIGURE 3.7-1 Ombres projetées par le contexte et par des éléments du bâtiment

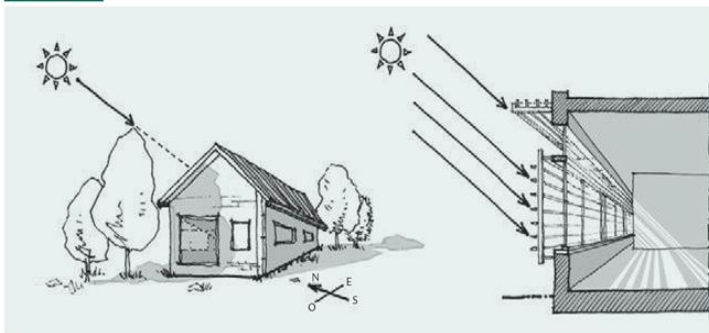
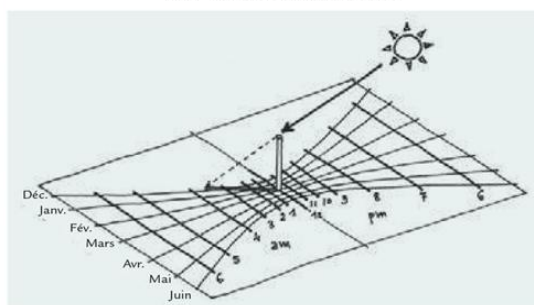


FIGURE 3.7-2 Ombre du gnomon projetée sur un cadran solaire



### 1- Cadran solaire

Le cadran solaire horizontal est un diagramme montrant, un peu comme les diagrammes de la trajectoire solaire, les trajectoires de l'ombre d'un piquet (le gnomon) à différentes heures de certains jours de l'année (figure 3.7-2). Chaque cadran solaire correspond à une latitude définie.

La méthode du cadran solaire est très rapide et facile à utiliser. Son application nécessite une maquette du bâtiment et du voisinage (figure 3.7-3).

La procédure se déroule comme suit :

- ■ Monter la maquette du bâtiment sur un plan auxiliaire mobile avec 2 axes.
- ■ Placer le cadran solaire près de la maquette, le nord du cadran correspondant à celui de la maquette.
- ■ Monter une tige de la taille indiquée (le gnomon) au niveau de la marque en forme de croix.
- ■ Mettre la maquette au soleil, de manière à ce qu'elle reçoive le rayonnement direct.
- ■ Régler l'inclinaison et l'orientation du plan et de la maquette de telle sorte que l'extrémité de l'ombre du gnomon indique l'heure et le mois à l'étude.
- ■ L'ombre et la pénétration du soleil dans la maquette simulent les conditions réelles dans le bâtiment pour l'heure et le jour en question.

FIGURE 3.7-3 Exemple d'application la méthode du cadran solaire

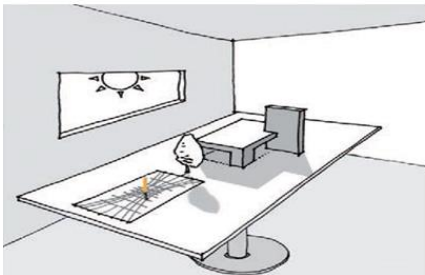


FIGURE 3.7-4 Évaluation de l'ombre projetée par un objet au moyen du cadran solaire

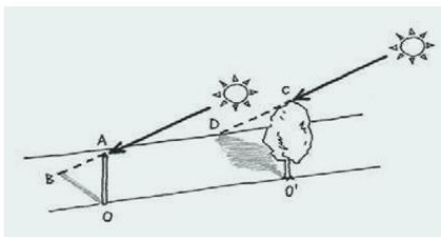
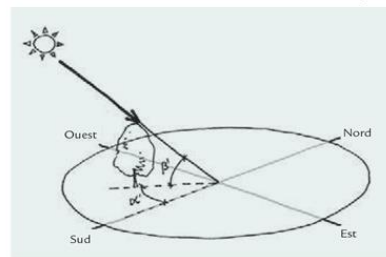


FIGURE 3.7-5 Coordonnées angulaires d'une obstruction créant un ombrage



**Remarque** : Si le temps n'est pas ensoleillé, on peut utiliser une lampe munie d'un projecteur, en la plaçant le plus loin possible de la table pour réduire l'erreur due au fait que les rayons de la lampe ne sont pas parallèles.

En outre, si on dispose d'un appareil-photo muni d'un téléobjectif, on peut cadrer la maquette et orienter la table de manière à voir la pointe du gnomon indiquer l'heure et le mois à l'étude. La photo qui en résulte correspond à une « vue du soleil » où laquelle les surfaces non visibles correspondent aux surfaces ombragées.

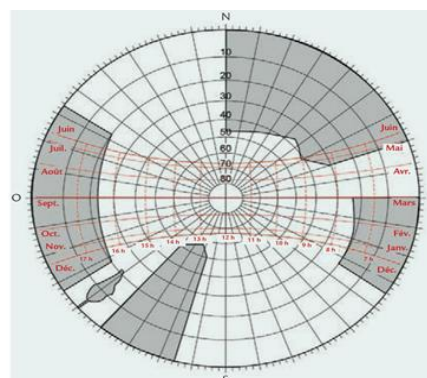
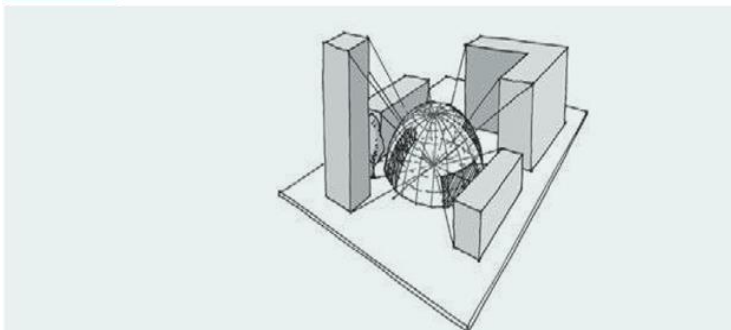
Enfin, le cadran solaire peut servir à estimer les ombres par analogie. Comme on l'a vu, le diagramme illustre la longueur et la position angulaire de l'ombre du gnomon à certaines heures de certains jours de l'année. Le calcul du rapport de la hauteur du gnomon à celle de l'élément d'ombrage analysé permet d'estimer l'ombre projetée par n'importe quel point du contexte à n'importe quel moment (figure 3.7-4).

## 2- Masques d'ombrage

Les diagrammes de la trajectoire solaire peuvent servir à étudier l'ombrage relatif à un site donné pendant l'année et à dessiner le profil des obstructions naturelles (les montagnes, les maisons, les arbres) à l'aide des coordonnées angulaires qui décrivent la position du soleil. Par exemple, en traçant la ligne idéale du sommet d'un arbre à l'observateur, on peut mesurer les deux angles  $\alpha$  et  $\beta$  (figure 3.7-5) et déterminer ainsi le profil entier de l'obstruction.

Ainsi, il est possible d'obtenir ce qu'on appelle des masques d'ombrage, en traçant le profil des obstructions sur le diagramme polaire. Lorsque la trajectoire solaire tombe dans la zone des obstructions solaires, c'est-à-dire à l'intérieur du masque, l'observateur est ombragé (figure 3.7-6).

FIGURE 3.7-6 Projection d'obstructions créant un ombrage sur un diagramme polaire



Le rapporteur d'ombre (figure 3.7-7) a été conçu pour étudier les effets des pare-soleil, des surplombs et des murs en aile sur les façades des bâtiments. Le rapporteur d'ombre a été conçu (figure 3.7-7) pour étudier les effets des pare-soleil, des surplombs horizontaux et des murs en aile sur les façades des bâtiments. Le rapporteur d'ombre a les mêmes dimensions que le diagramme polaire qui lui sera

superposé. Il montre les effets de l'ombrage causé par les éléments verticaux et les horizontaux, observé à partir d'un point précis, qui coïncide avec le centre du diagramme. Pour utiliser le diagramme, on superpose le demi-axe vertical inférieur (du centre au point B) à la ligne perpendiculaire à la façade dessinée en plan au point choisi. En outre, le diamètre A-A doit être aligné avec le profil de la façade. Le demi-cercle supérieur du diagramme est divisé en cercles concentriques et en lignes radiales, tout comme le diagramme polaire.

Cependant, la partie la plus intéressante du diagramme du point de vue pratique est le demi-cercle inférieur, qui représente la moitié de la voûte céleste (l'autre moitié lui étant parfaitement symétrique) et sur lequel on peut tracer le profil des éléments en surplomb ou en aile, selon la méthode décrite ci-après.

■ ■ Les courbes pseudo-horizontales représentent l'influence des ombres créées par les éléments en surplomb qui ont des extrémités horizontales parallèles à la façade. Elles sont dessinées en calculant l'angle  $\epsilon$ . Cet angle, situé sur le plan vertical orthogonal à la façade, est formé par la droite horizontale qui passe par le point d'analyse P et le segment qui va de ce point à l'extrémité extérieure d'un surplomb horizontal (figure 3.7-8a). On peut lire les valeurs correspondantes sur le demi-axe vertical inférieur du diagramme (du centre au point B dans la figure 3.7-7). Par exemple, si  $\epsilon = 60^\circ$ , on utilise la courbe pseudo-horizontale mesurée à  $60^\circ$ , comme à la figure 3.7-8.

FIGURE 3.7-7 Rapporteur d'ombre

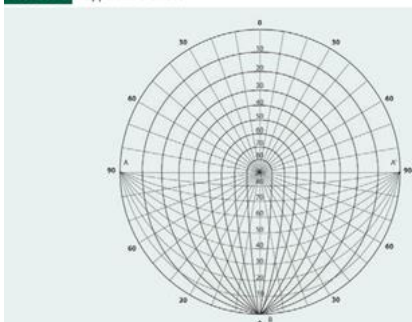
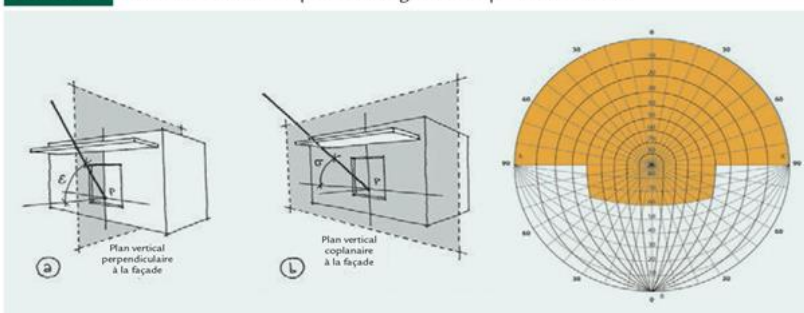
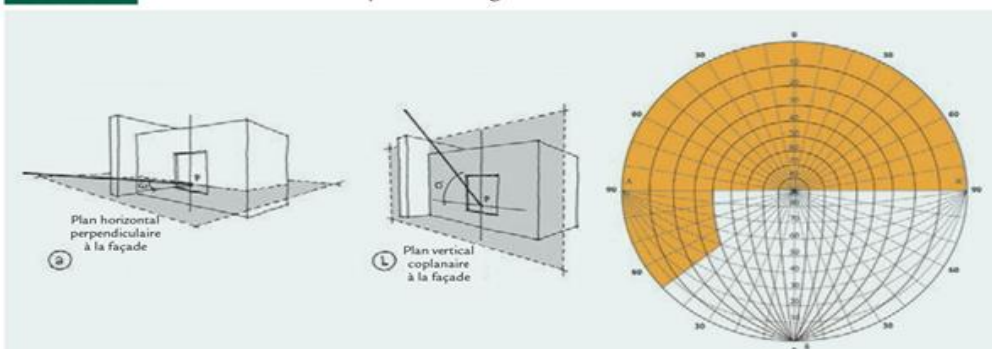


FIGURE 3.7-8 Construction du masque d'ombrage d'un surplomb horizontal



■ ■ Les courbes pseudo-verticales sont des prolongements des demi-cercles situés dans la moitié supérieure du diagramme qui convergent vers le point B ; elles prennent en compte à la fois l'influence des ombres créées par les surplombs horizontaux dont les extrémités sont perpendiculaires à la façade et celle des limites supérieures des murs en aile. On identifie ces courbes en calculant l'angle  $\sigma$ , situé dans le plan de la façade et formé par la droite horizontale qui passe par le point P et le segment qui va de P au point terminal d'un surplomb horizontal (figure 3.7-8b) ou à la limite supérieure d'un mur en aile (figure 3.7-9b). Les valeurs de  $\sigma$  se lisent à l'intersection du demi-axe vertical supérieur avec les demi-cercles (figure 3.7-7). Par exemple : si  $\sigma = 40^\circ$ , on utilise la courbe pseudo-verticale qui prolonge le demi-cercle de  $40^\circ$  situé dans la partie supérieure du diagramme, comme aux figures 3.7-8 et 3.7-9.

