

CONSTRUCTIONS ET ENERGIES

Cycle de formation pour architectes et ingénieurs-conseils

Organisé par l'Ordre des Architectes et des Ingénieurs-Conseils

CENTRE DE RECHERCHE PUBLIC HENRI TUDOR - LUXEMBOURG

CONDITIONS DE CONFORT ET DE LOGEMENT SAIN

CLAUDE-ALAIN ROULET

PROF. TIT. EPFL

Mai 2008

*Ces notes sont extraites du livre "Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments" publié en 2004 aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes à Lausanne.
(Roulet, 2004)*

Pour plus d'information sur cet ouvrage, voir <http://ppur.epfl.ch/livres/2-88074-547-0.html>

CONDITIONS DE CONFORT ET DE LOGEMENT SAIN

PROF. CLAUDE-ALAIN ROULET, EPFL

Mai 2008

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	La leçon de Vitruve	1
1.2	Confort, besoins des occupants	1
1.3	Critères de confort.....	1
2	CONFORT THERMIQUE	3
2.1	Modes de transfert de chaleur	3
2.2	Thermique du corps humain.....	3
2.3	Paramètres influant le confort thermique	5
2.4	Notion de confort	6
2.5	Mesure du confort	6
2.6	Températures opératives forfaitaires.....	10
2.7	Facteurs d'inconfort supplémentaires	10
2.8	Conditions de confort thermique forfaitaires	11
2.9	Acclimatation	12
2.10	Utilité des modèles de confort thermique	13
3	L'HUMIDITÉ DANS LES BÂTIMENTS	15
3.1	Signes d'humidité	15
3.2	Sources d'humidité	16
3.3	Humidité relative et humidité absolue	16
3.4	Humidité optimale.....	18
4	CONFORT AÉRAULIQUE	19
4.1	Contamination de l'air intérieur.....	19
4.2	Nécessité de l'aération	20
4.3	Débit d'air requis	20
5	CONFORT VISUEL	24
5.1	L'œil.....	24
5.2	Rappel des notions de base.....	24
5.3	Conditions de confort visuel	28
6	CONFORT ACOUSTIQUE.....	31
6.1	L'oreille	31
6.2	Rappel des notions de base.....	31
6.3	Niveaux caractéristiques	34
6.4	Absorption acoustique.....	35
7	CONTRÔLE	37
8	COMMENT ASSURER LE CONFORT?	38
8.1	Mesures passives et mesures actives.....	38
8.2	Confort naturel	39
8.3	Chauffage solaire passif	41
8.4	Protection thermique d'été : Refroidissement passif	42
9	ÉNERGIE ET QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR	47

9.1	Énergie dans le bâtiment	47
9.2	Quantification du confort et de la santé	48
9.3	Énergie et bien être.....	50
10	RÉSUMÉ	57
10.1	Stratégie.....	57
10.2	Les comforts	57
10.3	Santé, confort et consommation d'énergie dans les bâtiments	58
11	BIBLIOGRAPHIE	60
	PRESSION DE SATURATION DE LA VAPEUR D'EAU EN PA	62
	Diagramme de Carrier	63
	ÉQUATION DE FANGER	64

INDEX

acclimatation	12	énergie solaire	41	panorama	30
activité métabolique	3	équation de Fanger	64	photométrie	25
aération	20	ergorama	30	PMV	6
air	20	évaporation -		pourcentage prévisible	
apports solaires	41	condensation	3	d'insatisfaits	6
asymétrie de		FANGER	6	PPD	6
température		Fanger (équation de) ...	64	pression de de vapeur	
radiante	10	Fletcher et Munson	33	d'eau	62
bâtonnets	25	<i>FLETCHER-MUNSON</i>	33	protection	
bruit	32	flux		contre l'humidité	16
BSI	50	de chaleur	3	protection solaire ...	42, 44
Building Symptom		lumineux	26	qualité de l'air	57
Index	50	fréquence	31	rayonnement	3
candela	26	gains solaires	41	rayonnement solaire	11
Carrier (diagramme		gaz carbonique	20	refroidissement passif ..	42
de-)	63	habillement	9	rendement lumineux ...	26
chaleur	3, 21	homéotherme	4	salle sourde	35
champ central	30	humidité	15	SBS	49
chauffage solaire		IDE	48	sécurité	46
passif	41	indice		sensibilité spectrale	25
clo	9	de dépense d'énergie	48	seuil de douleur	33
comportement	46	inertie thermique ...	42, 44	solaire	
conduction	3	intensité		passif	41
cônes	25	lumineuse	26	solaire passif	41
confort	6	loi		son	31
acoustique	31, 57	de Fechner	32	spectre	24
adaptatif	12	de Lambert	27	du son	32
thermique	57	lumen	26	syndrome du bâtiment	
visuel	57	luminance	27, 30	malsain	49
confort aéraulique	20	lux	27	teinte	24
contraste	30	mesure du confort	6	température	
contrôle	37, 58	met	8	de couleur	25, 29
convection	3	métabolisme	3, 9	du sol	11
couleurs	25	niveau		opérative	7
courants d'air	23	acoustique	32	radiante	7
critères de confort	1	de pression sonore	32	temps de	
débit d'air	20	sonore équivalent	34	réverbération	35
décibel	32	sonore pondéré	33	transport de chaleur	3
densité de flux de		niveaux de		vapeur d'eau	20, 21
chaleur	3	dépassement	34	variation du niveau	35
éblouissement	30	odeurs	20, 21	ventilation nocturne	43
éclairage	27, 28	oxygène	20	vote moyen prévisible ...	6

1 INTRODUCTION

1.1 La leçon de Vitruve

Vitruve a énoncé quatre principes de l'architecture, ou trois qualités qu'un bâtiment doit avoir de manière équilibrée :

Localitas	bien situé, intégré à son environnement
Voluptas ou Venustas ¹ :	être beau, esthétiquement bien conçu
Firmitas ou Necessitas ¹ :	tenir debout, au besoin pendant longtemps
Comoditas :	être confortable et fonctionnel, conforme aux besoins de l'utilisateur

Les deux premières qualités sont particulièrement bien traitées à l'atelier et dans les traités d'architecture, et la troisième dans les manuels de construction et de statique. Ce document ne concerne donc que la troisième qualité, **comoditas**.

Le bâtiment est construit avant tout pour ses usagers, et doit donc être confortable et sain. Le bâtiment doit protéger les occupants de l'environnement extérieur, assurer un climat et une qualité d'air agréables à l'intérieur, et fournir des services tels que le transport, des produits et des communications.

C'est un des aspects du travail de l'architecte d'assurer un environnement confortable à l'intérieur des bâtiments qu'il construit. Ceci limite certes sa liberté d'expression - qui n'est pas aussi grande que celle d'un sculpteur par exemple - mais l'architecte a choisi cette carrière de son propre gré, il a choisi d'appliquer son art à des bâtiments, et se doit de le baser équitablement sur les critères énoncés par Vitruve.

Une bonne compréhension des phénomènes en jeu permet d'élargir la liberté d'expression de l'architecte dans la conception d'un bâtiment sain et confortable. Un des objectifs de ce cours est d'apporter des outils provenant de la physique et de la technique du bâtiment, en espérant ainsi faciliter l'expression et la création artistiques de bâtiments de haute qualité environnementale.

1.2 Confort, besoins des occupants

Assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur c'est entre autres satisfaire les besoins des occupants, donc assurer leur confort. Le confort est une notion subjective qui résume tout un ensemble de sensations : le confort thermique consiste à n'avoir ni trop chaud, ni trop froid, le confort aéraulique, pour lequel la qualité de l'air intérieur doit être acceptable ou mieux, agréable, le confort visuel, qui garantit un environnement bien visible et agréable aux yeux, et le confort acoustique qui offre un environnement pas trop bruyant et dans lequel les sons utiles sont clairement audibles.

1.3 Critères de confort

Les conditions propres à l'individu, qui sont son métabolisme, son activité, son habillement et sa santé jouent un rôle primordial sur la perception que cette personne aura de son confort. Il convient donc de le reconnaître, même si l'architecte n'a aucune influence sur ces paramètres.

D'autre part, les paramètres suivants, sur lesquels l'architecte peut avoir de l'influence, interviennent dans le confort :

¹ Ce mot change suivant les sources !

Conditions thermiques :	Température de l'air et des surfaces environnantes Sources de rayonnement (radiateurs, poêles, soleil) Perméabilité thermique des surfaces en contact avec le corps
Qualité de l'air :	Vitesse relative de l'air par rapport au sujet Humidité relative de l'air Pureté ou pollution de l'air, odeurs
Acoustique	Niveau de bruit, nuisance acoustique Temps de réverbération (durée d'écho)
Optique :	Éclairage naturel et artificiel Couleurs Volumés intérieurs et distribution des volumés

Le bien être des occupants d'un espace ne dépend pas seulement des conditions thermiques, aérauliques, visuelles et auditives. Il est certain que les paramètres suivants entrent aussi en ligne de compte :

- Volume de l'espace, proportions spatiales, forme des limites
- Aménagement intérieur, mobilier
- Densité d'occupation de l'espace
- Ambiance sociale, relations avec les autres occupants.

Ces paramètres sont de la compétence de l'architecte, du sociologue ou du directeur des ressources humaines, et sortent du domaine de compétence de l'auteur du présent ouvrage.

De plus, il n'est pas exclu (mais pas scientifiquement prouvé non plus) que certains phénomènes aient une influence encore mal connues sur le bien être des occupants, tels que les champs électromagnétiques de faible intensité, l'ionisation de l'air, voire des influences encore mal définies scientifiquement, mais dont il est souvent tenu compte, comme par exemple dans l'art du Feng Shui. Ceci aussi sort du domaine de compétence de l'auteur.

2 CONFORT THERMIQUE

2.1 Modes de transfert de chaleur

Le confort thermique, comme son nom l'indique, est le confort lié à une répartition de température et de flux de chaleur agréables. On ne peut pas en discuter sans comprendre la nature de la chaleur et de la température.

La chaleur est la forme d'énergie liée à l'agitation (vibration) aléatoire des molécules constituant la matière. Cette agitation se mesure par la température, et la chaleur par l'augmentation de température obtenue dans un matériau donné. Au zéro absolu, l'agitation thermique est nulle, la plupart des matériaux sont sous forme solide, généralement cristalline. A moins basse température, l'agitation est telle que la structure cristalline bien ordonnée disparaît, les matériaux fondent ou s'évaporent, tout en gardant assez de liens entre atomes pour conserver la structure moléculaire (la composition chimique) malgré l'agitation. A plus haute température, les molécules se décomposent en atomes, puis, plus haut, les atomes eux-mêmes se décomposent en ions et électrons : c'est l'état de plasma. Dans ce chapitre, nous resterons dans une gamme de température restreinte, relativement confortable, à savoir entre 10 et 40°C environ (280 à 310 K).

Comme l'eau coule de haut en bas, la chaleur passe naturellement de zones chaudes aux zones froides, en utilisant essentiellement quatre *modes de transport* :



La **conduction**, qui est la transmission de proche en proche de l'agitation moléculaire par chocs entre molécules;



La **convection**, transport de chaleur par transport (naturel ou forcé) de matière chaude vers une zone froide ou vice versa;



Le **rayonnement**, ou transport de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique par les surfaces des corps;



L'**évaporation-condensation** : la chaleur cédée à un matériau pour l'évaporer est restituée à la surface sur laquelle la vapeur se condense.

Le transfert de chaleur se quantifie par le **flux de chaleur** (en Watt) qui exprime la quantité d'énergie passant chaque seconde au travers d'une surface quelconque, ou, localement, par une **densité de flux de chaleur** (en W/m^2) qui exprime la quantité d'énergie transmise chaque seconde au travers d'une surface unité.

2.2 Thermique du corps humain

L'**activité métabolique** consiste à transformer la nourriture consommée, d'une part en constituants du corps (protéines, tissus) et d'autre part en énergie. Cette transformation produit aussi de l'eau, du gaz carbonique et des déchets divers (Figure 2.1).

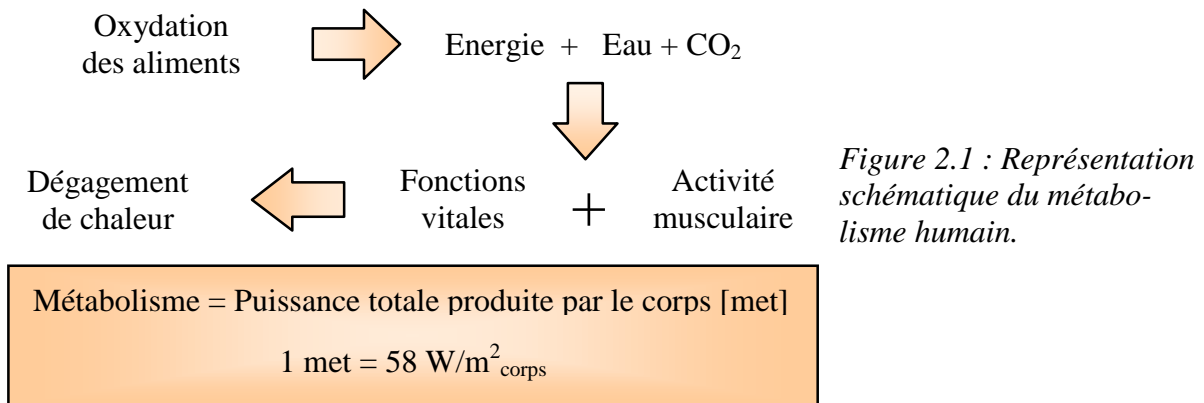


Figure 2.1 : Représentation schématique du métabolisme humain.

L'énergie ainsi produite nous permet d'une part de travailler, (au sens physique du terme, donc à nous mouvoir, à tirer et à pousser des objets) et d'autre part à maintenir la température interne de notre corps à 37°C, pour que les réactions biochimiques nécessaires puissent se faire dans de bonnes conditions.

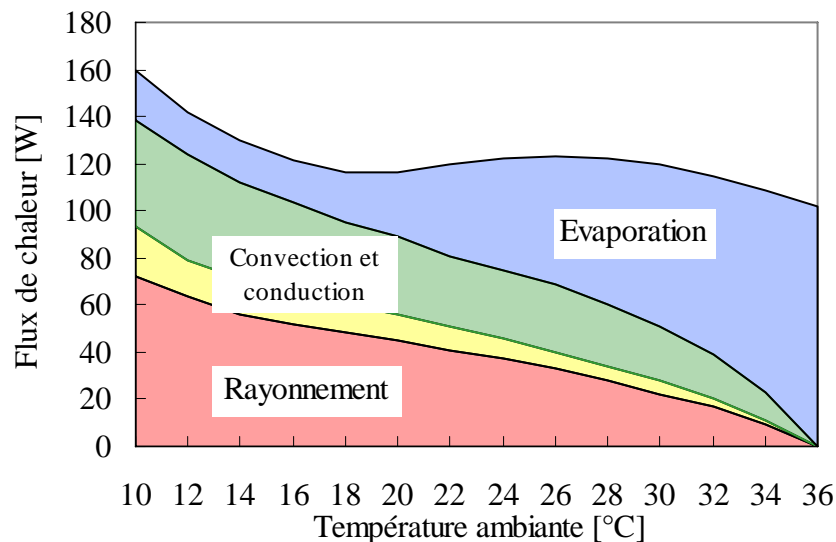


Figure 2.2 : Répartition des échanges de chaleur d'une personne assise en fonction de la température ambiante, supposée homogène.

Le corps est **homéotherme** : il tend à maintenir une température constante. Pour cela, il faut impérativement éliminer la chaleur produite dans le corps. Cette élimination se fait au travers de la peau et par la respiration. La chaleur dégagée par le métabolisme, plus ou moins grande selon l'activité, est éliminée, directement ou au travers des habits, par convection et conduction vers l'air ambiant, par rayonnement vers les surfaces voisines et par évapotranspiration dans l'air (Figure 2.2). On notera que, dans la zone confortable, les échanges par rayonnement, convection - conduction et évapotranspiration se répartissent en trois parts approximativement égales.

Les échanges de notre corps ont lieu avec divers éléments de notre environnement :



Les échanges de chaleur par conduction se font au contact de la peau (le cas échéant au travers des habits) avec des objets. Si l'objet est froid ou absorbe facilement la chaleur (métal, pierre) nous aurons un sentiment de matériau froid. Si au contraire il est chaud ou isolant thermique, nous aurons une sensation de chaud.



La chaleur est transportée par convection (et conduction) entre notre peau et l'air ambiant (ou l'eau lorsque nous sommes immergés). S'il y a du vent ou si nous bougeons par rapport à l'air, ces échanges augmentent. La sensation de froid (ou de chaud si l'air est trop chaud) est aggravée par le vent relatif.



Le transport de chaleur par rayonnement a lieu entre notre peau et les surfaces environnantes. Si ces surfaces sont froides, elles nous rafraîchissent (plafonds froids). Elles nous réchauffent dans le cas contraire (soleil, surface du calorifère, radiateur)



L'évapotranspiration nous permet d'évacuer de la chaleur même si l'air ou les surfaces environnantes sont plus chauds que notre peau. Il faut toutefois que l'air ne soit pas trop humide, car l'évaporation devient alors impossible. C'est ce qui rend le climat tropical pénible à supporter. Si le point de rosée dépasse la température de la peau, c'est la vapeur qui s'y condense, en chauffant la peau. C'est ce qui arrive notamment dans le sauna ou le bain turc.

Si la température du corps a tendance à rester très stable, la température de la peau varie en fonction des circonstances (Figure 2.3, Figure 2.4).

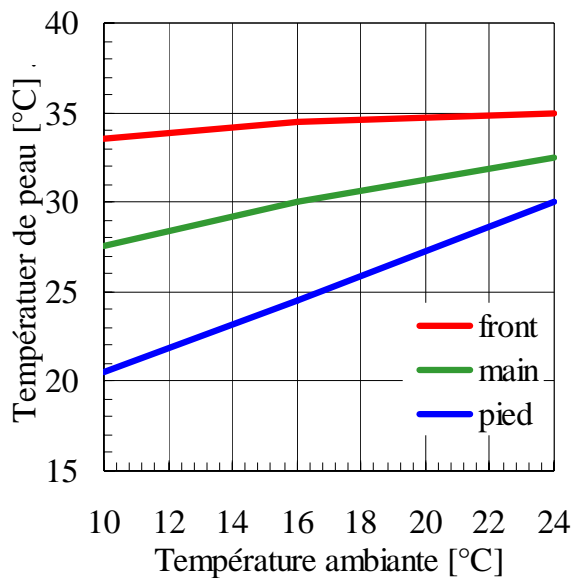


Figure 2.3 : Température de la peau en fonction de la température ambiante.



Figure 2.4 : Thermographie de l'auteur, montrant les différences locales de température de peau. Le noir correspond à 25°C ou moins, et le blanc à 35°C ou plus.

2.3 Paramètres influant le confort thermique

Ainsi, contrairement à ce qui est généralement admis, il est erroné de vouloir satisfaire les exigences de confort par une simple régulation de la température de l'air intérieur de l'habitation. Le confort thermique dépend de tous les facteurs suivants :

Les facteurs liés à l'individu :

- Son activité et le rendement de cette activité.
- Son habillement.

Les facteurs liés à l'environnement :

- Températures de l'air et des surfaces environnantes
- Vitesse relative de l'air et le degré de turbulence
- Pression de vapeur d'eau ou humidité relative

2.4 Notion de confort

Le confort est une notion essentiellement subjective. Il peut être défini de diverses manières :

- L'absence de plaintes pour inconfort
- Une sensation de bien-être général
- Les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont à un niveau minimum d'activité

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

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

2.5 Mesure du confort

Il est généralement admis de quantifier la sensation de confort en utilisant l'échelle de -3 à +3 proposée par **Fanger** (Fanger, 1982) et officialisée par la norme internationale ISO 7730 (ISO, 1993) :

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

Une autre méthode consiste à compter le pourcentage de personnes insatisfaites des conditions de confort. Ce pourcentage est directement lié au vote moyen d'une population donnée. On a ainsi deux paramètres permettant de mesurer le confort thermique :

Le **vote moyen**, appelé **PMV** (Predicted Mean Vote), qui est l'appréciation moyenne d'une population dans un environnement donné, sur l'échelle de -3 à +3. Le confort optimal correspond à un PMV nul.

Le **pourcentage prévisible d'insatisfaits**, appelé **PPD** (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui exprime la part des sujets insatisfaits dans une condition donnée. La Figure 2.5 montre la relation entre le PPD et le PMV.

À cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions "idéales". Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum.

Il reste néanmoins, en moyenne, 5 % d'insatisfaits lorsque le PMV nul. Même dans les conditions de confort optimales, on trouvera donc 2,5% des personnes ayant trop chaud, et 2,5%

ayant trop froid. Le pourcentage d'insatisfaits monte à 10 % pour un PMV = ± 0.5 et 20 % pour un PMV = ± 0.84.

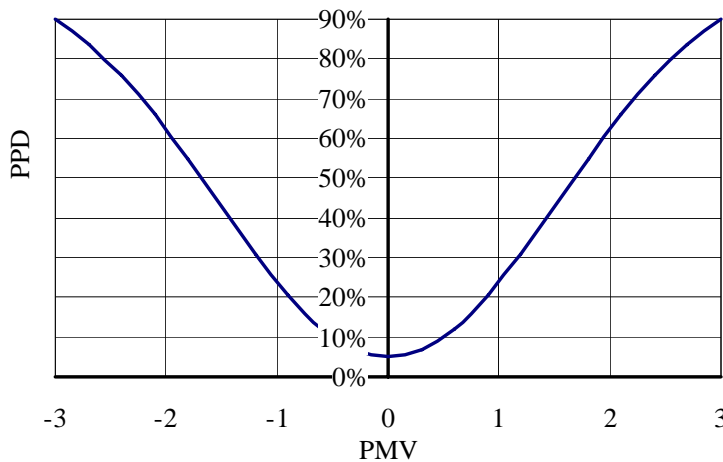


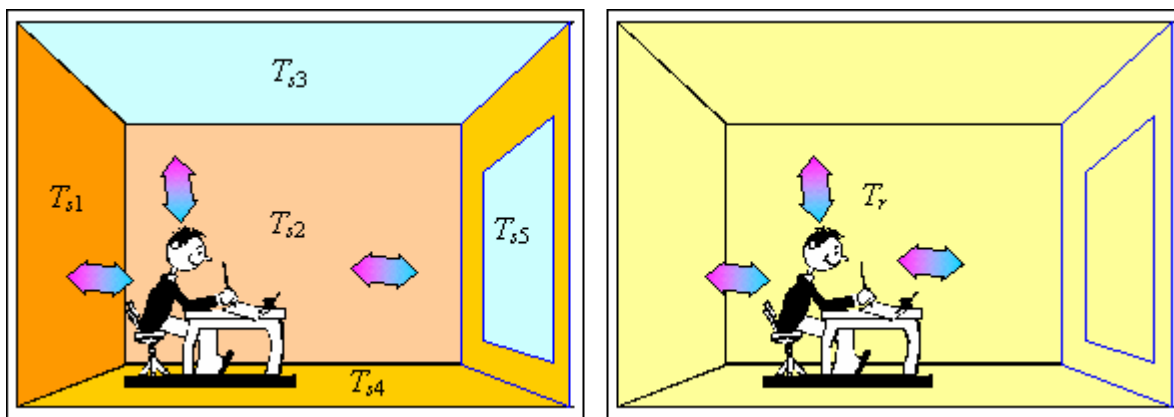
Figure 2.5 : Relation entre le pourcentage d'insatisfaits (PPD) et le vote moyen (PMV).

En comparant le vote d'un grand nombre de personnes mises dans des conditions contrôlées de confort diverses avec leur bilan thermique donné par des relations bien connues de la physique, Fanger a établi une équation prédisant le PMV à partir des paramètres de confort (voir annexe). Cette équation est complexe et sa résolution nécessite l'usage d'un ordinateur. Ainsi, pour des applications pratiques, un diagramme de confort a été calculé pour une combinaison courante des paramètres physiques (Figure 2.7).

La **température opérative** est une moyenne pondérée de la température de l'air T_a et de la température radiante T_r :

$$T_{op} = a T_a + (1 - a) T_r \quad \text{où} \quad a = 0.5 + 0.25v \quad (1.2-1)$$

v étant la vitesse relative de l'air. Si cette vitesse est nulle ou négligeable, ce qui est souvent le cas lorsqu'il n'y a pas de courants d'air, la température opérative est la moyenne arithmétique de la température de l'air et de la température radiante. Si la vitesse de l'air vaut 2 m/s ou plus, c'est la température de l'air, les surfaces environnantes n'ont plus d'effet sensible.



Pièce réelle

Pièce virtuelle

Figure 2.6 : Définition de la température radiante moyenne

Il peut arriver que les diverses surfaces délimitant une chambre ne soient pas à la même température. La **température radiante** moyenne en un endroit d'une pièce qui a plusieurs surfaces à différentes températures est la température homogène qu'aurait une pièce imaginaire dans laquelle le rayonnement reçu à cet endroit est le même que dans la pièce réelle (Figure 2.6).

L'humidité de l'air n'a que peu d'influence sur la sensation de confort tant qu'elle est comprise entre 30 et 70 % et que les autres paramètres de confort donnent un PMV inférieur à 1.

La Figure 2.7 donne la température opérative idéale, c'est à dire celle qui donne un PMV nul en fonction de l'activité et de l'habillement, et ce pour une vitesse de l'air basse (moins de 0,1 m/s) et une humidité relative normale (35 à 65%). Les parties ombrées donnent l'écart acceptable autour de la température idéale tel que $-0.5 < PMV < 0.5$, donc les domaines où il n'y aurait que 10% d'insatisfaits.

Pour utiliser l'équation de Fanger, il faut connaître les valeurs des différentes variables. Les températures, l'humidité et la vitesse de l'air se mesurent sur place ou se calculent au moyen de modèles. On utilisera le Table 2.1 pour les taux de métabolisme et la Table 2.2 pour l'habillement. Ces valeurs ont été mesurées en laboratoire.

Le taux de métabolisme ou l'activité peut être rapporté à un taux conventionnel, par exemple celui d'un individu assis tranquille. L'unité est alors le *met*, qui correspond à une puissance de 58 W dissipée par mètre carré de surface du corps.

