1996 724.217 F

Architecture climatique équilibrée

Conception
démarche
dimensionnement

PACER
Office fédéral
des questions
conjoncturelles

Architecture climatique équilibrée
Conception, démarche et dimensionnement

Mieux connaître l'influence du climat et du site sur le bâtiment et son confort.

Jouer avec le soleil pour faire pénétrer sa lumière et son énergie profondément dans le bâtiment en hiver et se protéger de sa chaleur en été.

Permettre une meilleure adéquation du projet à la nature et aux vœux du maître de l'ouvrage.

Tels sont les thèmes principaux de ce cours dont le but est, par une meilleure compréhension de quelques principes énergétiques fondamentaux, de donner à l'architecte une plus grande liberté.

Il peut alors, dès les premières esquisses, choisir librement sa stratégie pour intégrer naturellement son projet dans le site et utiliser au mieux l'énergie solaire passive.

Les conséquences naturelles de cette démarche seront un confort accru pour l'utilisateur, une meilleure qualité d'éclairage de l'espace intérieur, une économie d'énergie et d'exploitation et la bonne conservation du bâtiment dans le temps.

ISBN 3-905232-51-0

1996, 190 pages
N° de commande 724.217 f

PACER

Architecture climatique équilibrée

Conception, démarche et dimensionnement

Programme d'action PACER – Energies renouvelables
Office fédéral des questions conjoncturelles

Groupe de travail
- J.-L. Badoux,1095 Lutry
- D. Chuard, Sorane SA, 1018 Lausanne
- J.-P. Eggimann, EPFL–LESO, 1015 Lausanne
- C. Scaler, 1246 Corsier-Village

Directeur du cours
- J.-P. Eggimann, EPFL–LESO, 1015 Lausanne

Mise en pages, photocomposition et flashage
- DAC, 1006 Lausanne
- City Comp SA, 1110 Morges

Associations de soutien

SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes
ASIC Association suisse des ingénieurs-conseils

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, 1996.
Reproduction d'extraits autorisée moyennant l'indication de la source.
Diffusion: Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N°724.217 f).

Form. 724.217 f 4.96 500 xxxx

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le Programme d'action « Construction et Energie » se compose des trois programmes d'impulsions suivants :

PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions
RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité
PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Ils doivent favoriser une croissance économique qualitative et, par là, conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Jusqu'ici, si l'on fait abstraction du potentiel hydroélectrique, la contribution des énergies renouvelables à notre bilan énergétique est négligeable. Aussi le programme PACER a-t-il été mis sur pied afin de remédier à cette situation. Dans ce but le programme cherche :
- à favoriser les applications dont le rapport prix/performance est le plus intéressant ;
- à apporter les connaissances nécessaires aux ingénieurs, aux architectes et aux installateurs ;
- à proposer une approche économique nouvelle qui prenne en compte les coûts externes ;
- à informer les autorités, ainsi que les maîtres de l'ouvrage.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Le programme PACER se consacre, en priorité, à la formation continue et à l'information. Le transfert de connaissances est basé sur les besoins de la pratique. Il s'appuie essentiellement sur des publications, des cours et d'autres manifestations. Les ingénieurs, architectes, installateurs, ainsi que les représentants de certaines branches spécialisées, en constituent le public cible. La diffusion plus large d'informations plus générales est également un élément important du programme. Elle vise les maîtres de l'ouvrage, les architectes, les ingénieurs et les autorités.

Le bulletin « Construction et Energie », qui paraît trois fois par an, fournit tous les détails sur ces activités. Ce bulletin peut être obtenu gratuitement sur simple demande. Chaque participant à un cours ou autre manifestation du programme reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action « Construction et Energie » EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés ; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités. Pour la préparation de ces activités une direction de programme a été mise en place ; elle se compose du Dr Jean-Bernard Gay, du Dr Charles Filleux, de M. Jean Graf, du Dr Arthur Wellinger ainsi que de Mme Irène Wuillemin et de M. Eric Mosimann de l'OFQC. La préparation des différentes activités se fait au travers de groupes de travail, ceux-ci sont responsables du contenu de même que du maintien des délais et des budgets.

Documentation

Un bâtiment réussi est un bâtiment adapté au site, au climat et aux vœux du maître de l'ouvrage. L'architecte joue alors le rôle central.

Ce document, qui a pour but d'apporter des connaissances et des outils utiles à l'architecte dès la phase de l'avant-projet, est divisé en quatre parties:
a) Les premiers chapitres analysent l'environnement et le programme du projet.
b) Le chapitre 5 présente les principes de base du concept énergétique.
c) Le chapitre 6 montre comment, en fonction de la stratégie choisie par l'architecte, analyses et principes s'intègrent dans la démarche architecturale.
d) Les annexes (chacune liée à un chapitre) comprennent de manière plus détaillée les outils présentés dans les chapitres.

Cette publication est complémentaire aux documents PACER «Soleil et architecture – Guide pratique pour le projet» (1991) et «Energies renouvelables et architecture – Questions en relation avec le projet – Guide» (1996).

Le présent document a fait l'objet d'une procédure de consultation, il a également été soumis à l'appréciation des participants au premier cours pilote. Ceci a permis aux auteurs d'effectuer les modifications nécessaires, ceux-ci étant toutefois libres de décider des corrections qu'ils souhaitaient apporter à leur texte. Des améliorations sont encore possibles et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement auprès de l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Pour terminer nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente publication

Office fédéral des questions conjoncturelles
Service de la technologie
Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

Table des matières

1. Introduction 7

2. Analyse du site 9
2.1 Introduction 10
2.2 Température 14
2.3 Ensoleillement (sans ombre) 16
2.4 Ombre de l'environnement lointain 19
2.5 Ombre d'objets proches 21
2.6 Ombre propre 25
2.7 Vent 28
2.8 Analyse globale 35
2.9 Références 36

3. Analyse du programme 37
3.1 Introduction 38
3.2 Confort hygrothermique 40
3.3 Aération 45
3.4 Confort visuel 46
3.5 Charges internes, gains internes 49
3.6 Références 52

4. Performances 53
4.1 Introduction 54
4.2 Performances énergétiques, règlements 56
4.3 Performances économiques : prix et coûts de l'énergie 59
4.4 Performances de confort 60
4.5 Performances d'éclairage naturel 61
4.6 Références 62

5. Concept énergétique : principes 63
Période froide (hiver)
5.1 Capter le soleil 66
5.2 Stocker la chaleur 74
5.3 Distribuer la chaleur 80
5.4 Conserver la chaleur 86
Période chaude (été)
5.5 Minimiser les gains solaires 96
5.6 Ventilation naturelle 106
5.7 Déphasage des gains et ventilation nocturne 116
5.8 Eclairage naturel 118
5.9 Références 127

6. Démarche et stratégie 129
6.1 Démarche 130
6.2 Stratégie 130

A. Annexes **139**

A1 Bibliographie **141**

A2 Analyse du site **145**
A2.1 Régions climatiques de la Suisse 146
A2.2 Variation de la température moyenne en fonction de la région climatique et de l'altitude 148
A2.3 Variation du rayonnement global horizontal en fonction de la région climatique et de l'altitude 151
A2.4 Course solaire en projection cylindrique 154
A2.5 Course solaire en projection stéréographique 155
A2.6 Course solaire: valeurs numériques 156
A2.7 Cadran solaire 157
A2.8 Calculateur d'ombre en projection cylindrique 158
A2.9 Calculateur d'ombre en projection stéréographique 159
A2.10 Logiciel de calcul METEONORM'95 160
A2.11 Etude d'ensoleillement avec le logiciel AUTOCAD 162
A2.12 Etude d'ensoleillement avec le logiciel ARCHICAD 164

A4 Performances **167**
A4.1 Logiciels de calcul selon les normes et recommandations 168
A4.2 Logiciel de calcul LESOSAI 4.0 170

A5 Concept énergétique: principes **173**
A5.1 Shed sud – Tracé régulateur 174
A5.2 Logiciel de calcul DIAS 176
A5.3 Abaques eau chaude solaire 178
A5.4 Effet de cheminée 179
A5.5. Température d'un espace tampon 180
A5.6 Ventilation et vent: méthode 182

1. Introduction

Ce cours s'adresse aux architectes praticiens et souhaite leur apporter des connaissances et des outils de travail simples et performants qui leur permettront d'intégrer dès la conception du projet les composantes climatiques du lieu d'implantation de la future construction.

La prise en compte en amont de ces éléments devrait être pour le praticien un réflexe naturel tel le skieur qui « négocie » les obstacles avec plus ou moins de dextérité.

Si l'on se réfère au célèbre dessin du Corbusier désignant la journée solaire de 24 heures comme étant la clé de l'architecture et de l'urbanisme, et si on lui superpose le temps réel d'occupation du logement, on s'aperçoit que certaines pièces parmi les plus utilisées, hors du week-end, entre le lever et le coucher du soleil, et qui pourraient donc entretenir un rapport privilégié avec la lumière et le climat, sont celles que l'on relègue au cœur du bâtiment où elles sont réduites à une stricte fonctionnalité, définitivement inaptes à offrir un cadre plaisant aux activités qui s'y déroulent.

L'enseignement que nous apporte l'étude de l'architecture vernaculaire, par exemple, est sa réponse aux contraintes propres au lieu, que ce soit en montagne ou dans les climats désertiques. La récente période, dite « technologique » ou de l'architecture « internationale » a fait abstraction de l'environnement avec les conséquences que l'on connaît.

La prise en compte des apports et contraintes de l'environnement ne fait qu'enrichir l'élaboration du projet et l'harmoniser avec les activités qu'il abritera. Cela se traduit par le bien-être accru des utilisateurs et par la bonne résistance du bâtiment aux sollicitations extérieures. L'organisation de l'espace se fera tant en fonction du soleil et de la lumière, de l'exposition aux vents dominants ou thermiques saisonniers, de la topographie du terrain, de la vue, des nuisances phoniques, etc., que du programme fourni par le maître de l'ouvrage.

L'économie d'énergie n'est pas le but premier recherché dans ce cours: elle en sera la conséquence naturelle d'une réponse adéquate au programme, au climat et à l'environnement.