FIGURE 3.7-9 Construction du masque d'ombrage d'un mur en aile vertical



■ Les rayons qui partent du centre dans la moitié inférieure du diagramme représentent l'influence des ombres engendrées par les murs d'aile. Ces rayons indiquent la valeur de l'angle  $\omega$ , situé sur le plan horizontal orthogonal à la façade et formé par la droite horizontale qui passe par le point d'analyse P et le segment qui relie ce point à l'extrémité extérieure du surplomb horizontal (figure 3.7-9a). Les valeurs de l'angle  $\omega$  se lisent sur la circonférence externe du diagramme et sont symétriques par rapport à B (figure 3.7-7).

Par exemple, si  $\omega = 50^\circ$ , on utilise le rayon correspondant à  $50^\circ$  dans la partie inférieure gauche du diagramme, comme à la figure 3.7-9.

La figure 3.7-8 illustre un exemple de calcul des angles  $\varepsilon$  et  $\sigma$  pour un surplomb horizontal et la visualisation du surplomb sur le diagramme (en supposant que son prolongement latéral est symétrique au point P).

De même, la figure 3.7-9 illustre un exemple de calcul des angles  $\varepsilon$  et  $\sigma$  pour un mur en aile vertical et la visualisation de son obstruction sur le diagramme.

Enfin, pour faciliter la compréhension du masque d'ombrage, la figure 3.7-10 illustre les courbes et rayons de construction relatifs aux angles  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  et  $\omega$ . Les zones hachurées du diagramme représentent les portions de la voûte céleste obstruées par les éléments d'ombrage (le demi-cercle supérieur représente l'obstruction du bâtiment auquel la façade appartient). En superposant les masques obtenus sur le diagramme solaire du site, on voit les heures du jour où le point d'observation est ombragé (figure 3.7-11).

FIGURE 3.7-10 Courbes et rayons de construction de  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  et  $\omega$

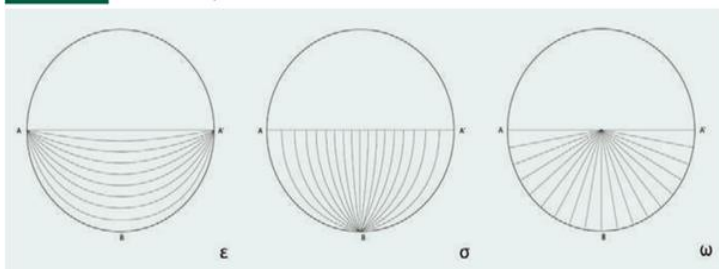
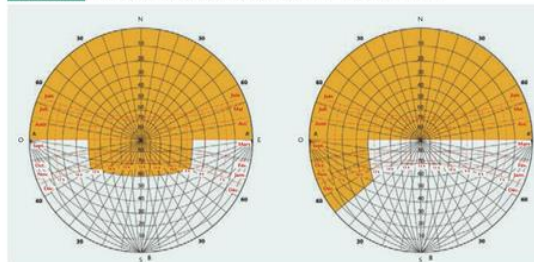


FIGURE 3.7-11 Superposition des masques d'ombrage sur le diagramme polaire



Par exemple, en correspondance avec les trajectoires solaires du côté sud, le surplomb horizontal du côté gauche du diagramme dans la figure 3.7-11 projette toujours une ombre sur la fenêtre qu'il surplombe entre 8 h 45 et 15 h 15, tandis que le mur d'aile du côté droit du diagramme projette une ombre à partir de 14 h, de janvier à mars et de septembre à décembre.

Les exemples qui précèdent ont trait à des situations où la façade est orientée exactement au sud. Bien entendu, il est toujours possible de prendre en compte une autre orientation en faisant pivoter le rapporteur d'ombre et en alignant le demi axe vertical inférieur avec la façade. L'exemple suivant (figure 3.7-12) illustre une obstruction horizontale sur une façade orientée vers l'ouest. Notons que dans ce cas, la fenêtre sous-jacente est toujours ombragée pendant les heures de la matinée ; elle commence à être ensoleillée entre 14 h et 15 h 30, selon le mois.

FIGURE 3.7-12 Orientation du masque d'ombrage

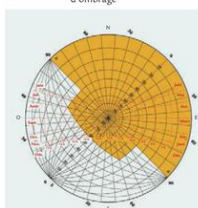


FIGURE 3.7-13 Exemple du masque d'ombrage d'un surplomb vertical et horizontal

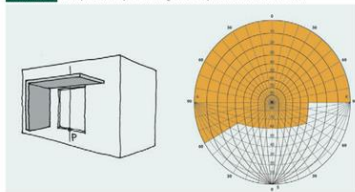
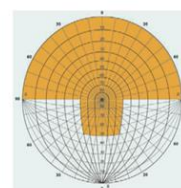
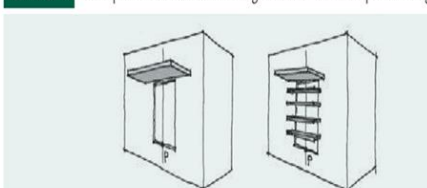


FIGURE 3.7-14 Un surplomb et une série de lames générant le même masque d'ombrage





**Remarque** : Il est possible d'associer les effets coïncidents d'obstructions verticales et horizontales en lisant sur le même diagramme les valeurs de  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  et  $\omega$ , comme l'illustre la figure 3.7-13.

Enfin, il est important de noter que c'est la géométrie angulaire et non la dimension physique réelle qui détermine le masque généré par l'obstruction. Par exemple, un seul grand surplomb horizontal et une série de lames horizontales, s'ils ont le même angle global d'obstruction, génèrent le même masque (figure 3.7-14).

### 3- Calcul de l'ombrage d'un surplomb

Au cours de la phase de conception, il est souvent nécessaire de définir correctement les dimensions des surplombs générant un ombrage pour obtenir l'effet désiré à l'endroit et au moment voulu. Pour simplifier le problème, on peut le réduire au calcul de la profondeur  $D$  d'un mur d'aile ou d'un surplomb horizontal (figure 3.7-15). Dans le cas d'un surplomb horizontal, après avoir déterminé la hauteur  $h$  de l'ombre souhaitée correspondant à une position donnée du soleil, la formule suivante s'applique :

$$D = h \frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\tan \beta} \quad (3.7-1) \text{ où le}$$

numérateur de la fraction doit être toujours considéré comme étant positif et  $\gamma$  représente l'azimut horizontal du plan ombragé, comme nous l'avons déjà vu. De même, pour un surplomb vertical ou un mur d'aile, après avoir déterminé la largeur  $w$  de l'ombre souhaitée, on peut utiliser l'expression suivante :

$$D = \frac{w}{|\tan(\alpha - \gamma)|} \quad (3.7-2) \text{ où le}$$

dénominateur de la fraction doit toujours être considéré comme étant positif. S'il s'agit, par contre, d'analyser les effets d'ombrage de surplombs de dimensions prédéterminées, les mêmes équations peuvent servir aux besoins des tests ; on insère les valeurs connues de  $D$ ,  $\alpha$  et  $\gamma$ , et on résout les équations pour trouver la valeur de  $h$  et de  $w$ .

### 4- Pare-soleils

Les écrans solaires installés à l'extérieur des fenêtres sont le moyen le plus efficace de contrôler les apports solaires (figure 3.7-16 et tableau 3.7-1). Comme le soleil est toujours haut dans le ciel à l'équateur, les pare-soleil horizontaux représentent un choix optimal pour les façades orientées vers le nord ou le sud. Les surplombs horizontaux au-dessus des fenêtres des façades orientées vers le sud ou le nord sont très efficaces et doivent déborder la largeur de la fenêtre pour l'ombrager correctement. Les surplombs horizontaux au-dessus des fenêtres faisant face à l'ouest ou à l'est doivent être très profonds pour assurer une protection tôt le matin et tard l'après-midi, de sorte qu'ils ne sont pas recommandés.

Les façades Est et Ouest sont plus difficiles à protéger que les façades nord et sud, à cause de la position basse du soleil le matin et l'après-midi. Les ailes verticales, souvent recommandées pour les orientations est et ouest aux latitudes supérieures à  $40^\circ$ , conviennent moins aux latitudes tropicales, car pour procurer une protection efficace, elles doivent être inclinées et obstruent alors la vue sur l'extérieur. Les pare-soleil alvéolés conviennent bien aux orientations est et Ouest. Les pare-soleil peuvent être fixes ou mobiles.

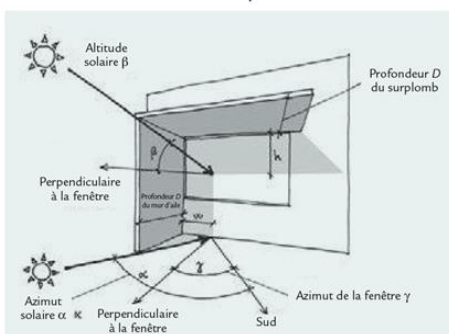
**TABEAU 3.7-1** Caractéristiques des différents types de pare-soleil

Pare-soleils horizontaux			
Pare-soleil	Vue latérale	Masque d'ombrage	Remarques
			Les surplombs droits sont surtout efficaces sur la façade sud.
			Les persiennes parallèles au mur laissent l'air chaud s'échapper et sont surtout efficaces pour une exposition au sud.
			Les auvents sont totalement ajustables aux conditions saisonnières et surtout efficaces pour une exposition au sud.
			Les persiennes horizontales accrochées à un surplomb solide coupent les rayons bas du soleil. Efficaces pour une exposition au sud, à l'est ou à l'ouest.
			Une bande verticale parallèle au mur coupe les rayons bas du soleil. Efficace pour une exposition au sud, à l'est ou à l'ouest.
			Les persiennes horizontales pivotantes sont ajustables aux conditions quotidiennes ou saisonnières. Efficaces pour une exposition au sud, à l'est ou à l'ouest.

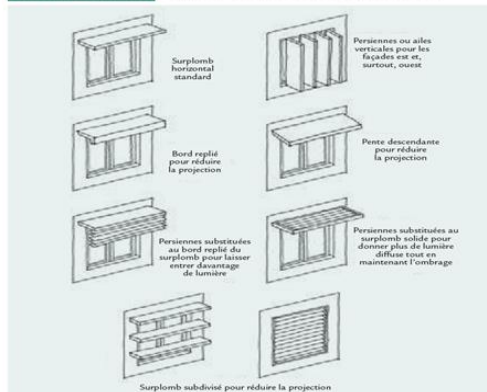
**TABEAU 3.7-1** Caractéristiques des différents types de pare-soleil (suite)

Pare-soleils verticaux			
Pare-soleil	Vue en plan	Masque d'ombrage	Remarques
			Les ailes verticales sont surtout efficaces pour une exposition près de l'est ou de l'ouest.
			Les ailes verticales inclinées sont surtout efficaces pour une exposition à l'est ou à l'ouest.
			Les ailes verticales pivotantes sont les plus flexibles ; elles sont ajustables aux conditions quotidiennes et saisonnières. Surtout efficaces pour une

**FIGURE 3.7-15** Méthode de calcul des dimensions d'un mur d'aile et d'un surplomb horizontal



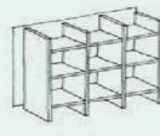

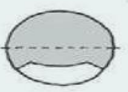
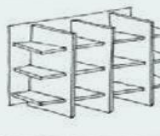
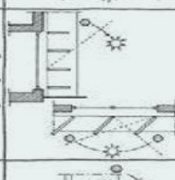

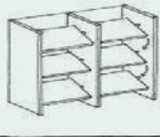
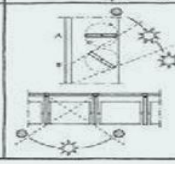

**FIGURE 3.7-16** Types de protection solaire





## Pare-soleils fixes

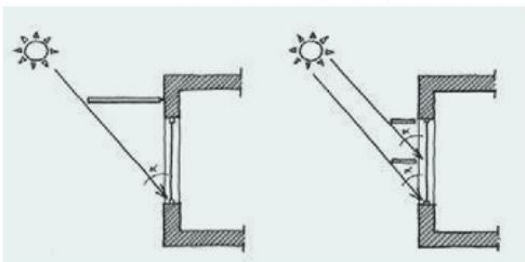
- Les pare-soleil fixes sont généralement placés à l'extérieur, afin d'intercepter le rayonnement solaire incident avant qu'il atteigne les surfaces vitrées ou toute autre ouverture, dissipant de ce fait l'énergie absorbée dans l'air extérieur.
- Ils comprennent des éléments structurels tels que les balcons et les surplombs, mais aussi des éléments non structurels tels que les auvents, les persiennes et les stores.
- Chaque façade nécessite un traitement spécial : chaque orientation doit être évaluée séparément.
- L'angle d'inclinaison doit prendre en compte l'angle d'incidence des rayons solaires sur chaque façade à divers moments de la journée.