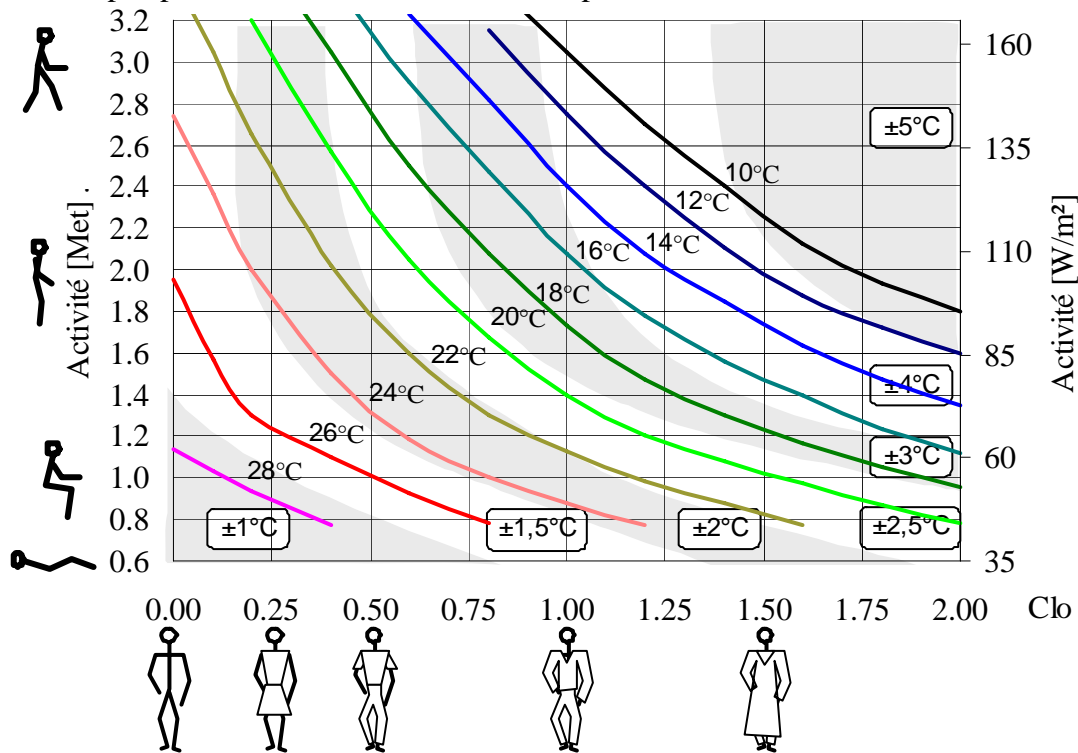


Figure 2.7 : Température opérative idéale en fonction de l'habillement et du métabolisme d'après (ISO, 1993).

Les valeurs proposées sont relatives à un homme de 70 kg dont la surface de corps est 1,8 m². Pour d'autres personnes, ajouter 1 W par kg supplémentaire, et diminuer de 20% pour les femmes et 20 à 40% pour les enfants.

Table 2.1 : Taux de métabolisme moyen correspondant à diverses activités (ISO, 1993)

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

† par rapport à la surface du corps.

* valable pour une personne de 1,8 m² de surface corporelle (par ex. taille 1.7 m, poids 69 kg)

L'habillement représente une résistance thermique entre la surface de la peau et l'environnement. On peut donc, à l'aide de mannequins chauffants, mesurer cette résistance thermique et l'exprimer en m²K/W. Il est aussi usuel de l'exprimer en *clo* (pour clothing). 1 clo correspond à la résistance thermique du complet – veston, ou à une résistance thermique de 0.155 m²K/W. Quelques exemples sont donnés dans la Table 2.2.

Table 2.2 : Valeurs en clo pour quelques habillements (ISO, 1993)

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

L'équation de Fanger est utilisable dans le domaine suivant :

- climat intérieur contrôlé (chauffage ou refroidissement)
- métabolisme de 46 à 230 W/m² (0.8 à 4 met);
- habillement de 0 à 2 clo ou résistance thermique des habits de 0 à 0.310 m²K/W ;
- température de l'air de 10 à 30 °C;
- température radiante moyenne de 10 à 40 °C;
- vitesse relative de l'air inférieure à 1 m/s;
- pression partielle de vapeur d'eau de 0 à 2700 Pa.

2.6 Températures opératives forfaitaires

En tenant compte de l'activité et de l'habillement usuels, on peut donner des conditions de confort thermique pour certains locaux typiques. La Table 2.3 donne quelques exemples.

Table 2.3 : Températures opératives forfaitaires pour quelques espaces typiques (CEN, 1998.).

Espace	Habillement (clo)		Activité (met)	Classe de confort	Température en	
	Été	Hiver			Été	Hiver
Bureau	0,5	1,0	1,2	A (haute)	24.5 ± 0.5	22.0 ± 1.0
				B (moyenne)	24.5 ± 1.5	22.0 ± 2.0
				C (minimum)	24.5 ± 2.5	22.0 ± 3.0
Cafétéria ou restaurant	0,5	1,0	1,4	A	23.5 ± 1.0	20.0 ± 1.0
				B	23.5 ± 2.0	20.0 ± 2.5
				C	23.5 ± 2.5	20.0 ± 3.5
Dépôt	0,5	1,0	1,6	A	23.0 ± 1.0	19.0 ± 1.5
				B	23.0 ± 2.0	19.0 ± 3.0
				C	23.0 ± 3.0	19.0 ± 4.0

La conséquence pratique pour les bâtiments commerciaux et les logements (où l'activité avoisine 1,1 met) est que la température opérative idéale en hiver (habillement de 1 clo) est comprise entre 20 et 24°C, alors qu'en été (habillement de 0,5 clo) elle est comprise entre 22 et 26 °C. Rappelons qu'il ne s'agit pas de la température de l'air seulement, mais d'une combinaison entre celle-ci et la température radiante.

2.7 Facteurs d'inconfort supplémentaires

L'équation de Fanger ne tient pas compte de certains facteurs d'inconfort supplémentaires tels que les gradients de température, les contacts avec les surfaces froides, l'effet désagréable de courants d'air ou les effets dynamiques.

Les figures suivantes sont basées sur des expériences portant sur un nombre relativement restreint d'individus (une centaine). Elles donnent une indication sur l'influence de divers paramètres sur la satisfaction des usagers (Fanger, 1983).

Pour les figures qui suivent, les paramètres de confort non mentionnés sont supposés "normaux", à savoir : vitesse de l'air nulle, gradients de température nuls, température radiante égale à la température de l'air et humidité relative "normale". De plus, les conditions thermiques étaient telles que le PMV soit nul. Par exemple, des surfaces chaudes sont compensées par des surfaces froides ou de l'air plus froid. Le pourcentage d'insatisfaits donné par les figures s'ajoute donc au 5 % usuels pour un PMV nul.

Ces diagrammes permettent de définir des conditions de confort acceptables ou d'estimer le PMV ou le PPD dans une condition donnée, à un instant donné. Dans de nombreux pays ayant adopté la méthode de Fanger, on admet que l'habitation est satisfaisante si le PPD ne dépasse pas 20 % au total.

L'asymétrie de température radiante par elle-même peut engendrer une sensation d'inconfort (Figure 2.8). Cette asymétrie est définie par la différence de température radiante moyenne entre les deux faces d'une petite surface, chacune des faces voyant la moitié de la pièce.

On notera que le plafond chaud est nettement moins bien supporté qu'un plafond froid, alors qu'une paroi chaude est préférée à une paroi froide.

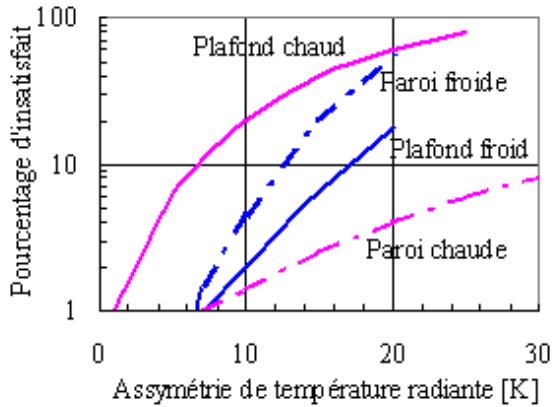


Figure 2.8 : Effet de l'asymétrie de température radiante.

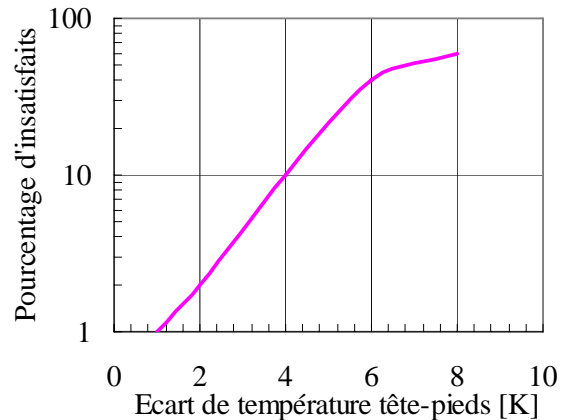


Figure 2.9 : Effet d'une différence de température entre la tête et les chevilles.

Un écart de température de 4 K entre la tête et les pieds génère déjà 10% d'insatisfaits, comme le montre la Figure 2.9, où l'on représente le pourcentage d'insatisfaits parmi des personnes assises présentant un écart de température entre la tête (1.1 m) et les chevilles (0.1 m).

La **température du sol** est ressentie à travers des semelles des chaussures. Son effet est particulièrement important si l'on porte des chaussures légères (Figure 2.10).

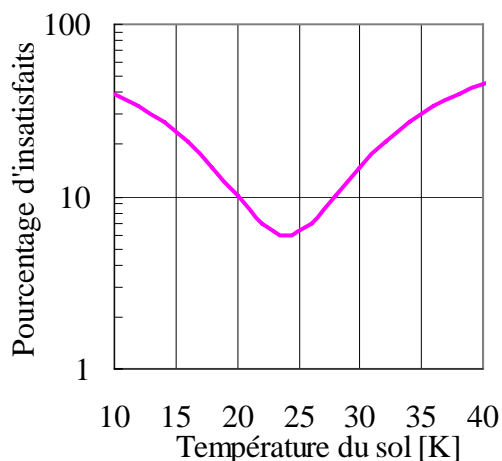


Figure 2.10 : Effet de la température du sol. (Fanger, 1982)

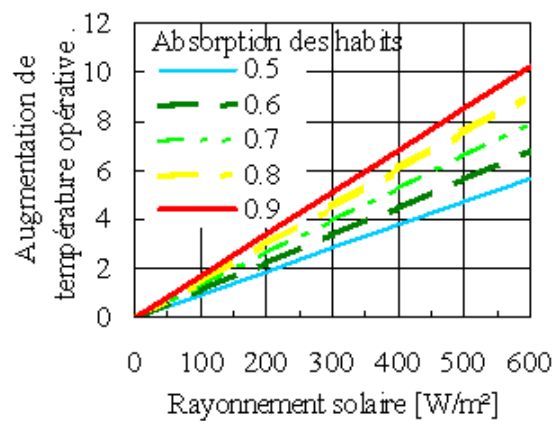


Figure 2.11 : Effet du rayonnement solaire sur la température ressentie.

L'influence du **rayonnement solaire** incident sur un occupant est importante. Il modifie sensiblement la température ressentie, comme on peut le voir sur la Figure 2.11, qui représente l'augmentation de la température opérative due au rayonnement solaire incident et absorbé par les habits.

2.8 Conditions de confort thermique forfaitaires

Dans son rapport technique 1752 (CEN, 1998.), la commission européenne de normalisation propose trois catégories ou classes de confort, correspondant à des exigences élevées, moyennes ou minimales. Ces classes correspondent à celles mentionnées dans la Table 2.3 et la Table 4.3.

Table 1 : Les trois classes d'environnement intérieur proposées dans le rapport (CEN, 1998.)

Classe de confort	Équilibre thermique global du corps		Inconforts locaux supplémentaires, pourcentages de plaintes pour			Asymétrie de temp. Radiante (°C)
	PPD	PMV	Courants d'air	Gradients de température verticaux	Température du sol	
A (haute)	< 6 %	-0.2 à + 0.2	<15 %	< 3 %	< 10 %	< 5
B (moyenne)	< 10 %	-0.5 à + 0.5	<20 %	< 5 %	< 10 %	< 5
C (minimum)	< 15 %	-0.7 à + 0.7	<25 %	< 10 %	< 15 %	< 10

2.9 Acclimatation

Le modèle de Fanger est basé sur des expériences effectuées en chambre climatique et en régime stationnaire, les occupants réagissant de manière passive aux stimuli. L'expérience journalière montre que la température idéale n'est pas constante. Les habitants aiment adapter les conditions climatiques intérieures à leurs besoins et réciproquement, ils adaptent leur habillement et leur activité aux conditions ambiantes. De plus, ils acceptent des variations de températures différentes suivant leur environnement.

Des données observées dans 160 bâtiments dans le monde entier ont été compilées dans le cadre du projet de recherche ASHRAE 884. De Dear et ses collègues ont séparé ces bâtiments en deux catégories : les bâtiments à ventilation naturelle et les bâtiments avec air conditionné (de Dear and Brager, 2002). Dans ces derniers, les températures observées correspondent à celles que l'on peut prédire à l'aide du modèle de Fanger (Fanger, 1982) repris dans la norme ISO 7730 (ISO, 1993) (Figure 2.12 de gauche).

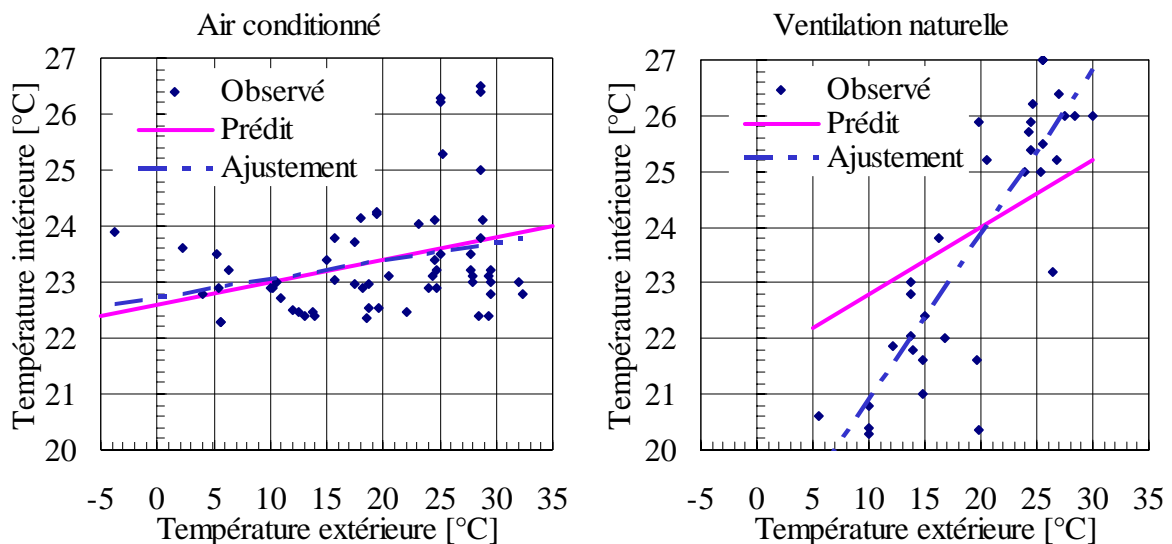


Figure 2.12 : Températures observées et prédites dans des bâtiments avec air conditionné (à gauche) et à ventilation naturelle (à droite). Les lignes en trait point sont ajustées sur les points expérimentaux. D'après (de Dear and Brager, 2002).

Par contre, dans les bâtiments avec ventilation naturelle, le modèle ne prédit pas la température idéale correcte. Il semble que les habitants s'adaptent aux conditions locales en utilisant des moyens qui ne sont pas pris en compte dans le modèle ISO 7730. (Figure 2.12 de droite). (McCartney and Nicol, 2002) ont abouti à des conclusions semblables à partir d'études sur des bâtiments européens.

Ainsi, en tenant compte de l'adaptation des occupants, la température opérative idéale dans les bâtiments à ventilation naturelle ne suit pas le modèle ISO 7730, mais dépend plutôt de la température extérieure, comme le propose de Dear (Figure 2.13) :

$$\theta_{op} = 17.8 + 0.31\theta_e \quad (1.2-2)$$

où θ_{op} est la température opérative idéale et θ_e la température extérieure en moyenne mensuelle. L'intervalle d'acceptation pour 90% des occupants est ± 2.5 K. Il s'élève à ± 3.5 K pour 80%. Ce modèle n'est valable qu'entre 8 et 32°C de température extérieure moyenne, et la température idéale pour 90% de la population reste comprise entre 17 et 22°C par temps très froid et entre 25,5 et 30,5 °C pendant la canicule (Figure 2.13).

Comme le montre la Figure 2.13, les prédictions de la norme ISO 7730 sont différentes de celles du modèle adaptatif, même si on tient compte des variations saisonnières de l'habillement (1 clo en hiver et 0,5 clo en été).

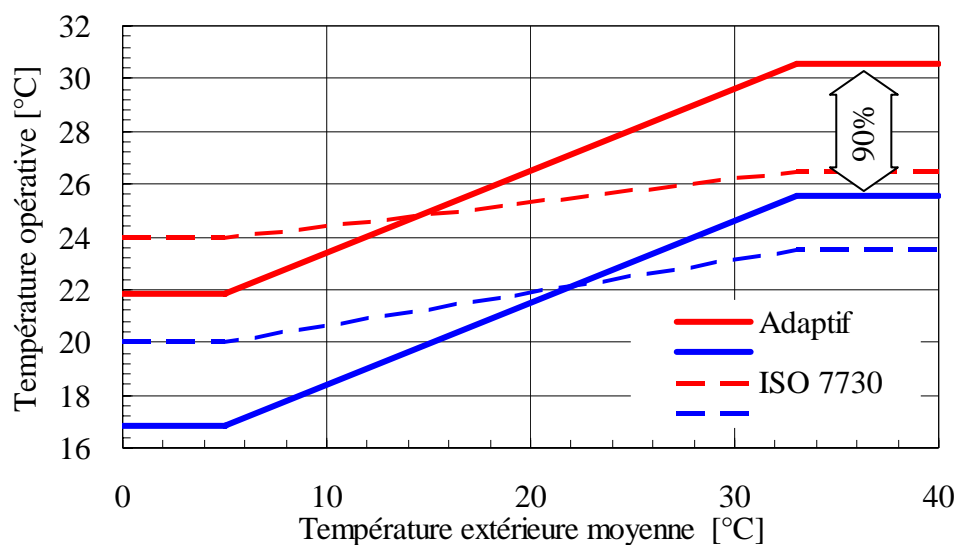


Figure 2.13 : Modèle de confort adaptatif de (de Dear and Brager, 2002) et selon ISO 7730 pour 1,2 met.

Ce modèle de confort adaptatif propose de nouvelles règles de conception pour les bâtiments à ventilation naturelle et permet des économies d'énergie importantes, spécialement en été.

2.10 Utilité des modèles de confort thermique

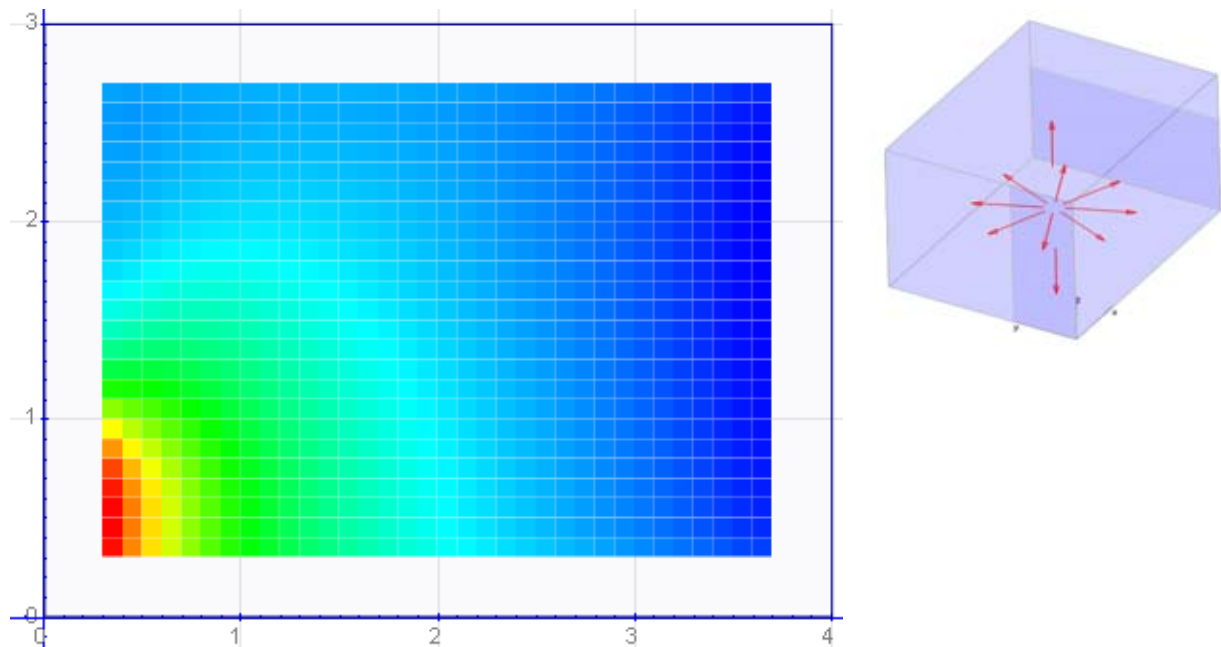
Il est maintenant prouvé que, à activité et habillement égaux, des facteurs tels que l'âge, le sexe, la corpulence, l'origine, la race, etc. ne modifient pas les exigences de confort de façon significative. Les modèles exposés ci-dessus permettent donc de prédire, déjà au niveau de l'avant projet, les conditions de confort qui règneront dans un bâtiment. Ceci permet d'imaginer une architecture sortant des sentiers battus tout en apportant certaines garanties quant au confort obtenu.

L'étude et la prédiction du confort thermique permettent donc :

- la conception d'habitations offrant déjà un bon confort sans l'intervention des habitants, et permettant aux occupants d'agir à bon escient pour améliorer leur confort.
- le calcul de bilans énergétiques réels, tenant compte des occupants et de leurs exigences justifiées,
- le calcul des températures minima et maxima acceptables permettant de diminuer les besoins en énergie,

Il faut toutefois rappeler que de nombreuses recherches restent à faire dans ce domaine. Par exemple, ces modèles ne tiennent pas compte explicitement des effets dynamiques (effet de la variation temporelle des paramètres sur le confort). L'interaction du confort thermique (défini par une température opérative) et des autres paramètres de confort (visuel, auditif, olfactif, etc.) n'est pratiquement pas connue.

Figure 2.14 : Carte du confort calculée avec le modèle de Fanger dans une pièce de 3 x 4 m comportant une fenêtre froide à droite et un radiateur à 36°C à gauche (logiciel RadiaConf).



3 L'HUMIDITÉ DANS LES BÂTIMENTS

L'excès d'humidité dans le bâtiment peut causer de nombreux ennuis :

- Création d'un climat favorable à la croissance de divers micro-organismes, dont les acariens et les moisissures inesthétiques (*Figure 3.1*) et parfois toxiques ou allergènes.
- Destruction des matériaux organiques, notamment le bois, par les moisissures ou des champignons (mérule en particulier, *Figure 3.2*).
- Altération des propriétés des matériaux (perte d'isolation thermique, ramollissement du plâtre et de nombreuses colles, etc).
- Apparition d'efflorescences cristallines sur les parois, l'évaporation laissant sur place les sels minéraux transportés par l'eau (*Figure 3.3*).
- Décollement des peintures, crépis, papiers peints, soit par l'humidité, soit par les efflorescences.
- Dégâts de gel.
- Apparition de taches (*Figure 3.4*).



Figure 3.1 : Taches de moisissures (EPQR Rénovation).



Figure 3.2 : Mérule (F. Baer, Holzschutz)



Figure 3.3 : Efflorescences (EPQR Rénovation).



Figure 3.4 : Remontée d'humidité (EPQR Rénovation).

3.1 Signes d'humidité

La présence d'eau en phase liquide à des endroits inattendus est un signe flagrant. Toutefois, le bâtiment peut souffrir d'un excès d'humidité sans que ce soit évident. D'autres signes indiquant un problème d'humidité dans un bâtiment sont :

- une odeur de moisi, de terre ou d'alcool;
- des taches d'eau causées par des infiltrations, des inondations ou des refoulements d'égouts;
- l'apparition de moisissures;
- les matériaux, la literie et des vêtements humides;
- de la condensation fréquente d'eau sur les fenêtres ou autres surfaces froides (conduites d'eau).

3.2 Sources d'humidité

Les sources d'humidité dans les bâtiments sont nombreuses. Un bâtiment neuf prend un à deux ans pour perdre son eau de chantier. Si la partie habitée n'est pas séparée du terrain par une couche étanche ou des espaces ventilés, l'eau phréatique peut s'infiltrer et s'évaporer dans la zone occupée. Enfin, les inondations causées par des crues, des fuites du toit ou de conduites peut entraîner gde graves problèmes d'humidité si le bâtiment n'est pas rapidement asséché.

Les occupants eux-mêmes sont source d'humidité. Un adulte évapore entre 40 g/h d'eau (pendant le sommeil) et 60 g/h (en activité). La cuisson des aliments produit environ 2 kg de vapeur d'eau par jour, auxquels il faut ajouter s'il y a lieu la vapeur d'eau produite par la combustion du gaz de cuisson, à savoir environ 1 kg par jour. Le séchage du linge à l'intérieur ou l'utilisation d'un séchoir sans évacuation de la vapeur produit en plus environ 1,5 kg/jour.

Éviter les excès d'humidité signifie se protéger contre :

- la pluie,
- l'humidité du sol et de la nappe phréatique,
- le transport convectif de vapeur d'eau dans les éléments de construction,
- la condensation de vapeur d'eau,
- l'apparition de moisissures sur les surfaces;
- l'accumulation excessive d'humidité par diffusion et capillarité dans les éléments de construction.

Selon la norme SIA 180, (SIA, 1999) les objectifs généraux de la protection contre l'humidité sont les suivants :

- Éviter l'accumulation locale excessive d'eau libre dans la structure du bâtiment.
- La résistance thermique d'un élément de construction ne doit pas diminuer sous l'influence de l'humidité. Une variation mineure et réversible est néanmoins tolérée.
- Éviter les modifications irréversibles de composants du bâtiment sous l'influence de l'humidité.