L'ambition de ce cours est de stimuler l'architecte à être curieux et intéressé par son environnement. L'architecture climatique équilibrée a longtemps été vue comme une caricature appelée « architecture

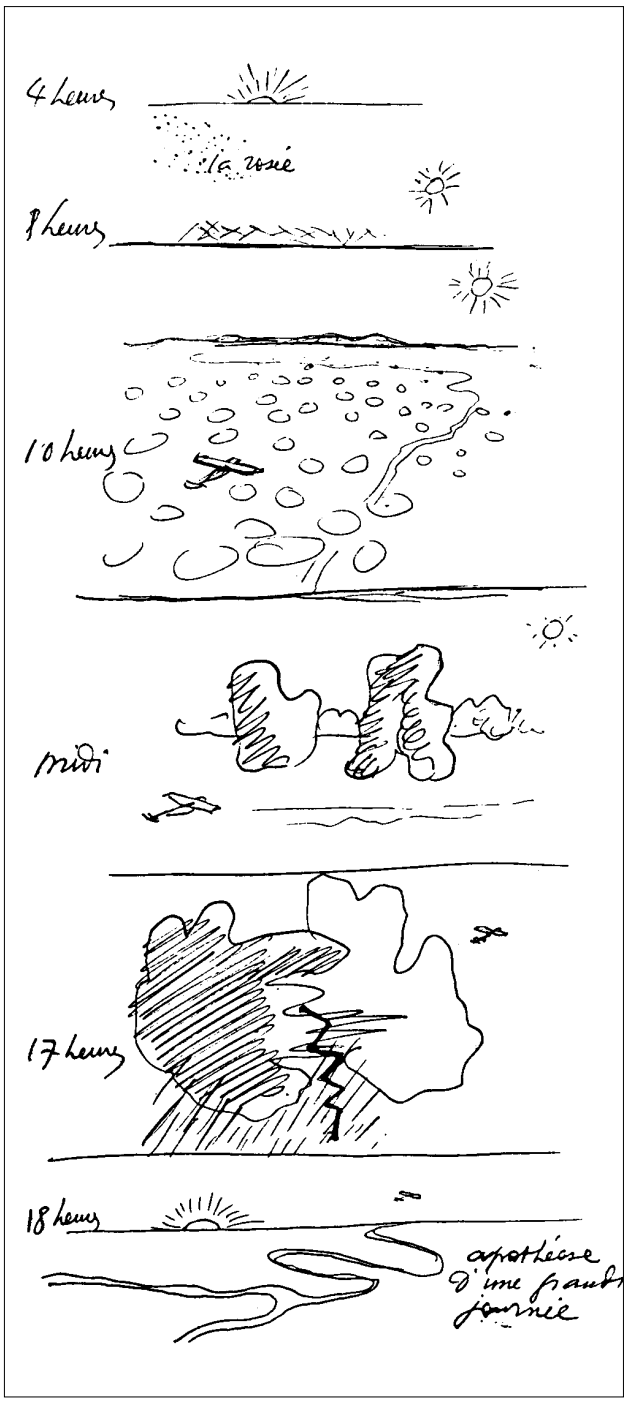


Figure 1.1: Une grande journée [Le Corbusier, la ville radieuse, Editions de l'architecture d'aujourd'hui, Boulogne, 1936 (?)].

solaire » exprimée par des capteurs à 45° d'inclinaison, la façade sud vitrée et la façade nord hermétiquement fermée. Cette simplification extrême s'est traduite par un regrettable refus généralisé des architectes de considérer les facteurs climatiques lors de la conception du projet de manière plus pertinente.

Les données climatologiques et environnementales doivent s'intégrer naturellement à la démarche du projet. L'objectif de ce cours est d'acquérir une notion de démarche par:

- la compréhension du phénomène de base;
- l'intégration du climat et de la topographie dans la projètation par l'analyse conjuguée du site et du programme;
- apprendre à faire des choix en hiérarchisant les priorités;
- échapper aux normes purement restrictives et à
- la stratégie de la formalisation.

Cette démarche plus complète intégrée au processus du projet (figure 1.2) se traduira par un confort accru de l'utilisateur, par une qualité d'éclairage de l'espace intérieur, par l'économie de l'exploitation et la bonne conservation du bâtiment dans le temps.

Si ce cours apporte les connaissances et outils qui donneront à l'architecte la liberté souhaitée pour la réalisation de bâtiments conceptuellement intégrés en harmonie avec le programme et le climat, il aura atteint son but.

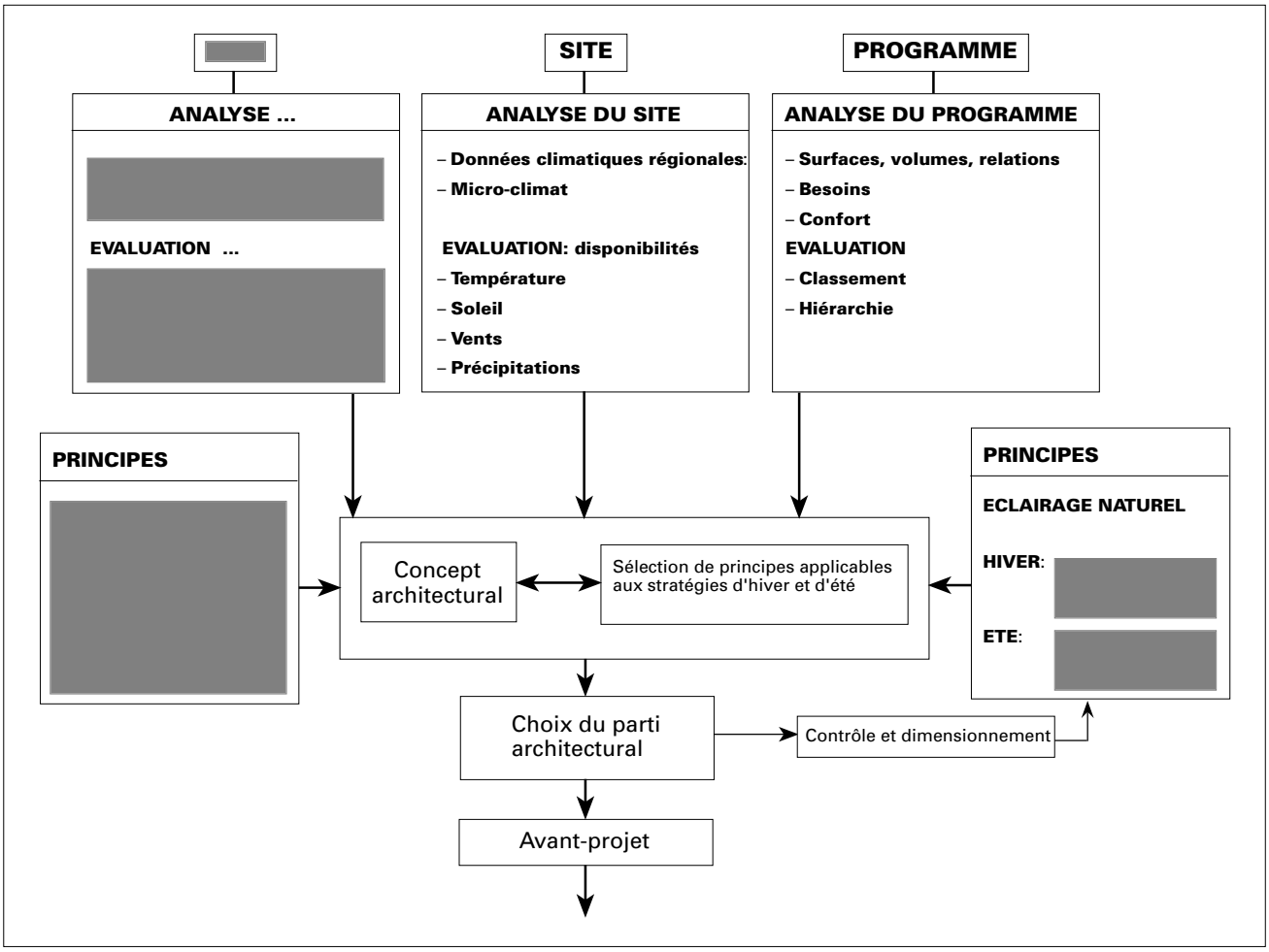


Figure 1.2: Représentation schématique de la démarche proposée.

2. Analyse du site

2.1	**Introduction**	**10**
2.2	**Température**	**14**
2.3	**Ensoleillement (sans ombre)**	**16**
2.4	**Ombre de l'environnement lointain**	**19**
2.5	**Ombre d'objets proches**	**21**
2.6	**Ombre propre**	**25**
2.7	**Vent**	**28**
2.8	**Analyse globale**	**35**
2.9	**Références**	**36**

2.1 Introduction

La première découverte du site, pour lequel l'architecte élabore son projet, est subjective. Il appréciera plus ou moins la vue, la végétation et les constructions qui entourent son site, les routes qui passent à proximité, etc.

La prise en compte de tous ces points est fondamentale pour la bonne intégration de son projet, mais ils ne sont pas suffisants.

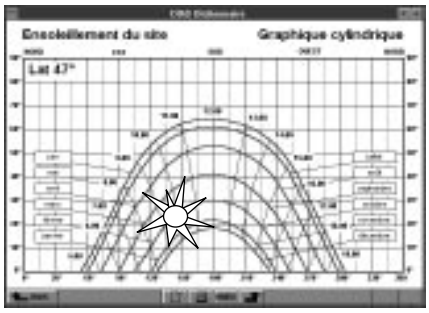
Il est tout aussi essentiel que le climat soit intégré à son projet.

Ce chapitre se consacre à la réunion des données climatiques qui permettront ensuite de choisir une stratégie énergétique qui sera adaptée au site.

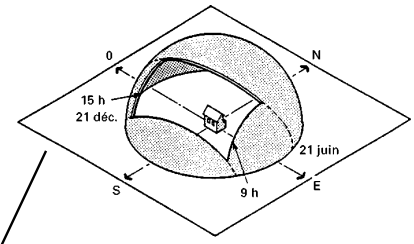
Règles

- Les données climatiques principales se déterminent progressivement en commençant au niveau de la région climatique pour finir au niveau du site.
- Les données des mois de janvier et de juillet sont en générales suffisantes pour l'élaboration du projet.
- Si la température moyenne de janvier est inférieure à 0°C, on isolera le bâtiment avec soin. Si la température de juillet est supérieure à 20°C, on prendra des précautions (protections solaires, ventilation nocturne) pour éviter les risques de surchauffes.
- Si la « fenêtre solaire » du site est dégagée (pas d'ombre provenant d'obstacles plus élevés que 10° entre le SE et le SW), le site est très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire.
- Déterminer les vents dominants (direction, force, régularité) sur le site. S'en protéger en hiver et les utiliser en été pour la ventilation naturelle.

Soleil
Chapitre 2.3
Page 16

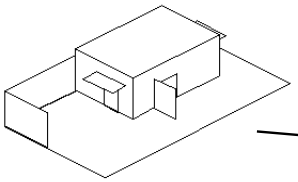


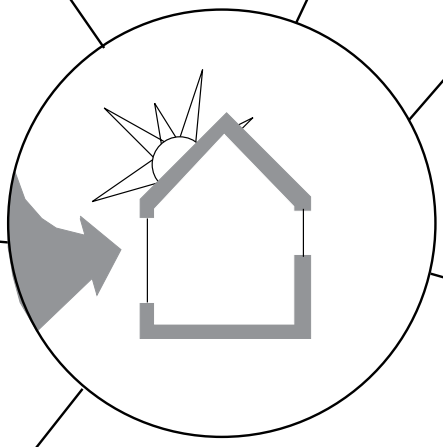
Ombre de l'environnement lointain
Chapitre 2.4
Page 19



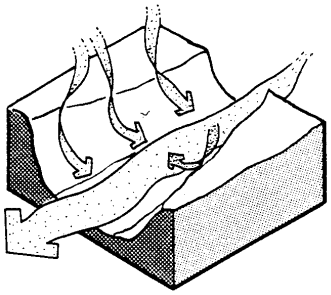
Ombre d'objets proches
Chapitre 2.5
Page 21

Ombre propre
Chapitre 2.6
Page 25





Vent
Chapitre 2.7
Page 28
(voir aussi chapitre 5.6)



Température
Chapitre 2.2
Page 14

Quelles données dans quel but ?