Pare-soleils alvéolés			
Pare-soleil	Vues en plan et latérale	Masque d'ombrage	Remarques
			Les pare-soleils alvéolés sont des combinaisons de pare-soleils horizontaux et verticaux. Surtout efficaces dans les climats chauds, pour une exposition à l'est ou à l'ouest.
			Alvéoles à ailes verticales inclinées vers le nord. Surtout efficaces dans les climats chauds, pour une exposition à l'est ou à l'ouest.
			Alvéoles à persiennes horizontales pivotantes. Surtout efficaces dans les climats chauds, pour une exposition à l'est ou à l'ouest.

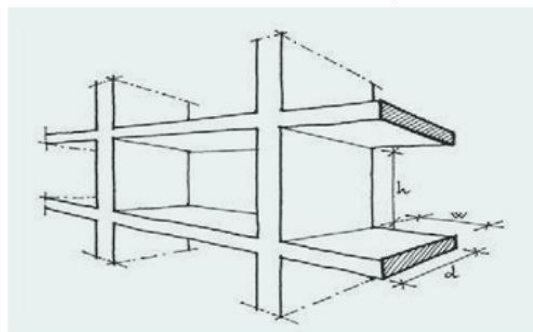
## Pare-soleils mobiles

- Les pare-soleil mobiles « réagissent » plus adéquatement à la trajectoire du soleil que les pare-soleil fixes.
- Les végétaux à feuilles caduques, les stores à rouleau, les stores à lamelles perforées, les stores vénitiens et les rideaux sont tous des types de pare-soleil mobiles.
- Chaque façade nécessite un traitement spécial : chaque orientation doit être évaluée séparément.
- L'angle d'inclinaison peut être réglé en fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires sur chaque façade à divers moments de la journée.

**FIGURE 3.7-17** Protection solaire horizontale simple ou multiple d'une fenêtre (section). L'effet d'ombrage est fonction de l'angle  $\alpha$  et non de la dimension du pare-soleil



**FIGURE 3.7-18** L'effet d'ombrage est fonction des rapports  $h/d$  et  $w/d$ , et non de la dimension du pare-soleil.



Les dimensions d'un pare-soleil peuvent varier sans modifier ses caractéristiques d'ombrage, pourvu que le rapport de la profondeur à l'espacement entre les éléments reste constant, comme le montre la figure 3.7-17. Le même principe s'applique ailes verticales et aux pare-soleil alvéolés (figure 3.7-18).

## **5- Recommandations**

- ■ Utiliser des pare-soleil extérieurs chaque fois que c'est possible ; ils sont beaucoup plus efficaces que les pare-soleil intérieurs pour contrôler les apports solaires, surtout si la pièce est climatisée.
- ■ Utiliser des éléments horizontaux pour les ouvertures faisant face au sud ou au nord.
- ■ Utiliser des éléments alvéolés sur les fenêtres faisant face à l'est ou à l'ouest.
- ■ Donner la priorité à l'ombrage des fenêtres faisant face à l'est et, surtout, à l'ouest.
- ■ La couleur des pare-soleil influe sur la lumière et la chaleur.

Les systèmes de protection solaire extérieurs doivent être de couleur claire si le but est de transmettre le rayonnement solaire diffus et de couleur sombre s'il s'agit plutôt de bloquer la lumière.

- ■ Choisir minutieusement les matériaux des pare-soleil ainsi que les propriétés de leur surface ; ils doivent avoir une résistance thermique élevée, car ils sont chauffés par le rayonnement solaire et ont tendance à réémettre ce rayonnement vers l'intérieur de la pièce.
- ■ Utiliser des pare-soleil fixes si le budget est restreint. Utiliser des pare-soleil mobiles pour optimiser l'efficacité de l'éclairage naturel et de la ventilation naturelle. Tenir compte du fait que le pare-soleil extérieur idéal assure la sécurité contre une intrusion et laisse circuler la ventilation naturelle, notamment la nuit, lorsque c'est nécessaire.

## CHAPITRE VII : ECLAIRAGE ARTIFICIEL

L'éclairage est un facteur important pour la réduction de la consommation globale d'énergie. Dans les pays industrialisés, l'éclairage représente de 5 à 15 % de la consommation totale d'électricité. Outre les économies directes, des économies d'énergie indirectes peuvent être réalisées grâce à une réduction de la consommation d'électricité pour la climatisation. La consommation d'énergie d'une installation d'éclairage dépend dans une grande mesure du type de lampe utilisé, des luminaires et des commandes d'éclairage (lumière du jour, détecteur de mouvement, atténuation de la lumière, etc.). Néanmoins, la charge d'alimentation électrique d'une installation d'éclairage est souvent le premier et le plus important facteur de la consommation d'énergie.

### 1- Lampes

On distingue trois grandes catégories de lampes : à incandescence, à décharge et à diode électroluminescente. La lumière de la lampe à incandescence est générée par un filament chauffé à une température élevée par un courant électrique. La lampe à décharge n'a pas de filament ; elle produit de la lumière par l'excitation du gaz contenu entre deux électrodes. La diode électroluminescente (DEL) est une source de lumière à semi-conducteur, un peu comme une cellule photovoltaïque qui fonctionnerait à l'envers : au lieu que la lumière génère de l'électricité, c'est l'électricité qui génère de la lumière. Les facteurs qui caractérisent les sources de lumière sont (voir aussi, « Principes du confort thermique et visuel ») :

- le flux lumineux, exprimé en lumens (lm) ;
- l'efficacité lumineuse (*L'efficacité lumineuse d'une source est le rapport de la puissance lumineuse à la puissance électrique utilisée pour l'obtenir*), exprimée en lumens par watt (lm/W) ;
- la durée de vie, généralement exprimée en heures de fonctionnement écoulées avant que le flux lumineux soit réduit à un certain pourcentage par rapport au flux initial (*Tous les types de lampes, dans une mesure variable, subissent un processus graduel de déclin du flux lumineux avant de cesser de fonctionner*) ;
- la luminance, exprimée en candélas par mètre carré ( $\text{cd/m}^2$ ) ;
- l'apparence de la couleur, ou la couleur de la lumière : l'impression de couleur que l'on obtient en regardant la source elle-même ;
- la température de couleur ;
- le rendu des couleurs ;
- la dimension physique.

Les lampes à incandescence sont caractérisées par une grande compacité, une faible efficacité lumineuse, une courte durée de vie, une luminance élevée, une bonne apparence et un bon rendu des couleurs, et une faible température de couleur. En raison de la faible efficacité lumineuse des lampes à incandescence, leur production est en voie d'être stoppée graduellement partout dans le monde. Les lampes fluorescentes ont une efficacité lumineuse plus élevée, une durée de vie plus longue et une luminance inférieure, mais leur rendu des couleurs est inférieur à celui des lampes à incandescence.

Dans la présente section, seules les lampes utilisées pour l'éclairage intérieur seront considérées.

#### Lampes incandescentes

Un fil de tungstène chauffé par effet Joule, c'est-à-dire par l'effet de l'électricité qui transite par lui, émet un rayonnement électromagnétique, d'abord dans l'infrarouge lointain, puis, à mesure que la température augmente, de plus en plus dans le spectre visible (la figure 4.2-37 présente le spectre des corps noirs à différentes températures ; le spectre correspondant du tungstène diffère très peu de celui-ci). Autrement dit, l'efficacité optique de la source (c'est-à-dire le rapport de l'énergie de rayonnement qui tombe dans le spectre visible à l'énergie totale émise) augmente en raison directe de la température.

FIGURE 4.2-37 Spectre des corps noirs soumis à diverses températures

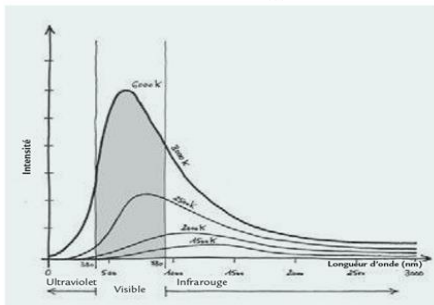


FIGURE 4.2-38 Lampe fluorescente linéaire

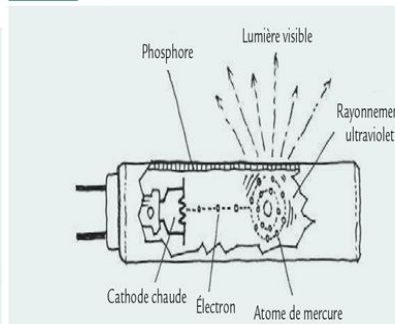
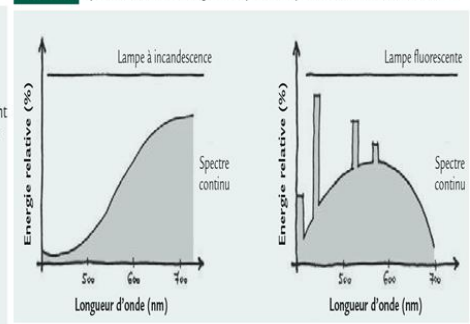


FIGURE 4.2-39 Spectre de lumière et énergie émise par les lampes fluorescentes et incandescentes



La lampe à incandescence exploite ce principe ; elle comprend, outre le filament, une ampoule de verre transparent ou translucide qui le protège, les supports de filament et le culot à vis. Le récipient est rempli d'un gaz inerte (généralement un mélange d'azote et d'argon), ce qui réduit l'oxydation du tungstène, laquelle doit être évitée pour deux raisons : d'une part, en s'érodant, le filament se fendille (ce qui influe sur la durée de vie de la lampe) ; d'autre part, des vapeurs ont tendance à se déposer sur la paroi intérieure, ce qui réduit sa transparence (et, partant, l'efficacité lumineuse). Pour cette raison, la température est maintenue bien en dessous du point de fusion, ce qui a un effet négatif sur l'efficacité optique de la lampe, et donc sur l'efficacité lumineuse. La plage de fonctionnement est comprise entre 2 700 et 3 000 K et, puisque le spectre du tungstène est pratiquement identique à celui des corps noirs, leur température de couleur coïncide avec leur température de fonctionnement.

La durée de vie de la lampe est de 750 à 1 000 heures ; à la fin de la durée de vie utile, le flux lumineux est à 87 % du flux initial. La majeure partie de l'émission d'une lampe à incandescence (jusqu'à 95 %) se situe dans la région infrarouge et son efficacité lumineuse est de 8 à 13 lm/W.

### Lampes halogènes au tungstène

Les lampes halogènes au tungstène sont des lampes à incandescence améliorées disponibles sous forme tubulaire (deux extrémités) et à une seule extrémité (deux broches). Outre les gaz inertes, l'ampoule contient également un élément halogène (tel que l'iode ou le brome), dont la fonction est de s'associer (dans les zones les plus froides de la lampe) au tungstène évaporé, pour former un composé gazeux ; ce composé se dissocie au contact du filament chaud, ce qui donne lieu à la redéposition de la majeure partie du tungstène sublimé. Le processus d'érosion du filament et le dépôt à l'intérieur de l'ampoule s'en trouvent considérablement ralentis, de sorte qu'il est possible d'augmenter la température jusqu'à 3 000 K, ce qui entraîne une meilleure efficacité lumineuse et une température de couleur plus élevée (la lumière est plus « blanche »). La durée de vie utile est de 3 000 à 5 000 heures ; le flux lumineux final équivaut à 94 % du flux initial.

### Lampes fluorescentes

Une lampe fluorescente (figure 4.2-38) est constituée d'une ampoule en verre tubulaire et de deux électrodes soudées aux extrémités. Elle contient de la vapeur de mercure à basse pression, en plus d'une petite quantité de gaz inerte qui facilite le démarrage. La surface intérieure du tube est recouverte

d'une couche de matériau fluorescent (phosphore). Le principe de fonctionnement est le suivant : une fois qu'une différence de potentiel est créée, les électrons se déplacent vers l'anode et les ions vers la cathode ; les électrons le long du tube acquièrent de la vitesse et entrent en collision avec les atomes qu'ils rencontrent sur leur chemin. Certains sont tellement rapides qu'ils arrivent à expulser certains électrons des atomes, et à élargir le flux des électrons libres, qui agissent comme des « balles », tandis que d'autres ont une énergie qui suffit à peine à déplacer les électrons des atomes d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau supérieur. Lorsque l'électron revient à son niveau d'énergie stable, il émet un photon d'énergie égal à la différence entre le niveau d'énergie où il a été poussé et le niveau stable. Ces photons constituent l'émission de rayonnement de la lampe.