3.3 Humidité relative et humidité absolue

Pour comprendre les phénomènes liés à l'humidité dans les bâtiments, il convient de bien distinguer l'humidité absolue de l'humidité relative.

L'**humidité absolue** est la quantité de vapeur d'eau présente dans une certaine quantité d'air. On l'exprime souvent en g/m^3 (grammes de vapeur d'eau par mètre cube d'air) ou en g/kg (teneur en eau, en grammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air). La densité de l'air étant proche de 1 kg/m^3 (en fait 1 kg/m^3 à 30°C et $1,25 \text{ kg/m}^3$ à 0°C), ces deux quantités sont presque égales, mais la première change un peu avec la température.

L'**humidité relative** est le rapport de la teneur en eau de l'air considéré à la teneur en eau maximale, qui ne dépend que de la température. Ce rapport est exprimé en pour-cent.

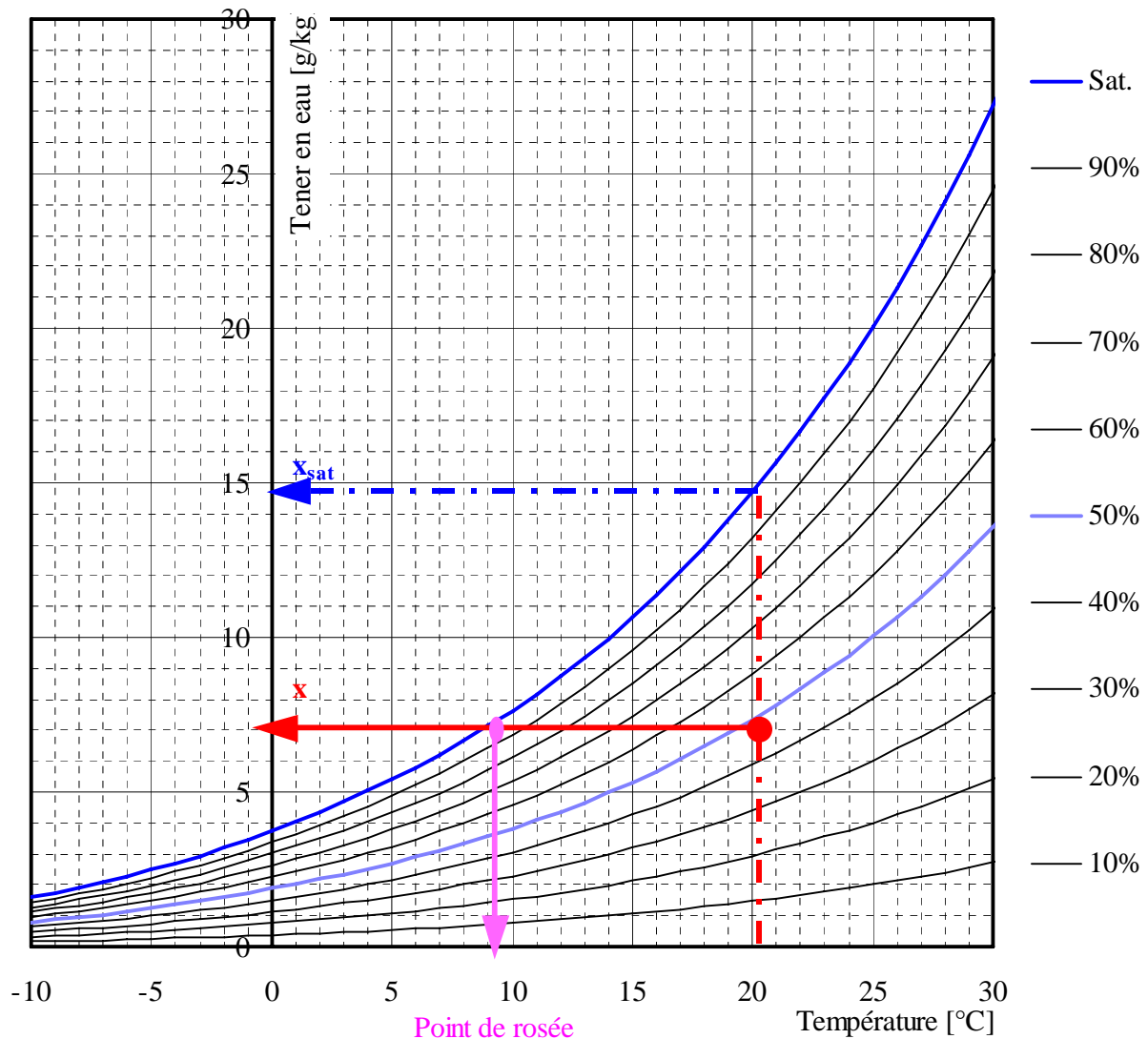


Figure 3.5 : Relation entre l'humidité absolue, la température et l'humidité relative (diagramme de Carrier). Exemple : L'air à 20°C et 50% d'humidité relative a une teneur en eau de 7 g/kg environ; son point de rosée est à environ 9.3°C.

Comme on peut le voir dans la Figure 3.5, la variation de l'humidité absolue maximale avec la température est très forte, en fait elle augmente presque exponentiellement avec la température absolue. Ce qui fait que si on chauffe de l'air sans changer sa teneur en eau (donc sans le faire passer par un humidificateur ou un dessiccateur), son humidité relative diminuera rapidement alors que l'humidité absolue reste constante. Le contraire se produit si on refroidit de l'air, ou si l'air passe près d'une surface froide : même si l'humidité absolue reste constante, l'humidité relative augmente fortement. Elle peut même atteindre 100% lorsque l'air atteint la température à laquelle sa teneur en vapeur d'eau correspond à la teneur maximale. Cette température s'appelle le **point de rosée**, parce que de la rosée apparaît alors sur la surface qui refroidit d'air.

L'humidité absolue dans un bâtiment est déterminée par :

- Les sources de vapeur d'eau dans le bâtiment : la teneur en eau augmente proportionnellement au débit de production de ces sources.
- Le débit d'air de ventilation ou d'aération, car l'air extérieur se mélange à l'air intérieur et apporte ou dilue la vapeur d'eau

- L'humidité absolue de l'air extérieur : plus elle est élevée, moins l'air extérieur peut diluer l'humidité intérieure.

L'humidité relative en un endroit du bâtiment dépend en plus de la température intérieure locale, elle-même influencée par :

- la température et l'ensoleillement à l'extérieur,
- les caractéristiques du bâtiment : isolation thermique, présence de ponts thermiques, etc.
- la température de l'air intérieur.

La plupart des phénomènes dépendant de l'humidité (assèchement, condensation, moisissures, déformation du bois, humidité des matériaux poreux tels que le papier et les tissus, etc.) dépendent en fait plus de l'humidité relative que de l'humidité absolue. Ainsi, même si l'air intérieur n'est pas trop humide, des moisissures peuvent apparaître sur des surfaces suffisamment froides (par ex. les ponts thermiques) dès que l'humidité relative locale dépasse 80%.

Dans les années septante, des mesures urgentes d'économie d'énergie ont été prises, parfois à la hâte est sans suffisamment réfléchir. Le fait d'avoir étanché des bâtiments sans les avoir mieux isolés thermiquement a eu pour effet de ramener l'aération à un niveau correct pour les limiter la concentration en polluants, mais insuffisant pour éviter que l'air ne soit trop humide près des ponts thermiques, ce qui a entraîné parfois l'apparition de moisissures, attribuée à tort au manque d'aération.

3.4 Humidité optimale

La Figure 6 montre qu'une humidité trop faible ou trop élevée augmente les risques de problèmes.

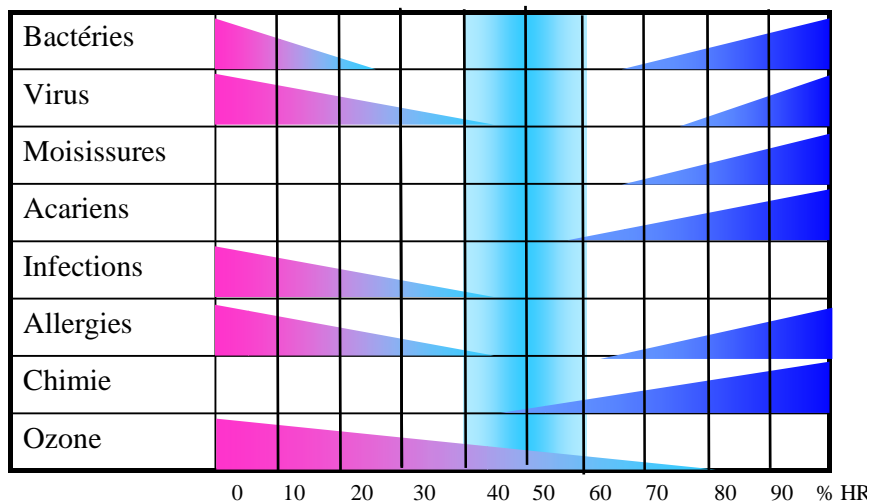


Figure 6 : Zone d'humidité optimale, à laquelle le développement de microbes ou les réactions chimiques sont le moins favorisés (valable pour une température de 20 à 22°C) (Roulet, 2004).

Un air sec permet à certains microbes de se conserver en sporulant, augmente le risque d'infection et d'allergies (poussières, pollens) et la concentration d'ozone. Une humidité trop élevée favorise le développement des microbes et des acariens, favorise les réactions chimiques et les allergies aux composés chimiques.

L'humidité relative a peu d'effet sur le sentiment de confort, pour autant qu'elle se situe entre 30 et 70 % et que la température soit confortable. Un air frais et sec est mieux perçu qu'un air chaud et humide, ce qui permet de sérieuses économies : en abaissant la température et l'humidité de 23°C et 50% à 20°C et 40% on peut diminuer le débit d'air par personne de 10 à 3,5 l/s (36 à 13 m³/h) sans que les occupants jugent que la qualité d'air diminue (Fang et al., 2000).

4 CONFORT AÉRAULIQUE

4.1 Contamination de l'air intérieur

On trouve de nombreux composés chimiques dans l'air des bâtiments, qui peuvent avoir des effets désagréables. Ces composés peuvent être émis par les matériaux de construction, les revêtements, le mobilier et les activités des occupants. De plus, les organismes vivants tels que les animaux, les insectes ou les moisissures génèrent des allergènes ou des composés toxiques. Les risques liés à ces polluants sont a priori plus grands si la concentration en polluant est plus grande.

On s'efforce donc à maintenir les concentrations de polluants en dessous d'un niveau acceptable, en évitant tout d'abord d'introduire des sources de pollution dans les bâtiments, en éliminant ces sources autant que possible, et enfin en évacuant les polluants par une aération suffisante.

La concentration acceptable dépend du polluant. Pour certains d'entre eux, il existe une limite en dessous de laquelle les éventuels dégâts à l'organisme sont réparables, et le risque de dégâts est alors nul. C'est le cas par exemple du monoxyde de carbone. Pour d'autres polluants, (comme par exemple le radon) le risque de dégât est proportionnel à la concentration, et ne s'annule jamais. Dans ce cas, fixer une concentration acceptable revient à accepter un certain risque.

La Figure 4.1 montre la probabilité de mort prématurée pour un individu exposé à divers risques. Cette figure reflète des estimations qui sont d'autant moins précises que le risque est plus faible. On notera que la probabilité d'écourter sa vie reste très faible, pratiquement non mesurable pour l'exposition à l'amiante, la fumée passive, les solvants couramment présents dans les logements et le radon extérieur, qui est inévitable.

Cette probabilité devient mesurable, et comparable, pour les accidents domestiques et une faible exposition au radon. Il faut remarquer que les accidents automobiles, dont la fréquence ne semble scandaliser personne, dépassent de loin ces deux dernières causes. Enfin, une forte exposition au radon représente un risque élevé, mais néanmoins inférieur à celui qu'accepte allégrement un fumeur.

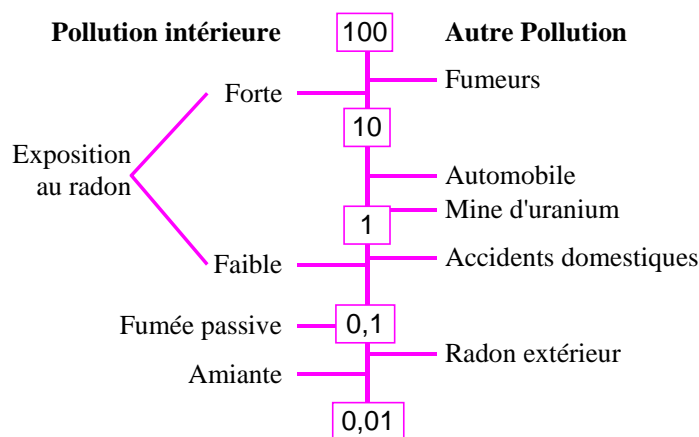


Figure 4.1 : Probabilité (en %) de mort prématurée pour un individu exposé à divers risques

Toutefois, la santé n'est pas l'absence de maladie ou de décès, mais un sentiment général de bien être selon la définition de l'OMS. En conséquence, toute cause de pathologie ou de malaise doit être évitée dans la mesure du possible. De plus, il ne faut pas oublier que les enfants

sont particulièrement sensibles, et donc que les bâtiments dans lesquels ils se trouvent doivent être particulièrement bien soignés.

4.2 Nécessité de l'aération

Le but de l'aération est d'assurer un environnement intérieur confortable, maintenant les occupants en bonne santé. Un air sans cesse renouvelé à l'intérieur des bâtiments est nécessaire, non pour assurer l'apport d'oxygène indispensable à la vie, mais surtout pour éliminer au fur et à mesure les divers polluants générés dans le bâtiment et qui rendent l'atmosphère malodorante et toxique.

En l'absence d'aération, l'*oxygène* est la dernière chose qui manque. Les occupants seront incommodés en premier lieu par une concentration trop élevée en polluants divers, dont notamment les odeurs, la vapeur d'eau et la chaleur (Figure 4.2).

Ces nuisances sont essentiellement générées par l'activité des occupants. Elles sont notamment :

- les odeurs, auxquelles les personnes entrant dans les locaux sont très sensibles,
- la vapeur d'eau, qui augmente l'humidité relative, donc le risque de moisissures,
- le gaz carbonique, qui, en trop grande concentration, rend les occupants léthargiques,
- les poussières, aérosols et gaz toxiques provenant des activités et du bâtiment lui-même.
- la chaleur en excès, provenant des activités humaines et des gains solaires.

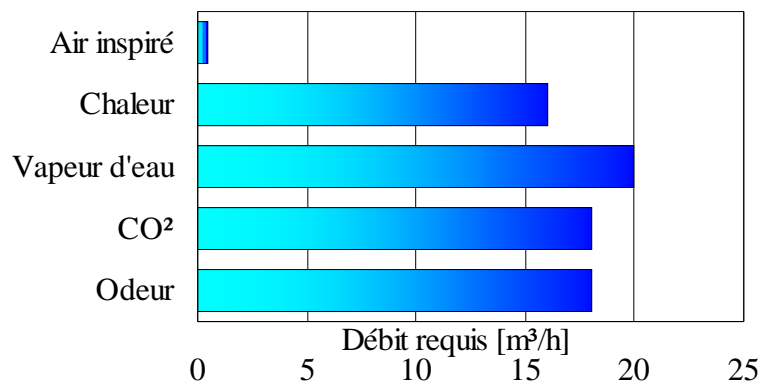


Figure 4.2 : Débit d'air requis pour évacuer les divers polluants produits par une personne assise ayant une activité de bureau, lorsque l'air extérieur est pur, à 0°C et 100% d'humidité relative.

En principe, le bâtiment ne devrait pas être sources de nuisances. Ce n'est malheureusement pas toujours le cas.

4.3 Débit d'air requis

En régime permanent, le débit d'air pur nécessaire pour maintenir la concentration d'un polluant donné en dessous d'une certaine limite est donné par la relation ci-dessous :

$$\text{Débit d'air extérieur} = \frac{\text{Débit de la source de pollution}}{\text{Concentration limite nette}} \quad (1.2-3)$$

Par exemple, une personne en activité de bureau produit 18 litres de gaz carbonique par heure. Pour maintenir une concentration de CO₂ inférieure à 1400 ppm (ou 1,5 ‰) alors que la concentration extérieure est de 400 ppm, il faut un débit d'air de :

$$\text{Débit d'air extérieur} = \frac{18 \text{ l/h}}{(1400 - 400) 10^{-6}} = 18'000 \text{ l/h} = 18 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les personnes sensibles peuvent avoir mal à la tête à partir de 5000 ppm de CO₂. Si on tolère une telle concentration, et que les autres polluants n'ont pas d'effet grave, le débit nécessaire est alors :

$$\text{Débit d'air extérieur} = \frac{18 \text{ l/h}}{(5000 - 400) 10^{-6}} \cong 4'000 \text{ l/h} \cong 1 \text{ m}^3/\text{h}$$

En général, plusieurs polluants sont émis dans le volume étudié, le débit requis est alors celui nécessaire pour éliminer le polluant le plus exigeant et non la somme des débits. En effet, qui peut le plus peut le moins, et chaque mètre cube d'air contient le mélange des polluants.

En pratique, plusieurs unités peuvent être utilisées pour exprimer les débits de polluant et les concentrations dans l'équation (1.2-3). Il est important, pour obtenir un résultat correct, d'utiliser des unités cohérentes ou, à défaut, des facteurs de conversion (Table 4.1).

Table 4.1 : Expression de l'équation (1.2-3) et unités pour l'intensité de la source, la concentrations et le débit pour divers polluants. Pour chaque polluant, la première ligne donne les unités cohérentes, alors que la seconde montre les unités pratiques.

Polluant	Intensité de la source	Concentration	Débit d'air	Pour l'avoir en m ³ /h, multiplier le débit par
Odeur	olf	pol,	l/s	1
	olf	décipol	m ³ /h	36
Gaz quelconque	kg/s	kg/kg	kg/s	1
	cm ³ /h	ppm	m ³ /h	1
Vapeur d'eau	kg/s	kg/kg	kg/s	1
	g/h	g/kg	m ³ /h	1/ρ _{air}
Chaleur	W	J/kg	kg/s	1
	W	°C	m ³ /h	0.34 Wh/(m ³ K)

A titre d'exemple, considérons les polluants émis par une personne moyenne en activité de bureau. Les polluants émis par cette personne sont donnés dans la Table 4.2. Cette table donne aussi des concentrations limite acceptables et les débits qui en résultent.

Table 4.2 : Quelques polluants émis par une personne en activité de bureau.

Polluant	Odeurs	CO ₂	Vapeur d'eau	Chaleur
Intensité de source	1 olf	18 l/h	72 g/h	120 W
Concentration limite	0,3 pol	1400 ppm	7 g/kg	22 °C
Concentration extérieure	0,1 Pol	400 ppm	4 g/kg	0 °C
Débit d'air (m ³ /h)	18 m ³ /h	18 m ³ /h	20 m ³ /h	16 m ³ /h

En détail, les calculs sont les suivants :

La personne émet 1 olf, on tolère un accroissement de 0,2 pol par rapport à l'air extérieur. On aura donc :

$$\text{Débit nécessaire} = \frac{1 \text{ olf}}{0,2 \text{ pol}} = 5 \frac{\text{l}}{\text{s}} \text{ ou } 18 \text{ m}^3/\text{h}$$

Elle respire environ 72 g d'eau par heure. L'air extérieur, à 0°C et 100 % HR, contient 4 g/kg d'air sec (voir annexe). L'air intérieur, à 22°C et limité à 40% d'humidité relative contient 7 g/kg.

$$\text{Débit nécessaire} = \frac{72 \text{ g/h}}{(7-4) \text{ g/kg}} = 24 \text{ kg/h} \text{ ou } 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

car la masse spécifique de l'air intérieur est d'environ 1,2 kg/m³.

Enfin, cette personne dégage 120 W. Pour éliminer cette chaleur il faut :

$$\text{Débit nécessaire} = \frac{120 \text{ W}}{(22-0) \text{ K} \cdot 0,34 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K})} = 16 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le débit minimum est le plus grand des quatre, donc celui nécessaire pour éliminer la vapeur d'eau dans le cas présent. Ces calculs présupposent que, dans chaque zone, le mélange est total.

Il faut noter que nous avons été assez peu exigeants pour les odeurs. Si nous tolérons 0,2 pol dans l'espace habité pour ne pas incommoder les personnes entrant dans la pièce, le débit nécessaire pour évacuer les odeurs est :

$$\text{Débit nécessaire} = \frac{1 \text{ olf}}{0,1 \text{ pol}} = 10 \text{ l/s} \text{ ou } 36 \text{ m}^3/\text{h}$$

et ce sont alors les odeurs qui dominent.

Ces calculs sont valables en régie stationnaire. Les calculs transitoires requièrent la résolution d'une équation différentielle. Pour une seule zone de volume V (par exemple une salle donnant sur l'extérieur), la concentration C d'un polluant et les débits d'air \dot{V} et de source de polluant S sont liés par :

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = S - \dot{V}(C - C_0) \quad (1.2-4)$$

Si on part d'une concentration initiale égale à la concentration extérieure C_0 , qu'on introduit une source de pollution d'intensité constante et que le débit d'air est nul, la concentration augmentera proportionnellement au temps, avec un taux d'accroissement égal à S/V . Ainsi, dans une salle de cours initialement "propre" de 240 m³ contenant 24 personnes, la concentration de gaz carbonique augmenterait de

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{S}{V} = \frac{24 \cdot 0,018}{240} = 1800 \text{ ppm/h} \quad (1.2-5)$$

Au bout d'une période de cours, elle atteint une limite encore acceptable, mais cette limite deviendrait tout à fait inacceptable au bout de 2 à 3 h. On peut donc imaginer ventiler les classes d'école en aérant pendant les pauses, dans la mesure où le volume disponible par personne est suffisant (dépasse 10 m³), ou les périodes de cours sont assez courtes (par ex. 45 minutes) et où l'aération est suffisante pendant la pause pour complètement renouveler l'air de la classe.

4.3.1 Débits d'air forfaitaires

En tenant compte des charges polluantes usuelles dans certains locaux typiques et des concentrations couramment admises, il est possible de calculer des débits d'air forfaitaires, comme ceux données dans la Table 4.3. Ces débits sont valables tant que la pollution réelle correspond aux hypothèses de calcul.

Table 4.3 : Débits d'air forfaitaires en litre par seconde et mètre carré de plancher pour des locaux administratifs, en fonction de la charge polluante (CEN, 1998.)

Classe de qualité	Occupants seuls	Matériaux peu polluants	Matériaux polluants	
A (haute)	1	2	3	
B (moyenne)	0.7	1.4	2.1	l/(s.m ²)
C (minimum)	0.4	0.8	1.2	

4.3.2 Courants d'air

Le pourcentage d'individus ressentant des courants d'air alors que, à vitesse d'air nulle, leur confort est idéal, dépend non seulement de la vitesse et de la température de l'air mais aussi de son degré de turbulence, c'est à dire des variations relatives de vitesse de l'air. Dans la plupart des locaux, cette intensité de turbulence est comprise entre 50 et 70%.

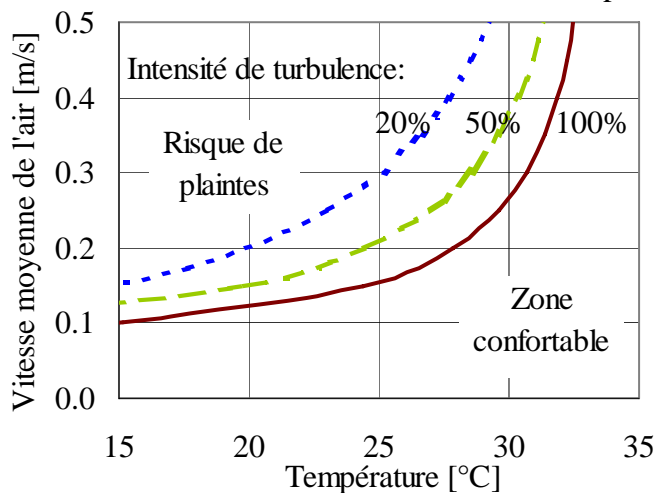


Figure 4.3 : Combinaisons de vitesse moyenne, d'intensité de turbulence et de température qui cause 10% d'insatisfaits.

Le pourcentage d'insatisfaits est alors donné par une relation empirique développée aussi par Fanger (Fanger et al., 1988), qui fait aussi intervenir la température de l'air. On peut déduire de cette relation la relation entre la température nécessaire pour limiter le pourcentage d'insatisfaits à une valeur donnée et la vitesse moyenne de l'air. Cette relation est à la base de la Figure 4.3. On voit par exemple que, pour limiter le pourcentage d'insatisfaits à 10% si la vitesse de l'air est de 0,4 m/s, il faut une température d'au moins 28°C par faible turbulence ou 33°C par forte turbulence.

En règle générale, on évite de causer des courants d'air dont la vitesse excède 0,2 m/s dans la zone occupée. Il est même recommandé de ne pas dépasser 0,1 m/s. Il faut aussi savoir qu'il est très difficile d'obtenir un écoulement d'air ayant moins de 20% de turbulence.

5 CONFORT VISUEL

5.1 L'œil

L'œil est une caméra numérique biologique (Figure 5.1). Le cristallin, la cornée et l'humeur vitrée forment un objectif. La mise au point est obtenue en faisant varier la forme du cristallin. La quantité de lumière admise est contrôlée par l'iris. Les rayons lumineux qui pénètrent dans l'œil sont focalisés sur la rétine. Cette dernière est formée de terminaisons nerveuses photosensibles: les cônes, sensibles à la couleur, et les bâtonnets, sensibles à l'intensité de la lumière. Les signaux de ces cellules sont prétraités dans la rétine, puis envoyés au cerveau par le nerf optique.

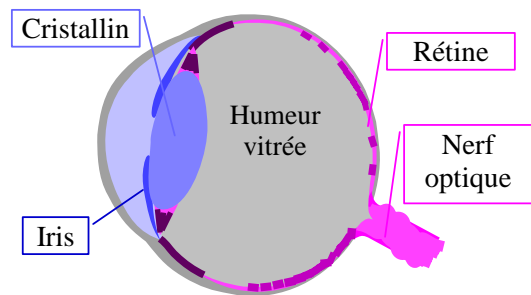


Figure 5.1 : Coupe schématique de l'œil

5.2 Rappel des notions de base

5.2.1 Spectre

La lumière visible est composée d'ondes électromagnétiques, dont la longueur d'onde se situe entre 0,4 et 0,7 micron (400 et 700 nm ou nanomètres) environ. Un rayon lumineux est caractérisé par son intensité et sa teinte, mesurée par son spectre. Le *spectre* d'une source de lumière est la répartition de l'intensité de la source dans les diverses couleurs, ou longueurs d'onde. C'est la forme du spectre qui donne la *teinte* d'une lumière (Figure 5.2).