On compte en Suisse environ une centaine de stations météorologiques, exploitées par l'institut suisse de météorologie (ISM), mesurant les données suivantes :

- température ;
- humidité relative ;
- durée d'insolation ;
- rayonnement global horizontal ;
- nébulosité ;
- force du vent ;
- direction du vent ;
- précipitations ;
- pression atmosphérique.

Ces données sont généralement disponibles sous forme de moyennes mensuelles. Pour plus d'une vingtaine de stations, on peut également obtenir des valeurs horaires.

L'interaction de chacune de ces données avec le bâtiment est très différente et seulement une petite partie de ces informations sont nécessaires à l'architecte.

La température de l'air extérieur est de première importance. La durée de l'hiver y est étroitement liée. De sa valeur moyenne dépend l'importance de l'isolation thermique. En fonction de ses valeurs extrêmes, hivernales ou estivales, on dimensionnera le chauffage et le rafraîchissement, naturel ou non.

L'ensoleillement du site est tout aussi important. En fonction du soleil, le bâtiment s'ouvrira sur l'extérieur ou s'en protégera. Sa régularité aura une influence sur le chauffage.

Par la lumière qu'il apportera, c'est le soleil qui créera l'ambiance du bâtiment. De plus, l'éclairage naturel pourra contribuer à une part importante des besoins en lumière, réduisant ainsi la consommation d'électricité.

Bien que moins important, du point de vue de la consommation d'énergie, l'influence du vent n'est pas à négliger. Une conception judicieuse permettra de s'en protéger en hiver et d'en bénéficier en été.

Les précipitations sont d'une importance secondaire. On s'en protégera en hiver comme en été. La description de leur utilisation, par exemple pour l'arrosage, les WC ou les nettoyages ne fait pas partie de cet ouvrage.

Dans la phase de concept, l'humidité relative a peu d'importance, surtout sous nos climats.

Quant à la pression atmosphérique, elle n'a aucun rôle sur les performances du bâtiment.

Climat

Toutes les données climatiques varient dans l'espace et dans le temps.

La Suisse est à la frontière entre une zone à climat océanique et une zone à climat continental. Mais, vu sa petite taille, le climat d'un lieu ne dépend presque pas de ses coordonnées géographiques (latitude et longitude).

Les chaînes de montagne ont une tout autre influence. Ce sont donc principalement les Alpes, et secondairement le Jura, qui délimitent les régions climatiques suisses (annexe 2.1).

La détermination des données climatiques se fait d'abord à l'échelle mésoclimatique ou régionale, ensuite on effectue des corrections microclimatiques (altitude, situation locale) et finalement des corrections pour le site lui-même (tableau 2.1.1).

La connaissance de l'évolution journalière d'une donnée climatique est aussi importante puisque son amplitude est en général aussi élevée que la variation annuelle et plus élevée que la variation spatiale.

Les données sur l'ensemble d'une saison ou de l'année sont nécessaires pour évaluer les performances énergétiques globales du bâtiment.

Source de données

Divers logiciels et normes [1 à 7] permettent également de calculer le climat local. Certains sont aussi capables de déterminer l'ensoleillement d'une fenêtre en tenant compte de l'ombrage.

Par exemple, le logiciel METEONORM [7] (annexe 2.10) permet d'obtenir directement la température et le rayonnement pour chaque lieu de Suisse, défini par ses coordonnées topographiques X et Y ou la commune et l'altitude.

	Température	Ensoleillement	Vent
Variation spatiale:			
– région	*	*	*
– altitude	* * *	* *	*
– situation locale	* * *	–	* * * *
– site	*	* * * *	* * *
– orientation	–	* * *	* * *
Variation temporelle:			
– annuelle	* * *	* *	–
– nycthémérale	* * *	* * * *	* *

–	= très faible
*	= faible
* *	= moyenne
* * *	= importante
* * * *	= très importante

Tableau 2.1.1: Importance des variations des données climatiques de base en fonction de l'échelle d'observation. La variation nycthémérale désigne la variation entre le jour et la nuit.

2.2 Température

Température moyenne de l'air

Pour connaître la température moyenne de l'air extérieur, on applique la démarche décrite au chapitre 2.1.

La température moyenne correspondant à la région et à l'altitude du site se lit à la figure 2.2.1 ou à l'annexe 2.2 (pour toutes les régions climatiques de Suisse).

On corrige ensuite cette température en fonction de la situation locale. Mais chaque situation locale est particulière. De multiples phénomènes, par exemple une dépression du relief (figure 2.2.3), en influencent la température. Le tableau 2.2.2 en donne le résumé.

Par exemple pour obtenir la température moyenne de janvier à Ouchy (Lausanne, bord du lac, 375 m):

- température à 375 m dans la région climatique bassin lémanique: 1,0°C;
- correction de température pour situation au bord de lac: + 1,2°C;
- température à Ouchy: 1,0 + 1,2 = 2,2°C.

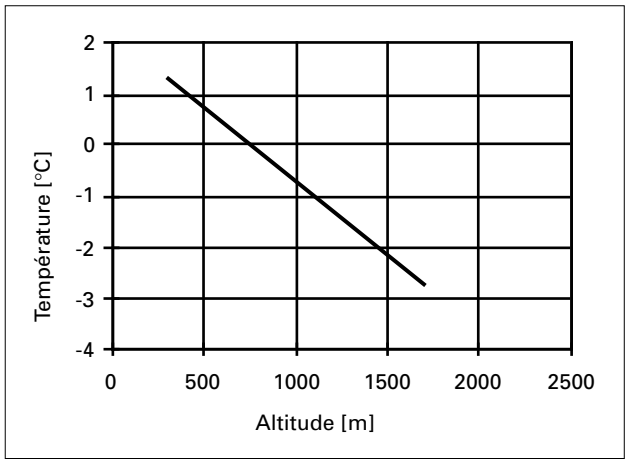


Figure 2.2.1a: Variation de la température du mois de janvier en fonction de l'altitude dans le bassin lémanique et le Jura vaudois.

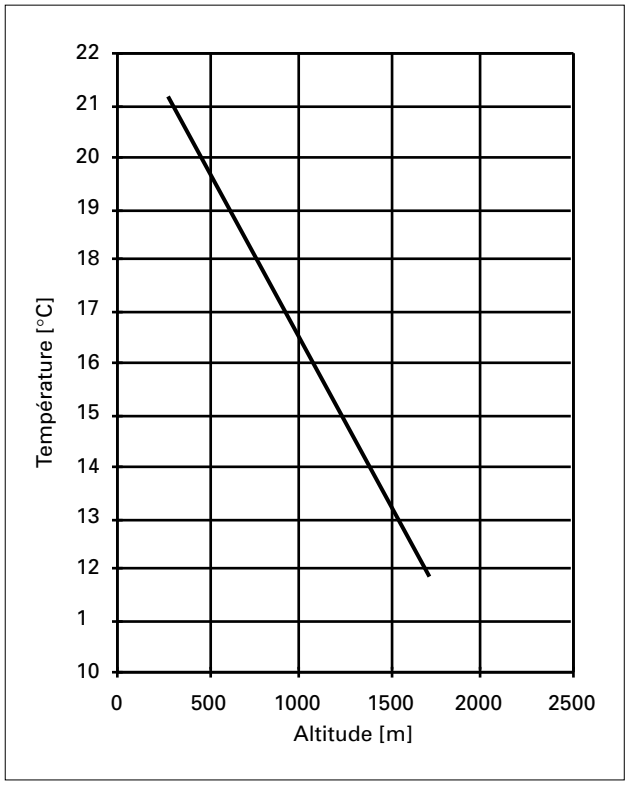


Figure 2.2.1b: Variation de la température du mois de juillet en fonction de l'altitude dans le bassin lémanique et le Jura vaudois.

	Nord des Alpes		Sud des Alpes Sud du Valais	
	Janvier	Juillet	Janvier	Juillet
Dépression	–1,6	–0,3	–1,6	–0,3
Lac d'air froid	–3,9	–0,3	–3,9	–3,9
Grand lac	+1,2	–0,4	+1,2	–0,4
Grande ville	+1,1	+0,8	+1,1	+0,8
Versant sud	+1,8	+0,8	+3,4	+1,5
Versant est / ouest	+0,9	+0,3	+1,7	+0,8
Flanc de vallée	+0,3	+0,1	+1,8	+0,9

Tableau 2.2.2: Correction de température [°C] en fonction de la situation locale.
Dépression (par ex. la Chaux-de-Fonds, Viège, Hinterrhein) et lac d'air froid (par ex. Haute-Engadine, vallée de Conches) ne concernent que les régions montagneuses.
Grand lac concerne les sites distants d'au plus un kilomètre d'un grand lac.
Grande ville concerne le centre des villes de Genève, Lausanne, Berne, Bâle et Zurich.

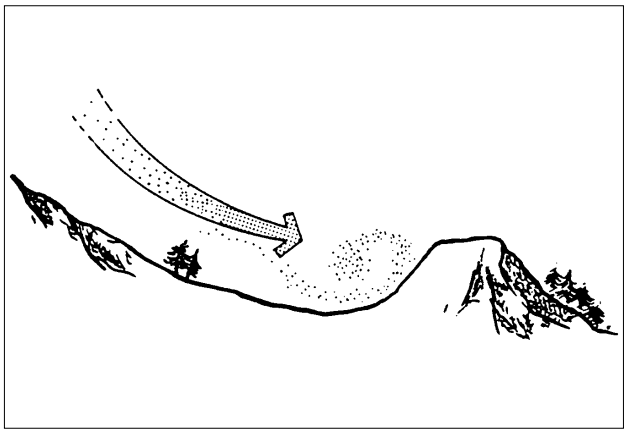


Figure 2.2.3: Une dépression du relief bloque l'air froid.

Variation nycthémérale

La variation de la température au cours d'une période de 24 heures dépend fortement de la couverture nuageuse et de la durée d'ensoleillement. Par conséquent, l'amplitude de variation sera plus importante en été qu'en hiver (figure 2.2.4) et nettement plus importante par une belle journée que par temps gris.

Température du ciel

La température apparente du ciel est inférieure à la température de l'air. Cette différence est faible par temps fortement couvert, mais elle peut atteindre 25°C par temps clair.