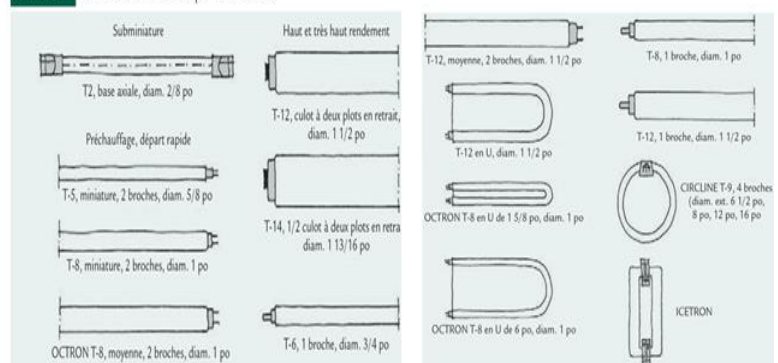
Le processus décrit ci-dessus, avec des atomes de mercure dans le remplissage de gaz du tube, provoque un rayonnement qui tombe principalement dans la région de l'ultraviolet. Le revêtement de luminophore interne assure la transformation du rayonnement ultraviolet en rayonnement visible, équilibrant le rayonnement sortant de manière à assurer un bon rendu des couleurs ; le mélange détermine le type de lumière obtenu. Le spectre obtenu est du type représenté à la figure 4.2-39, où le spectre de la lampe à incandescence est également représenté, à des fins de comparaison.

Les lampes fluorescentes ont une efficacité lumineuse pouvant atteindre 100 lm/W. On les classe généralement selon l'apparence, la tonalité et la couleur et en fonction de l'équilibre entre l'efficacité lumineuse et le rendu des couleurs. Le tableau 4.2-3 présente la gamme des températures de couleur proximale (*La température de couleur proximale est la température absolue d'un corps noir dont la chromaticité ressemble le plus à celle de la source de lumière*) et la classe de température de couleur de la plupart des tubes fluorescents plus courants sur le marché. Une lampe « chaude » s'intègre bien avec les ampoules à incandescence, une lampe « blanche » ou « intermédiaire » s'adapte très bien aux ampoules à incandescence et à la lumière du jour, tandis que les lampes « froides » ou de « lumière du jour » s'intègrent mieux uniquement avec la lumière naturelle.

**TABEAU 4.2-3** Classes de température de couleur

Température de couleur proximale (K)	Classe de température de couleur
Moins de 3 300	Blanc chaud
De 3 300 à 5 300	Blanc intermédiaire
Plus de 5 300	Blanc froid

**FIGURE 4.2-40** Formes courantes de lampes fluorescentes



Les lampes fluorescentes sont offertes dans une grande variété de tailles, de couleurs, de puissances et de formes. Les lampes fluorescentes tubulaires linéaires sont produites dans des longueurs et des fréquences variées (figure 4.2-40). L'un des principaux types de lampes fluorescentes est la lampe fluorescente compacte (figure 4.2-41), qui remplace les anciennes lampes incandescentes et a une efficacité lumineuse près de cinq fois plus élevée et une durée de vie de cinq à huit fois plus longue que celles-ci. À la fin de sa durée de vie, son flux lumineux est égal à 85 % du flux initial.



FIGURE 4.2-41 Lampes fluorescentes compactes



FIGURE 4.2-42 Types de luminaire et leurs fractions de flux

Symbole	Désignation	Principe	FFS (%)	FFI (%)
	Direct		0-40	40-90
	Semi-direct		40-40	90-60
	Diffusion générale		40-60	60-40
	Semi-indirect		60-50	40-10
	Indirect		90-100	10-0

FIGURE 4.2-43 Courbe photométrique d'un projecteur

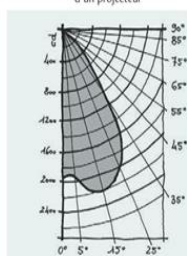


TABLEAU 4.2-4 Rendement et caractéristiques de fonctionnement des lampes\*

Type de lampe	Efficacité lumineuse (lm/W)	Indice de rendu de couleur	Température de couleur (K)	Apparence de la couleur	Durée de vie (heures)
À incandescente normale	De 8 à 13	97 ou plus	De 2 500 à 2 800	Excellente	De 750 à 1 000
Halogène	De 10 à 36	97 ou plus	De 2 800 à 3 200	Excellente	De 3 000 à 5 000
Fluorescente (linéaire)	De 70 à 100	De 50 à 90 ou plus	De 2 700 à 7 500	Excellente	De 15 000 à 46 000
Fluorescente (compacte) à culot	De 35 à 65	Un peu plus de 80	De 2 700 à 6 500	Excellente	De 6 000 à 8 000
Fluorescente (compacte) à broches	De 50 à 80	Un peu plus de 80	De 2 700 à 5 000	Excellente	De 10 000 à 16 000
Aux halogénures	De 68 à 120	De 60 à 90	De 2 700 à 10 000	Bonne	De 10 000 à 20 000
À DEL	Plus de 50	De 20 à 95 ou plus	De 1 100 à 9 000 et plus	De médiocre à très bonne	De 20 000 à 50 000

\* The Lighting Handbook, Tenth Edition – Reference and Application, Illuminating Engineering Society, 2011.

## Lampes aux halogénures

Les lampes aux halogénures sont des lampes à décharge à haute intensité ; ce sont des sources de lumière très efficaces dont la taille et la forme s'apparentent à celles des lampes incandescentes plutôt qu'à celles des fluorescentes. Comme toutes les lampes à décharge, elles ont besoin d'une amorce pour fonctionner. La lumière est émise à partir d'un petit tube à arc disposé à l'intérieur d'une ampoule extérieure de protection. La taille relativement petite de ce tube à arc permet un certain contrôle optique semblable à celui d'une source ponctuelle. Lorsqu'un rendu de couleurs supplémentaire est nécessaire, on ajoute des halogénures au mercure dans le tube à arc. La lumière blanche émise par les lampes aux halogénures est plutôt froide, mais il y a assez d'énergie dans chaque partie du spectre pour fournir un très bon rendu des couleurs. Les lampes aux halogénures sont parmi les meilleures sources de lumière, car elles combinent de nombreuses caractéristiques souhaitables en une seule lampe : une efficacité élevée (de 68 à 120 lm/W), une longue durée de vie (de 10 000 à 20 000 heures), un très bon rendu des couleurs et une petite taille favorisant le contrôle optique. Cependant, elles ne conviennent généralement pas à l'éclairage intérieur parce que leur puissance minimale est plutôt élevée.

## Diode électroluminescente

L'utilisation de la diode électroluminescente (DEL) comme source de lumière est une innovation prometteuse. Les DEL produisent une lumière de couleur pure ; pour générer une lumière blanche, il faut soit mélanger la lumière de DEL de différentes couleurs, soit utiliser du phosphore (comme dans les lampes fluorescentes) pour convertir la lumière de couleur en lumière blanche. Contrairement à toutes les autres sources de lumière, les DEL produisent très peu de chaleur sous forme de rayonnement infrarouge. Cependant, elles produisent une grande quantité de chaleur sensible, qui nécessite l'adjonction d'un dissipateur de chaleur. Les DEL sont habituellement montées sur un bloc métallique qui conduit la chaleur loin de la diode, dans l'air derrière la lampe. À l'heure actuelle, les DEL émettant une lumière blanc chaud ont une efficacité lumineuse supérieure à 50 lm/W et encore plus élevée pour le blanc froid. Une DEL ne consomme que 10 à 20 % de l'électricité qu'exige une lampe à incandescence pour produire la même quantité de lumière, pour une durée de vie 100 fois plus longue. Les caractéristiques de rendement et de fonctionnement de différents types de lampes sont résumées au tableau 4.2- 4.

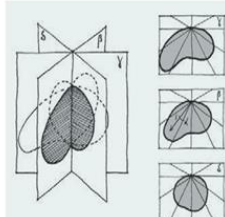
## 2- Luminaires

Un luminaire est le contenant d'une ou plusieurs sources lumineuses, y compris les éléments nécessaires pour les fixer, les protéger et les relier au réseau électrique. Le but du luminaire est de modifier les caractéristiques de flux et de luminance des lampes qu'il contient, en fonction des exigences spécifiques. Le contrôle de la distribution du flux lumineux s'obtient en exploitant les propriétés optiques de certains matériaux (tableau 4.2-5).

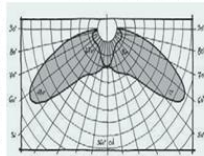
**TABEAU 4.2-3** Coefficient de transmission de certains matériaux

Matériau	Coefficient de transmission (%)
Vitre clair	De 80 à 90
Vitre translucide	De 70 à 75
Vitre opale	De 20 à 60
Plastique acrylique clair	De 80 à 90
Plastique acrylique opale	De 20 à 60
Albâtre	De 20 à 50
Marbre	De 5 à 30

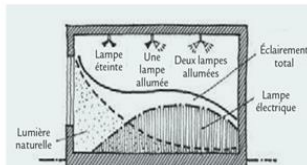
**FIGURE 4.2-44** Courbes photométriques d'une source d'éclairage asymétrique



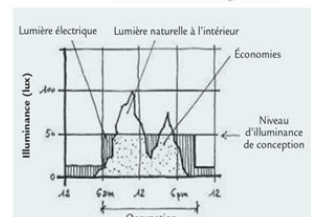
**FIGURE 4.2-45** Courbes photométriques d'un luminaire à tubes fluorescents. Les angles 0°, 90°, 180° et 270° indiquent la position des plans sur lesquels la courbe est tracée (voir la figure 4.2-44)



**FIGURE 4.2-46** Maintien de l'illuminance de conception par la commutation de lumière électrique dans des zones en couche



**FIGURE 4.2-47** Économies d'énergie potentielles associées à l'éclairage naturel



Les luminaires sont répartis en cinq groupes, en fonction de la distribution du flux lumineux dans l'espace au-dessus et en dessous du plan horizontal passant par le centre de l'unité (figure 4.2-42). L'efficacité d'un luminaire est exprimée par le rendement normalisé, soit le rapport du flux émis par le luminaire au flux émis par la lampe, habituellement exprimé en pourcentage. Le rendement normalisé peut être réparti en portions supérieure et inférieure (délimitées par le plan horizontal qui passe par le centre de la lampe). On peut aussi prendre comme base le rendement total du luminaire (100 %) et définir les fractions de flux supérieur (FFS) et inférieur (FFI), et le rapport de fraction de flux de FFS à FFI.

### Courbes photométriques

Une définition plus précise d'une combinaison lampe, d'un luminaire ou d'une lampe agissant comme un luminaire est donnée par les courbes polaires (ou diagrammes d'intensité polaire), en traçant l'intensité de la lumière dans une série de directions au sein d'un plan vertical passant par le luminaire. C'est une représentation en deux dimensions qui ne présente donc que les données d'un seul plan. Si la distribution de l'unité est symétrique (par exemple, pour un luminaire doté d'une lampe à incandescence), la courbe dans un seul plan est suffisante pour tous les calculs et un diagramme polaire semi-circulaire est utilisé sur lequel on trace l'intensité de la source (en candélas), vue à partir de directions (angles de vision) variées (figure 4.2-43). Si la distribution de l'unité est asymétrique, plus on s'éloigne de la symétrie, plus il faut de plans différents pour réaliser des calculs précis (figure 4.2-44) ; pour un luminaire fluorescent, par exemple, au moins deux plans sont nécessaires (figure 4.2-45).

### 3- Systèmes de commande de l'éclairage

Plus on s'éloigne d'une fenêtre, plus il devient difficile de maintenir les niveaux d'éclairage de la lumière du jour nécessaires à certaines tâches. Lorsque ces tâches sont localisées, comme le travail de bureau, la lumière du jour peut être complétée par un éclairage artificiel situé près de la tâche et commandé par l'utilisateur. C'est une combinaison efficace, car la lumière du jour peut encore être utilisée dans de grandes parties du bâtiment qui sont éloignées des fenêtres, mais où le niveau d'éclairage exigé est inférieur. Par exemple, dans un bureau, la lumière ambiante peut être fournie à une intensité de 100 à 200 lux dans l'ensemble du bureau, tandis que la lecture à un bureau peut exiger 300 lux.