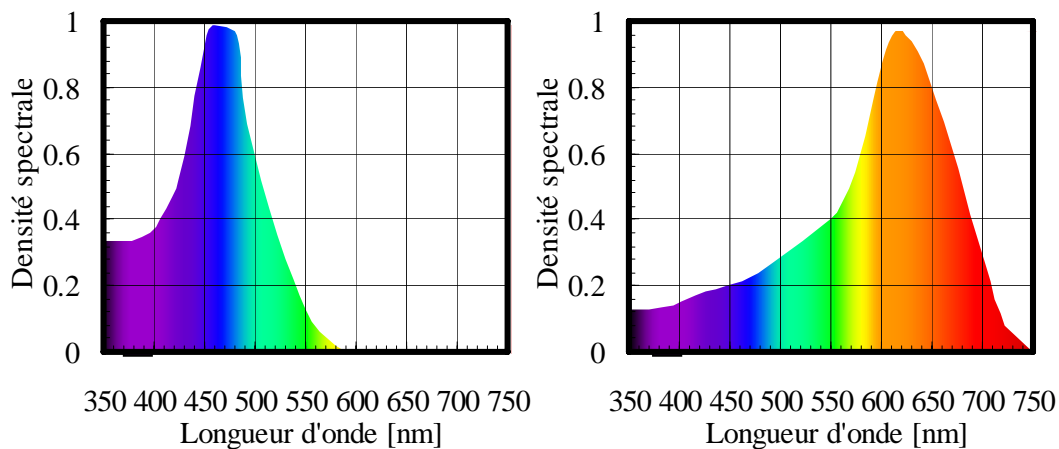
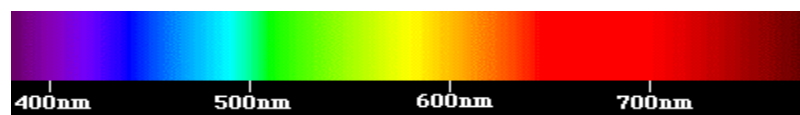


Figure 5.2 : Spectres continus d'une lumière plutôt bleue (à gauche) et plutôt rouge (à droite).



Spectre continu du soleil



Spectre de raies d'émission obtenu par une décharge électrique dans de l'hydrogène

Figure 5.3 : Spectres

On distingue les spectres de raies, discontinus, comme ceux obtenus par décharge électrique dans une atmosphère de gaz pur à relativement basse pression et température, et les spectres

continus comme celui du soleil, des lampes à incandescence, des bons tubes fluorescents, etc. (Figure 5.3).

5.2.2 Couleur

Les capteurs de lumière constituant la rétine de l'œil sont de deux types : les *cônes*, sensibles aux couleurs, et les *bâtonnets*, plus sensibles mais ne distinguant pas les couleurs. Un troisième type de capteurs, à faible résolution et réagissant lentement sert à mettre l'horloge interne à l'heure du jour (Lubkin et al., 2002).

Il y a trois types de cônes, qui ont trois sensibilités spectrales différentes. Les couleurs peuvent dès lors être classées en fonction des parts de mélange de trois couleurs dites fondamentales. On peut donc donner à chaque couleur un ensemble de coordonnées, comme le montre la Figure 5.4, qui représente le diagramme des couleurs élaboré par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Les deux axes donnent les coordonnées x et y , la deuxième étant corrélée avec la luminosité ressentie. Les trois couleurs pures rouge, vert et bleu occupent les "coins" de la plage coloriée, dont le contour est occupé par les couleurs pures, monochromatiques, pour lesquelles la longueur d'onde est donnée (en nm).

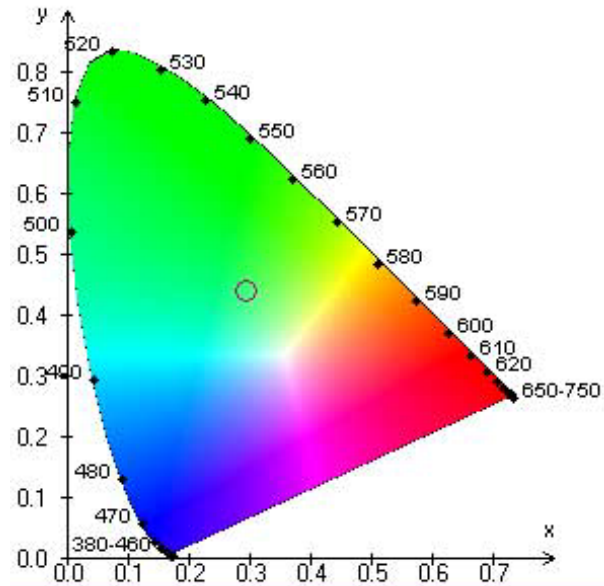


Figure 5.4 : Diagramme CIE des couleurs

5.2.3 Température de couleur

La température de couleur d'une source lumineuse est la température qu'aurait un corps noir (que l'on peut se représenter par l'intérieur d'un four vu par une petite ouverture) qui émet une lumière de même teinte que la lumière émise par la source en question. Paradoxalement, les teintes dites "chaudes" ont une température de couleur basse (3500 K ou moins), alors que les teintes "froides" ont une température de couleur élevée (plus de 5500 K, Figure 5.5).

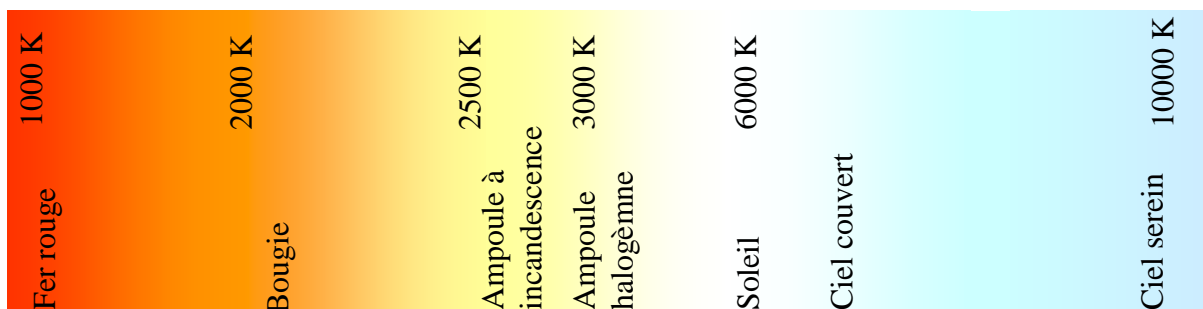


Figure 5.5 : Température de couleur.

5.2.4 Unités de photométrie

L'éclairagiste ne considère que la lumière visible. Les unités photométriques sont donc basées sur la *sensibilité spectrale* de l'œil humain (Figure 5.6).

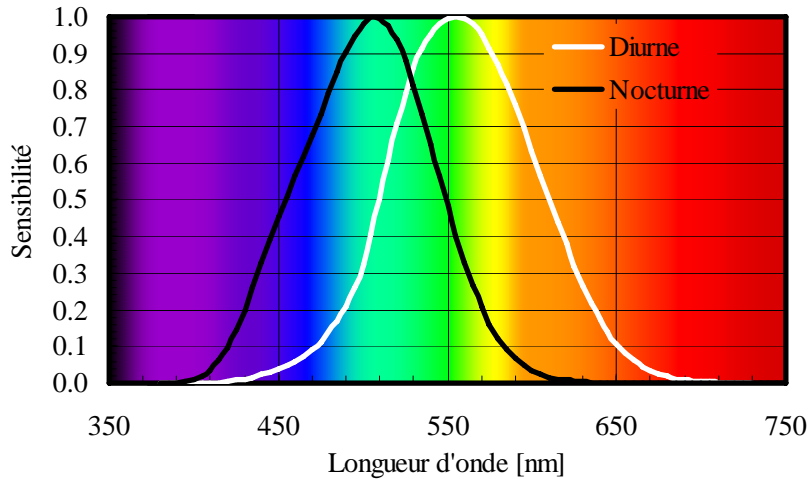


Figure 5.6 : Sensibilité spectrale normalisée de l'œil humain.

Les cônes et les bâtonnets ne perçoivent que les longueurs d'ondes comprises entre 380 nm² (violet) et 780 nm (rouge), avec un maximum de sensibilité à 555 nm (vert) si l'intensité est suffisante pour exciter les cônes. A faible luminosité, seuls les bâtonnets détectent un signal, et ce maximum se déplace vers le bleu, vers 500 nm. Ceci explique pourquoi, de nuit, tous les chats sont gris.

5.2.5 Flux lumineux

Un rayon de lumière transporte de l'énergie. Un flux lumineux pourrait donc s'exprimer en Watt. Cependant, comme toutes les unités photométriques sont rapportées à la sensibilité spectrale de l'œil, elles portent des dénominations particulières. Par exemple, le flux lumineux n'est pas donné en W mais en lumen (lm).

Le flux lumineux d'une source est la quantité de lumière émise par unité de temps (Figure 5.7). C'est aussi la puissance que celle-ci fournit sous forme de rayonnement, pondérée par la sensibilité spectrale de l'œil. Il est mesuré en **lumen** (lm).

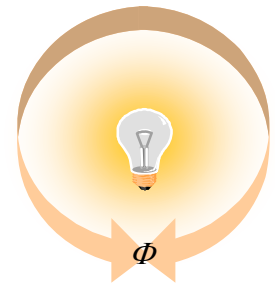


Figure 5.7 : Flux lumineux

Le rapport du flux lumineux à la puissance consommée par une source de lumière est le **rendement lumineux**, qui s'exprime en lumens par Watt (lm/W). Par exemple, une lampe à incandescence de 100 W fournit un flux lumineux de 1200 lm. Son rendement lumineux est donc 12 lm/W.

5.2.6 Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse d'une source dans une direction donnée est le rapport du flux rayonné Φ dans un angle solide Ω axé autour de la direction en question et de l'angle solide correspondant (Figure 5.8) :

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1.2-6)$$

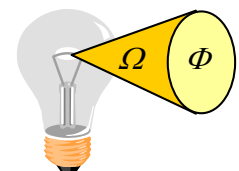


Figure 5.8 : Intensité lumineuse

L'intensité s'exprime en **candela** (cd). La candela étalon est l'intensité lumineuse d'une source qui émet un rayonnement monochromatique vert, à 555 nm de longueur d'onde, et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de 1/683 Watt par stéradian. En effet, pour cette longueur d'onde correspondant au maximum de sensi-

² 1 nm (nanomètre) = 10⁻⁹ m, un milliardième de millimètre ou un millième de micron.

bilité de l'œil, un flux lumineux de 683 lumens correspond à un flux énergétique de un watt. 683 lm/W est donc le rendement lumineux maximum qu'une source puisse avoir.

5.2.7 Éclairement

L'éclairement est le quotient du flux lumineux tombant uniformément sur une surface par l'aire de cette surface :

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.2-7)$$

Si la surface est petite, à distance r de la source, et sous un angle d'incidence i , on obtient :

$$E = I \frac{\cos(i)}{r^2} \quad (1.2-8)$$

L'éclairement s'exprime en **lux** (lx). Le lux est défini par l'éclairement obtenu sur une surface de 1 m^2 recevant uniformément un flux de 1 lm (Figure 5.9).

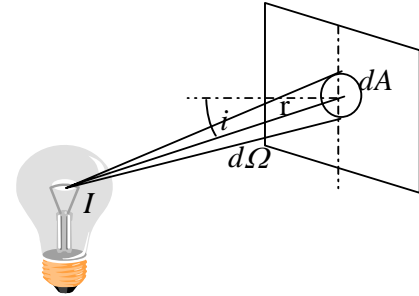


Figure 5.9 : Calcul de l'éclairement

Quelques valeurs typiques :

- Nuit de pleine lune :0,1 lx
- Valeur normale pour la lecture300 lx
- Ciel couvert, de jour : 8'000 à 20'000 lx
- Plein soleil.....jusqu'à 100'000 lx

On notera que notre œil voit déjà assez clair à 0,1 lux et supporte 100'000 lux. Il a donc une dynamique dépassant 1 million !

5.2.8 Luminance

La luminance d'un élément de surface dans une direction donnée est le rapport de l'intensité émise dans cette direction à la surface apparente de l'élément vu de cette direction (Figure 5.10).

$$L = \frac{I(i)}{A \cos(i)} \quad (1.2-9)$$

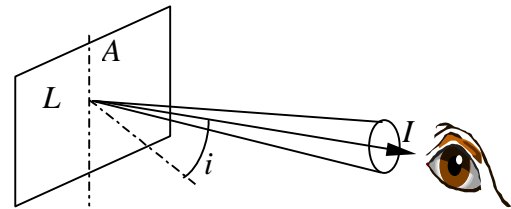


Figure 5.10 : Calcul de la luminance

L'unité de luminance est la candela par mètre carré, qui est la luminance obtenue dans une direction normale à une surface d'une source uniforme de 1 cd et d'une surface de 1 m^2 .

Le diagramme de luminance représente la luminance d'une source en fonction de la direction (Figure 5.11). Si la luminance est indépendante de l'angle i , on dit que la source suit la **loi de Lambert**. Son diagramme polaire d'intensité est alors une sphère tangente à la surface. La plupart des surfaces mates (plâtre, dispersion, papier) suivent approximativement cette loi.

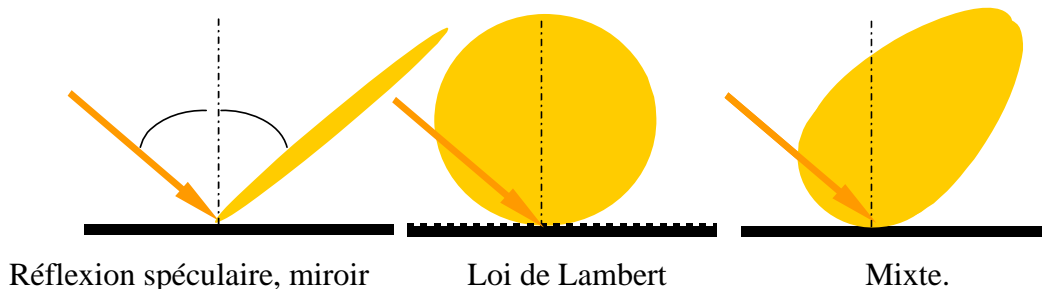


Figure 5.11 : Diagrammes de luminance

5.2.9 Résumé des définitions photométriques

Toutes les unités photométriques sont rapportées à la sensibilité spectrale de l'œil. On passe des unités énergétiques aux unités photométriques en opérant la moyenne pondérée par cette sensibilité spectrale et en multipliant par le facteur de 683 lm/W à 555 nm.

Unité énergétique	Unité photométrique
Flux d'énergie	Flux lumineux (lm)
Intensité (W/sr)	Intensité lumineuse (cd)
Densité de flux (W/m^2)	Éclairement (lx)
"Intensité surfacique" ($W/sr.m^2$)	Luminance (cd/m^2)

Les relations entre les diverses unités photométriques peuvent se résumer par la Figure 5.12

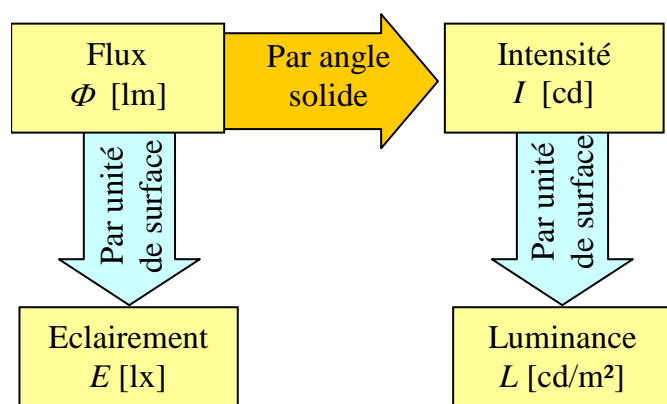


Figure 5.12 : Relations entre les unités photométriques.

5.3 Conditions de confort visuel

5.3.1 Éclairement

Les conditions d'éclairage nécessaires pour assurer la satisfaction des usagers dépendent de l'utilisation des locaux. La caractéristique la plus importante quantifiant la qualité de l'éclairage est l'éclairement local (Table 5.1) et sa répartition.

L'Union Suisse pour la Lumière (USL) recommande les valeurs de la Table 5.1 pour l'éclairage artificiel des locaux. Ces valeurs se retrouvent dans de nombreuses normes nationales.

Table 5.1 : Éclairements recommandés

Type de locaux et d'activité	Éclairement requis (lux)		
	Min.	Moyenne	Max.
Circulation, corridors, théâtres, salle de concert	50	100	200
Ateliers, halles de montage, magasins	200	300	400
Écoles, bureaux, travaux courants, lecture, écriture, travail sur écran, etc.	300	400	500
Travaux délicats, dessin, tracés, travaux techniques, etc.	500	750	1000
Ateliers de précision, mécanique fine, contrôle des couleurs, contrôle visuel de qualité, etc.	1000	à	5000

5.3.2 Température de couleur, spectre de la lumière

Pour de nombreuses applications, il est important que la lumière rende bien les couleurs. Pour cela, il faut que le spectre de la lumière contienne toutes les couleurs, de préférence également distribuées. En effet, un pull-over rouge éclairé avec une lumière monochromatique jaune (dont le spectre est représenté à la Figure 5.13 de gauche) semblera noir, car il ne réfléchit que le rouge, absent de la lumière qui l'éclaire. La lumière solaire, avec sa température de couleur de 6000 K, est blanche et rend bien toutes les couleurs.

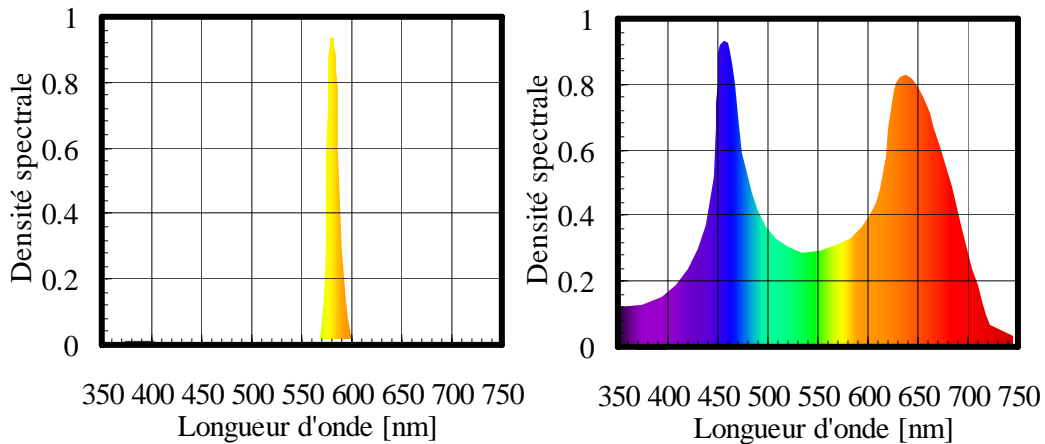


Figure 5.13 : Spectres d'une lumière monochromatique (lampe au sodium, à gauche) et bichromatique (à droite).

L'œil n'est pas parfaitement achromatique : s'il met au point sur une image bleue, l'image rouge peut être un peu trouble et vice versa. Si la lumière ne contient que deux bandes de longueurs d'ondes (par exemple bleu et rouge, comme sur la Figure 5.13 de droite), l'œil met au point alternativement sur l'une et l'autre image, et se fatigue rapidement.

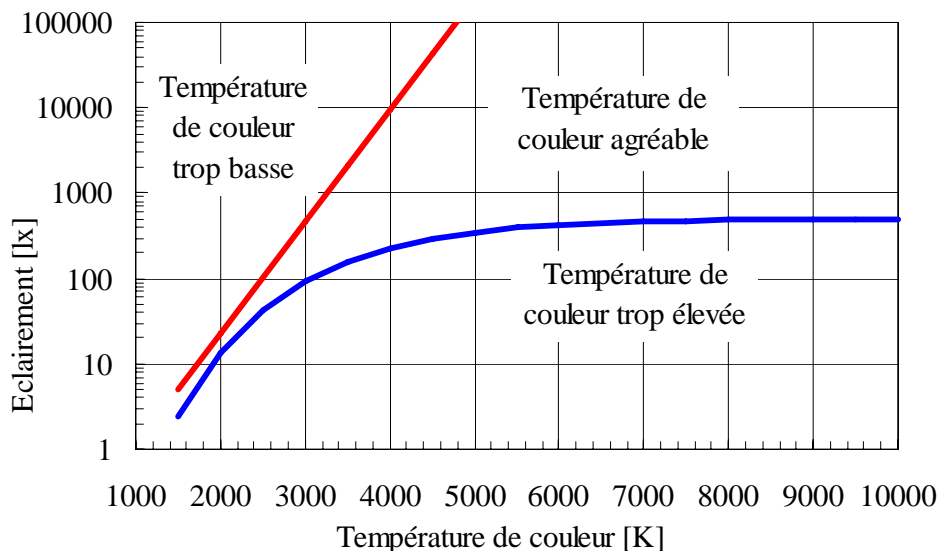


Figure 5.14 : Température de couleur et confort visuel (Diagramme de Krieger).

La température de couleur est aussi importante pour l'ambiance et le confort visuel. A faible éclairage, nous préférons les couleurs dites "chaudes", de basse température de couleur. Par contre, si l'éclairage est fort, nous préférons les couleurs "froides", dont la température de couleur dépasse 5500 K (Figure 5.14). Cette préférence est à mettre en relation avec la sensi-

bilité de l'œil (Figure 5.6). A faible éclairage, nous sommes sensibles dans le bleu et moins sensible dans le rouge, et nous avons donc besoin de plus de lumière rouge. A fort éclairage, la sensibilité de l'œil est adaptée aux sources de lumière de 6000 K et plus.

5.3.3 Répartition de luminance

La luminance L , à savoir l'intensité lumineuse par mètre carré de surface vue, ne doit pas trop varier dans le champ visuel. Dans le champ visuel, on distingue (Figure 5.15) :

- Le **champ central**, d'une ouverture de 1° centré sur l'axe de vision. L'image de ce champ est focalisée sur la fovéa, endroit de la rétine à grande densité de capteurs, permettant de distinguer les détails.
- L'**ergorama**, champ de 60° d'ouverture, qui est utilisée pour le travail
- Le **panorama**, champ de 120° d'ouverture dans lequel seuls les mouvements sont détectés.



Figure 5.15 : Champ central, ergorama et panorama.

Les **contrastes** de luminance, à savoir le rapport entre la luminance la plus élevée et la plus basse, ne doivent pas excéder 3 dans l'ergorama et 10 dans le panorama.

L'**éblouissement**, à savoir un flux lumineux trop important reçu directement dans les yeux doit être évité. Ce phénomène peut apparaître dans les locaux à grandes fenêtres, en hiver, lorsque le soleil est bas sur l'horizon (Figure 5.16 et Figure 5.17).



Figure 5.16 : Bon confort visuel. Les contrastes dans l'ergorama sont modérés, et la source de lumière est vue dans le panorama.



Figure 5.17 : Mauvais confort visuel. Les contrastes dans l'ergorama sont exagérés, et la source de lumière éblouissante est proche de l'axe de vision.

Pour plus d'information concernant le confort visuel voir (CNBE, 1974; Paule et al., 1998) ou le très complet "Handbuch für Beleuchtung" (SLG, 1992)

6 CONFORT ACOUSTIQUE

6.1 L'oreille

Les ondes sonores atteignant le pavillon sont guidées dans le conduit auditif vers le tympan, membrane qui est mise en mouvement par la pression acoustique (Figure 6.1). Ce mouvement est transmis à la cochlée par les osselets (série de leviers). La cochlée est un récipient en spirale plein de liquide, qui contient les terminaisons du nerf auditif, cils de diverses longueurs qui vibrent chacun à une fréquence d'excitation différente.

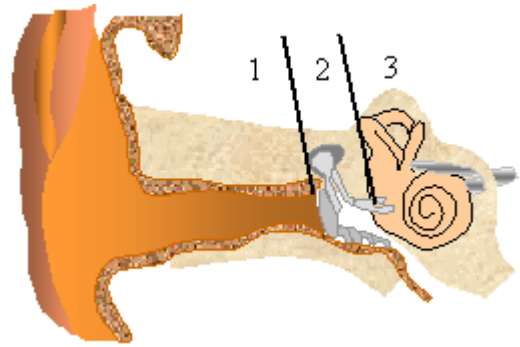


Figure 6.1 : L'oreille. 1) pavillon; 2) tympan et osselets; 3) oreille interne.

6.2 Rappel des notions de base

L'acoustique du bâtiment s'occupe de deux domaines particuliers : l'acoustique interne des salles et la protection contre le bruit (Figure 6.2).

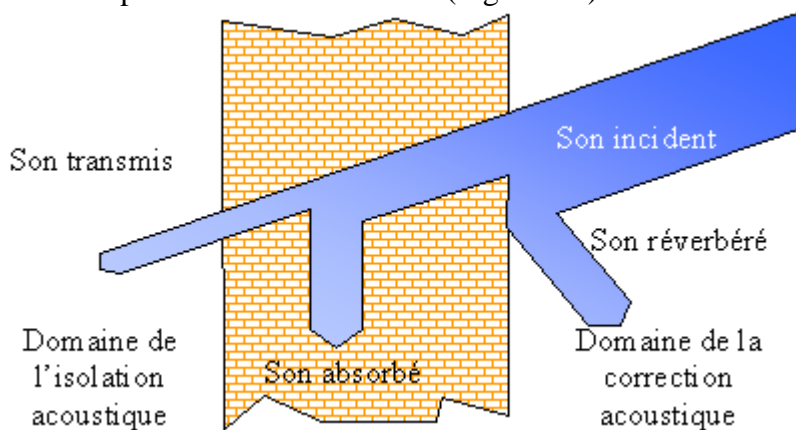


Figure 6.2 : le confort acoustique a deux aspects : la qualité de l'acoustique intérieure et l'atténuation des bruits provenant de l'extérieur.

Il est établi que la satisfaction des utilisateurs dépend notamment de deux grandeurs : le niveau de bruit causé par les sources extérieures et le temps de réverbération à l'intérieur du local.