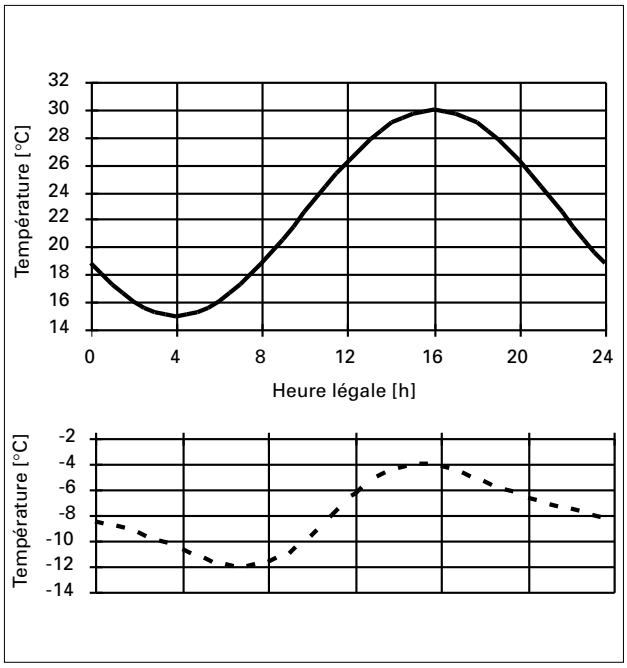


Figure 2.2.4: Variation de la température extérieure par une belle journée d'été (trait continu) et d'hiver (pointillé).

2.3 Ensoleillement (sans ombre)

L'ensoleillement est une grandeur vectorielle puisque en un point donné sa valeur dépend de la direction. Les stations climatiques ne mesurent le plus souvent que le rayonnement global reçu par un plan horizontal. C'est celui que l'on déterminera en premier pour le site. Puis on calculera le rayonnement global sur des plans (façades, toitures) d'orientation et d'inclinaison quelconques.

Rayonnement global horizontal

Comme pour la température, l'ensoleillement est fonction de la région climatique et de l'altitude (figure 2.3.1 et annexe 2.3 pour toutes les régions climatiques suisses). Par contre, il n'y a pas de correction pour la situation locale. Une correction interviendra à un niveau plus fin: l'ombre sur le site (§§ 2.4-2.5.).

On remarque qu'en hiver, l'ensoleillement croît avec l'altitude à cause des brouillards plus fréquents en plaine, tandis qu'en été il diminue avec l'altitude suite aux nuages plus nombreux en montagne.

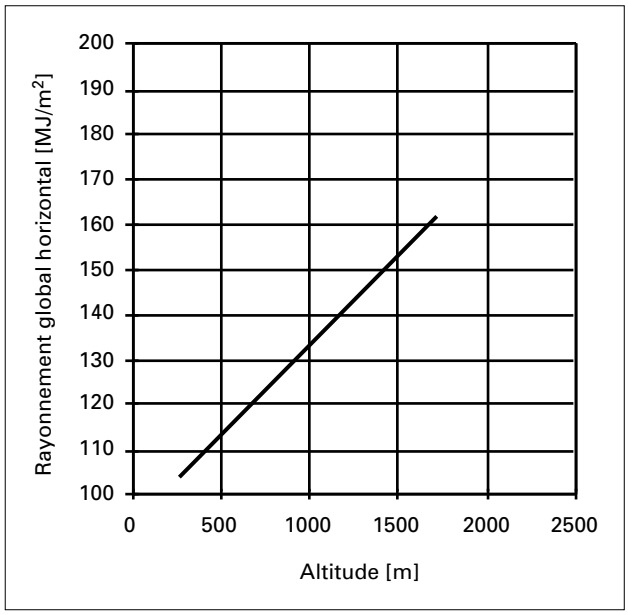


Figure 2.3.1a: Variation du rayonnement global horizontal de janvier en fonction de l'altitude pour le bassin lémanique et le Jura vaudois.

Rayonnement global sur un plan quelconque

Pour une orientation et une inclinaison données, le rayonnement global, peut se déterminer, en fonction du rayonnement global horizontal, à partir des facteurs de corrections des figures 2.3.2.

Par exemple, si l'on reçoit 150 MJ/m^2 sur un plan horizontal, alors une toiture orientée au sud-est (=azimut de -45°) et inclinée à 30° recevra en hiver 1,20 $\times$ 150 = 180 MJ/m^2.

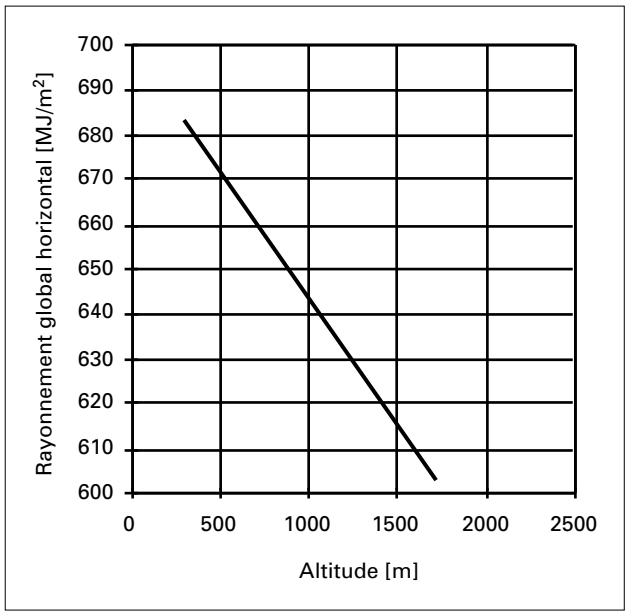


Figure 2.3.1b: Variation du rayonnement global horizontal de juillet en fonction de l'altitude pour le bassin lémanique et le Jura vaudois.

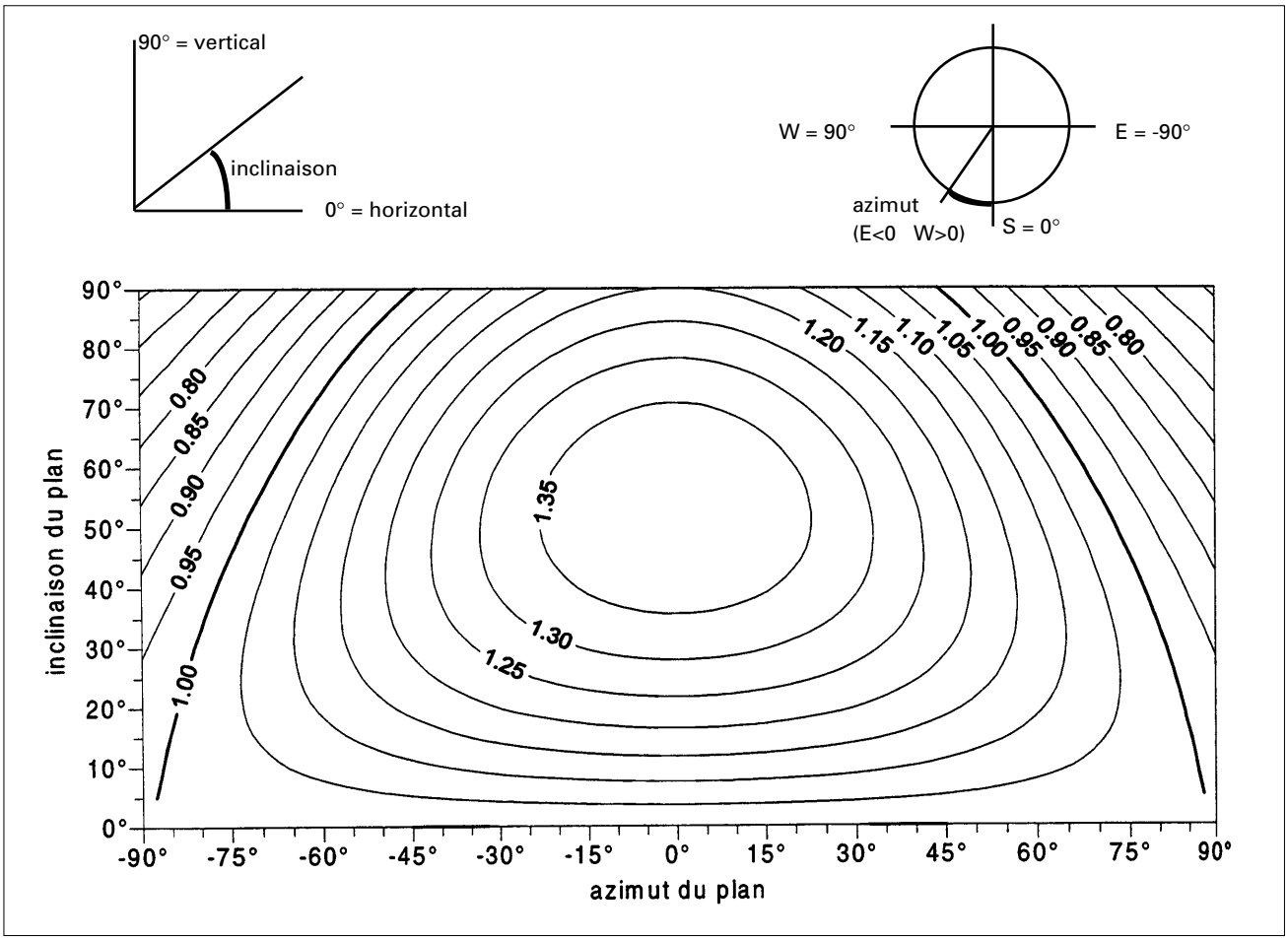


Figure 2.3.2a : Facteur de correction d'ensoleillement du semestre d'hiver (octobre à mars) pour Pully.