Une commande de l'éclairage artificiel bien conçue procure des avantages fonctionnels, esthétiques, psychologiques, économiques et environnementaux. La commande de l'éclairage favorise une utilisation flexible des espaces, ainsi que la création d'un environnement d'éclairage intéressant et varié. C'est aussi un des meilleurs moyens d'économiser de grandes quantités d'énergie en éteignant tout simplement les lumières inutiles. La commande d'éclairage nécessite généralement l'utilisation de dispositifs automatiques, tels que les détecteurs de mouvement et de lumière, les minuteries et un équipement de télécommande.

Les détecteurs de mouvement réagissent à l'entrée et à la sortie des personnes dans une pièce. Ils sont basés soit sur la technologie infrarouge ou des ultrasons, soit sur une technologie hybride combinant ces deux approches. Les occupants peuvent également ajuster le niveau d'éclairage en fonction de leurs tâches et de leur proximité de la fenêtre, en utilisant uniquement la lumière naturelle ou en la combinant à l'éclairage artificiel (figure 4.2-46).

L'éclairage artificiel peut être commandé par une cellule photosensible qui sert soit de commutateur marche-arrêt lorsque la lumière naturelle atteint un certain seuil, soit de gradateur fournissant juste assez de lumière électrique pour répondre aux besoins d'éclairage. L'utilisation d'une commande automatisée sensible à la lumière du jour peut générer des économies d'énergie de 30 à 50 % pour l'éclairage électrique d'un immeuble de bureaux, souvent au cours des périodes de pointe de charge du bâtiment (figure 4.2-47). La plupart des minuteries sont situées dans un emplacement central pour éteindre ou allumer les lumières suivant un cycle préétabli. Cette solution est excellente partout où les activités ont un horaire régulier. La commande de commutation à distance permet à une personne ou à un ordinateur occupant un emplacement central de commander les lumières. Cette commande centrale fait partie du système de gestion de l'énergie. Le contrôle de l'intensité est un autre moyen puissant d'économiser l'énergie. Lorsque l'éclairage naturel est utilisé, la commutation et la gradation de l'intensité sont particulièrement importantes.

#### **4- Conception des systèmes d'éclairage**

L'objectif de la conception d'un système d'éclairage est de déterminer le type de luminaires, ainsi que leur nombre, leur puissance et leur emplacement, afin d'obtenir un confort visuel optimal pour les tâches à effectuer dans la zone éclairée. Pour ce faire, il existe de nombreuses méthodes, allant des règles empiriques simples aux modèles complexes de simulation informatique, qui donnent des résultats plus ou moins précis et sont utilisées à différentes étapes du processus de conception. De nos jours, la conception finale d'un système d'éclairage s'effectue à l'aide de l'ordinateur ; on peut cependant obtenir une estimation raisonnablement fiable par des méthodes manuelles relativement simples telles que celle du flux total, qui permet au concepteur de calculer rapidement le flux total nécessaire pour maintenir un certain niveau d'éclairage sur le plan (*Le plan de travail est le plan sur lequel un certain niveau d'éclairage doit être maintenu. Dans un bureau, il se situe à la hauteur des tables ; dans une boucherie, à la hauteur du comptoir ; dans un corridor, au niveau du plancher, etc.*) de travail d'une pièce dotée de canalisations parallèles (*Cette méthode n'est pas applicable aux autres formes, ou alors avec précaution*) et de luminaires disposés de manière uniforme.

La conception du système exige qu'une fois que les activités à réaliser dans la salle sont définies, le concepteur prenne des décisions initiales sur les aspects suivants :

a. Le niveau d'éclairage requis sur le plan du travail dépend des activités à mener dans la pièce et peut varier d'un pays à l'autre ou en tant que tradition ou norme, de même que par rapport à l'optimisation du rapport du coût de l'énergie à celui de la main-d'œuvre. Il convient en effet de noter que la qualité de l'éclairage a une incidence directe sur la productivité des personnes qui accomplissent une tâche. Le tableau 4.2-6 indique les valeurs d'éclairage recommandées pour diverses activités<sup>9</sup>. Il faut toutefois noter que des enquêtes récentes ont montré que la valeur la plus appropriée pour les immeubles de bureaux est de 300 lux plutôt que de 500 lux.

b. Le type d'éclairage (direct, semi-direct, diffus, etc.) indiqué par les paramètres techniques, économiques et esthétiques et le choix du type d'éclairage vont de pair avec le choix du type de luminaires, lequel est aussi conditionné par le contrôle de l'éblouissement.

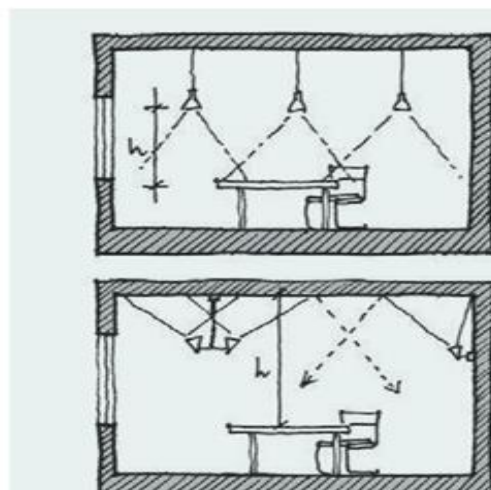
c. Le type de source lumineuse dépend de paramètres économiques (coût, durée) et techniques (qualité de la lumière).

d. L'éclairage du plan de travail dépend à la fois du flux direct provenant des luminaires et du flux indirect (diffus) provenant des murs et du plafond, qui dépend des couleurs et de la géométrie de la pièce.

**TABLEAU 4.2-6** Niveau d'éclairage recommandé (norme EN 12464-1)

Type de bâtiment	Type de pièce	Éclairage maintenu dans la zone de travail (lux)
Immeuble de bureaux	Bureau individuel	500
	Bureau à espace décloisonné	500
	Salle de conférence	500
Établissement d'enseignement	Salle de classe	300
	Salle de classe pour l'éducation des adultes	500
	Salle de conférences	500
Centre hospitalier	Salle commune	100
	Salle d'examen	300
	Salle d'examen et de traitement	1000
Hôtel ou restaurant	Restaurant, salle à manger	-
Installation sportive	Salle de sport	300
Commerce de gros ou de détail	Zone de vente	300
	Zone du tiroir-caisse	500
Zone de circulation	Couloir	100
	Escalier	150

**FIGURE 4.2-48** Hauteur utile pour un éclairage indirect et semi-direct



#### 4- Conception des systèmes d'éclairage

L'objectif de la conception d'un système d'éclairage est de déterminer le type de luminaires, ainsi que leur nombre, leur puissance et leur emplacement, afin d'obtenir un confort visuel optimal pour les tâches à effectuer dans la zone éclairée. Pour ce faire, il existe de nombreuses méthodes, allant des règles empiriques simples aux modèles complexes de simulation informatique, qui donnent des résultats plus ou moins précis et sont utilisées à différentes étapes du processus de conception.

De nos jours, la conception finale d'un système d'éclairage s'effectue à l'aide de l'ordinateur ; on peut cependant obtenir une estimation raisonnablement fiable par des méthodes manuelles relativement simples telles que celle du flux total, qui permet au concepteur de calculer rapidement le flux total nécessaire pour maintenir un certain niveau d'éclairage sur le plan (*Le plan de travail est le plan sur lequel un certain niveau d'éclairage doit être maintenu. Dans un bureau, il se situe à la hauteur des tables ; dans une boucherie, à la hauteur du comptoir ; dans un corridor, au niveau du plancher, etc.*) de travail d'une pièce dotée de canalisations parallèles (*Cette méthode n'est pas applicable aux autres formes, ou alors avec précaution*) et de luminaires disposés de manière uniforme.

La conception du système exige qu'une fois que les activités à réaliser dans la salle sont définies, le concepteur prenne des décisions initiales sur les aspects suivants :

a. Le niveau d'éclairage requis sur le plan du travail dépend des activités à mener dans la pièce et peut varier d'un pays à l'autre ou en tant que tradition ou norme, de même que par rapport à l'optimisation du rapport du coût de l'énergie à celui de la main-d'œuvre. Il convient en effet de noter que la qualité de l'éclairage a une incidence directe sur la productivité des personnes qui accomplissent une tâche. Le tableau 4.2-6 indique les valeurs d'éclairage recommandées pour diverses activités. Il faut toutefois noter que des enquêtes récentes ont montré que la valeur la plus appropriée pour les immeubles de bureaux est de 300 lux plutôt que de 500 lux.

b. Le type d'éclairage (direct, semi-direct, diffus, etc.) indiqué par les paramètres techniques, économiques et esthétiques et le choix du type d'éclairage vont de pair avec le choix du type de luminaires, lequel est aussi conditionné par le contrôle de l'éblouissement.

c. Le type de source lumineuse dépend de paramètres économiques (coût, durée) et techniques (qualité de la lumière).

d. L'éclairage du plan de travail dépend à la fois du flux direct provenant des luminaires et du flux indirect (diffus) provenant des murs et du plafond, qui dépend des couleurs et de la géométrie de la pièce.

### **Méthode du flux total ou du facteur d'utilisation**

Soit  $E_m$  le niveau d'éclairage requis pour le plan de travail de superficie  $S$  de l'espace à éclairer, les flux direct et indirect utiles qui doivent parvenir sur la surface s'expriment comme suit :

$$\phi_u = E_m S \quad (4.2-1)$$

Le facteur (ou coefficient) d'utilisation est défini par le rapport entre le flux utile et le flux total émis par les lampes :

$$u = \frac{\phi_u}{\phi_t} \quad (4.2-2)$$

La différence  $\phi_t - \phi_u$  représente le flux absorbé par les luminaires, les murs et le plafond. Le facteur d'utilisation dépend à la fois du type d'utilisation et de la couleur (réflectivité) des murs et du plafond : la forme géométrique de la pièce a également une grande importance. Pour caractériser géométriquement la salle du point de vue de son influence sur le facteur d'utilisation, on utilise un nombre pur, l'indice de la pièce  $i$  :

$$i = \frac{a \cdot b}{h(a+b)} \quad (4.2-3) \text{ où } a \text{ et } b$$

représentent les dimensions de la pièce et  $h$  la hauteur, c'est-à-dire la distance entre le luminaire et le plan de travail.

Pour un éclairage indirect et semi-direct, la hauteur utile est la distance entre le plafond et le plan de travail (figure 4.2-48). Le facteur d'utilisation varie très peu lorsque l'indice de la pièce est supérieur à 5 ; en conséquence, on peut adopter une valeur de 5 même si la valeur calculée est plus élevée. Le tableau 4.2-7 présente les valeurs du facteur d'utilisation, en fonction du coefficient de réflexion des murs et du plafond et de l'indice de la pièce, pour les types de luminaires les plus courants. Pour calculer le flux total émis par la lampe, après avoir sélectionné les luminaires, défini les coefficients de réflexion des parois et du plafond, calculé l'indice de la pièce et déterminé le facteur d'utilisation, on utilise l'expression suivante :

$$\phi_t = \frac{E_m S}{u} d \quad (4.2-4) \text{ où } d$$

est le facteur de dépréciation, qui prend en compte les éléments suivants :


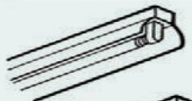




a) le flux émis diminue progressivement pendant toute la durée de vie de la lampe ;

b) les propriétés optiques (transparence et facteur de réflexion) des luminaires se dégradent au fil du temps ;



c) le coefficient de réflexion des parois diminue avec le temps en raison de la dégradation naturelle de la peinture et de l'accumulation de poussière.