6.2.1 Sons et bruit

Le son est une sensation auditive produite par une variation rapide de la pression de l'air. L'origine de cette variation est engendrée par la vibration d'un corps qui met en vibration l'air environnant. Ainsi est créée une succession de zones de pression et de dépression qui constituent l'onde acoustique.

La **fréquence** est le nombre de cycles complets qu'un phénomène vibratoire (le son par exemple) effectue en une seconde. Elle s'exprime en périodes par seconde ou Hertz (Hz). La fréquence des sons audibles va de 16 à 16 000 Hz.

Un son pur est la sensation auditive produite par une variation sinusoïdale de la pression de l'air (Figure 6.3 à gauche). Un son aigu a une haute fréquence, et un son grave une basse fréquence.

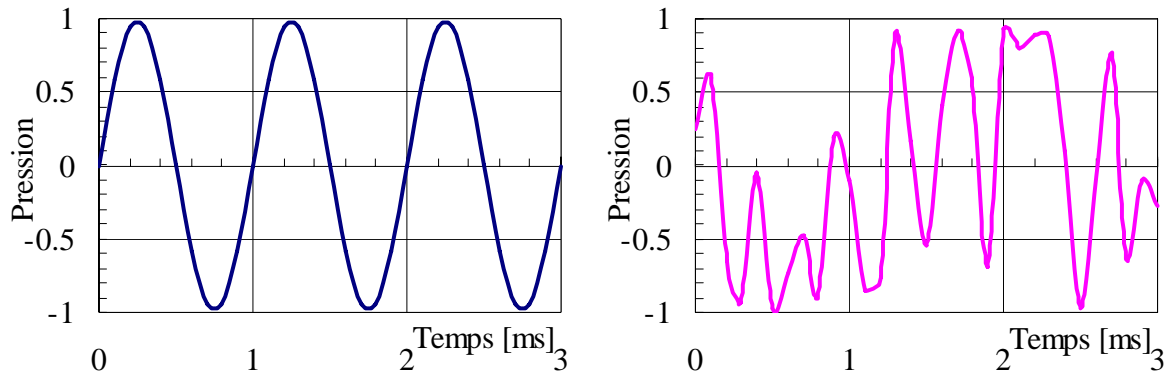


Figure 6.3 : Variation dans le temps de la pression correspondant à un son pur (à gauche) et du bruit (à droite)

Un bruit est le résultat d'une variation aléatoire de la pression (Figure 6.3 à droite). Physiologiquement on attribue au mot "bruit" un caractère gênant.

Le *spectre d'un son* (amplitude de la variation de pression en fonction de la fréquence de la variation) est formé de raies, à la fréquence fondamentale du son (Figure 6.4) et à ses multiples. Un son pur n'a qu'une seule fréquence. Le bruit est un mélange de sons, toutes les fréquences sont représentées.

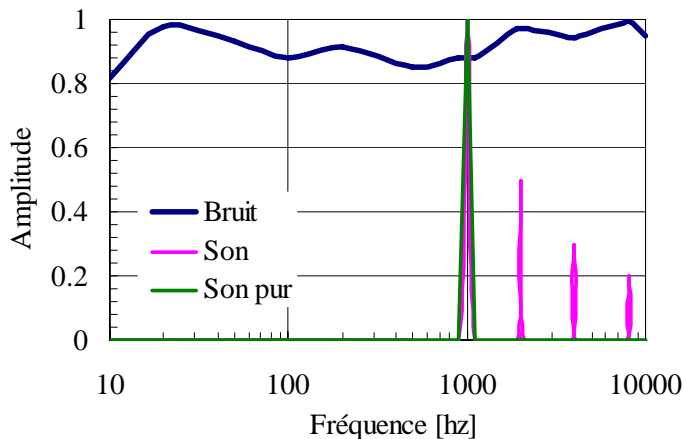


Figure 6.4 : Spectre acoustiques

6.2.2 Niveau sonore

La variation de pression qui engendre un son est faible par rapport à la pression atmosphérique (env. 100'000 Pa). Par contre elle peut varier dans un grand domaine : entre 10^{-5} et 1000 Pa. La sensation auditive n'est pas linéaire mais varie pratiquement comme le logarithme de l'excitation (*loi de Fechner*). L'utilisation d'une échelle logarithmique s'impose donc pour éviter la manipulation de nombres peu pratiques. On a choisi d'autre part une échelle relative car la perception du son de l'oreille humaine est proportionnelle à un changement relatif de pression plutôt qu'à la variation absolue de la pression.

Le *niveau de pression sonore* ou *niveau acoustique* est donc défini comme le logarithme de la pression ou de l'intensité de l'onde acoustique. Pour la définition du *décibel* acoustique, le niveau de référence est le seuil d'audibilité à 1000 Hz, pour lequel l'intensité acoustique est $I_o = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (intensité qui correspond à une variation de pression $p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$). Un facteur 10 multiplie le logarithme pour obtenir des **décibels**. Le niveau acoustique en décibels vaut donc :

$$L=10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)=20\log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (1.2-10)$$

Comme le montre la Figure 6.5, la perception de l'oreille est extrêmement complexe car elle dépend de façon non linéaire aussi bien de la fréquence que du niveau sonore. Fletcher et Munson ont déterminé le niveau acoustique à donner à un son sinusoïdal pur d'une fréquence donnée, pour avoir la même sensation auditive qu'avec un son pur de fréquence 1000 Hz, d'un niveau acoustique déterminé.

On l'appelle **niveau sonore pondéré**. Le résultat illustré dans la Figure 6.5 montre qu'il faut un niveau de 60 dB pour percevoir un son à 50 Hz alors que 0 dB suffisent à 1000 Hz. En terme d'intensité sonore, le rapport est de un million! Le **seuil de douleur** dépend peu de la fréquence, et se situe vers 120 dB, soit une intensité sonore 10^{12} fois plus grande !

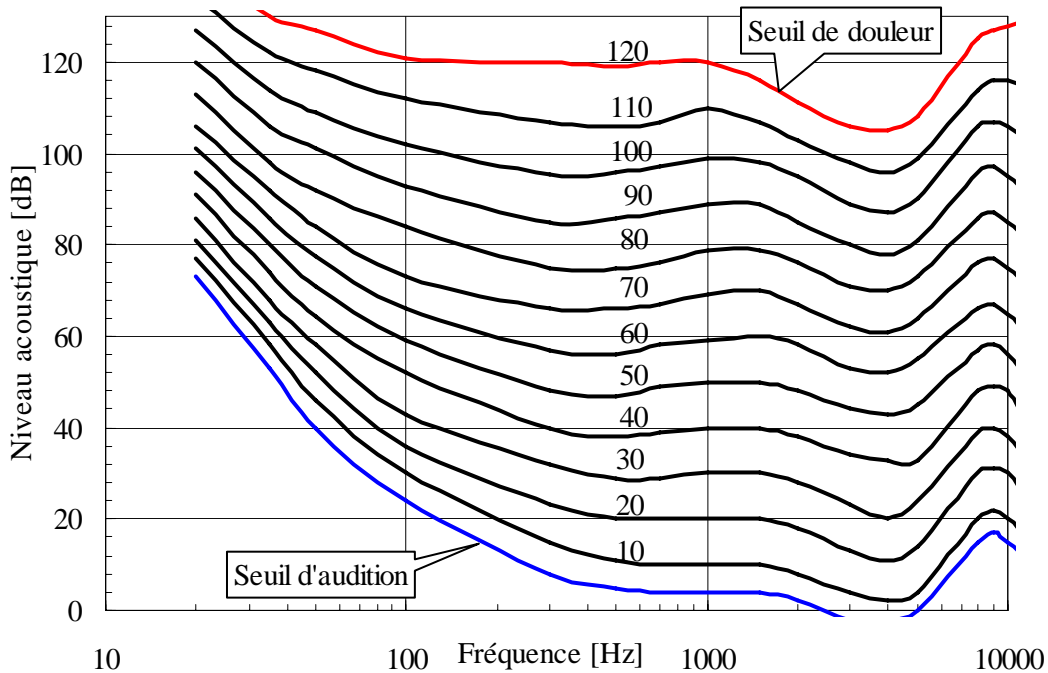


Figure 6.5 : Diagramme de Fletcher - Munson : perception des sons par l'oreille humaine

Le but des mesures étant de quantifier objectivement le bruit perçu par l'oreille humaine, il a fallu créer pour les instruments de mesure (sonomètres) des courbes de correction s'approchant aussi bien que possible des caractéristiques de l'ouïe : ce sont les courbes de pondération en fréquences (Figure 6.6) qui sont désignées par les lettres A, B, C et normalisées selon CEI 651.

A l'origine chacune de ces pondérations avait son domaine d'application plus ou moins bien défini : Filtre A pour les bruits de faible niveau, puis B et C pour les niveaux plus élevés. A l'heure actuelle seule la courbe A est utilisée pour la mesure des nuisances.

Le niveau sonore mesuré avec la courbe de pondération en fréquence A s'appelle niveau sonore pondéré A noté L_A , et son unité est le dBA. On utilise souvent par simplification le symbole L mais l'unité doit être dBA.

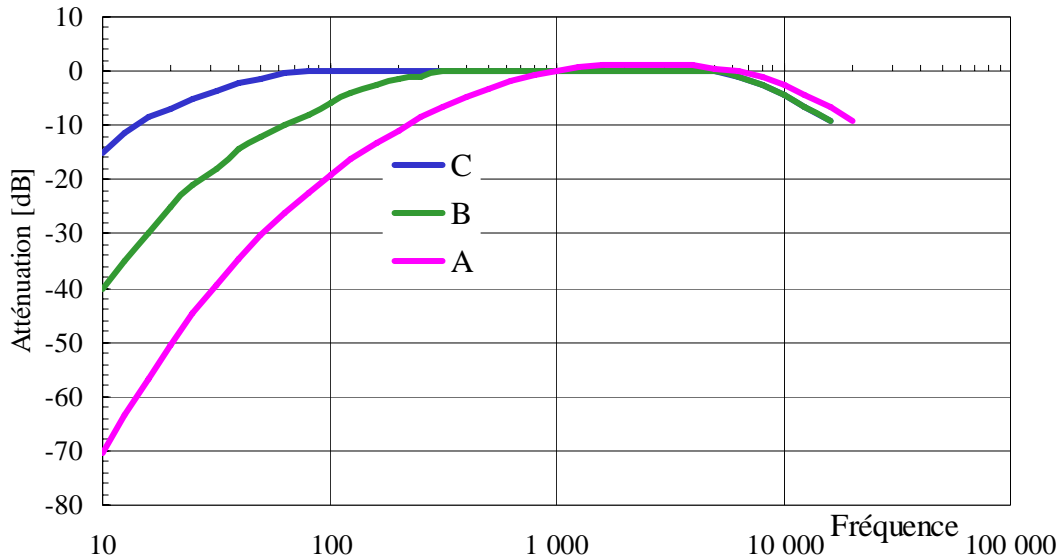


Figure 6.6 : Filtres acoustiques normalisés

Lorsque le niveau sonore fluctue en fonction du temps, on remplace ce niveau variable par un niveau moyen de même contenu énergétique que le niveau variable pour une durée de mesure T . C'est le **niveau sonore continu équivalent** L_{eq} :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L(t)} dt \right] \quad (1.2-11)$$

Les **niveaux statistiques** L_N sont souvent appelés **niveaux de dépassement** parce qu'ils désignent le niveau sonore qui est dépassé pendant N % du temps de mesure, N pouvant prendre toutes les valeurs entre 0,1 et 99,9 %. Les plus utilisés sont :

L_1 est le niveau dépassé pendant 1 % du temps, donc par les pointes de bruit.

L_{10} niveau dépassé pendant 10 % du temps.

L_{50} est le niveau de bruit médian

L_{99} est une bonne approximation du niveau de bruit de fond.

Ces niveaux statistiques donnent les informations sur les fluctuations des niveaux durant le temps de mesure. Par exemple la différence entre les niveaux L_1 (pointes rares) et L_{99} (bruit de fond) permet de juger de la gêne due au bruit avec plus de sûreté qu'avec le seul niveau L_{eq} .

6.3 Niveaux caractéristiques

Quelques exemples de bruits typiques ainsi que l'impression qu'ils donnent et leurs effets sur le système auditif sont donnés dans la Table 6.1.

Des dégâts irréversibles de l'oreille peuvent se produire suite à des expositions répétées ou prolongées à des niveaux de bruit dépassant 90 dB.

Table 6.1 : Quelques exemples de niveaux de bruit

Niveau	Impression	Effets	Exemples
130 dB	Très douloureux	Lésions irréversibles du système auditif	Banc d'essai de réacteur
120 dB	Douloureux		Burin pneumatique
110 dB	Insupportable	Perte d'audition après une brève exposition	Atelier de tôlerie
100 dB	Difficilement supportable		Atelier de presses
90 dB	Très bruyant	Perte d'audition après une longue exposition	Poids lourd à 3 m
80 dB	Bruyant		Réfectoire scolaire
70 dB	Acceptable	Gamme de bruits et sons parfaitement supportables	Forte conversation
60 dB	Bruit courant		Rue bruyante
50 dB			Bureau
40 dB	Faible		Radio à faible niveau
30 dB	Calme		Zone résidentielle calme
20 dB	Très calme		Pièce très protégée
10 dB	Silence	L'observateur entend le bruit de son propre organisme	Ne peut être obtenu qu'en laboratoire
0 dB	Silence absolu		

La Table 6.2 donne les niveaux de bruit perturbateurs généralement admis dans divers endroits.

Table 6.2 : Niveau de bruit perturbateur généralement admis (dB A)

Dans les chambres à coucher	30 - 40
Pour le travail intellectuel	50 - 70
Pour le travail manuel	80

Une *variation du niveau* de l'ordre de 1 dB est inaudible. Une variation de 3 dB (facteur 2 en intensité) est faiblement audible. Un accroissement (ou une baisse) de 10 dB est perçu par une majorité de personnes comme un niveau de bruit deux fois plus (ou moins) intense.

6.4 Absorption acoustique

L'acoustique interne d'une salle est caractérisée par la manière dont les ondes sonores s'y propagent et notamment par son *temps de réverbération* ou durée d'écho, qui est le temps nécessaire pour que le niveau sonore baisse de 60 dB après l'extinction de la source. Ce temps dépend du volume de la salle, des surfaces absorbantes (parois, sol, plafond, mobilier) et de leur coefficient d'absorption du son. Le temps de réverbération optimal dépend de l'utilisation et du volume de la salle (Figure 6.7).

Les salles beaucoup trop *sourdes*, à très faible temps de réverbération, qui sont utilisées pour des expériences et essais acoustiques, ont une ambiance acoustique oppressante. Les temps de réverbération courts, de 0,5 à 1 seconde, améliorent l'intelligibilité de la parole, alors que des temps de réverbération plus longs sont recherchés pour le rendu de la musique. Les temps très longs, caractéristiques des cathédrales, permettant de donner son ampleur à la musique de l'orgue, mais rendent la parole difficilement intelligible.

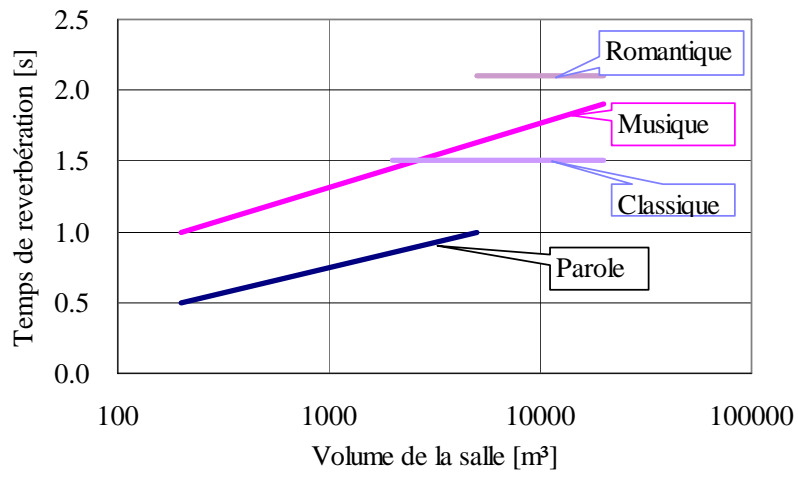


Figure 6.7 : Temps de réverbération optimal pour diverses applications.

7 CONTRÔLE

Le bien être des occupants s'améliore et leur tolérance augmente s'ils ont des moyens de contrôle sur leur environnement (voir 9.3.3, page 53). Dans les bâtiments anciens, le contrôle de la température, de l'aération et de la lumière résulte uniquement des actions de l'occupant, qui met du bois dans le fourneau, ouvre et ferme les fenêtres et les volets, allume et éteint les luminaires. Afin de réduire ces tâches qui peuvent être fastidieuses, les bâtiments modernes sont équipés d'installations automatiques qui contrôlent tout ou partie des prestations du bâtiment : un thermostat règle la température, un hygromètre l'humidité, des horloges ou des détecteurs de pollution contrôlent la ventilation mécanique et des capteurs de luminance et de présence allument et éteignent l'éclairage artificiel si nécessaire.

Il faut savoir que l'efficacité de ces organes de contrôle est très variable. Par exemple, un thermostat dont l'action est proportionnelle à l'écart entre la température réelle et la température de consigne contrôle mieux la température avec une consommation d'énergie moindre qu'un thermostat tout ou rien. Un contrôleur de température prévisionnel ((Morel et al., 2001)), qui peut anticiper sur le temps qu'il va faire et les besoins des occupants, permettra encore une nette amélioration du confort tout en diminuant la consommation d'énergie de manière significative. Toutefois, l'utilisateur ne sera satisfait que s'il peut agir sur la température de consigne pour l'adapter à ses besoins.

Les défauts de fonctionnement les plus graves proviennent souvent de l'indépendance des contrôleurs. Dans la plupart des bâtiments, chaque grandeur est contrôlée indépendamment, sans lien entre les différents contrôleurs. L'auteur a observé des installations qui chauffent et refroidissent simultanément la même pièce, ou qui humidifient et assèchent simultanément le même local. Ce risque bien réel de dysfonctionnement est d'autant plus grand que le système de contrôle est complexe. On peut le réduire en concevant et en installant un système de contrôle intégrant toutes les fonctions.

Il n'en reste pas moins qu'il est nécessaire de laisser à l'utilisateur la haute main sur le système. Dans l'idéal, chaque occupant devrait pouvoir agir sur son environnement. S'il n'a pas accès aux contrôles installés, il trouve en général un moyen de se satisfaire, en général en contrariant l'effet des installations : obturation des entrées d'air, ouverture inopinée des fenêtres, installations sauvage de chauffages électriques ou de climatiseurs, voire sabotage des installations.

Des expériences récentes ((Guillemin, 2003; Guillemin and Morel, 2002)) ont montré qu'il est possible d'atteindre les performances des meilleurs contrôles automatiques avec une excellente satisfaction des occupants au moyen d'un système automatique intégrant le contrôle de la température, de l'éclairage et des protections solaires, qui apprend les désirs de l'utilisateur. Le contrôleur prend en compte chaque action de l'occupant tendant à modifier son réglage, ce qui fait qu'après quelques jours d'apprentissage, il agit comme le ferait l'occupant, qui n'a alors plus le désir ni le besoin d'intervenir.

8 COMMENT ASSURER LE CONFORT?

8.1 Mesures passives et mesures actives

Pour assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur, on peut appliquer des mesures passives et des mesures actives.

- Les mesures passives sont des mesures architecturales et constructives qui permettent d'atteindre naturellement le but poursuivi sans ou avec très peu, d'apport d'énergie.
- Les mesures actives ou technologiques permettent d'atteindre le but poursuivi par des actions mécaniques, en consommant de l'énergie pour compenser les défauts du bâtiment ou compléter les mesures passives.

Nous désirons montrer que, pour apporter une bonne qualité de l'environnement intérieur, les mesures passives ou constructives sont préférables aux mesures actives ou techniques, et qu'elles sont en tout cas nécessaires.

8.1.1 Quelques exemples de mesures passives :

- **La distribution des volumes** doit être adaptée au climat. Les grandes hauteurs sont confortables en climat chaud, alors que les petits volumes sont plus faciles à chauffer. La distribution des pièces en hauteur favorise la ventilation par effet de cheminée, mais augmente aussi le gradient de température.
- **L'emplacement des ouvertures** détermine l'éclairage et la ventilation naturels. Par exemple une ouverture tout en haut permet d'évacuer l'air chaud. Des fenêtres hautes éclairent mieux le fond des pièces que des vitrages larges.
- **L'isolation thermique** protège du climat extérieur. Si elle est placée à l'extérieur de la structure, elle la protège des variations rapides de température, stabilise la température intérieure, favorise l'utilisation des gains solaires, permet le refroidissement passif et supprime les risques de moisissure et de condensation.
- **La ventilation naturelle** est généralement mieux acceptée par les habitants que la ventilation mécanique. Elle permet des débits nettement supérieurs à ceux que la ventilation mécanique peut atteindre, ce qui facilite l'évacuation rapide de grandes quantités de polluants et améliore nettement l'efficacité du refroidissement passif.
- **Le refroidissement passif** consiste à refroidir la structure du bâtiment la nuit pour éviter les surchauffes les jours de canicule. Pour cela, on utilise de grandes ouvertures pendant toute la nuit, une des ouvertures étant située le plus haut possible.
- **Le chauffage solaire passif** consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire entrant dans le bâtiment par les fenêtres, ou parfois par des dispositifs ad hoc, pour contribuer au chauffage des locaux.
- **L'isolation et l'absorption acoustiques** assurent une ambiance acoustique agréable dans les locaux, évitent les interférences désagréables entre voisins et réduisent l'impact des bruits extérieurs.
- **L'éclairage naturel** est parfaitement adapté à nos yeux, bien accepté, voire recherché par les occupants. A éclairage égal, il chauffe moins que l'éclairage artificiel.

8.1.2 Quelques exemples de mesures actives :

- **Les miroirs et trompe-l'œil**, ainsi que tout dispositif tendant à faire croire que les espaces sont différents de ce qu'ils sont en réalité. Ils sont utilisés en général pour donner l'illusion d'un plus grand espace.
- **Le chauffage local ou central** reste indispensable dans les climats froids pour assurer une température confortable en hiver.

- **La ventilation mécanique** supplée à la ventilation naturelle ou la complète dans les locaux de grande dimension ou à fort taux d'occupation. Elle permet aussi de récupérer la chaleur dans l'air extrait.
- **Le conditionnement d'air** permet de refroidir les locaux dans lesquels la charge thermique est trop élevée. On peut aussi utiliser à cet effet les parois radiantes (par exemple des plafonds froids)
- **L'atténuation acoustique active** est une technique consistant à réémettre les sons ambiants avec une demi-période de retard, ce qui compense en grande partie le son ambiant. Cette technique n'est utilisée que dans des cas exceptionnels.
- **L'éclairage artificiel** est bien connu et reste indispensable pour voir la nuit !

8.1.3 Avantages et inconvénients des mesures passives et actives

Les mesures passives sont généralement bon marché, consomment peu ou pas d'énergie et par définition ne peuvent pas tomber en panne. Par contre, elles dépendent souvent des conditions météorologiques et donc ne fonctionnent pas toujours à satisfaction. Elles nécessitent de la créativité et souvent un surcroît d'étude de la part de l'architecte. Enfin, une erreur de conception peut avoir des conséquences dramatiques.

Les mesures actives sont bien adaptées aux besoins, du moins quand elles sont bien conçues, construites et mises en service, car elles sont conçues pour cela. L'architecte n'a pas trop à s'en soucier, car ces mesures utilisent des méthodes connues appliquées par d'autres professionnels (chauffagistes, éclairagistes, installateurs, ingénieurs, etc.). Souples et relativement indépendantes des conditions météorologiques, elles permettent de corriger des erreurs de conception architecturale. Par contre, elles sont souvent chères, énergivores et peuvent tomber en panne. Dans ce cas, la situation peut être plus catastrophique que dans un bâtiment "passif". Enfin, et c'est le défaut d'une qualité, elles permettent les erreurs de conception architecturale....

Les avantages et inconvénients des mesures passives ou des mesures actives sont résumés dans le Tableau 8.1. On note que les inconvénients des unes sont compensées par les avantages des autres et réciproquement.

Tableau 8.1 : Avantages et inconvénients des mesures passives et actives

	Mesures passives	Mesures actives
Avantages	Bon marché Consomment peu d'énergie Ne tombent pas en panne	Sont adaptés aux besoins Méthodes connues Souplesse Corrige les erreurs
Inconvénients	Nécessitent de l'imagination Ne sont pas toujours adaptées Ne pardonnent pas d'erreur	Chères Énergivores Des pannes sont possibles Permettent des erreurs

Les mesures passives étant préférables mais ne pouvant pas toujours garantir des conditions confortables, la stratégie à adopter consiste à aller aussi loin que raisonnablement possible avec les mesures passives, et de pallier les insuffisances résiduelles par des installations actives dont les dimensions seront alors réduites. Cette stratégie permet souvent d'avoir plus de choix quant aux types et aux emplacements des installations actives.

8.2 Confort naturel

Certains bâtiments sont naturellement confortables, alors que d'autres nécessitent d'importantes installations techniques pour garantir des conditions acceptables.

Dans la Figure 8.1, la bande représente la marge de température de confort, qui varie avec l'habillement, donc avec la saison. La courbe pleine représente la température extérieure. En point-trait, on représente l'évolution de la température dans d'un bâtiment bien conçu et en pointillé celle d'un bâtiment inadapté à son climat.

En climat tempéré, il est parfaitement possible d'assurer un climat intérieur confortable en été sans aucune installation technique, et une bonne conception permet de réduire fortement la durée et l'importance de la saison de chauffage. L'opposé peut être réalisé dans les pays chauds, où une conception adéquate permet de réduire les besoins en refroidissement. Le climat tropical (température élevée constante et forte humidité) fait toutefois exception et nécessite d'autres mesures.

Un bâtiment devrait assurer, sans aucune consommation d'énergie, un confort au moins équivalent à celui régnant à l'extérieur (Chatelet et al., 1998). Les installations de chauffage et de refroidissement étant déclenchées, l'intérieur du bâtiment ne devrait être ni plus chaud - en saison chaude - ni plus froid - en saison froide - que l'extérieur.