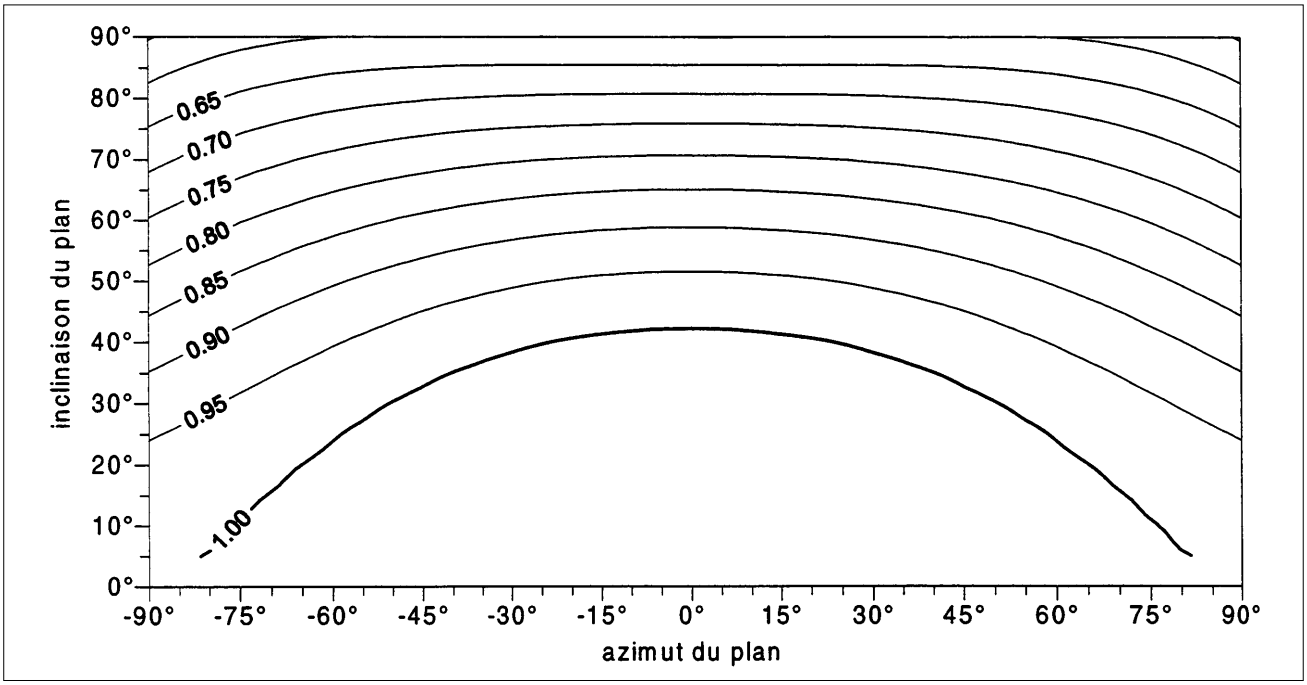


Figure 2.3.2b : Facteur de correction d'ensoleillement du semestre d'été (avril à septembre) pour Pully.

Variation nycthémérale

L'évolution horaire du rayonnement donne des indications précieuses. Elle permet de connaître à quelle heure, et avec quelle intensité, le soleil apparaîtra sur une façade donnée.

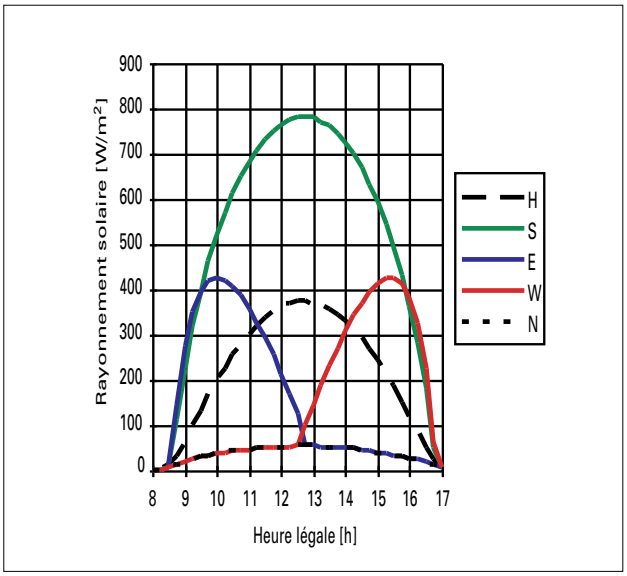


Figure 2.3.3a: Evolution du rayonnement solaire lors d'une belle journée d'hiver.
On remarquera qu'une façade nord ne reçoit que du rayonnement diffus et que, vu la faible hauteur du soleil, la façade sud reçoit le double du soleil d'une toiture horizontale.

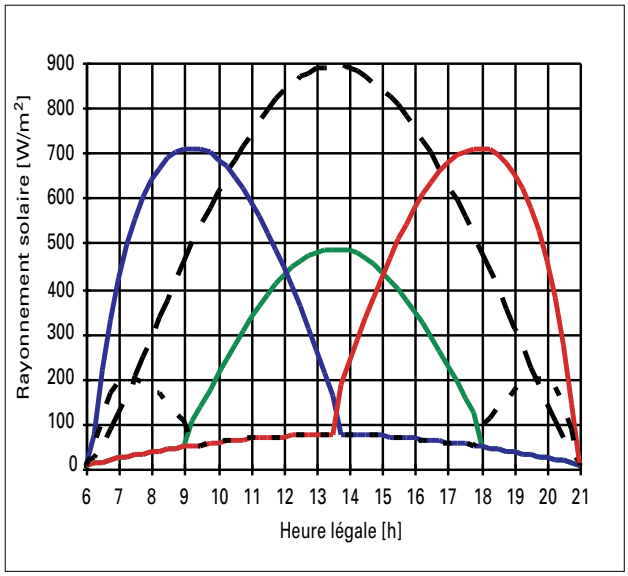


Figure 2.3.3b: Evolution du rayonnement solaire lors d'une belle journée d'été.
On remarquera qu'une façade nord reçoit deux fois du rayonnement direct et que, vu la grande hauteur du soleil, une toiture horizontale reçoit le double du soleil d'une façade sud.

2.4 Ombre de l'environnement lointain

Déterminer l'ombre sur le site a deux significations :

– vérifier si, pour une heure et un jour donnés, un endroit du site ou une fenêtre du bâtiment est à l'ombre ou non ;
– calculer la part d'énergie du soleil (rayonnement global) non reçue par le site ou la fenêtre pour un mois donné ou la saison de chauffage.

Pour ce dernier cas, on se référera aux ouvrages [7] (annexe 2.10), [8], [9] ou [10]. METEONORM a, par exemple, été utilisé pour connaître la réduction du rayonnement sur une façade sud dans une rue est-ouest (figure 2.4.1).

Dans le premier cas, le calcul de l'ombrage d'un site et des fenêtres du bâtiment se fait en 3 étapes :

1) Ombre de l'environnement lointain : on tient compte des objets suffisamment lointains (montagnes, bâtiments, forêt) pour que le site puisse être considéré comme un tout : l'ensemble du site est à l'ombre ou ne l'est pas.
2) Ombre d'objets proches : les objets proches (bâtiments de l'autre côté de la rue, arbres) ombrent chaque endroit du site de manière différente, à d'autres heures.
3) Ombre « propre » : des éléments propres au projet (avant-toit, mur, saillie,…) crée une ombre sur chaque fenêtre de manière différente, à d'autres heures.

Par les calculs d'ombrage dû à l'environnement (étapes 1 et 2), on cherchera avant tout à déterminer si le site, ou quelles parties du site, a une « fenêtre solaire » bien dégagée (figure 2.4.2).

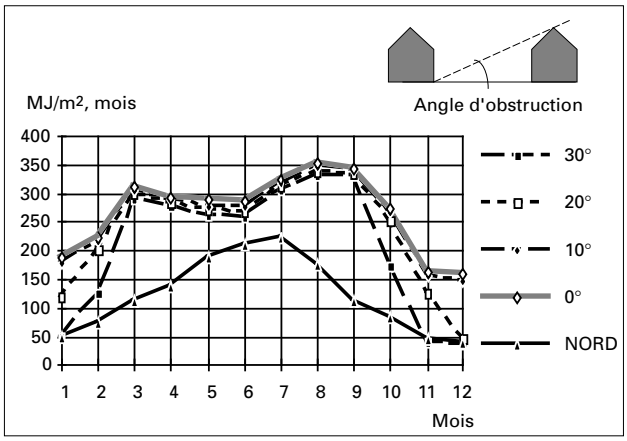


Figure 2.4.1 : Réduction du rayonnement incident sur une façade sud due à un obstacle linéaire (bâtiments en bande). La réduction est donnée pour 3 angles limites. L'effet est très faible en été, mais en hiver, pour des angles dépassant 20°, cette façade sud ne reçoit pas plus de soleil qu'une façade nord.

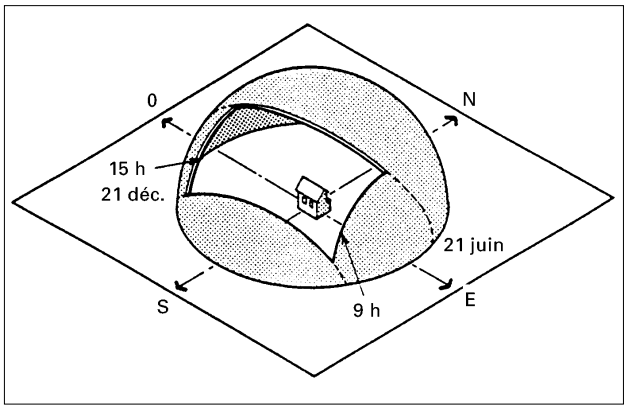


Figure 2.4.2 : La « fenêtre solaire » est la portion du ciel qui idéalement ne devrait pas être ombrée : pas d'obstacle plus haut que 10° et orienté à ±45° par rapport au sud.

Pour calculer l'ombre de l'environnement, il faut connaître pour chaque direction, la hauteur angulaire des obstacles.

La hauteur angulaire des masques se relève sur le site. Différents outils permettent cette mesure :

- une boussole et un théodolite ;
- un clisimètre (figure 2.4.3) ;
- un héliochron (figure 2.4.4) ;
- un appareil photo muni d'un objectif œil de poisson (très cher !).

Lorsque ces masques sont connus, il peuvent être reportés sur l'un des deux graphiques suivant (figure 2.4.5 et 2.4.6 et annexes A2.4 et A2.5) afin d'obtenir les périodes (saisons et heures) d'ombrage du site.

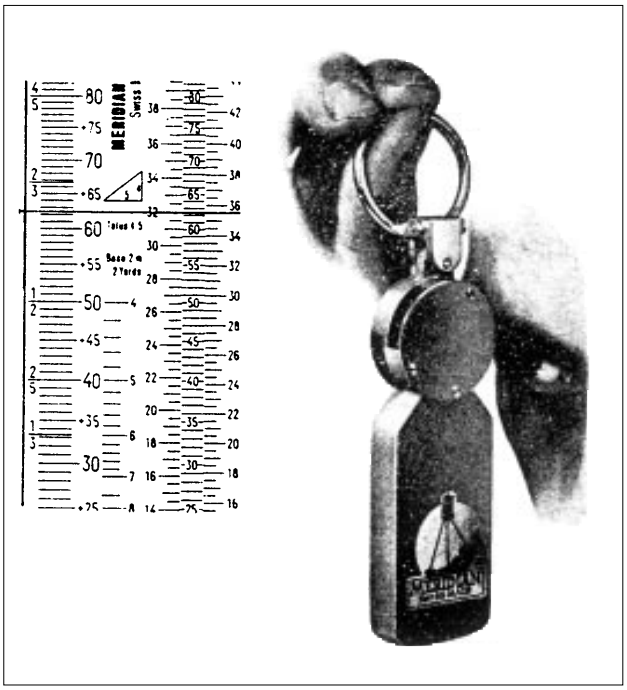


Figure 2.4.3 : Clisimètre.