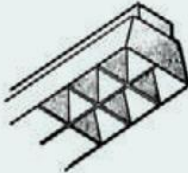
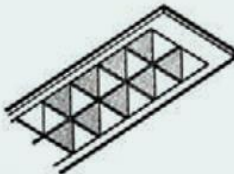
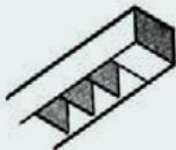
**TABEAU 4.2-7** Facteurs d'utilisation des types de luminaires les plus courants\*

Description du luminaire et FFI habituelle	Forme habituelle	DLDR de base	Taux de réflectance (%)									
			Plafond	70			50			30		
				Murs	50	30	10	50	30	10	50	30
		%	Indice de la pièce									
<b>(M)</b> Lampe à mercure à réflecteur avec correction des couleurs MBFR (80-90)		85	0-6	0-4	0-34	0-3	0-39	0-33	0-29	0-37	0-32	0-29
		0-8	0-53	0-48	0-41	0-51	0-45	0-4	0-49	0-43	0-4	
		1	0-62	0-55	0-49	0-58	0-52	0-48	0-56	0-51	0-48	
		1-25	0-68	0-6	0-55	0-64	0-58	0-53	0-61	0-56	0-51	
		1-5	0-72	0-65	0-59	0-68	0-62	0-57	0-65	0-59	0-54	
		2	0-81	0-73	0-67	0-75	0-69	0-64	0-69	0-65	0-61	
		2-5	0-85	0-78	0-72	0-79	0-73	0-69	0-73	0-68	0-65	
		3	0-8	0-83	0-78	0-83	0-78	0-75	0-77	0-73	0-7	
		4	0-84	0-89	0-84	0-87	0-83	0-8	0-8	0-77	0-75	
		5	0-87	0-92	0-89	0-9	0-87	0-84	0-83	0-79	0-77	
<b>(F)</b> Ballast émaillé ouvert aux extrémités (75-85)		75	0-6	0-38	0-31	0-28	0-35	0-31	0-28	0-35	0-31	0-28
		0-8	0-45	0-4	0-37	0-44	0-4	0-37	0-44	0-4	0-37	
		1	0-49	0-45	0-4	0-49	0-44	0-4	0-48	0-43	0-4	
		1-25	0-55	0-49	0-46	0-53	0-49	0-45	0-52	0-48	0-45	
		1-5	0-58	0-54	0-49	0-57	0-53	0-49	0-55	0-52	0-49	
		2	0-64	0-59	0-55	0-61	0-58	0-55	0-6	0-56	0-54	
<b>(F)</b> Ballast émaillé fermé aux extrémités (65-83)		2-5	0-68	0-63	0-6	0-65	0-62	0-59	0-64	0-61	0-58	
		3	0-7	0-65	0-62	0-67	0-64	0-61	0-65	0-63	0-61	
		4	0-73	0-7	0-67	0-7	0-67	0-65	0-67	0-66	0-64	
		5	0-75	0-72	0-69	0-73	0-7	0-67	0-7	0-68	0-67	
<b>(T)</b> Réflecteur dispersif industriel standard (77)												
<b>(M)</b> Réflecteur industriel en aluminium (72-76)		70	0-6	0-39	0-38	0-33	0-39	0-36	0-33	0-39	0-35	0-33
		0-8	0-48	0-43	0-4	0-46	0-43	0-4	0-46	0-43	0-4	
		1	0-52	0-49	0-45	0-52	0-48	0-45	0-52	0-48	0-45	
		1-25	0-56	0-53	0-5	0-56	0-53	0-49	0-56	0-52	0-49	
		1-5	0-6	0-57	0-54	0-59	0-57	0-53	0-59	0-55	0-53	
		2	0-65	0-62	0-59	0-63	0-6	0-58	0-63	0-59	0-57	
<b>(T)</b> Réflecteur grande hauteur, aluminium (72) ou émaillé (66)		2-5	0-67	0-64	0-62	0-65	0-62	0-61	0-65	0-62	0-6	
		3	0-69	0-66	0-64	0-67	0-64	0-63	0-67	0-64	0-62	
		4	0-71	0-68	0-67	0-69	0-67	0-65	0-69	0-66	0-64	
		5	0-72	0-7	0-69	0-71	0-69	0-67	0-71	0-67	0-65	


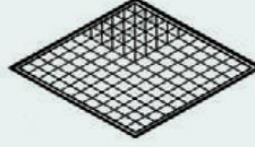
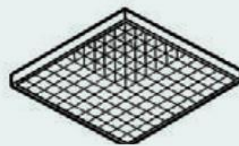



\* Dans la première colonne du tableau, (F) indique un luminaire pour lampes fluorescentes, (M) indique un luminaire pour lampe à luminescence à émission corrigée, (T) indique un luminaire pour lampe à incandescence (filament de tungstène).

Source des tableaux: Electricity Council, *Interior Lighting Design*, Londres, 1973.

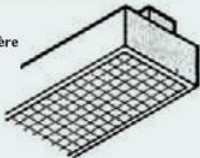


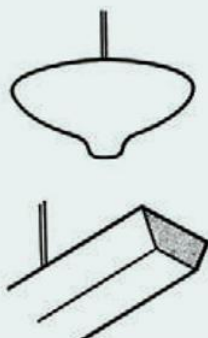
**TABLEAU 4.2-7** Facteurs d'utilisation des types de luminaires les plus courants (suite)

Description du luminaire et FFI habituelle	Forme habituelle	DLDR de base	Taux de réflectance (%)									
			Plafond	70			50			30		
				50	30	10	50	30	10	50	30	10
%	Indice de la pièce											
(F) Diffuseur en plastique fermé (45-55)		50	0-6	0-27	0-21	0-18	0-24	0-2	0-18	0-22	0-19	0-17
		0-8	0-34	0-29	0-26	0-32	0-28	0-25	0-29	0-26	0-24	
		1	0-4	0-35	0-31	0-37	0-33	0-3	0-33	0-3	0-28	
		1-25	0-44	0-39	0-35	0-4	0-36	0-33	0-36	0-33	0-31	
		1-5	0-47	0-42	0-38	0-43	0-39	0-36	0-38	0-35	0-33	
		2	0-52	0-47	0-44	0-47	0-44	0-41	0-41	0-39	0-37	
		2-5	0-55	0-51	0-48	0-5	0-47	0-44	0-44	0-42	0-4	
		3	0-58	0-54	0-51	0-52	0-49	0-47	0-47	0-45	0-43	
		4	0-61	0-57	0-54	0-55	0-52	0-5	0-49	0-47	0-45	
		5	0-63	0-59	0-57	0-57	0-55	0-53	0-51	0-49	0-47	
(F) Ballast en plastique, à lamelles (45-55)		50	0-6	0-26	0-22	0-18	0-25	0-21	0-19	0-24	0-2	0-18
		0-8	0-34	0-29	0-26	0-32	0-28	0-25	0-31	0-27	0-24	
		1	0-39	0-34	0-3	0-36	0-32	0-29	0-34	0-31	0-28	
		1-25	0-43	0-38	0-34	0-39	0-36	0-33	0-37	0-34	0-31	
		1-5	0-46	0-41	0-37	0-42	0-39	0-36	0-39	0-36	0-33	
		2	0-5	0-46	0-43	0-43	0-42	0-4	0-43	0-39	0-37	
		2-5	0-53	0-49	0-46	0-49	0-46	0-43	0-45	0-42	0-4	
		3	0-55	0-51	0-49	0-51	0-48	0-46	0-47	0-45	0-43	
		4	0-58	0-54	0-52	0-53	0-51	0-49	0-48	0-47	0-45	
		5	0-6	0-57	0-55	0-55	0-53	0-51	0-5	0-48	0-47	
(F) Ballast à lames encastré, avec surfaces réfléchissantes conçues optiquement (50)		50	0-6	0-28	0-25	0-23	0-28	0-25	0-23	0-28	0-25	0-23
		0-8	0-34	0-31	0-28	0-33	0-3	0-28	0-33	0-3	0-28	
		1	0-37	0-35	0-32	0-37	0-34	0-32	0-37	0-34	0-32	
		1-25	0-4	0-38	0-35	0-4	0-37	0-35	0-4	0-37	0-35	
		1-5	0-43	0-41	0-38	0-42	0-4	0-38	0-42	0-39	0-38	
		2	0-46	0-44	0-42	0-45	0-43	0-41	0-44	0-42	0-41	
		2-5	0-48	0-46	0-44	0-47	0-45	0-43	0-48	0-44	0-43	
		3	0-49	0-47	0-46	0-48	0-46	0-45	0-47	0-45	0-44	
		4	0-5	0-49	0-48	0-49	0-48	0-47	0-48	0-47	0-46	
		5	0-51	0-5	0-49	0-5	0-49	0-48	0-49	0-48	0-47	
(F) Ballast en métal à lamelles suspendu, lumière vers le haut et le bas, surfaces réfléchissantes conçues optiquement (47-54)		50	0-6	0-35	0-32	0-29	0-33	0-31	0-28	0-33	0-3	0-28
		0-8	0-41	0-38	0-35	0-39	0-36	0-34	0-38	0-35	0-33	
		1	0-46	0-42	0-4	0-44	0-41	0-39	0-42	0-39	0-37	
		1-25	0-49	0-46	0-43	0-47	0-44	0-42	0-45	0-42	0-4	
		1-5	0-52	0-49	0-46	0-49	0-47	0-44	0-47	0-44	0-42	
		2	0-56	0-53	0-51	0-52	0-5	0-48	0-49	0-47	0-45	
		2-5	0-58	0-55	0-53	0-54	0-52	0-5	0-51	0-49	0-47	
		3	0-59	0-57	0-55	0-55	0-53	0-52	0-52	0-5	0-49	
		4	0-61	0-59	0-57	0-57	0-55	0-54	0-53	0-51	0-5	
		5	0-63	0-6	0-59	0-58	0-57	0-55	0-54	0-52	0-51	

**TABLEAU 4.2-7** Facteurs d'utilisation des types de luminaires les plus courants (suite)

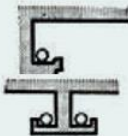

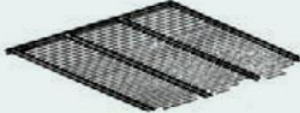

Description du luminaire et FFI habituelle	Forme habituelle	DLDR de base	Taux de réflectance (%)									
			Plafond			50			30			
			70	50	30	70	50	30	70	50	30	
				% Murs			% Murs			% Murs		
				% Indice de la pièce			% Indice de la pièce			% Indice de la pièce		
(F) Ballast émaillé à fentes et à lames (45-55)		50	0-6 0-8 1 1-25 1-5 2 2-5 3 4 5	0-27 0-32 0-35 0-38 0-41 0-45 0-47 0-48 0-49 0-5	0-24 0-3 0-32 0-35 0-38 0-42 0-44 0-45 0-47 0-49	0-22 0-27 0-3 0-32 0-35 0-4 0-43 0-45 0-46 0-48	0-26 0-32 0-35 0-38 0-4 0-43 0-45 0-46 0-48 0-49	0-24 0-29 0-32 0-35 0-38 0-41 0-43 0-45 0-47 0-48	0-22 0-27 0-3 0-32 0-35 0-39 0-41 0-43 0-45 0-47	0-26 0-31 0-34 0-38 0-4 0-43 0-45 0-46 0-47 0-48	0-23 0-29 0-31 0-34 0-37 0-4 0-43 0-44 0-45 0-46	0-22 0-27 0-3 0-32 0-35 0-39 0-41 0-43 0-44 0-45
(F) Luminaire encastré (modulaire) à lames (40-50)												
(F) Panneau à lames peu profond, fixé au plafond (40-50)												
(F) Diffuseur encastré (modulaire) (43-54)		50	0-6 0-8 1 1-25 1-5 2 2-5 3 4 5	0-21 0-28 0-32 0-35 0-37 0-41 0-43 0-45 0-47 0-49	0-18 0-24 0-29 0-32 0-34 0-37 0-4 0-42 0-44 0-46	0-16 0-22 0-26 0-29 0-31 0-33 0-37 0-41 0-44 0-46	0-21 0-27 0-31 0-34 0-36 0-39 0-42 0-44 0-46 0-47	0-18 0-24 0-28 0-31 0-33 0-37 0-39 0-42 0-44 0-46	0-16 0-22 0-26 0-29 0-31 0-33 0-37 0-41 0-44 0-46	0-2 0-26 0-3 0-32 0-34 0-38 0-4 0-42 0-44 0-46	0-18 0-24 0-28 0-31 0-33 0-37 0-39 0-42 0-44 0-46	0-16 0-22 0-26 0-29 0-31 0-33 0-37 0-41 0-44 0-46
(F) Panneau diffuseur peu profond, fixé au plafond (40-55)												
(T) Diffuseur quasi sphérique, ouvert en dessous (50)		50	0-6 0-8 1 1-25 1-5 2 2-5 3 4 5	0-28 0-39 0-43 0-48 0-52 0-58 0-62 0-65 0-68 0-71	0-22 0-3 0-36 0-41 0-48 0-52 0-56 0-6 0-64 0-68	0-18 0-26 0-32 0-37 0-41 0-46 0-52 0-55 0-58 0-61	0-25 0-33 0-38 0-46 0-54 0-6 0-68 0-71	0-2 0-28 0-34 0-42 0-48 0-54 0-6 0-68 0-71	0-17 0-23 0-29 0-37 0-41 0-47 0-53 0-57 0-61	0-22 0-27 0-31 0-34 0-37 0-42 0-45 0-48 0-51 0-53	0-18 0-25 0-29 0-32 0-36 0-38 0-42 0-45 0-48 0-51	0-16 0-22 0-26 0-29 0-32 0-35 0-38 0-41 0-44 0-48