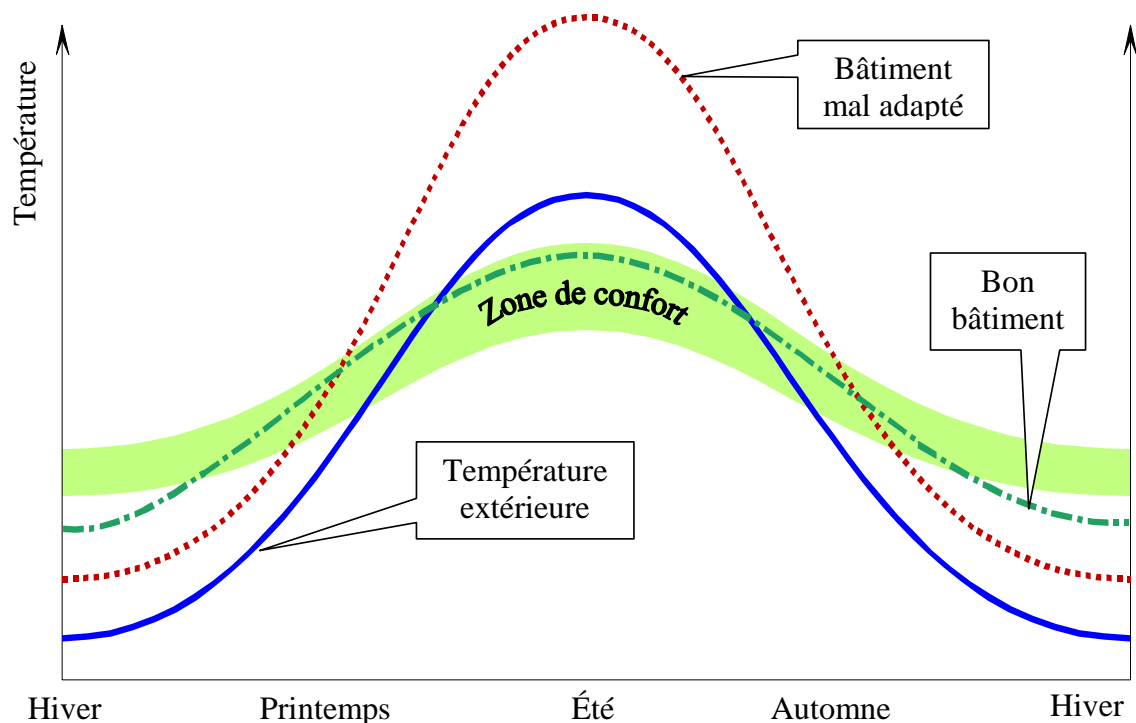


Figure 8.1 : Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, en absence de chauffage ou de climatisation.

S'il est bien conçu et construit, le bâtiment peut fournir un confort nettement supérieur. Un tel bâtiment ne surchauffe pas ou peu en été et profite des gains solaires pendant les périodes froides, pour raccourcir la saison de chauffage. Un bâtiment inadapté à son climat, (par exemple est un hôtel d'une grande chaîne internationale ou un atrium sans protections solaires) a tendance à surchauffer en saison chaude et à être glacial en saison froide. Un rattrapage technologique coûteux est nécessaire pour assurer le confort dans ces bâtiments, qui consomment alors de grandes quantités d'énergie pour assurer un confort parfois juste acceptable.

Plusieurs des mesures passives résumées ci-dessus, comme par exemple, l'éclairage naturel ou l'isolation thermique sont bien connues, nous n'y reviendrons donc pas. Nous présentons ci-dessous deux moyens d'améliorer le confort thermique d'hiver et d'été. Ces moyens sont rela-

tivement moins connues et probablement plus complexes, car ils nécessitent un ensemble de mesures pour réussir.

8.3 Chauffage solaire passif

Le chauffage solaire passif consiste à utiliser au mieux l'énergie du rayonnement solaire entrant dans le bâtiment. Ces apports solaires dépendent de l'ensoleillement normalement présent sur le site concerné, de l'orientation des surfaces réceptrices, de l'ombrage permanent et des caractéristiques de transmission et d'absorption solaires des surfaces réceptrices. Les surfaces qui captent l'énergie solaire sont principalement les vitrages, mais aussi les parois et planchers intérieurs des surfaces ensoleillées, les parois situées derrière un revêtement transparent ou une isolation transparente, et même toute surface opaque exposée au soleil.

Les gains solaires peuvent apporter une part importante des besoins en chauffage dans les bâtiments. Cette part est non négligeable : dans un bâtiment ordinaire en ville, elle dépasse 10% des besoins de chauffage, mais elle peut atteindre 50 % dans les bâtiments bien conçus et bien exposés. De plus, les caractéristiques du bâtiment nécessaires à l'utilisation optimale des gains solaires en font un bâtiment confortable été comme hiver, caractérisé par une grande ouverture sur l'extérieur.

8.3.1 Principe du captage solaire passif

Le rayonnement solaire entrant par les fenêtres et le cas échéant par d'autres éléments de captage spéciaux est transformé en chaleur à l'intérieur du bâtiment, et contribue ainsi au chauffage des locaux. Ce mode de faire présente de nombreux avantages, et en particulier la source d'énergie est gratuite et non polluante. Par contre, il présente quelques inconvénients auxquels il est nécessaire de pallier. Pour cela, il convient de suivre les quelques directives simples énoncées ci-dessous (Figure 8.2).

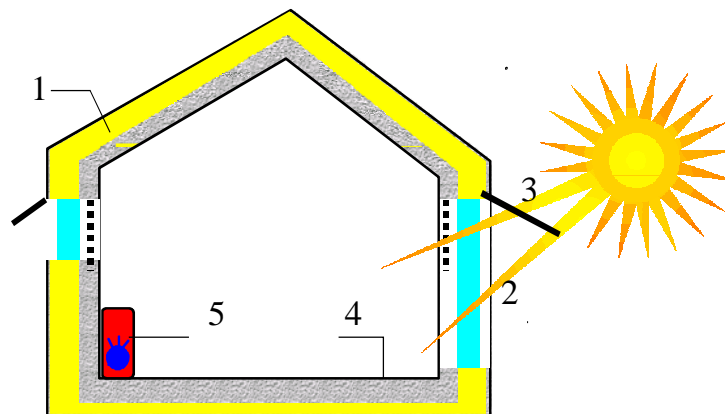


Figure 8.2 : Principes du chauffage solaire passif

1. Bonne isolation thermique
 2. Grands vitrages côté soleil...
 3. ..avec protections solaires efficaces et mobiles
 4. Structure massive pour accumuler la chaleur
- Installation de chauffage et régulation adéquats

- 1.
2. Pour que les gains solaires, toujours limités, représentent une part importante des besoins, il faut limiter ces besoins au minimum par une **isolation thermique** soignée : fortes épaisseurs d'isolation et vitrages à hautes performances. L'utilisation de ces gains sera améliorée par une répartition adéquate, en plan et en coupe, des zones chauffées ou à activité diurne et des zones tampon : les premières au soleil, les secondes en retrait.
3. Le rayonnement solaire est relativement diffus, en particulier en hiver, où il ne dépasse pas quelques centaines de watts par mètre carré. Pour capter une quantité de chaleur appréciable, il faut de **grandes surfaces de captage**, orientées vers les directions les plus ensoleillées (du sud-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord). L'orientation du bâtiment doit tenir compte de ces besoins. Les surfaces de captage sont avant tout les fenêtres et portes vitrées, mais aussi les vérandas et les parois opaques à isolation transparente.

4. Lorsque la température extérieure est clémente et qu'il fait beau, ces surfaces apportent trop de gains. Il est donc indispensable de munir toutes les surfaces de captage de dispositifs de contrôle. En particulier, il faut munir les fenêtres de **protections solaires efficaces**, donc extérieures pour la protection d'été (Figure 2.1). En effet, le rayonnement solaire chauffe la protection et cette chaleur doit être évacuée à l'extérieur en été. Des arbres à feuilles caduques sont souvent proposés, car ils apportent une ombre plus fraîche que des stores. Toutefois, ce type de protection n'est pas réglable, et ne peut pas être diminué pour améliorer l'éclairage naturel par mauvais temps en belle saison. Des protections solaires intérieures peuvent être utiles en hiver pour réduire l'éblouissement tout en profitant de la chaleur solaire.

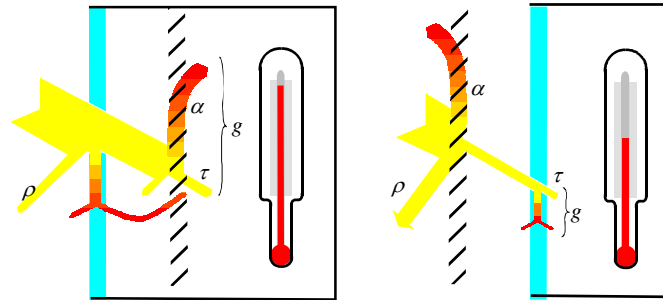


Figure 8.3 : Les protections solaires efficaces sont à l'extérieur du bâtiment.

5. Pour augmenter l'efficacité du chauffage solaire passif, il faut répartir sur la journée les gains reçus pendant quelques heures seulement. **L'inertie thermique du bâtiment doit donc être élevée**, pour limiter les surchauffes en période ensoleillée, et restituer la chaleur accumulée pendant la nuit. Le bâtiment est donc massif et l'isolation est posée à l'extérieur de la structure. Il faut aussi tenir compte en dessinant le plan, de la nécessité de répartir la chaleur dans toute la zone habitée : grouper les zones chaudes plutôt au sud, placer les zones plus fraîches (circulations, dépôts) au nord.
6. Enfin, le chauffage d'appoint ne doit fonctionner que quand il est nécessaire. Il doit réagir rapidement aussi bien lorsque le soleil disparaît que lorsqu'il apparaît. Il faut donc une **régulation thermique adéquate**, qui tienne compte des gains solaires et des caractéristiques du système de chauffage. C'est notamment le cas s'il y a un thermostat dans chaque pièce. Des systèmes de contrôle prévisionnels peuvent pallier les défauts des chauffages à grande inertie, comme le chauffage par le sol.

Pour plus de détails relatifs à la construction solaire passive, voir par exemple (Buckley et al., 1991; Ganz et al., 1990).

8.4 Protection thermique d'été : Refroidissement passif

8.4.1 Principe du refroidissement passif

Le refroidissement passif consiste à mettre à profit tout phénomène abaissant la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. Il permet d'assurer sous notre climat un excellent confort estival tout en évitant l'installation de coûteux systèmes de conditionnement d'air.

En premier lieu, on cherche à réduire les gains de chaleur solaires et internes, en installant des protections solaires efficaces et en évitant d'utiliser des appareils à faible rendement.

Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. Cette technique d'usage général est applicable dans tout type de bâtiment (lourd ou léger), mais ne fonctionne que lorsque la température extérieure est plus basse que la température de confort.

Si ce n'est pas le cas, on peut appliquer le refroidissement passif par ventilation nocturne. Celui-ci consiste à refroidir la structure du bâtiment à l'aide de la ventilation naturelle, de manière à permettre à cette structure d'accumuler la chaleur générée dans le bâtiment pendant la journée. Il comprend donc deux périodes : la période de refroidissement et la période de protection (Figure 8.4).

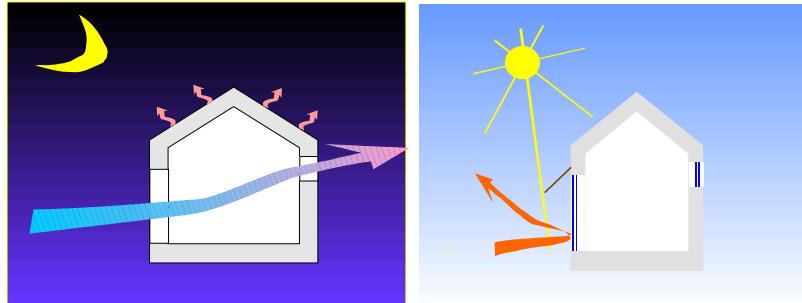


Figure 8.4 : Les deux périodes du refroidissement passif. A gauche, période de refroidissement, à droite, période de protection.

Période de refroidissement : Tant que la température extérieure est inférieure à la température intérieure, (en général pendant la nuit) des ouvertures sont pratiquées dans le bâtiment de manière à permettre à l'air chauffé par la structure du bâtiment de s'échapper, et à l'air frais extérieur de s'infiltrer. Le bâtiment est ainsi aéré et refroidi pendant cette période.

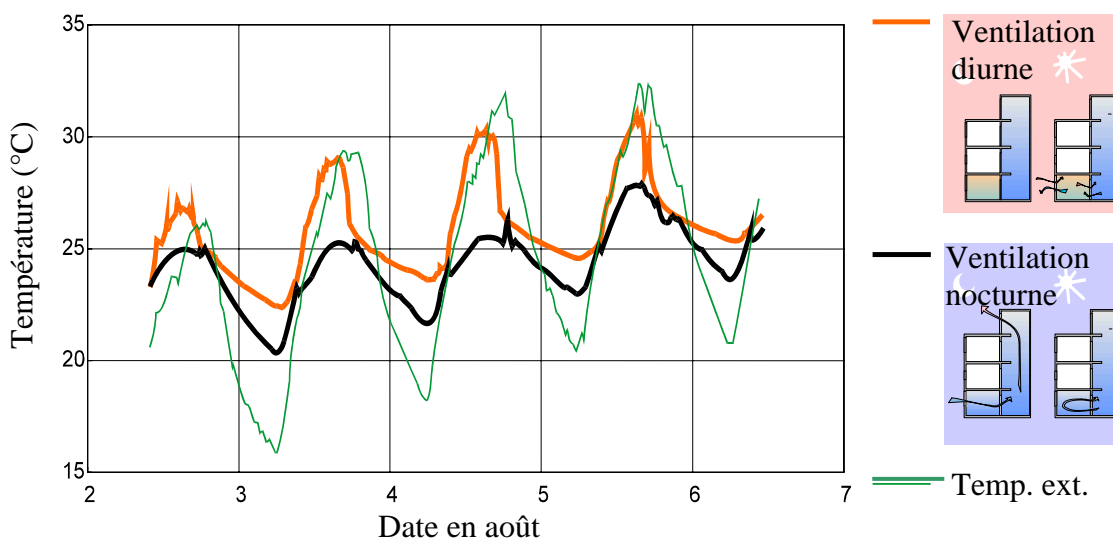


Figure 8.5 : Température dans deux bureaux identiques. L'un est aéré pendant la journée, l'autre pendant la nuit. La ligne fine est la température extérieure.

Période de protection : Tant que la température de l'air extérieur est plus élevée que celle de l'air intérieur, la ventilation est réduite au minimum nécessaire pour assurer une bonne qualité de l'air. Les gains de chaleur résiduels chauffent le bâtiment mais, la structure étant froide et massive, ce réchauffage est relativement lent. Dans de bonnes conditions, on évite de dépasser les limites d'un bon confort thermique.

Le refroidissement passif par ventilation nocturne permet généralement d'atteindre des températures plus basses ou d'éliminer plus de chaleur que la ventilation diurne. La Figure 8.5 montre des enregistrements de température dans deux bureaux identiques; l'un étant aéré pendant

la journée, l'autre pendant la nuit. Les deux bureaux sont munis de protections solaires efficaces. L'abaissement de la température maximale dépasse 4 degrés !

Le refroidissement passif n'est cependant applicable qu'à condition de respecter les règles constructives ci-dessous.

8.4.2 Règles de conception pour le refroidissement passif

Règles générales

L'utilisation de la ventilation pour abaisser la température intérieure et diminuer les besoins en réfrigération ne peut fonctionner que si certaines conditions sont satisfaites (Figure 8.6). Notons qu'il n'est pas toujours possible de les satisfaire pour des bâtiments existants qui n'ont pas été conçus pour cela.

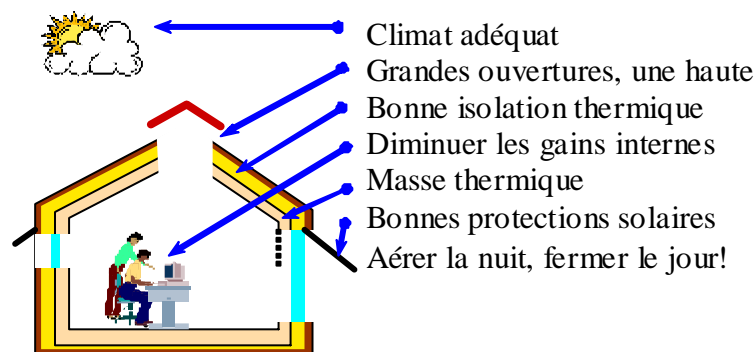


Figure 8.6 : Conditions nécessaires pour un refroidissement passif efficace

Ces conditions sont détaillées ci-dessous.

Conditions liées au climat :

- La température extérieure moyenne, sur 24 heures, ne doit pas être trop élevée.
- Le climat doit être tel que la déshumidification de l'air ne soit pas nécessaire.
- Pour le refroidissement par ventilation nocturne, l'amplitude des variations nycthémérales³ de la température de l'air extérieur doit être importante (minimum 5 degrés).

Ces conditions sont facilement remplies en Suisse, en tous cas au nord des Alpes.

Conditions liées au bâtiment :

- Les gains de chaleur doivent être limités de manière à éviter la surchauffe et à ne pas dépasser la quantité de chaleur qu'il sera possible d'évacuer pendant la période de refroidissement suivante. Ceci signifie :
- la présence et l'utilisation adéquate de **protections solaires** efficaces, donc extérieures (Figure 8.3). Le rayonnement solaire inévitablement absorbé par le dispositif de protection se transforme en chaleur. Si le dispositif est à l'intérieur, la chaleur y est aussi !;
- un équipement (machines, éclairage, etc.) à faible consommation d'énergie,
- la généralisation de l'éclairage naturel, contrôlé par des dispositifs (notamment des protections solaires mobiles) rejetant la lumière en excès à l'extérieur du bâtiment.
- Si les gains sont trop importants pour assurer le confort par la seule ventilation naturelle, il est possible d'assister celle-ci par un refroidissement artificiel.

Règles constructives pour l'inertie thermique.

- Pour des locaux occupés de jour, l'inertie thermique du local doit être grande. Elle est maximale si un matériau dense (béton, maçonnerie) d'au moins 10 cm d'épaisseur est ap-

³ ou journalières (nuit-jour)

parent sur toutes les parois (plafond, plancher, murs). Des épaisseurs trop grandes (plus de 20 cm depuis la surface) sont par contre inutiles.

- Il faut limiter autant que possible les surfaces recouvertes de matériau isolant (faux plafonds, moquettes, lambrissages, tapisseries épaisses). Il convient toutefois de tenir compte des exigences acoustiques et esthétiques. Une solution de compromis consiste à laisser apparente une partie importante (au moins 50%) de la structure massive.
- Une isolation suffisante doit être placée à l'extérieur. Il importe en effet que la masse intérieure de la paroi ne soit pas chauffée de l'extérieur. Ce critère est satisfait pour les murs doubles ou à isolation extérieure, si le coefficient de transmission thermique U est conforme aux exigences actuelles pour la protection thermique d'hiver.
- Pour des locaux qui ne sont occupés que la nuit, une faible inertie thermique peut être avantageuse, car elle permet un abaissement rapide de la température ambiante.
- Il est avantageux de répartir la capacité de stockage sur toutes les surfaces de la structure. A contrario, il est erroné de concentrer cette masse sur un seul élément épais. Ce n'est donc pas la masse par mètre carré de plancher qui est déterminante, mais la masse par mètre carré de surface en contact avec l'air intérieur.

Règles constructives concernant la ventilation

- Plusieurs configurations sont possibles pour la ventilation nocturne (Figure 8.8). Les ouvertures de ventilation doivent être de dimension suffisante (voir Module 2, aspects hygiéniques de l'air) et leur position doit être adaptée à la configuration prévue.

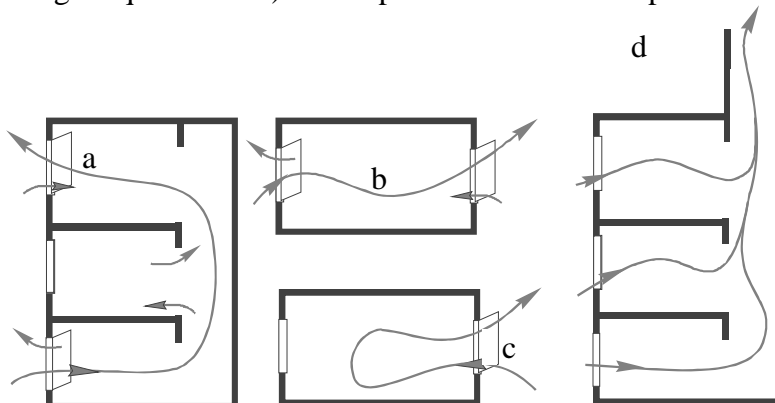


Figure 8.8 : Configurations de ventilation naturelle.

- a) ventilation à deux ouvertures;
- b) ventilation traversante;
- c) ventilation à ouverture unique;
- d) ventilation avec cheminée.

- Le haut des ouvertures assurant la ventilation dans chaque local doit se situer le plus haut possible. En effet, pour un transfert de chaleur maximal avec les parois, la surface d'échange convective doit être la plus grande possible (Figure. 8.7).
- Les ouvertures doivent être orientées autant que possible de façon que les entrées d'air soient exposées au vent dominant en période de refroidissement et que les sorties d'air se trouvent sous le vent.
- Si le volume à ventiler est d'une faible hauteur, il faut favoriser la ventilation naturelle traversante. Si ceci n'est pas possible, les ouvertures doivent comprendre deux éléments d'aires égales séparés par une distance verticale maximale.
- Pour un bâtiment à plusieurs niveaux, les sorties d'air doivent être beaucoup plus grandes que les entrées et se situer le plus haut possible dans le bâtiment. Il faut en effet éviter que l'air préchauffé par le bas du bâtiment sorte par les locaux habités supérieurs. Le rapport entre la surface des ouver-

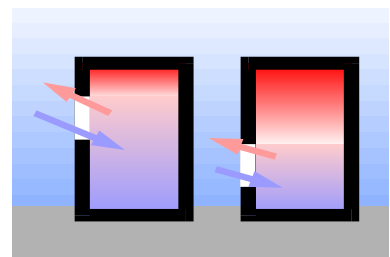


Figure. 8.7 : Au-dessus du haut de l'ouverture, l'air chaud piégé est à la température des parois et aucun échange convectif ne peut avoir lieu.

tures d'entrée et de sortie doit être calculé pour avoir un niveau neutre au-dessus du dernier niveau ventilé.

- Une surélévation du bâtiment facilite la construction de grandes ouvertures pour l'air. S'il n'est pas possible de satisfaire cette condition, on peut ventiler le niveau supérieur indépendamment, ou l'équiper d'un ventilateur d'extraction

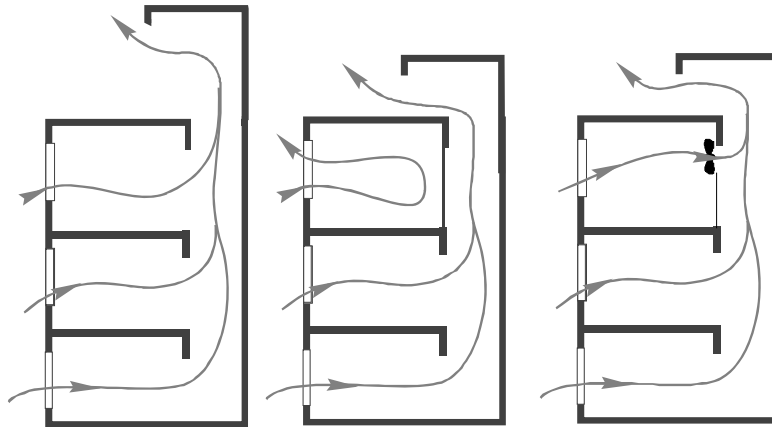


Figure. 8.9 : Moyens disponibles pour refroidir les derniers étages. Voir aussi Figure 8.8 d

Grande ouverture haute Ventilation autonome du dernier étage Ventilateur d'appoint

- Si la ventilation mécanique est utilisée pour le refroidissement passif, le ventilateur doit fonctionner de préférence en extraction pour éviter d'échauffer l'air avec les pertes du moteur et les frottements sur le ventilateur.
- Il n'est pas possible d'utiliser une installation de ventilation mécanique à double flux à haute pression pour le refroidissement passif : les débits et le rendement sont nettement insuffisants.

Règles de sécurité.

- Prévoir des protections contre les tempêtes, laissant passer l'air sans laisser entrer la pluie.
- Il est pratiquement impossible d'éviter la pénétration de bruit et de polluants par les grandes ouvertures requises pour la ventilation naturelle. Si l'environnement est trop bruyant ou trop contaminé, examiner la possibilité de construire ailleurs ou d'utiliser la ventilation mécanique ou d'autres moyens de refroidissement, tels que structure refroidie ou panneaux radiants (par ex. plafonds froids).
- Diminuer les risques d'effraction en plaçant les ouvertures hors de portée et en multipliant de petites ouvertures. L'installation de stores à lamelles, de moustiquaires, de grilles et de systèmes d'alarme doit aussi être envisagée.
- Veiller à satisfaire les règles de protection incendie. Les exutoires de fumée peuvent être utilisés comme ouvertures de ventilation, mais doivent pouvoir être manœuvrés depuis un endroit facilement accessible en cas d'incendie. L'air de refroidissement peut être transporté dans les couloirs et escaliers, mais ces flux d'air doivent être bloqués en cas d'incendie.

Règles de comportement

Les meilleures mesures constructives peuvent être inutiles sans un comportement approprié, qui ne peut être obtenu des occupants qu'au moyen d'une information claire et répétée. Les deux points importants sont :

- Il est essentiel que les protections solaires soient utilisées.
- Un refroidissement efficace n'est atteint que si les ouvertures de ventilation sont fermées pendant la journée et ouvertes la nuit.

9 ÉNERGIE ET QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR

9.1 Énergie dans le bâtiment

9.1.1 Les flux d'énergie dans le bâtiment

Pratiquement toute l'énergie entrant dans un bâtiment finit par être transformée en chaleur. Étant donné que l'intérieur du bâtiment est souvent plus chaud que l'extérieur, toute cette énergie finit aussi par en sortir. Le bâtiment peut être comparé à un tonneau des Danaïdes dans lequel on maintient un niveau d'eau en le remplissant continuellement (Figure 9.1). Le niveau correspond au confort thermique demandé et le débit d'eau aux flux d'énergie.