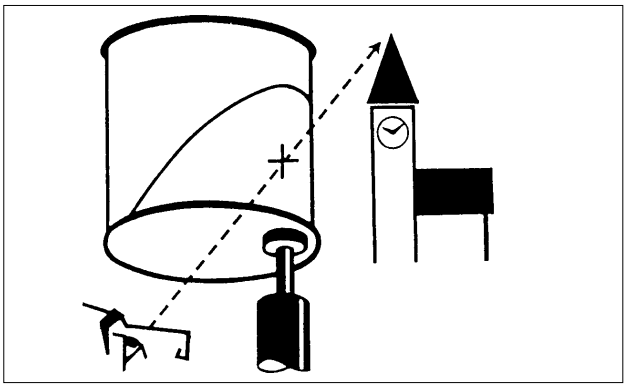


Figure 2.4.4 : Héliochron.

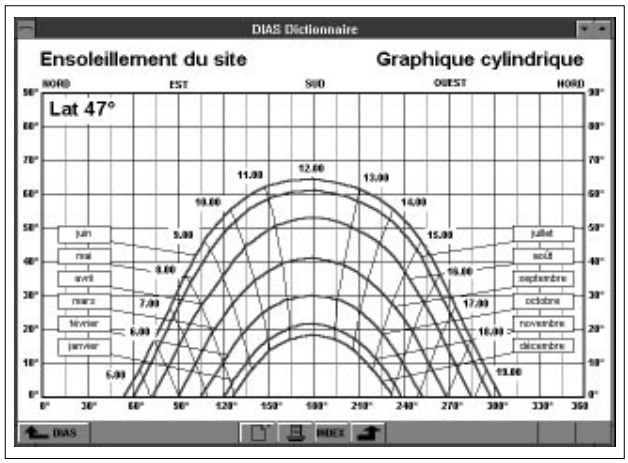


Figure 2.4.5 : Mouvement du soleil en projection cylindrique.

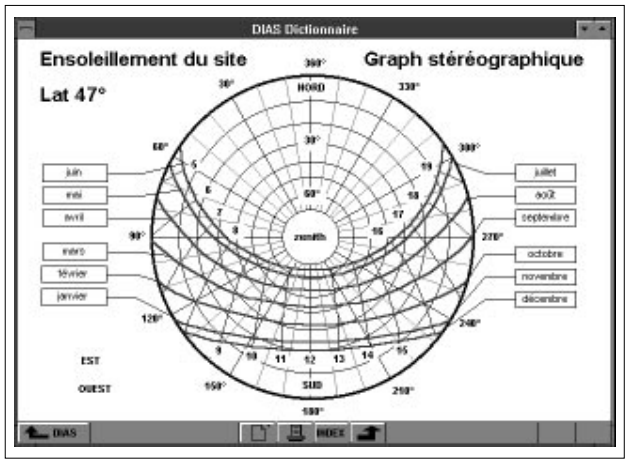


Figure 2.4.6 : Mouvement du soleil en projection stéréographique.

2.5 Ombre d'objets proches

Les bâtiments voisins ou des arbres ombreront seulement une partie du site. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le calculer :

- depuis plusieurs points du site, relever les azimuts et hauteurs des obstacles et procéder comme pour l'environnement lointain (peut être fastidieux !);
- se placer du point de vue du bâtiment et déterminer quelle zone du site ne doit pas avoir d'obstacles dépassant une certaine hauteur ;
- se placer du point de vue de l'obstacle masquant le soleil et déterminer la zone d'ombre ;
- utiliser une maquette du bâtiment avec son site et la placer sous une source de lumière.

Les trois dernières méthodes sont décrites ci-dessous.

Point de vue du bâtiment

Afin que le futur bâtiment soit ensoleillé, il faut éviter qu'il soit entouré d'obstacles proches et hauts. La période la plus critique est celle où le soleil est le plus bas, soit en décembre. La figure 2.5.1 montre une méthode simple pour déterminer la zone qui devrait être libre d'obstacle.

Il suffit de calculer pour 9h, 12h et 15h le 21 décembre. Car en hiver, pendant ces 6h arrivent plus des 80 % du rayonnement solaire.

La pente du terrain a une grande importance : si le terrain descend vers le sud, la hauteur tolérable des obstacles en est accrue d'autant, si le terrain monte vers le sud, la hauteur tolérable en est réduite.

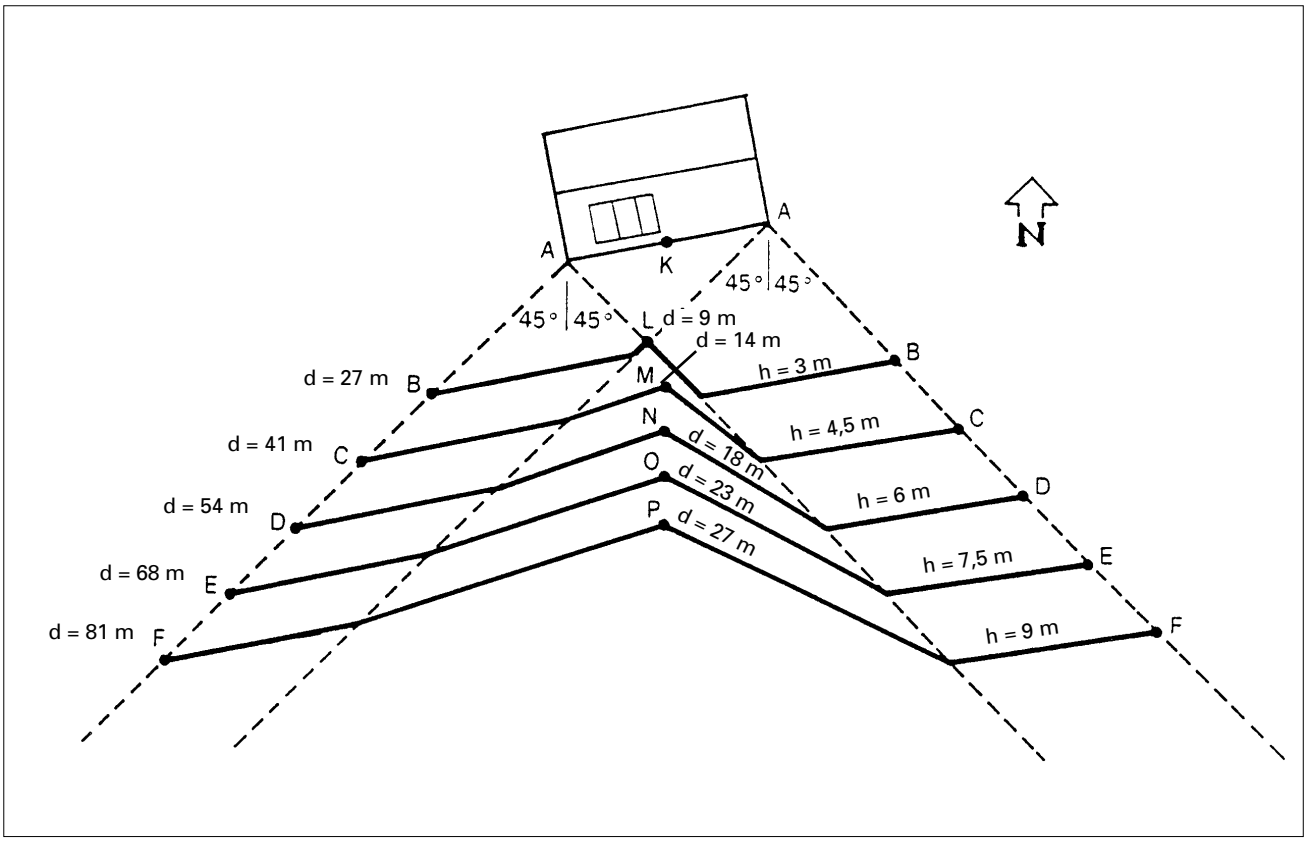


Figure 2.5.1: Distance minimale des obstacles en fonction de leur hauteur afin que le bâtiment ne soit pas ombré au mois de décembre. La ligne KL… correspond à 12h (soleil au sud), les lignes AB… correspondent à 9h (sud-est) et 15h (sud-ouest).
Procédure:
Pour des obstacles d'une hauteur (h) respectivement de 3m, 4,5m, 6m, 7,5m, 9m, etc.:

1) *prendre la façade orientée le plus au sud;*
2) *tracer à partir du milieu (K) de la façade une ligne orientée au sud;*
3) *sur cette ligne un obstacle doit être à une distance d'au moins 3 fois sa hauteur: placer les points L, M, N, O, P, etc., correspondant aux différentes hauteurs des obstacles, à cette distance (respectivement 9, 14, 18, 23, 27m, etc.);*
4) *tracer à partir d'une extrémité (A) de la façade une ligne orientée au sud-ouest;*
5) *sur cette ligne un obstacle doit être à une distance d'au moins 9 fois sa hauteur: placer les points B, C, D, E, F, etc., correspondant aux différentes hauteurs des obstacles, à cette distance (respectivement 27, 41, 54, 68, 81m, etc.);*
6) *répéter l'étape 5 sur une ligne orientée au sud-est;*
7) *répéter les étapes 4, 5 et 6 pour l'autre extrémité de la façade;*
8) *relier les 4 points B entre eux en passant par le point L: cette ligne détermine la distance minimale d'un obstacle de 3m de haut;*
9) *répéter l'étape 8 pour les points correspondant aux autres hauteurs d'obstacle.*

Point de vue de l'obstacle

Chaque obstacle crée une ombre se déplaçant sur le site (figures 2.5.2 à 2.5.6).

La zone ombrée peut être définie comme l'ensemble des ombres aux différentes heures de la journée.

Comme précédemment un calcul fait pour 9h, 12h et 15h le 21 décembre est suffisant pour obtenir la zone ombrée.

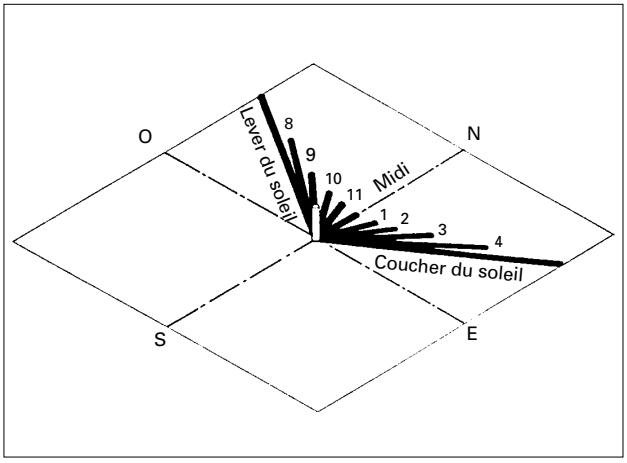


Figure 2.5.2: Déplacement de l'ombre due à un poteau vertical.