**TABLEAU 4.2-7** Facteurs d'utilisation des types de luminaires les plus courants (suite)

Description du luminaire et FFI habituelle	Forme habituelle	DLDR de base %	Taux de réflectance (%)									
			Plafond	70			50			30		
				Murs	50	30	10	50	30	10	50	30
Indice de la pièce												
(F) Luminaire suspendu à côtés opaques, lumière vers le haut et le bas, diffuseur ou lames en dessous (45-50)		45	0-6	0-28	0-24	0-2	0-26	0-22	0-19	0-24	0-2	0-19
		0-8	0-38	0-3	0-28	0-33	0-29	0-26	0-31	0-27	0-24	
		1	0-41	0-38	0-32	0-37	0-33	0-3	0-34	0-3	0-27	
		1-25	0-45	0-41	0-38	0-41	0-37	0-34	0-37	0-33	0-3	
		1-5	0-49	0-45	0-4	0-44	0-4	0-37	0-39	0-35	0-33	
		2	0-55	0-5	0-46	0-48	0-45	0-42	0-42	0-39	0-37	
		2-5	0-58	0-53	0-5	0-51	0-48	0-45	0-45	0-42	0-4	
		3	0-6	0-58	0-53	0-53	0-5	0-48	0-47	0-44	0-42	
		4	0-63	0-59	0-57	0-55	0-53	0-51	0-48	0-46	0-44	
		5	0-65	0-62	0-6	0-57	0-55	0-53	0-5	0-48	0-46	
(T) Sphère opale (45) et autres luminaires diffuseurs à globe quasi sphérique		45	0-6	0-23	0-18	0-14	0-2	0-16	0-12	0-17	0-14	0-11
		0-8	0-3	0-24	0-2	0-27	0-22	0-18	0-22	0-19	0-16	
		1	0-36	0-29	0-25	0-31	0-26	0-22	0-28	0-23	0-19	
		1-25	0-41	0-34	0-29	0-35	0-3	0-26	0-29	0-26	0-22	
		1-5	0-45	0-39	0-33	0-39	0-34	0-3	0-31	0-28	0-25	
		2	0-5	0-45	0-4	0-43	0-38	0-34	0-34	0-32	0-29	
		2-5	0-58	0-53	0-5	0-51	0-48	0-45	0-45	0-42	0-4	
		3	0-6	0-58	0-53	0-53	0-5	0-48	0-47	0-44	0-42	
		4	0-63	0-59	0-57	0-55	0-53	0-51	0-48	0-46	0-44	
		5	0-65	0-62	0-6	0-57	0-55	0-53	0-5	0-48	0-46	
(T) Diffuseur ouvert au dessus, à lames en dessous (30)		30	0-6	0-28	0-23	0-19	0-24	0-2	0-19	0-2	0-18	0-16
		0-8	0-35	0-3	0-26	0-3	0-26	0-23	0-25	0-23	0-2	
		1	0-4	0-34	0-31	0-34	0-3	0-27	0-27	0-25	0-23	
		1-25	0-45	0-39	0-36	0-38	0-33	0-31	0-3	0-28	0-26	
		1-5	0-49	0-44	0-4	0-41	0-36	0-34	0-32	0-3	0-28	
		2	0-54	0-5	0-46	0-45	0-41	0-39	0-34	0-33	0-31	
		2-5	0-57	0-53	0-5	0-47	0-44	0-42	0-36	0-35	0-33	
		3	0-6	0-58	0-53	0-49	0-46	0-45	0-38	0-37	0-35	
		4	0-63	0-59	0-57	0-51	0-49	0-48	0-4	0-39	0-37	
		5	0-65	0-62	0-6	0-53	0-51	0-5	0-41	0-4	0-38	
(T ou F) Luminaire totalement indirect, d'après une FFS de 75 % (parties supérieure et inférieure du mur de la même couleur)		0-6	0-1	0-07	0-04	0-07	0-05	0-03				
		0-8	0-13	0-11	0-08	0-11	0-09	0-07				
		1	0-16	0-15	0-12	0-15	0-12	0-1				
		1-25	0-2	0-19	0-16	0-18	0-15	0-13				
		1-5	0-24	0-23	0-2	0-2	0-18	0-16				
		2	0-28	0-27	0-23	0-22	0-2	0-18				
		2-5	0-32	0-31	0-26	0-24	0-22	0-2				
		3	0-38	0-35	0-29	0-25	0-23	0-21				
		4	0-4	0-38	0-31	0-26	0-24	0-22				
		5	0-43	0-4	0-33	0-27	0-25	0-23				



**TABLEAU 4.2-7** Facteurs d'utilisation des types de luminaires les plus courants (suite)

Description du luminaire et FFI habituelle	Forme habituelle	DLDR de base	Taux de réflectance (%)												
			Plafond	70			50			30					
				Murs	50	30	10	50	30	10	50	30	10		
		%	Indice de la pièce												
(T ou F) Comme ci-dessus, partie supérieure des murs et plafond de même couleur			0-6	0-11	0-08	0-05	0-08	0-06	0-04						
			0-8	0-16	0-13	0-1	0-11	0-09	0-07						
			1	0-21	0-17	0-14	0-13	0-11	0-09						
			1-25	0-25	0-21	0-18	0-15	0-13	0-11						
			1-5	0-29	0-25	0-22	0-17	0-15	0-13						
			2	0-33	0-3	0-27	0-2	0-18	0-16						
			2-5	0-37	0-34	0-32	0-23	0-21	0-19						
			3	0-4	0-38	0-36	0-26	0-24	0-22						
			4	0-43	0-42	0-4	0-28	0-27	0-25						
			5	0-45	0-44	0-42	0-3	0-29	0-27						
(T ou F) Corniches indirectes, coffres encastrés donnant toute leur lumière au dessus de l'horizontale. D'après une FFS de 40, mais ce chiffre peut varier de façon			0-6	0-07	0-05	0-04	0-04	0-03							
			0-8	0-09	0-07	0-06	0-06	0-05							
			1	0-11	0-09	0-08	0-08	0-07							
(F) Plafond complètement lumineux, composé d'une bande nervurée translucide ou d'éléments individuels en forme de cuvette. Chiffres basés sur des cavités aux surfaces blanches, trois fois plus larges que profondes	 		0-6	0-2	0-15	0-12									
			0-8	0-28	0-24	0-2									
			1	0-34	0-31	0-27									
			1-25	0-37	0-34	0-31									
			1-5	0-4	0-36	0-34									
			2	0-45	0-42	0-39									
			2-5	0-47	0-44	0-42									
			3	0-49	0-46	0-44									
			4	0-52	0-49	0-47									
			5	0-54	0-51	0-49									
(F) Plafond complet à lames composé de cellules en plastique translucides d'un demi-pouce. Chiffres basés sur des cavités aux surfaces blanches, trois fois plus larges que profondes			0-6	0-31	0-28	0-24									
			0-8	0-34	0-31	0-27									
			1	0-37	0-34	0-3									
			1-25	0-39	0-36	0-33									
			1-5	0-41	0-38	0-36									
			2	0-44	0-42	0-39									
			2-5	0-46	0-44	0-41									
			3	0-48	0-46	0-43									
			4	0-5	0-48	0-45									
			5	0-51	0-49	0-47									

L'évaluation du facteur de dépréciation est donc un processus assez complexe qui doit être réalisé uniquement s'il est possible de prévoir raisonnablement la fréquence de l'entretien.

En général, pour une première approximation, on peut utiliser les valeurs suivantes, lorsque les autres paramètres sont les mêmes :

$$d = 1,3 \text{ pour l'éclairage direct ;}$$

$$d = 1,5 \text{ pour l'éclairage semi-direct ;}$$

$$d = 1,7 \text{ pour l'éclairage indirect.}$$

L'éclairage produit par un luminaire sur le plan de travail n'est jamais uniforme, sauf dans le cas d'un éclairage indirect ; cependant, l'uniformité augmente en fonction de la distance entre le plan de travail et le luminaire, ainsi que du nombre de dispositifs. On peut donc déterminer le rapport optimal



entre l'espacement  $D$  entre les luminaires et la hauteur utile  $h$  :  $D/h < 1,5$ , étant donné que  $D' \leq D/2$  est la distance entre les luminaires extrêmes et le mur dans le cas d'un éclairage direct. Dans le cas de luminaires linéaires tels que ceux qui contiennent des lampes fluorescentes tubulaires, l'écartement minimum entre les deux extrémités contiguës des lampes disposées en ligne doit être égal à au moins la moitié de la longueur du luminaire.

### **Déterminer le nombre de luminaires et leur puissance au moyen de la méthode de calcul en lumens**

À l'aide d'un simple nomogramme, illustré à la figure 4.2-49, on peut calculer le nombre de luminaires requis et leur puissance pour la conception d'un système d'éclairage. On procède comme suit (**REMARQUE** : Si on utilise ce nomogramme conjointement avec les tableaux de facteurs d'utilisation, reporter d'abord sur l'échelle 8 le FU obtenu à partir des tableaux. Si la FFI du luminaire à utiliser est identique à la FFI de base donnée dans ces tableaux, ignorer les échelles 6 et 7. Si la FFI du luminaire à utiliser est nettement différente de celle qu'indiquent les tableaux, reporter les valeurs données dans le tableau sur l'échelle 7. Tracer un segment de droite de ce point sur l'échelle 7 passant par le FU (d'après les tableaux) sur l'échelle 8 et prolonger le segment jusqu'à l'échelle 6. L'intersection avec l'échelle 6 donne l'utilance du luminaire. À partir de cette valeur sur l'échelle 6, tracer un segment passant par le point de l'échelle 7 correspondant à la FFI réelle du luminaire à utiliser. L'intersection de ce segment avec l'échelle 8 donne le FU corrigé, qui servira à compléter le calcul) :

- a. Établir l'indice de la pièce (calculé au moyen de l'équation 4.2-3 exposée plus haut).
- b. À partir de l'indice de la pièce, chercher le facteur d'utilisation (FU) correspondant au type de luminaire à utiliser (tableau 4.2-7).
- c. Reporter le FU sur l'échelle 8 ; reporter la longueur de la pièce sur l'échelle 1 et sa largeur sur l'échelle 2. Tracer un segment de droite passant par ces points jusqu'à l'échelle 3.
- d. Du point obtenu sur l'échelle 3, tracer un segment passant par la valeur de l'illuminance requise sur l'échelle 4 et le prolonger jusqu'à l'échelle 5.
- e. Du point obtenu sur l'échelle 5, tracer un segment passant par le point reporté à l'échelle 8 et le prolonger jusqu'à l'échelle 9. On obtient le flux lumineux total à fournir par toutes les lampes.
- f. Du point obtenu sur l'échelle 9, tracer un segment passant par le point correspondant au nombre de luminaires sur l'échelle 10 et le prolonger jusqu'à l'échelle 11. On obtient la valeur de l'illuminance requise par luminaire, en lumens. Ou encore, si le rendement par luminaire (en lumens) est connu, un segment passant cette valeur sur l'échelle 11 et par le point reporté sur l'échelle 9 coupera l'échelle 10 vis-à-vis le nombre de luminaires requis.
- g. Les deux colonnes de droite donnent une indication approximative des combinaisons appropriées de lampes par luminaire pour produire la quantité de lumière requise.

### **5- Conseils pour l'éclairage artificiel**

Afin de réduire le plus possible la consommation d'énergie, l'intégration de l'éclairage naturel et de l'éclairage artificiel doit être envisagée dès les premières étapes du processus de conception du bâtiment. La stratégie d'éclairage, le choix des luminaires et les méthodes de commande sont tous touchés par l'objectif d'intégrer la lumière naturelle.

La lumière naturelle peut fournir l'éclairage ambiant requis pour la plupart des heures ouvrables. Des lampes de travail commandées par l'utilisateur doivent être fournies pour répondre aux exigences d'éclairage à tous les endroits où un éclairage supplémentaire est nécessaire. Les utilisateurs situés près des fenêtres utilisent souvent la lumière naturelle comme principale source de lumière de travail.

En général, les niveaux de l'éclairage ambiant devraient être nettement inférieurs à ceux de l'éclairage travail (sans être moindres que le tiers de ces derniers). L'éclairage indirect, souvent très apprécié par les architectes en raison de l'atmosphère visuelle qu'il produit, doit être utilisé avec beaucoup de prudence, car il est très inefficace du point de vue de la consommation d'énergie. Il est préférable d'utiliser des luminaires qui fournissent un éclairage semi-direct avec une FFS inférieure à 20 %, ce qui constitue un bon compromis entre l'efficacité énergétique et le confort visuel.