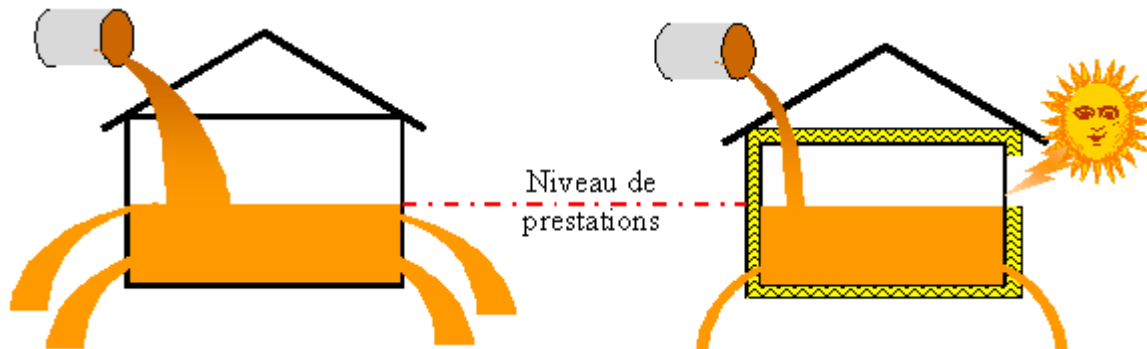


Figure 9.1 : Le bâtiment est un tonneau des Danaïdes : on maintient le confort grâce à un flux d'énergie. A gauche, bâtiment mal isolé, à droite, bâtiment correct.

Si le bâtiment est mal isolé, le flux d'énergie est plus important, et pire, la température est peu homogène : en hiver, trop chaud près des corps de chauffe et trop froid près des endroits mal isolés de l'enveloppe et trop chaud sous toiture en été. Par contre, si le bâtiment est bien conçu, la température est plus homogène, les vitrages bien exposés, munis de protections solaires bien conçues et d'ouvertures adéquates, apportent des gains solaires importants en hiver, un contact avec l'extérieur, et permettent d'assurer un climat agréable en été.

Les principaux flux de chaleur au travers du bâtiment sont les déperditions par transmission au travers des parois de l'enveloppe, les déperditions par aération, à savoir la chaleur nécessaire pour conditionner l'air frais provenant de l'extérieur, les gains solaires passifs, essentiellement le rayonnement solaire entrant par les fenêtres, et l'apport d'énergie nécessaire pour maintenir un confort thermique agréable (Figure 9.2).

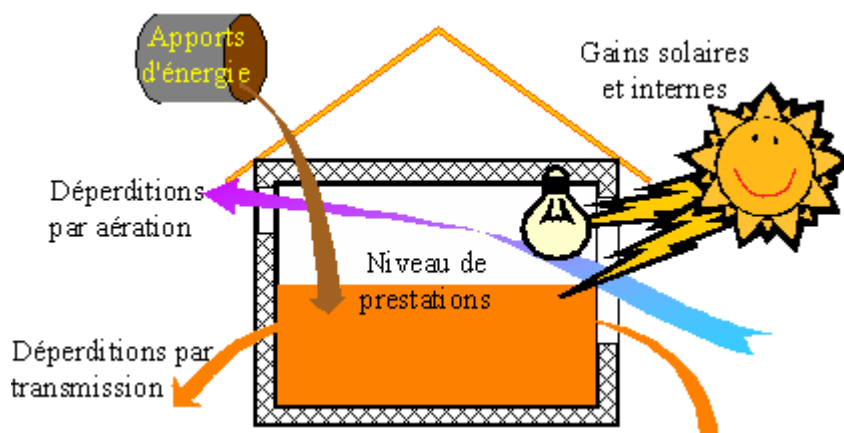


Figure 9.2 : Les principaux flux de chaleur au travers du bâtiment.

9.1.2 Indice de dépense d'énergie (IDE)

Un indice souvent utilisé pour comparer la consommation d'énergie des bâtiments est l'Indice de Dépense d'Énergie ou IDE (SIA, 1982). On obtient cet indice en divisant la consommation annuelle totale d'énergie (de tous les agents énergétiques) exprimée en MJ (ou en kWh) par la surface brute de plancher chauffé (murs inclus).

Cette mesure simple a surtout un but statistique servant en première analyse. La comparaison de cet indice avec les valeurs statistiques connues permet de savoir si le bâtiment est un gros ou un petit consommateur.

La Figure 9.3 montre les gammes d'indices de dépense d'énergie selon le Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation. On notera que le rapport des performances entre la classe A et la classe I dépasse 10: les bâtiments les plus performants du Luxembourg consomment dix fois moins d'énergie primaire ou d'énergie de chauffage par mètre carré de plancher que les moins performants.

Gebäudekategorie		Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D	Klasse E	Klasse F	Klasse G	Klasse H	Klasse I
1	Wohnen MFH	≤ 45	≤ 75	≤ 85	≤ 100	≤ 155	≤ 225	≤ 280	≤ 355	> 355
2	Wohnen EFH	≤ 45	≤ 95	≤ 125	≤ 145	≤ 210	≤ 295	≤ 395	≤ 530	> 530

Gebäudekategorie		Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D	Klasse E	Klasse F	Klasse G	Klasse H	Klasse I
1	Wohnen MFH	≤ 14	≤ 27	≤ 43	≤ 54	≤ 85	≤ 115	≤ 150	≤ 185	> 185
2	Wohnen EFH	≤ 22	≤ 43	≤ 69	≤ 86	≤ 130	≤ 170	≤ 230	≤ 295	> 295

Figure 9.3 : Classes d'indices de dépense d'énergie primaire globale des bâtiments au Luxembourg selon le Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation. En haut, consommation globale d'énergie primaire, en bas besoins en chauffage.

De nombreux exemples montrent qu'une forte consommation d'énergie ne va pas forcément de pair avec un confort élevé. Au contraire, la plupart des bâtiments à forte consommation sont inconfortables, et de nombreux bâtiments à basse consommation offrent un environnement intérieur de très bonne qualité.

9.2 Quantification du confort et de la santé

Plusieurs indications sur la qualité de l'environnement intérieur des bâtiments ont été obtenues par des enquêtes dans des bâtiments. En particulier, plusieurs enquêtes récentes utilisant des méthodes similaires ont été effectuées dans une dizaine de pays européens (Bluyssen et al., 1995a) et à Singapour (Sekhar et al., 1998), et ont concerné environ 100 bâtiments résidentiels et 100 bâtiments administratifs. Dans tous ces bâtiments, on a obtenu de nombreuses caractéristiques (surface, volume, nombre d'occupants, orientation, isolation etc. ainsi que la consommation d'énergie. Un questionnaire a été distribué aux occupants, demandant notamment leurs impressions sur leur bien être, et le confort ressenti.

9.2.1 Quantification du confort

Le confort est une sensation subjective. Le meilleur indicateur est donc le confort perçu par les occupants. Nous avons vu que l'échelle de confort thermique va de - 3 (trop froid) à + 3

(trop chaud) en passant par 0 (parfait). Pour mesurer le confort perçu relativement à d'autres critères on demande aux occupants de noter, sur une échelle allant par exemple de 1 (tout à fait satisfaisant) à 7 (totalement insatisfaisant) leur impression concernant la qualité de l'air, les odeurs, la fraîcheur de l'air, le bruit, l'éclairage naturel et artificiel, l'éblouissement, leur environnement, le contrôle qu'ils ont sur celui-ci, etc. On peut aussi ne poser qu'une seule question: êtes-vous satisfait du confort global dans ce bâtiment?

9.2.2 Observations

Les moyennes du Tableau 2 ont été observées dans des résidences et des bureaux Européens.

Tableau 2: Moyenne des notes de confort.

	Résidences	Bureaux
Qualité de l'air	2.8	3.8
Confort thermique	3.0	3.8
Éclairage naturel et artificiel	2.3	2.8
Acoustique et bruit	2.7	2.8

Le confort ressenti a été noté par les occupants sur une échelle allant de 1 (tout à fait satisfaisant) à 7 (tout à fait insatisfaisant). Il est généralement acceptable dans les logements, mais le confort thermique et la qualité de l'air sont jugés proches du milieu de l'échelle, donc relativement médiocres dans les bureaux.

9.2.3 Quantification de la santé: le Syndrome du Bâtiment Malsain (SBS) et son indice (BSI)

Dans les bâtiments dits "malsains" certains symptômes, qui ne peuvent pas être reliés à des causes précises, se retrouvent fréquemment. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit la santé comme un état de bien être physique, mental et social total et non simplement comme une absence de maladie ou d'infirmité. L'OMS a aussi défini le SBS comme une réaction de la majorité des occupants d'un immeuble à leur environnement intérieur, réaction qui ne peut pas être directement reliée à des causes évidentes telles qu'une exposition à une concentration excessive d'un contaminant connu ou à une défectuosité d'un système de ventilation.

Le SBS se caractérise par des symptômes d'inconfort et de réactions physiologiques ou sensorielles aiguës. Les personnes qui développent le SBS voient généralement leurs symptômes disparaître lorsqu'elles quittent l'immeuble incriminé. La Table 9.1 donne la liste de ces symptômes.

Table 9.1 : Liste des symptômes du syndrome du bâtiment malsain.

Symptômes les plus fréquents	Autres symptômes observés
Yeux secs, irrités, qui picotent	Yeux larmoyants
Nez bouché, respiration par le nez difficile	Nez qui coule, usage fréquent du mouchoir
Gorge sèche ou irritée	Poitrine oppressée, difficulté à respirer
Mal à la tête	Symptômes de grippe
Peau sèche	Peau irritée, éruptions
Apathie, fatigue	

Pour estimer l'impact du bâtiment sur la santé des occupants, on demande aux occupants s'ils ressentent l'un ou l'autre de ces symptômes, et si ces symptômes disparaissent lorsque la per-

sonne quitte le bâtiment. Si c'est le cas, c'est à dire si le symptôme n'apparaît que lorsque la personne se trouve dans le bâtiment, il est réputé lié au bâtiment.

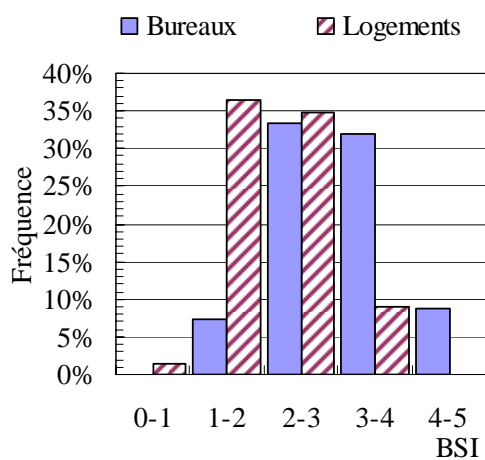


Figure 4: Pourcentage des bâtiments présentant diverses valeurs du BSI

Pour comparer les bâtiments, des indices des symptômes liés au bâtiment (BSI pour Building Symptom Index) ont été définis. Ces indices donnent le nombre moyen de symptômes liés au bâtiment ressentis par personne. Il prend donc une valeur allant de 0 à 11.

En moyenne, les occupants des bureaux déclarent plus de symptômes que les habitants des logements (Figure 4). Ce nombre est inférieur à 1 dans les meilleurs logements, et compris entre 1 et 2 dans les meilleurs bureaux. Les occupants des logements attribuent en moyenne 1 symptôme à leur logement, alors que les employés attribuent en moyenne 2 symptômes à leur bureau. Il ne dépasse 5 dans aucun bâtiment. Notez qu'un bâtiment est clairement déclaré malsain si le nombre de symptômes moyen par occupant dépasse 6. Aucun des bâtiments examinés n'était jugé a priori comme malsain.

Il a été aussi demandé aux occupants s'ils souffraient d'une ou plusieurs des maladies de type allergiques données dans le Tableau 3. Entre 10 et 30% des occupants ressentent une ou plusieurs pathologies parmi cette liste.

Il a été aussi demandé aux occupants s'ils souffraient d'une ou plusieurs des maladies de type allergiques données dans le Tableau 3. Entre 10 et 30% des occupants ressentent une ou plusieurs pathologies parmi cette liste.

Tableau 3 : Prévalence de diverses allergies et maladies dans les immeubles examinés.

	Residentiel	Bureaux
Asthme	10%	10%
Rhume des foins	20%	20%
Rhinite allergique	40%	30%
Eczéma	30%	20%
Autres pb. de peau	20%	10%
Bronchite	30%	
Respiration sifflante	20%	
Autres pb pulmonaires	20%	Pas demandé
Migraines	30%	
Dermatite	10%	

La prévalence d'allergies telles que rhinite et eczéma, ainsi que des bronchites et des migraines est relativement élevée: 30%, voire 40% de la population déclarent en souffrir. Un des aspects que HOPE tente d'éclaircir est de savoir si l'une ou l'autre de ces pathologies pourrait être due au bâtiment.

9.3 Énergie et bien être

Il faut de l'énergie pour assurer le climat intérieur en toute saison. Si on en manque, c'est inconfortable; mais si on en consomme beaucoup, est-ce plus confortable pour autant ? Il y a-t-il synergie ou antinomie entre la consommation d'énergie et le confort ou la joie de vivre ?

Une journée d'absence (environ 400.-) coûte de deux à huit fois plus cher que le coût annuel du chauffage de la place de travail (environ 50.- à 200.-). De ce fait, le maître de l'ouvrage est

prêt à acquérir de coûteuses installations de conditionnement et à dépenser de l'énergie pour améliorer les conditions de travail.

9.3.1 Variations dans un échantillon observé

Lors de l'enquête la plus récente, on a observé les variations du Tableau 4 parmi les 100 résidences et 60 bureaux inspectés.

Tableau 4: Variations des paramètres importants dans les bâtiments observés.

	Résidentiel			Administratif		
	Moyenne	90% de	à	Moyenne	90% de	à
BSI	0.52	0.1	0.8	1.92	1.0	3.0
Confort	2.08	1.5	2.9	3.32	2.9	3.8
Énergie	182	74	334	221	100	356

Les écarts entre les pires et les meilleurs sont très grands en ce qui concerne le syndrome du bâtiment malsain et la consommation d'énergie. Ils sont moins grands en ce qui concerne le confort ressenti.

L'indice de dépense d'énergie des bâtiments inspectés varie de 150 à plus de 2000 MJ/m². Les mesures effectuées ne montrent pas de différence significative globale de consommation d'énergie selon les systèmes de ventilation (naturelle, mécanique, climatisation), car il existe des immeubles à ventilation naturelle à forte consommation et des bâtiments climatisés à basse consommation (Figure 9.5).

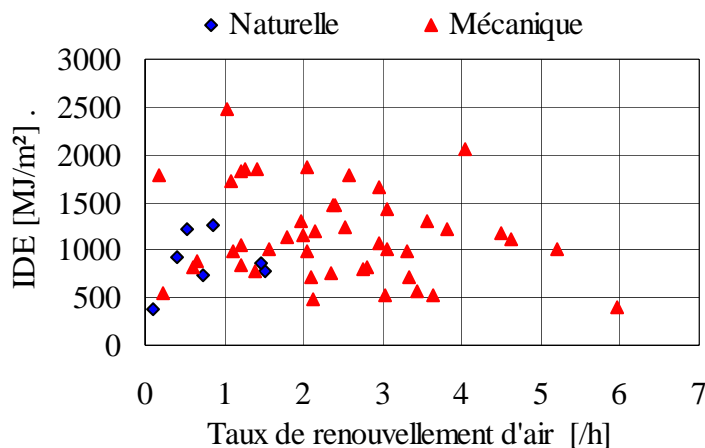


Figure 9.5 : Indice de dépense d'énergie en fonction du taux de renouvellement d'air mesuré dans chaque bâtiment. Les deux classes correspondent aux bâtiments à ventilation naturelle et mécanique.

A isolation et aération égales, l'indice de dépense d'énergie pour le chauffage est proportionnel à la rigueur du climat, exprimée par les degrés-jours de chauffage. En fait, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre la consommation d'énergie et le débit d'air, la température ou le climat (Figure 9.5, Figure 9.6, Figure 9.). La consommation d'énergie dépend donc plus de la manière dont sont construits et exploités les bâtiments que des climats extérieur ou intérieur.

En principe, on dépense de l'énergie pour améliorer le climat intérieur et les conditions de travail. Comme le montre la Figure 9.8, le résultat obtenu dans les bâtiments examinés en Europe est décevant : il y a une corrélation significative positive entre l'indice de dépense d'énergie et le nombre de symptômes ou l'inconfort ressentis; les occupants se sentent mieux dans les bâtiments à basse consommation d'énergie !

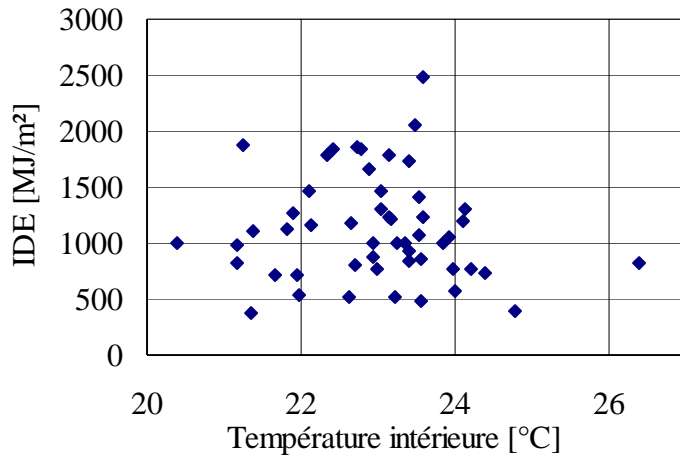


Figure 9.6 : Indice de dépense d'énergie en fonction de la température intérieure.

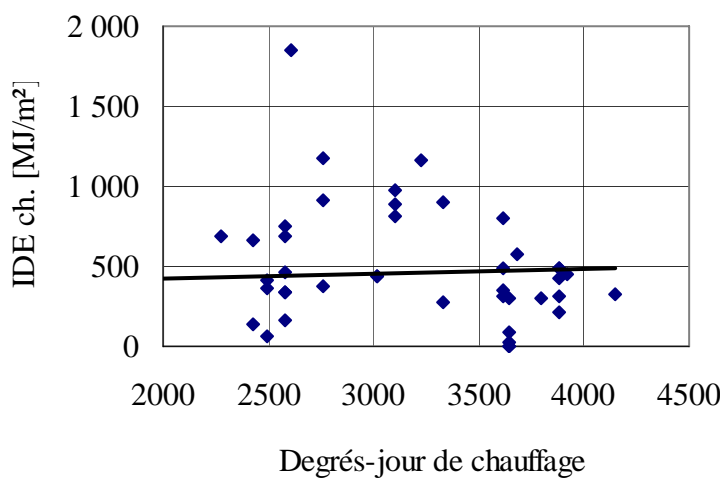


Figure 9.7 : Indice de dépense d'énergie (combustibles seulement) en fonction des degrés-jours de chauffage (rigueur du climat hivernal).

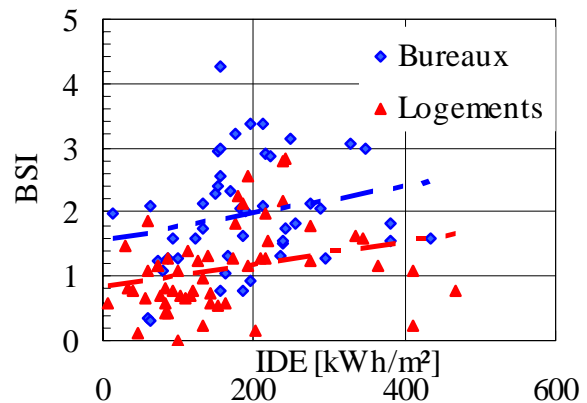
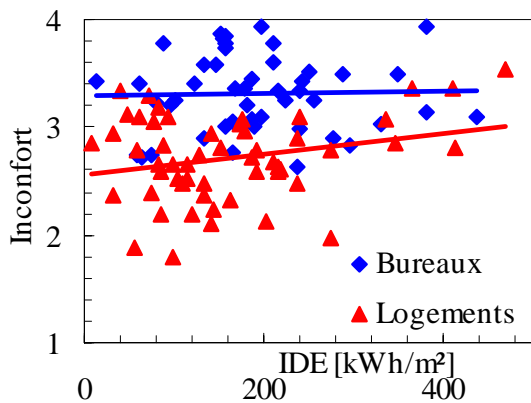


Figure 9.8 : Corrélation entre la consommation d'énergie et le confort ou le BSI.

9.3.2 Pourquoi ce manque de cohérence ?

Nous savons que la consommation d'énergie de chauffage devrait augmenter avec la température intérieure, la rigueur du climat hivernal et le débit d'aération. Par ailleurs, beaucoup d'énergie est dépensée pour améliorer le confort intérieur. Or les observations faites en Europe montrent que d'une part le BSI est plus élevé dans les bâtiments à forte consommation d'énergie, et que d'autre part cette consommation est sans relation avec la température intérieure, la rigueur du climat hivernal et le débit d'aération.

Une première explication est que la manière dont le bâtiment est construit et exploité a plus d'influence sur la consommation d'énergie que les climats intérieur et extérieur, et la campagne de mesure a examiné des bâtiments de tous types, du moins bien au mieux isolé, du plus bâclé au mieux conçu.

Une deuxième explication tient à l'inconfort et aux malaises qui peuvent résulter non seulement d'une température inconfortable, mais aussi d'une humidité ou au contraire d'une sécheresse excessive, d'un éclairage inadéquat ou d'un bruit excessif. D'autres facteurs peuvent influencer le confort. En particulier le stress, qui provient généralement d'insatisfaction au travail, d'une trop haute densité d'occupation, de manque de sphère privée et de contrôle sur l'environnement peut avoir de l'influence sur la santé des occupants. Enfin, la pollution intérieure qui résulte de mauvais entretien, d'humidité excessive et/ou d'une aération insuffisante peut causer des affections morbides.

Le résultat illustré dans la Figure 9.8 n'est en fait pas surprenant : on peut s'attendre à ce qu'un bâtiment mal conçu et médiocrement exploité soit moins sain et consomme plus d'énergie qu'un bâtiment bien conçu et exploité avec compétence. Il est aussi possible que l'on cherche à compenser les plaintes exprimées dans les bâtiments à problèmes en augmentant la température de chauffage, ce qui augmente la consommation.

9.3.3 Comment améliorer le bien être ?

Un des objectifs des professionnels du bâtiment et des occupants est de limiter autant que possible les causes de malaise. En fait, dans l'idéal, le bâtiment devrait être non seulement pas malsain, mais encore parfaitement sain, apportant de la joie de vivre à ses occupants.

Les occupants ont rarement la possibilité d'agir sur leur environnement de travail (température, aération, ouverture des fenêtres, etc.), et ceci est ressenti négativement (Figure 9.9). Une amélioration de cette situation permettrait de diminuer le nombre relativement élevé de symptômes liés au lieu de travail qui ont été observés.

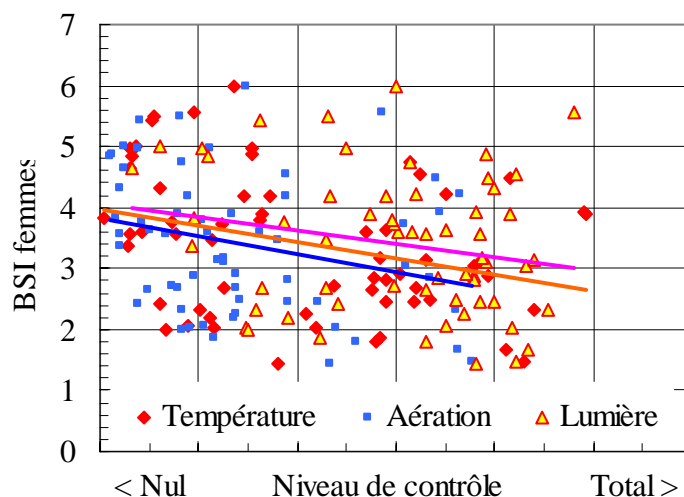


Figure 9.9 : Le BSI diminue lorsque les occupants ont l'impression de contrôler leur environnement. Le niveau de contrôle représente l'opinion des occupants relative à l'impression de contrôler leur environnement.

Dans des bâtiments de bureau examinés, on a observé une relation significative entre le pourcentage des occupants déclarant ouvrir la fenêtre et le nombre moyen de symptômes ressentis par ces mêmes occupants (Figure 9.10). Apparemment, les occupants acceptent difficilement de ne pas avoir la possibilité d'ouvrir la fenêtre. Ils expriment consciemment ou inconsciemment ce mécontentement en ressentant des symptômes du syndrome du bâtiment malsain.

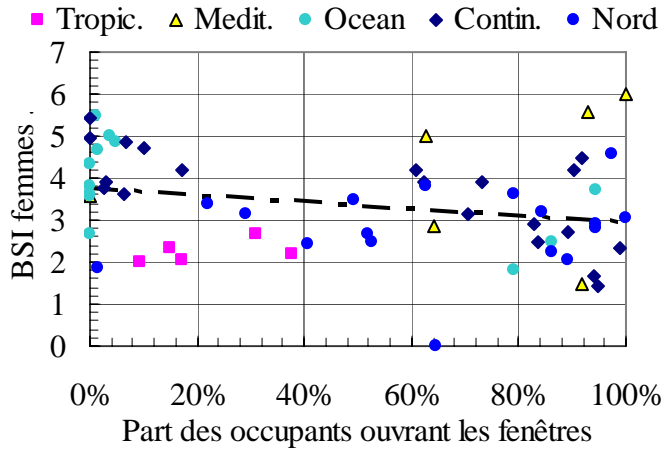


Figure 9.10 : Le BSI diminue légèrement lorsque les occupants ont la possibilité d'ouvrir les fenêtres. C'est d'ailleurs une forme de contrôle sur l'environnement.

La pente serait plus forte si on ne tenait pas compte des bâtiments situés en pleine ville d'Athènes.

Le BSI augmente avec le nombre de personnes par bureau (Figure 9.11). Les bureaux paysagers semblent moins bien acceptés par les occupants que les bureaux individuels.