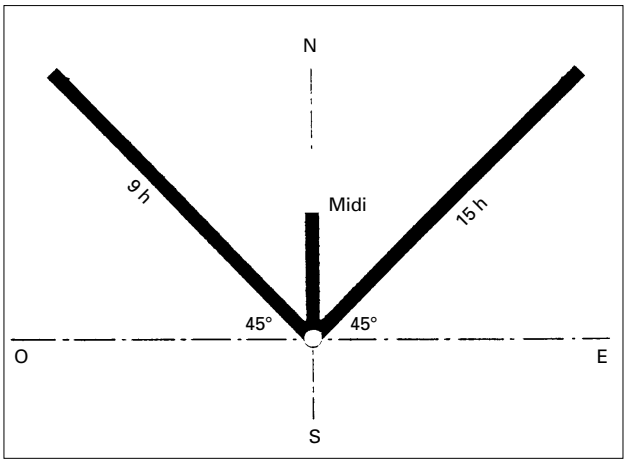


Figure 2.5.3: Ombre due à un poteau vertical le 21 décembre:
- *à 9h: l'ombre est orientée au nord-ouest du poteau et a une longueur de 9 fois sa hauteur;*
- *à 12h: l'ombre est orientée au nord et a une longueur de 3 fois sa hauteur;*
- *à 15h: l'ombre est orientée au nord-est et a une longueur de 9 fois sa hauteur.*

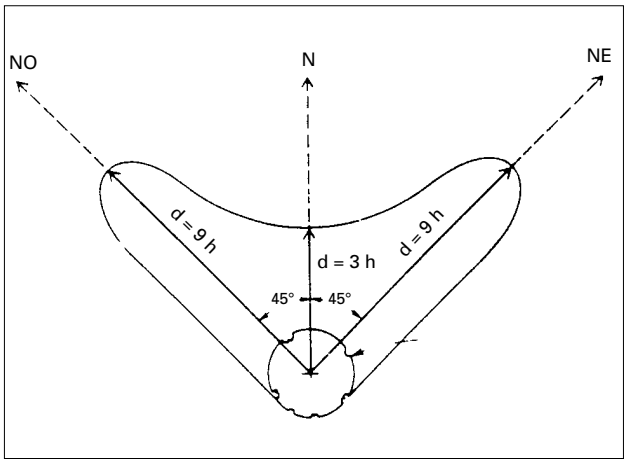


Figure 2.5.4: Ombre due à un arbre (21 décembre).

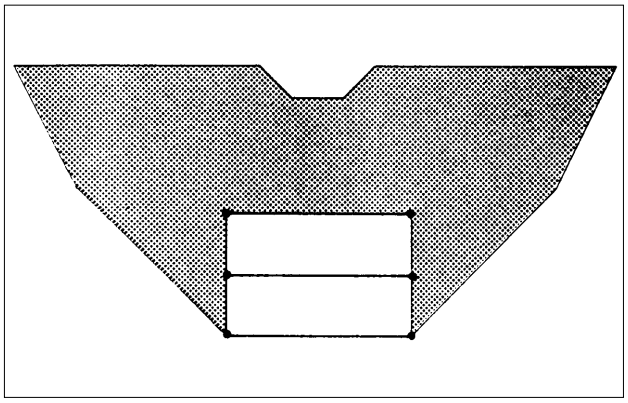


Figure 2.5.5: Ombre due à un bâtiment.

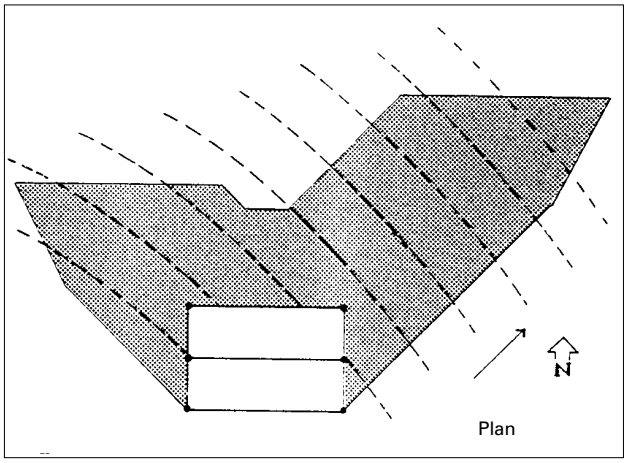


Figure 2.5.6: Ombre due à un bâtiment sur un terrain en pente.

L'ombre d'un obstacle est toujours beaucoup plus importante en hiver qu'en été. Or, on souhaiterait parfois avoir de l'ombre en été et non en hiver. Cela peut arriver grâce à des arbres dont la ramure est élevée (figure 2.5.7). Remarquons que les arbres à feuilles caduques ne laissent passer en hiver qu'environ la moitié du soleil.

Lorsqu'on calcule la longueur de l'ombre d'un objet, il ne faut pas oublier d'ajouter ou de soustraire à sa hauteur l'effet de la pente du terrain (figure 2.5.8).

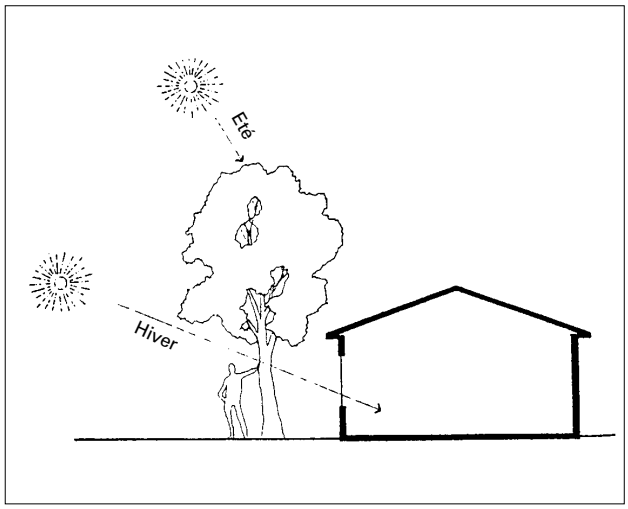


Figure 2.5.7: Ombre estivale grâce à un arbre à haute ramure proche du bâtiment.

Maquette

Si l'on dispose d'une maquette du site et du bâtiment on peut alors observer les ombres directement sur la maquette. Il suffit d'appliquer la procédure suivante :

1) éclairer la maquette en la plaçant, soit à l'extérieur par un jour ensoleillé, soit sous une forte lampe (une lampe de bureau ne suffit pas) ;
2) placer sur la maquette un cadran solaire (photocopier celui de l'annexe A2.7, le coller sur un papier résistant, découper le pourtour, plier selon les pointillés et régler l'angle à 47°, découper les 2 grands côtés du triangle central puis le plier orthogonalement, son ombre indiquera l'heure solaire et la date) ;
3) incliner et orienter la maquette ou la lampe de façon que les rayons lumineux arrivent avec l'angle correspondant à ceux du soleil pour la date et l'heure choisie, le cadran solaire nous les indiquent directement ;
4) il est possible de placer sur la maquette une feuille de papier et d'y dessiner successivement les ombres pour le 21 décembre à 9h, 12h et 15h.

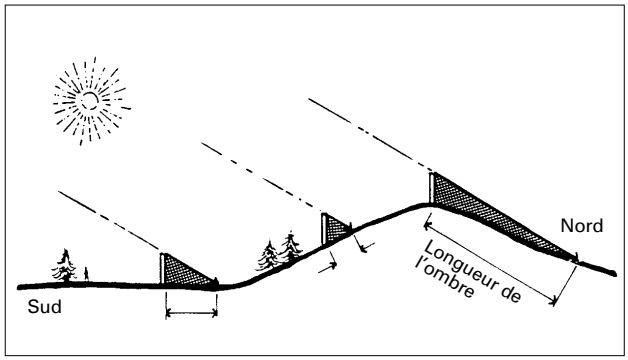


Figure 2.5.8: Effet de la pente du terrain sur la longueur de l'ombre.

2.6 Ombre propre

Trois méthodes sont utilisables pour déterminer quand et de combien une fenêtre est ombrée par des éléments propres au bâtiment (avant-toit, avancée de façade,…) ou des obstacles proches :

- calculer la portion de fenêtre ombrée pour une date et une heure données ;
- déterminer la période de l'année où la fenêtre est ombrée à 100 % ou à 50 % ;
- représenter graphiquement la fenêtre telle que la « voit » le soleil.

Portion de fenêtre ombrée

La recommandation SIA V382/2 [6] donne une méthode de calcul. Il est aussi possible d'utiliser, dans le cas de l'avant-toit uniquement, le logiciel DIAS (annexe 5.2).

Période d'ombre

En fonction des angles de l'obstacle par rapport à la fenêtre on dessine un graphique, (voir figures 2.6.1 et 2.6.2) qui, superposé au diagramme de la course solaire, nous permet de lire directement les dates et heures où la fenêtre est ombrée.

Vue depuis le soleil

Les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO/CAD) généralement utilisés dans les bureaux d'architectes sont parfaitement à même de dessiner le bâtiment avec ses fenêtres et ses obstacles tels que le verrait le soleil. Les parties des fenêtres alors cachées par les obstacles sont à l'ombre ! (Voir annexes A2.11 et A2.12.)