### ***Lampes***

■ ■ Utiliser des lampes fluorescentes et des ballasts de gradation. L'éclairage fluorescent convient aussi bien aux applications à gradateur qu'à commutateur, car il peut être atténué efficacement sur une large gamme sans changement de couleur et peut s'allumer et s'éteindre presque instantanément. La plupart des ballasts de gradation pour fluorescents peuvent atténuer le rendement lumineux jusqu'à 10 à 20 %, mais l'atténuation des gradateurs « architecturaux » peut aller jusqu'à 1 % (ces gradateurs sont toutefois plus chers).

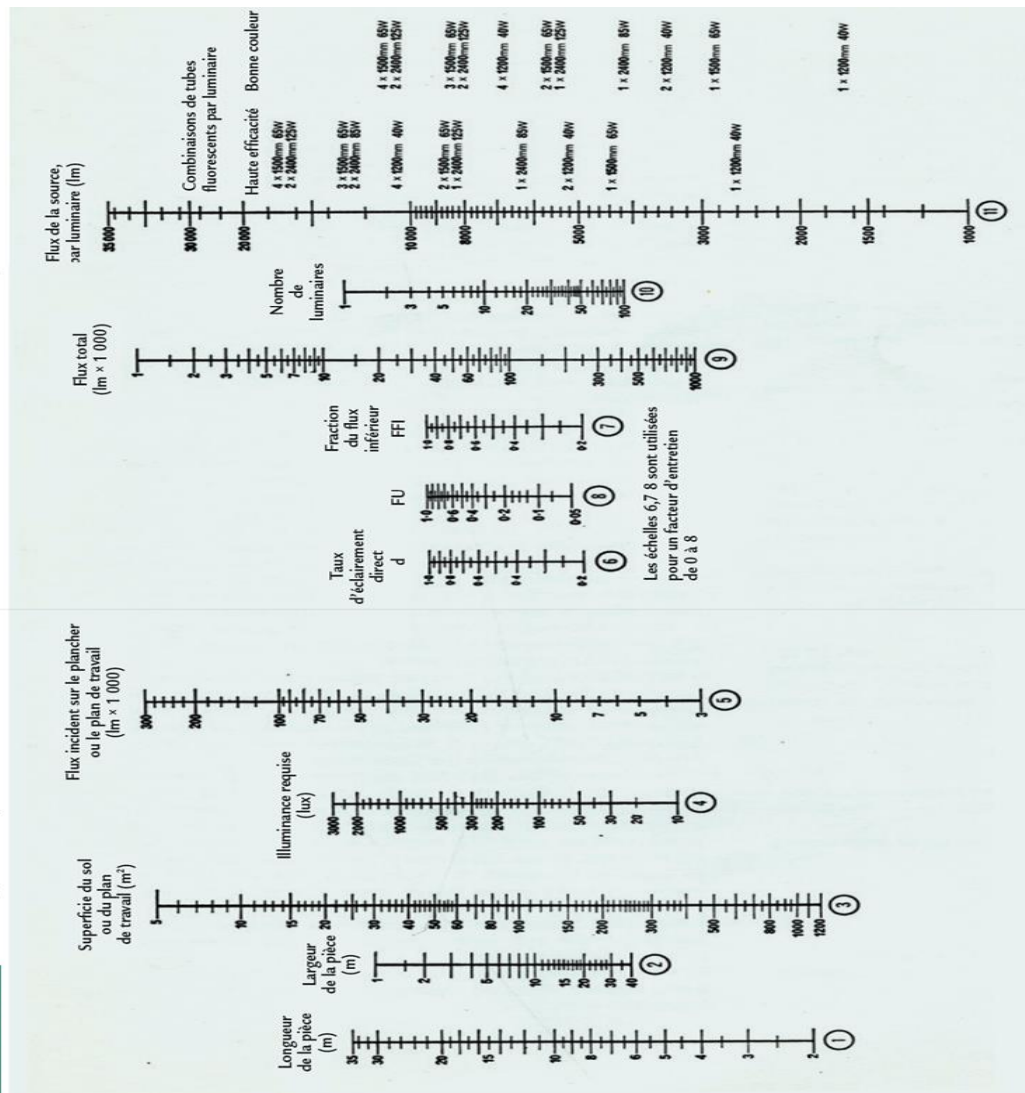
■ ■ Envisager la possibilité d'utiliser des sources à DEL, notamment pour l'éclairage de travail. Bien que plus chères, elles sont à intensité réglable et ont une très longue durée de vie.

■ ■ Si la lumière naturelle et la lumière artificielle sont utilisées en même temps (c'est-à-dire si l'éclairage naturel est insuffisant et doit toujours être complété par un éclairage artificiel), essayer de faire correspondre la température de couleur froide de la lumière du jour. Pour un appariement optimal de la température de couleur avec celle de la lumière naturelle, préciser l'utilisation de lampes fluorescentes avec une température de couleur de 4 000 K. Cependant, si l'éclairage naturel est suffisant la plupart du temps et que l'éclairage artificiel n'est nécessaire que la nuit, opter pour des lampes fluorescentes ayant une température de couleur de 2 700 à 3 000 K.

■ ■ Éviter les lampes à décharge à haute intensité (DHI). La plupart des sources de DHI (halogénures, sodium à haute pression et vapeur de mercure) ne conviennent pas aux applications à gradateur parce qu'elles subissent des changements de couleur quand on atténue leur intensité et qu'elles ont une plage d'atténuation relativement restreinte.

■ ■ Opter pour du matériel écoénergétique. Peu importe la stratégie d'éclairage, il faut toujours choisir les technologies d'éclairage les plus rentables et les commandes les plus efficaces disponibles, compte tenu du budget de conception.

**FIGURE 4.2-49** Nomogramme permettant de déterminer le nombre de luminaires et leur p



### Commande de l'éclairage

■ ■ Opter pour des commandes à gradateur si les stratégies de commande sélectionnées mettent à contribution l'éclairage naturel, le maintien du flux lumineux ou le réglage. Bien qu'en baisse, le coût des ballasts de gradation est encore élevé, de sorte que les commandes à gradateur sont au moins deux fois plus onéreuses que les commandes par commutation ; elles demeurent toutefois la meilleure solution pour la mise en œuvre de ces stratégies.

■ ■ Pour toutes les autres stratégies, opter pour du matériel de commutation, car les technologies de commutation sont peu coûteuses, leur période de recouvrement de l'investissement est brève et, en général, leur installation n'exige aucune expertise particulière.

■ ■ Utiliser des commandes à horaire programmable pour une forme de contrôle des horaires plus spécialisée qu'un simple chronomètre.

■ ■ Utiliser des détecteurs de mouvement. Ceux-ci peuvent facilement s'installer dans des boîtiers muraux en lieu et place des commutateurs manuels.

## *Confort visuel*

■ ■ Garder un éclairage ambiant faible autour des écrans d'ordinateur. S'il y a des ordinateurs, l'éclairage ambiant ne doit pas dépasser 300 lux. La règle de base applicable aux espaces où se trouvent des terminaux à écran est d'éclairer les écrans le moins possible et de fournir un éclairage ambiant de 150 à 300 lux.

■ ■ Éloigner le facteur de réflexion des lampes des écrans d'ordinateur. Limiter le potentiel d'éblouissement par réflexion des plafonniers sur les écrans d'ordinateur.

■ ■ Éviter l'éblouissement causé par les lampes exposées dans le champ de vision. Bloquer la vue directe sur les sources lumineuses pour éviter l'éblouissement. L'éclairage mixte (direct et indirect) est un moyen d'y parvenir.

■ ■ Utiliser des stratégies d'éclairage pour équilibrer l'éblouissement par les fenêtres si celui-ci est prévisible. Garder la luminance de l'environnement intérieur élevée pour équilibrer la luminosité de la fenêtre s'il n'y a pas de modificateurs architecturaux tels que des tableaux d'embrasure, des pare-soleil ou des éléments pour filtrer la lumière du jour. Un enduit de couleur claire sur le mur ou le plafond vers l'arrière de la pièce (la zone la plus éloignée de la fenêtre) est généralement efficace. Une légère augmentation de la consommation d'énergie à cette fin est acceptable.

## *Problèmes d'intégration*

■ ■ La position des fenêtres influe directement sur les stratégies de commande de l'éclairage et le placement des capteurs à cellules photoélectriques.

■ ■ La qualité des espaces périphériques dépend du mélange et de l'équilibre entre la lumière naturelle (une lumière latérale, fortement directionnelle, produisant un grand éclairement et une couleur froide) et la nature très différente de l'éclairage électrique.

■ ■ Les surfaces intérieures, et en particulier le plafond, doivent être de couleur claire.

■ ■ Coordonner les postes de travail avec l'emplacement des fenêtres et des accessoires, en particulier pour les espaces de travail sensibles à l'éblouissement (les ordinateurs, par exemple). Aligner la direction de la vue sur le terminal à écran parallèlement au mur où se trouve la fenêtre.

■ ■ L'emplacement des cloisons mobiles et autres meubles en hauteur ne doit pas entraver la pénétration de la lumière naturelle. Cette règle peut nécessiter la réorientation de cloisons ou l'utilisation de panneaux translucides plutôt que de panneaux opaques.

■ ■ Le concepteur d'éclairage doit fournir une estimation raisonnable de la réduction de puissance d'éclairage associée aux commandes de l'éclairage naturel afin de calculer la charge de refroidissement. On peut s'attendre à ce que les zones périphériques aient une charge d'éclairage électrique inférieure à la charge de pointe aux périodes de refroidissement de pointe (le midi, en été, par exemple).

■ ■ L'intégration d'une stratégie d'éclairage naturel n'a pas d'effet négatif sur la conception de l'éclairage. En fait, la qualité de l'éclairage est généralement plus élevée dans un espace où l'éclairage naturel est conçu avec soin.

■ ■ Les systèmes d'éclairage mixte qui utilisent des luminaires suspendus coûtent généralement 50 % plus cher que les luminaires à éclairage direct.

■ ■ De nombreuses technologies d'éclairage efficaces ont une période de recouvrement de l'investissement brève et donnent droit à des rabais ou des mesures incitatives de la part des services publics, en raison de la très forte proportion de la consommation d'énergie du bâtiment associée à l'éclairage.

Le coût de certaines technologies nouvelles (par exemple, les ballasts électroniques réglables) baisse avec le temps. Veiller à utiliser des estimations de coûts à jour dans l'analyse.

## **QUELQUES DEFINITIONS**

### **CERTIFICATS DE PERFORMANCE ENERGETIQUE (CPE) ET SYSTEMES D'EVALUATION DES BATIMENTS DURABLES (SEBD)**

Les certificats de performance énergétique (CPE) et les systèmes d'évaluation des bâtiments durables (SEBD) jouent un rôle important dans l'atteinte de l'efficacité sur les plans énergétique et des ressources, et dans celle de la durabilité dans le domaine de la construction. Ils constituent le plus important ensemble d'outils volontaires ou obligatoires disponibles. On leur attribue notamment les fonctions suivantes :

■ ■ Les CPE et les SEBD aident à définir ce qu'est un bâtiment écoénergétique, écologique ou durable, offrant ainsi une échelle objective de mesure de la performance.

■ ■ Ils permettent d'étiqueter et d'identifier les bâtiments écoénergétiques, écologiques et durables dans le contexte du marché de l'immobilier.

■ ■ Ils produisent un portrait détaillé du rendement énergétique et des caractéristiques de durabilité d'un bâtiment, c'est-à-dire des composantes, principes et usages qui ont une incidence sur sa performance.

■ ■ Ils aident à reconnaître et à récompenser le leadership environnemental dans l'industrie immobilière et contribuent à l'enrichissement des connaissances sur le niveau de durabilité des bâtiments existants dans chaque pays.

■ ■ Ils contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre de l'environnement bâti et, par conséquent, à l'atténuation des changements climatiques.

Cependant, les procédures d'obtention des CPE et des SEBD diffèrent sur le plan de l'étendue et de la nature de l'évaluation. La procédure de certification des SEBD est longue et relativement coûteuse. L'obtention d'un CPE se fait plus rapidement. Dans ce dernier cas, on réalise une enquête visuelle et une inspection énergétique principalement axées sur certains consommateurs et sur des éléments du bâtiment tels que l'isolation des combles, les chaudières domestiques, les réservoirs d'eau chaude, les radiateurs, les fenêtres et le vitrage. Cette procédure standard fixée par le législateur dépend aussi en grande partie des conditions climatiques locales. Les bâtiments qui obtiennent les meilleures cotes, c'est-à-dire une certification platine, 5 étoiles, exceptionnelle, etc. ont généralement un rendement qui dépasse les normes établies dans la réglementation nationale en matière de construction. Si le CPE a un statut obligatoire (par exemple pour un changement de propriétaire du bâtiment), ils constituent un outil efficace pour l'application de la réglementation relative à l'efficacité énergétique des bâtiments.