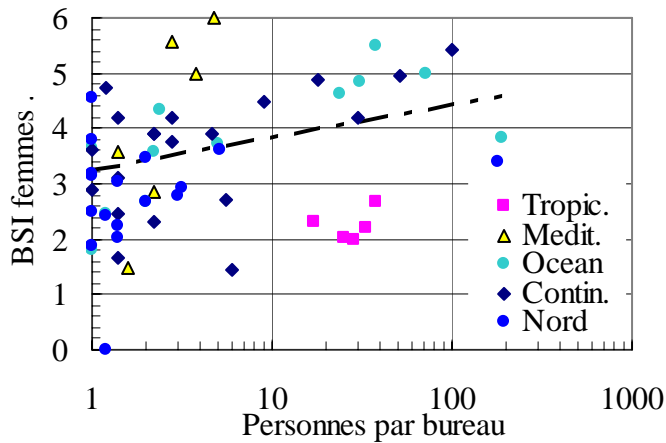
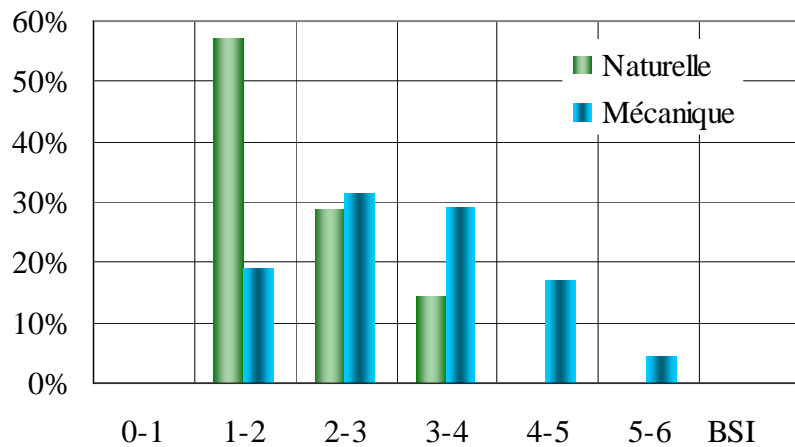


Figure 9.11 : BSI en fonction du nombre de personnes par bureau.

Quoique les BSI les plus élevés soient observés dans les bâtiments à ventilation mécanique (systèmes à air pulsé seulement ou à double flux), les BSI bas s'observent également dans les deux types de bâtiments (Figure 9.12). Il est donc possible d'assurer la santé des habitants avec les deux systèmes de ventilation.

Figure 9.12 : BSI des occupants aérés par ventilation mécanique ou naturelle.



9.3.4 Les "bons" et les "méchants"

Chaque bâtiment peut être représenté par un point dans un espace à plusieurs dimensions, par exemple bien être, confort, consommation d'énergie. L'ensemble des bâtiments forme un nuage de points, qui se trouve allongé le long d'un « axe du bien et du mal » allant des bâtiments inconfortables, à haute consommation d'énergie et nombreux symptômes aux bâtiments sains, confortables et à haute consommation d'énergie (Figure 13). On voit qu'il existe des bâtiments bons sous tous rapports, et d'autres qui sont mauvais sous tous les aspects. On trouve cependant aussi des bâtiments malsains mais confortables et à basse consommation, et des bâtiments sains, inconfortables et à haute consommation.

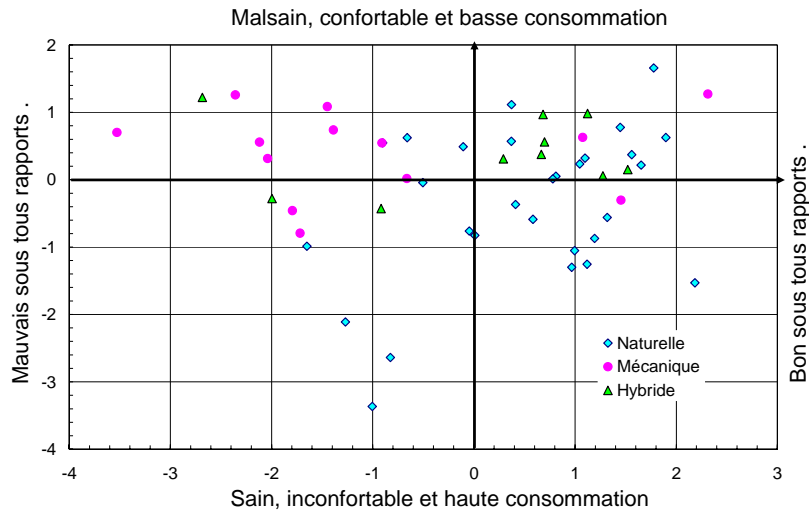


Figure 13: Représentation des bâtiments résidentiels le long de "l'axe du bien".

La question est donc "qu'est-ce qui fait que des bâtiments sont bons sous les trois aspects, ou, à l'autre extrémité, pourquoi certains bâtiments sont moins bons sous ces mêmes aspects." Nous avons sélectionné, dans chaque catégorie (bureaux et logements), 10 à 12 bâtiments parmi les meilleurs et le même nombre parmi les moins bons.

Tableau 5: Caractéristiques des bâtiments sélectionnés comme "bons" et "mauvais"

	Bureaux		Logements	
	Bon	Mauvais	Bon	Mauvais
Nb. de bâtiments	11	12	10	11
BSI	0.8	2.1	0.5	1.8
kWh/m ²	136	225	105	263
Confort	3.0	3.8	2.3	2.9
Allergies	0.6	1.0	1.8	3.5

Les caractéristiques moyennes de ces 4 groupes de bâtiments sont données dans le Tableau 5. On voit que le BSI varie d'un facteur 3, la consommation d'énergie d'un facteur 2 environ. Par contre le confort ressenti passe de presque satisfaisant à médiocre dans les bureaux et de assez satisfaisant à presque satisfaisant dans les logements.

Il faut rappeler qu'il n'y avait pas, dans l'échantillon observé, de bâtiment malsain. Les "bons" bâtiments sont meilleurs que les "mauvais", mais ces derniers ne sont pas franchement mauvais.

Les différences significatives (qui ne sont pas dues au hasard) entre les groupes sont les suivantes:

- Les bons bâtiments sont généralement plus récents que les vieux. C'est essentiellement du au fait qu'on trouve difficilement des bâtiments à basse consommation d'énergie construit avant 1980.
- La surface allouée à chaque occupant est presque deux fois plus grande dans les bons bâtiments que dans les moins bons.
- La hauteur de plafond est plus grande dans les bons bâtiments.
- Le nombre de bâtiments dans lesquels on a pensé à optimiser l'éclairage naturel est plus grand dans les bons, et le nombre de ceux pour lesquels on n'a pas optimisé l'éclairage naturel est plus grand parmi les « mauvais »
- En ce qui concerne la production d'eau chaude, on trouve les rares bâtiments avec installation solaire parmi les bons bâtiments.

La majorité des bons bâtiments ont une ventilation naturelle, alors que la majorité de mauvais ont une ventilation mécanique. Il faut toutefois remarquer qu'on trouve des bâtiments à ventilation mécanique parmi les bons, et des bâtiments à ventilation naturelle parmi les mauvais. On pourrait penser qu'une réaction rapide aux plaintes des occupants devrait améliorer la situation, mais on ne remarque pas de différence significative à ce sujet entre les deux groupes.

9.3.5 Conclusions

On peut déduire de ces résultats les conclusions suivantes:

- On observe de corrélations entre bien être (BSI) et confort ressenti, ce qui peut provenir du fait que ce sont deux manifestations du même bien être. On peut aussi penser que les gens se sentent physiquement et physiologiquement mieux dans un bâtiment confortable.
- Pas de corrélation entre énergie et confort ou BSI. Il n'est donc pas nécessaire de consommer beaucoup d'énergie pour assurer le confort et le bien être des occupants.
- Il existe des bâtiments confortables, sains et à basse consommation. C'est donc possible de les concevoir et de les construire. Dans plusieurs pays, les bâtiments ayant présenté les meilleures performances ont été expressément conçus pour être sains, confortables et à base consommation d'énergie.

10 RÉSUMÉ

10.1 Stratégie

Les études faites dans le cadre de projets de recherches européens (Bluyssen et al., 1995b; Roulet et al., 2005) ont notamment montré que les bâtiments sains, confortables et à basse consommation sont tout d'abord le résultat d'une volonté de la part du maître de l'ouvrage et de l'architecte.

Pour rendre un bâtiment confortable (ce qui est sa mission première), les mesures passives, visant à concevoir le bâtiment pour le rendre naturellement plus confortable, doivent être exploitées autant que possible avant de recourir aux mesures actives qui pallient les insuffisances résiduelles à l'aide d'installations techniques. De toute manière, le bâtiment devrait, lorsque les installations techniques sont déclenchées, être au moins aussi confortable ou pas plus inconfortable que l'extérieur. Les mesures passives sont en effet plus robustes, généralement mieux acceptées et souvent meilleur marché. Ce sont aussi les mesures que l'architecte contrôle le mieux.

Suivant la latitude, des installations techniques restent nécessaires pour rendre le climat intérieur confortable en toute saison, mais les mesures passives en réduisent fortement la taille et l'impact. Le choix des procédés et l'emplacement des installations sont aussi facilités si ces installations n'ont qu'un rôle complémentaire.

10.2 Les comforts

Le *confort thermique* dépend d'abord de chaque individu, en particulier de son habillement et de son activité métabolique. Ceci lui permet de s'adapter à son environnement. L'environnement intérieur doit aussi être adapté aux besoins des occupants, donc à leur habillement et leur activité. Pour cela, il faut assurer une température de l'air et des températures des surfaces environnantes agréables. L'indicateur principal est la température opérative, moyenne pondérée de la température de l'air et des surfaces entourant l'occupant. La vitesse de l'air et son degré de turbulence, ainsi que les gradients de température ont aussi un effet.

Il faut noter que les exigences de confort ne sont pas les mêmes dans les bâtiments complètement conditionnés et dans les bâtiments à ventilation naturelle. Dans ces derniers, les occupants s'adaptent, et tolèrent de plus grandes variations de température que dans les premiers.

Une bonne *qualité de l'air* est obtenue en évacuant les polluants aériens produits par l'activité humaine, les appareils et les matériaux de construction en contact avec l'intérieur. Le débit d'air neuf requis pour remplacer l'air vicié dépend donc de l'intensité des sources de pollution et de la pureté de l'air requise, ainsi que de la qualité de l'air extérieur. Si les occupants sont les seules sources de pollution, le débit d'air nécessaire est compris entre 10 et 40 m³/h dans les zones non fumeurs. Il peut largement dépasser ces valeurs en cas de pollution supplémentaire.

Le *confort visuel* est obtenu en donnant un éclairage adapté à l'activité dans le champ visuel, en évitant des contrastes trop marqués, notamment l'éblouissement. Le spectre de la lumière utilisée doit être continu, et d'une température de couleur adaptée à l'éclairage. L'éclairage naturel est particulièrement confortable, dans la mesure où son intensité est contrôlée.

Le *confort acoustique* nécessite d'une part d'éviter les bruits gênants ou de s'en isoler, de manière à maintenir leur niveau en dessous d'une limite acceptable, et d'autre part à assurer une

ambiance acoustique agréable dans les locaux. Pour cela, il faut notamment éviter une trop grande part de parois réverbérantes (béton, maçonnerie) à l'intérieur.

Le **contrôle** que l'occupant a sur son environnement intervient pour une grande part dans sa satisfaction. Le réglage automatique permet certes d'optimiser le rapport prestation/coût, et son usage se généralise à juste titre, mais l'occupant doit garder la haute main sur les valeurs de consigne.

D'autres paramètres peuvent influencer le bien être des occupants. Les plus évidents sont certainement la dimension et la forme des espaces intérieurs, l'aménagement de ces espaces et le taux d'occupation. L'ambiance sociale a aussi de l'importance : il suffit de penser à l'atmosphère parfois irrespirable et surchauffée des cafés ou des dancings où les clients restent néanmoins volontiers. Enfin, s'il n'est pas prouvé que de faibles champs électromagnétiques, voire d'autres "champs" aient de l'influence, il n'est pas non plus exclu qu'ils en aient ! *"There are more things in heaven and earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy"* (Hamlet. Act I. Sc. 5).

10.3 Santé, confort et consommation d'énergie dans les bâtiments

De l'énergie est utilisée dans les bâtiments pour améliorer le confort (chauffer, refroidir, ventiler, éclairer) et assurer diverses autres prestations (transports, communications, production, etc.). La consommation spécifique (par exemple l'indice de dépense d'énergie) varie fortement d'un bâtiment à l'autre, même à prestations équivalente, mais les bâtiments les plus énergétivores ne sont ni les plus sains, ni les plus confortables, et on trouve des bâtiments sains et jugés confortables parmi les plus bas consommateurs. D'autre part, l'absence de corrélation significative entre la consommation d'énergie et plusieurs facteurs qui devraient la faire varier (climat, débit d'air) montre que d'autres facteurs propres au bâtiment dominent : ce sont l'isolation thermique, le contrôle et l'efficacité de la ventilation, le rendement des installations de chauffage et de climatisation. Ces facteurs peuvent être améliorés sans nuire au bien être de l'occupant, et souvent en améliorant ce bien être.

Le syndrome du bâtiment malsain ou SBS est un ensemble de symptômes atypiques qui augmentent lorsque la personne est dans le bâtiment, mais que ne peuvent pas être attribués à une cause particulière. Actuellement trop d'occupants souffrent d'un ou plusieurs de symptômes du SBS : certains bâtiments rendent malades les plus sensibles de leurs occupants.

Le climat et la consommation d'énergie ne semblent pas avoir un grand effet sur le SBS. Par contre, certains bâtiments sont clairement plus sains que d'autres, ce qui permet de proposer les recommandations suivantes pour améliorer le bien être des habitants (Roulet et al., 2006).

- Suffisamment isoler thermiquement le bâtiment.
- Assurer un éclairage naturel important et un contact avec l'extérieur par des fenêtres suffisamment grandes et bien orientées. Le flux de chaleur et de lumière entrant par ces vitrages doit être contrôlé par des protections solaires efficaces et mobiles.
- Stabiliser le climat intérieur par une construction lourde donnant une inertie thermique suffisante.
- Assurer la qualité d'air requise, notamment en choisissant des matériaux de construction et de revêtement intérieurs propres, en évitant de polluer l'air intérieur par les activités qui y règnent (machines, produits utilisés) et en assurant le débit d'air neuf et propre nécessaire.
- Utiliser autant que possible la ventilation naturelle, éventuellement hybride, en adoptant une architecture qui permette ce type de ventilation.
- Donner aux occupants la possibilité de contrôler leur environnement (thermostats, éclairage, contrôle individuel de la ventilation, ouverture des fenêtres). (Guillemin, 2003) a

montré qu'un contrôleur automatique qui s'adapte aux souhaits des occupants est rapidement adopté, augmente leur confort et leur satisfaction tout en réduisant la consommation d'énergie.

- Éviter les bureaux paysagers, préférer les bureaux cellulaires pour 1 à 4 personnes.

L'amélioration de l'environnement intérieur et du bien être des usagers diminue l'absentéisme et augmente la productivité. Selon Ph. Bluysen⁴, les économies potentielles en Europe qui pourraient résulter d'une amélioration de la qualité des ambiances sont les suivantes (en milliards d'euros ou G€)

Réduction du nombre d'allergies, notamment l'asthme	3 à 6 G€
Réduction du nombre de symptômes du syndrome du bâtiment malsain	15 à 45 G€
Augmentation de la productivité	30 à 240 G€
Prévention des dommages dans les bâtiment et diminution des réparations	10 à 20 G€

A ceci, on peut ajouter une économie de 100 à 200 G€ que l'on pourrait obtenir en adaptant la performance énergétique des bâtiments aux normes actuelles.

⁴ Communication à la conférence EPIC 2002, Lyon.

11 BIBLIOGRAPHIE

Ces notes sont extraites du livre "Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments" publié en 2004 aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes à Lausanne. (Roulet, 2004)

Pour plus d'information sur cet ouvrage, voir <http://ppur.epfl.ch/livres/2-88074-547-0.html>

ASTM, 2000, ASTM E 741-83: Standard test method for determination of air change in a single zone by means of a tracer gas dilution., *in* ASTM, ed., Annual Book of Standards, v. 2000: Philadelphia, PA, ASTM.

Bluyssen, P. M., E. De Oliveira Fernandes, P. O. Fanger, L. Groes, G. Clausen, C.-A. Roulet, C.-A. Bernhard, and O. Valbjorn, 1995a, European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings. Final report of Contract Jou2-CT92-022,, Delft (NL), TNO Bouw.,

Bluyssen, P. M., E. De Oliveira Fernandes, L. Groes, G. Clausen, P.-O. Fanger, O. Valbjorn, C.-A. Bernhard, and C.-A. Roulet, 1995b, European Audit Study in 56 Office Buildings: Conclusions and Recommendations: Healthy Buildings '95, p. 287-292.

Buckley, M., S. Burton, A. Crompton, and J. Daggart, eds., 1991, Architectures solaires en Europe, v. EUR 12 738 FR: Luxembourg, Commission des Communautés Européennes, 150 p.

CEN, 1998., CR 1752, Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment., Brussels, CEN.

Chatelet, A., P. Fernandez, and P. Lavigne, 1998, Architecture climatique, v. 2: Aix-en-Provence, Edisud, 160 p.

CNBE, 1974, Technique de l'éclairage.: Liège, Vaillant-Carman.

de Dear, R. J., and G. S. Brager, 2002, Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55: Energy and Buildings, v. 34, p. 549–561.

Fang, L., G. Clausen, and P. O. Fanger, 2000, Temperature and humidity: Important Factors for Perception of Air Quality and for Ventilation Requirements: ASHRAE Trans., v. 106 P. 2, p. 503-510.

Fanger, P. O., 1982, Thermal Comfort.: Florida, USA, R. E.Krieger.

Fanger, P. O., 1983, Thermal comfort requirements: ICBEM international Conference on Building Energy Management, p. 6.1.

Fanger, P. O., A. K. Melikov, H. Hansawa, and J. Ring, 1988, Air turbulence and the sensation of draught.: Energy and Buildings, v. 12, p. 21-30.

Ganz, C., A. Muller, A. Faist, J.-B. Gay, N. Kohler, C.-A. Roulet, and J.-L. Scartezzini, 1990, Le Soleil - Chaleur et lumière dans le bâtiment., v. Documentation SIA D 056: Zürich, SIA.

Guillemin, A., 2003, Using Genetic Algorithms to Take into Account User Wishes in an Advanced Building Control System, EPFL, Lausanne, 185 p.

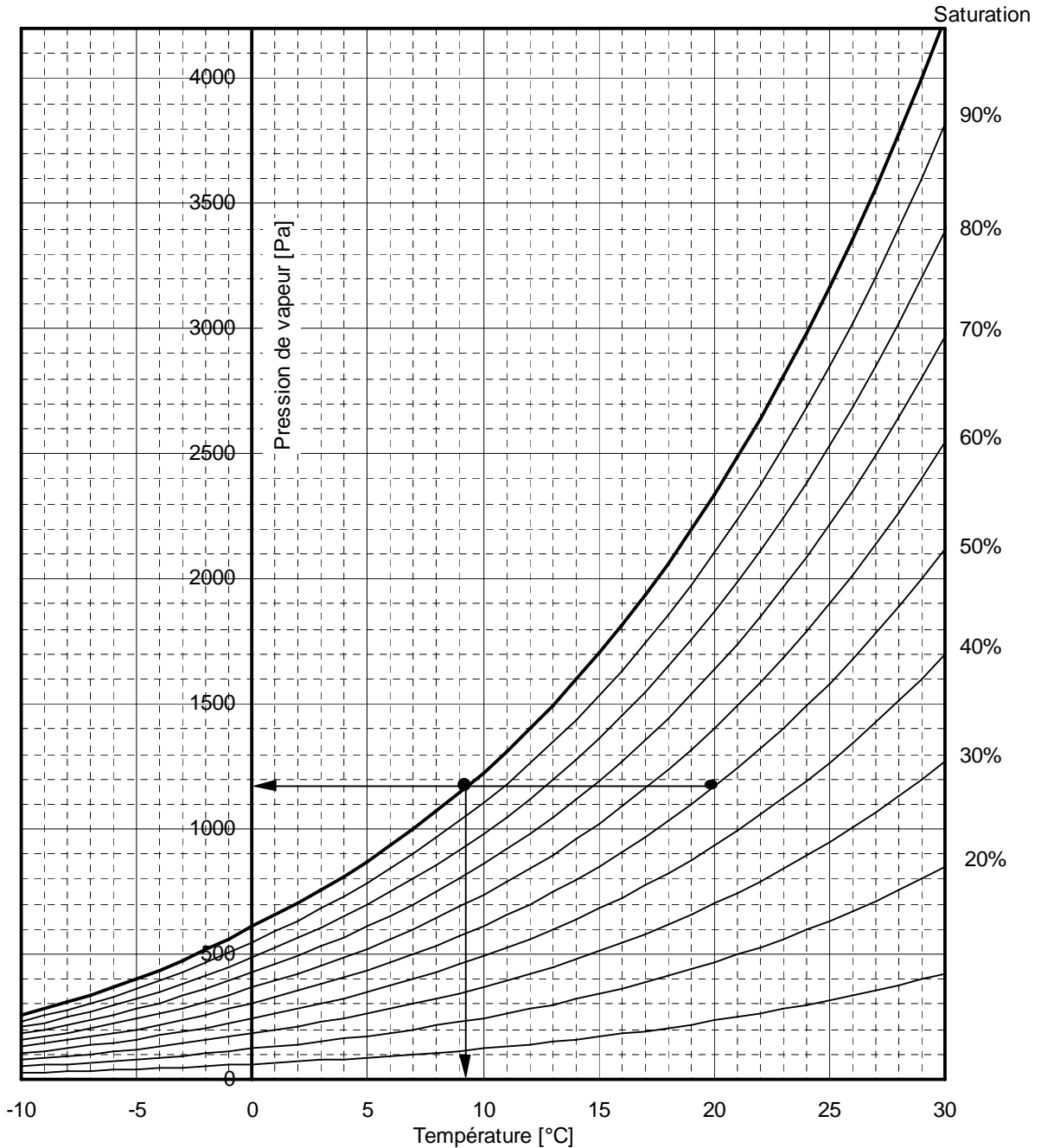
Guillemin, A., and N. Morel, 2002, Experimental Results of a Self-Adaptive Integrated Control System in Buildings: a Pilot Study: Solar Energy, v. 72, p. 397-403.

- ISO, 1993, Norme EN-ISO-7730: Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique., Genève, CEN et ISO.
- Lubkin, V., P. Beizai, and A. Sadun, 2002, The Eye as Metronome of the Body: Survey of Ophthalmology, v. 47, p. 17-25.
- McCartney, K. J., and J. F. Nicol, 2002, Developing an adaptive control algorithm for Europe: Energy and Buildings, v. 34, p. 623–635.
- Morel, N., M. Bauer, M. El-Khoury, and J. Krauss, 2001, NEUROBAT, A Predictive and Adaptive Heating Control System Using Artificial Neural Networks,: International Journal of Solar Energy, v. 21.
- Paule, B., M. Bodart, S. Citherlet, and J.-L. Scartezzini, 1998, "Leso-Dial" Daylighting Design Software: Daylighting'98, p. 29-36.
- Roulet, C.-A., 2004, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments: Lausanne, PPUR, 368 p.
- Roulet, C.-A., F. Foradini, C. Cox, M. Maroni, and E. d. O. Fernandes, 2005, Creating healthy and energy-efficient buildings: lessons learned from the HOPE project Indoor Air, p. Paper 1.6 44.
- Roulet, C.-A., N. Johner, F. Foradini, P. Bluysen, C. Cox, E. d. O. Fernandes, and B. Müller, 2006, Perceived Health and Comfort in Relation with Energy Use and Building Characteristics: Building Research Information, v. 34, p. 467-474.
- Sekhar, S. C., K. W. Tham, and D. Cheong, 1998, Integrated Indoor Air Quality and Energy Audits and Targets of Commercial Air-Conditioned Buildings in Singapore, Singapore, School of Design and Environment, National University of Singapore.
- SIA, 1982, SIA 180/4 L'indice de dépense d'énergie, Zurich, SIA.
- SIA, 1999, SIA 180: Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments, Zurich, SIA.
- SLG, 1992, Handbuch für Beleuchtung: Landsberg, Ecomed Fachverlag.

$$p_{sat} = 610,5 \exp\left(\frac{22,5 \cdot \theta}{273 + \theta}\right)$$

$$p_{sat} = 610,5 \exp\left(\frac{17,27 \cdot \theta}{237,3 + \theta}\right)$$

Diagramme de Carrier



Exemple: L'air à 20°C et 50% d'humidité relative a une pression de vapeur d'eau de 1170 Pa environ; son point de rosée est à environ 9.3°C.

ÉQUATION DE FANGER

La relation entre le PPD et le PMV illustrée dans la Figure 2.5 page 7 est la suivante :

$$PPD = 1 - 0.95 \exp(-0.003353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2)$$

Fanger [1982] a établi une équation prédisant le PMV à partir des paramètres de confort qui sont énumérés ci-dessous:

Paramètres influant le confort thermique.

Température de l'air	θ_a [°C] ou T_a [K]
Température radiante moyenne	θ_{mrt} [°C] ou T_{mrt} [K]
Vitesse relative de l'air.....	v [m/s]
Pression partielle de vapeur d'eau	p [Pa]
Activité métabolique du sujet	M [Watt]
Son travail mécanique fourni.....	W [Watt]
Surface de peau du sujet	A [m ²]
Activité spécifique du sujet	$m = M/A$ [W/m ²]
Son travail spécifique	$w = W/A$ [W/m ²]
La résistance thermique des habits	R [m ² K/W]
ou l'habillement.....	[Clo] = $R/0.155$
La fraction de la surface habillée	f

L'équation de Fanger est donnée ci-dessous. Dans cette équation, toutes les variables sont exprimées en unités SI.

$$PMV = (0.303 \exp(-0.036 m) + 0.028) \\ [m-w - 0.00305 (5733 - 6.99 (m-w) - p) - 0.42 (m-w - 58.15) \\ - 0.000017 m (5867 - p) - 0.0014 m (307 - T_a) - F]$$

où la fonction d'habillement F est donnée par :

$$F = 3.96 \cdot 10^{-8} f(T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) + f h (T_{cl} - T_a)$$

Pour le coefficient h de transfert thermique des habits, on prend celle des deux expressions ci-dessous qui donne la valeur la plus grande :

$$h = 2.38 (T_{cl} - T_a)^{1/4} \quad \text{ou} \quad h = 12.06 \sqrt{v}$$

La température (absolue) des habits T_{cl} est donnée en résolvant l'équation implicite :

$$T_{cl} = 308.9 - 0.028 (m - w) - R F$$

La fraction de surface habillée f peut être estimée par :

$$f = 1.00 + 1.290 R \quad \text{si } R < 0.078 \text{ m}^2 \text{ K/W} \\ f = 1.05 + 0.645 R \quad \text{si } R > 0.078 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$