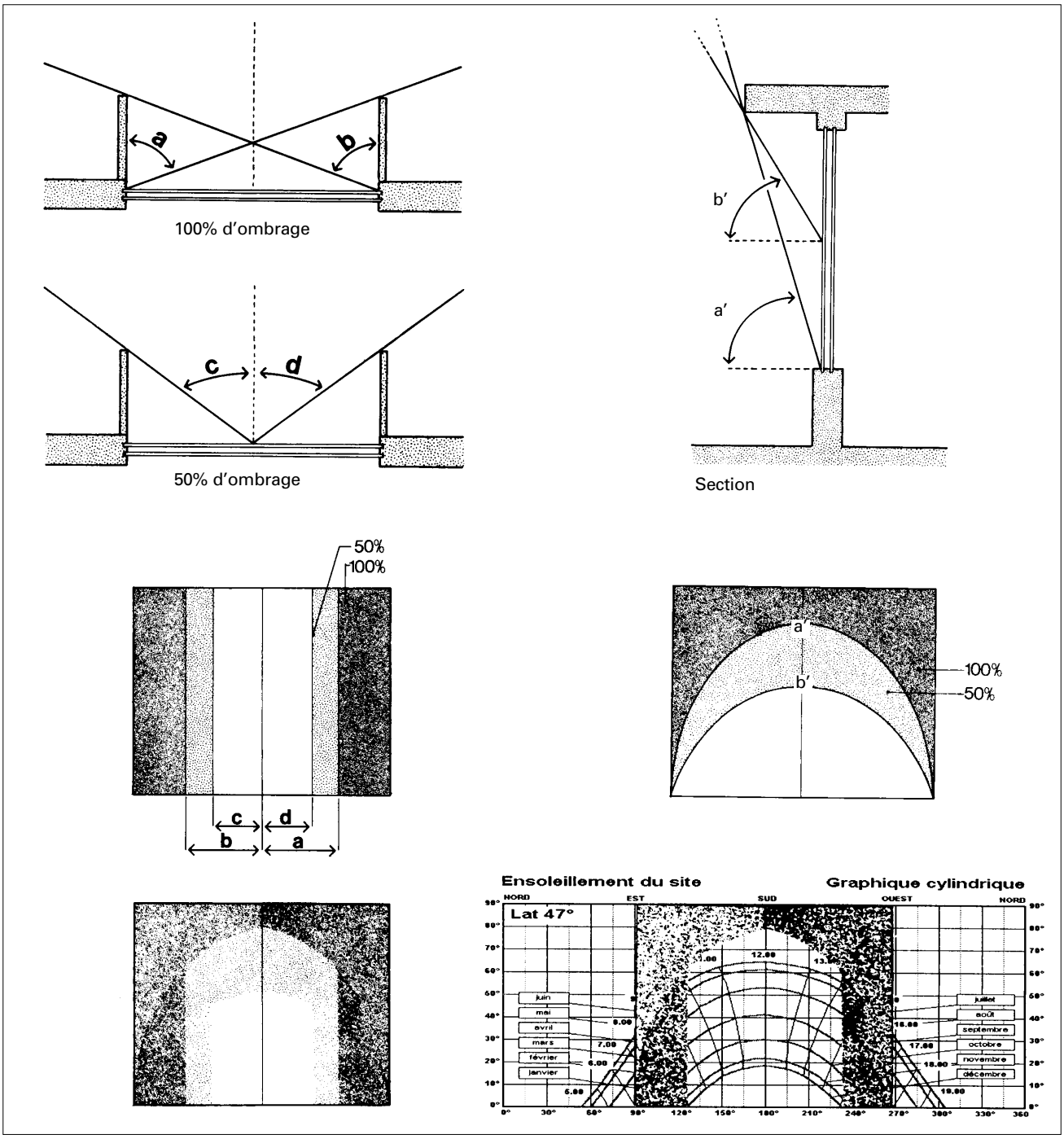


Figure 2.6.1: Ombre portée en projection cylindrique (le calculateur d'ombre se trouve à l'annexe A2.8).

Procédure

En plan:

1) *depuis le bord gauche de la fenêtre, mesurer l'angle d'ouverture (a) entre les obstacles à droite et à gauche;*
2) *répéter l'étape 1 pour le bord droit de la fenêtre (angle b);*
3) *depuis le milieu de la fenêtre, mesurer l'angle d'ouverture (c) entre la normale et l'obstacle à gauche;*
4) *répéter l'étape 3 pour l'obstacle à droite (angle d);*
5) *reporter sur le calculateur d'ombre les azimuts c et b (à gauche du centre) et d et a (à droite);*

En coupe:

6) *depuis le bas de la fenêtre, mesurer l'angle d'ouverture (a') entre l'horizontale et l'obstacle supérieur;*
7) *répéter l'étape 6 à mi-hauteur de la fenêtre (angle b');*
8) *reporter sur le calculateur d'ombre les hauteurs a'et b';*
9) *reporter le calculateur d'ombre sur le diagramme de la course solaire: la zone à l'extérieur de la courbe a-b-a'est complètement ombrée, la courbe c-d-b'indique un ombrage de 50%.*

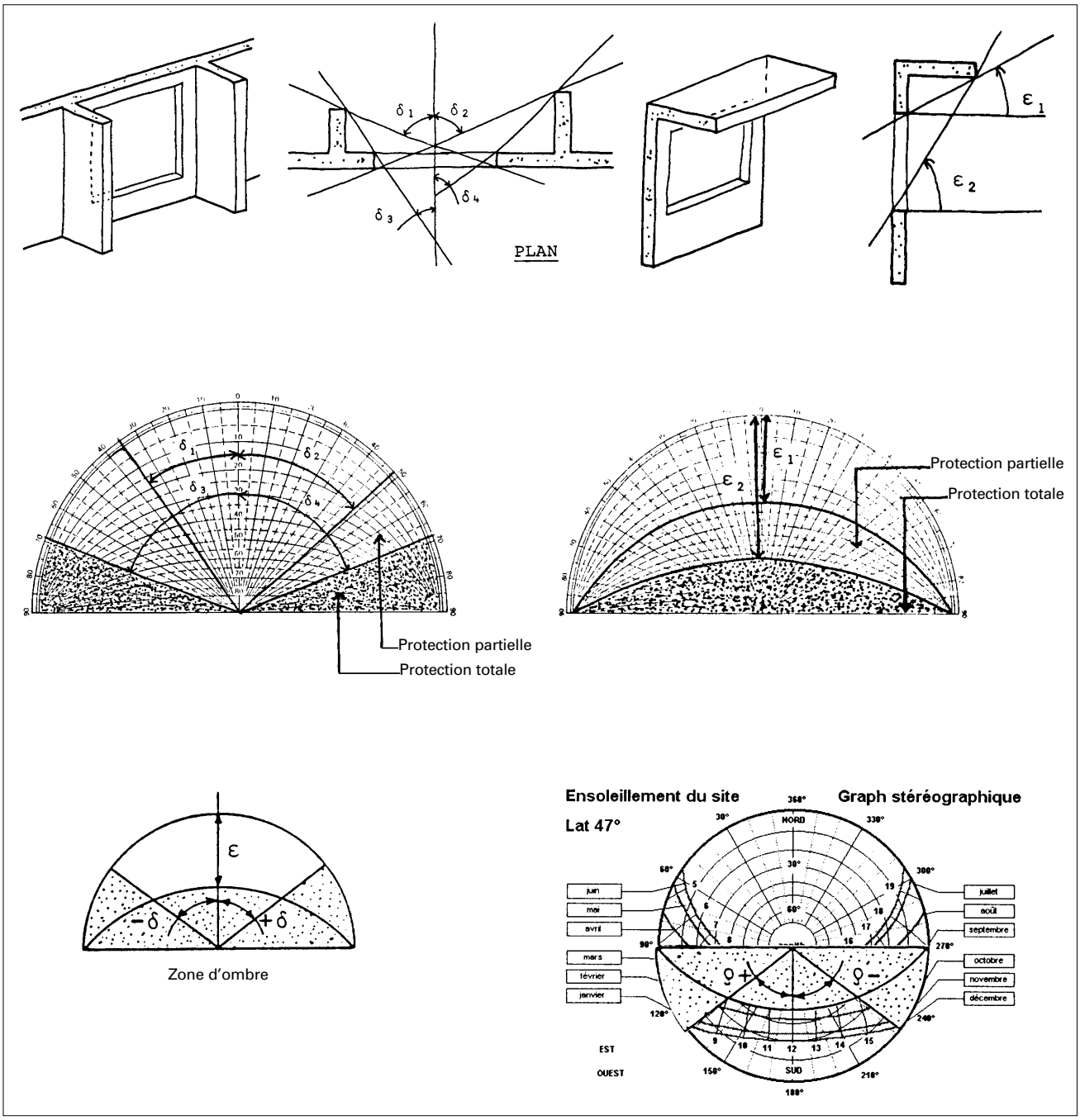


Figure 2.6.2: Ombre portée, en projection stéréographique (le calculateur d'ombre se trouve à l'annexe A2.9).

Procédure:

en plan:

1) *depuis le bord droit de la fenêtre, mesurer l'angle d'ouverture ($\delta 1$) entre la normale et l'obstacle à gauche, puis entre la normale et l'obstacle à droite ($\delta 4$);*
2) *répéter l'étape 1 pour le bord gauche de la fenêtre (angle $\delta 2$ à droite et $\delta 3$ à gauche);*
3) *reporter sur le calculateur d'ombre les azimuts (représentés par les rayons) $\delta 1$ et $\delta 3$ (à gauche du centre) et $\delta 2$ et $\delta 4$ (à droite);*

en coupe:

4) *depuis le haut de la fenêtre, mesurer l'angle d'ouverture ($\varepsilon 1$) entre l'horizontale et l'obstacle supérieur;*
5) *depuis le bas de la fenêtre, mesurer l'angle d'ouverture ($\varepsilon 2$) entre l'horizontale et l'obstacle supérieur;*
6) *reporter sur le calculateur d'ombre les hauteurs (représentées par les arcs de cercle) $\varepsilon 1$ et $\varepsilon 2$ à partir du bord supérieur (90° est au centre!);*
7) *reporter le calculateur d'ombre sur le diagramme de la course solaire: la zone à l'intérieur de la courbe $\delta 3$-$\varepsilon 2$-$\delta 4$ est complètement ombrée, la zone à l'extérieur de la courbe $\delta 1$-$\varepsilon 1$-$\delta 2$ n'est jamais ombrée.*

2.7 Vent

Le vent est la grandeur climatologique la plus subtile, la plus variable dans le temps et dans l'espace. De plus, c'est une grandeur vectorielle : pour caractériser le vent, il faut donner sa vitesse et sa direction.

Une simple carte des vents (figure 2.7.1) ne peut donner qu'une vue partielle de la situation et une étude plus fine est nécessaire.

Pour déterminer les conditions de vent sur le site, il ne suffit pas de prendre les données de la station de mesure la plus proche. La disposition des montagnes et vallées ainsi que les obstacles naturels (allée d'arbres) ou construits ont une influence beaucoup plus grande que l'éloignement à la station. L'observation du relief environnant le site donnera bien plus d'indications.

Vitesse du vent

Suivant la source des données, diverses unités de mesure sont utilisées. Le tableau 2.7.2 en donne la correspondance. Souvent, on donne la force du vent au lieu de sa vitesse (tableau 2.7.3).

1 nœud	=	1,852 km/h	=	0,514 m/s
1 km/h	=	0,278 m/s	=	0,540 nœud
1 m/s	=	3,600 km/h	=	1,944 nœud

Tableau 2.7.2: Correspondance des unités de mesure de la vitesse du vent.

En Suisse, la vitesse moyenne (mensuelle) du vent est faible, environ 2 m/s, ce qui explique la quasi absence d'éolienne. Si l'on excepte les sommets de montagne, il n'y a pas de régions ni de situation locale qui se distingue par une vitesse moyenne plus élevée.

C'est à une échelle plus fine que se font sentir les différences.

La vitesse moyenne varie peu au cours de l'année. On note un faible maximum aux mois de mars à mai et un faible minimum aux mois d'octobre à décembre.

La variation sur la journée est différente. Des phénomènes locaux, avec des horaires particuliers, se superposent à des phénomènes à plus large échelle. En général, après minuit la vitesse est la plus faible (1 à 1,5 m/s) tandis qu'elle est la plus élevée dans l'après-midi (3 à 3,5 m/s).

Figure 2.7.1: Direction et fréquence principales des vents en Suisse.

Force [degré Beaufort]	Vitesse [km/h]	Vitesse [m/s]	Qualification	Caractéristiques
0	<2	<0,5	Calme	Les fumées montent verticalement.
1	3	1	Presque calme	Direction du vent à peine reconnaissable d'après les fumées.
2	7	2	Léger	Perceptible au visage. Agite légèrement les feuilles des arbres. Rides sur l'eau des lacs et étangs.
3	14	4	Faible	Feuilles et petites branches ainsi que fanions en mouvement continu. Petites vagues d'aspect vitreux sur lacs et étangs.
4	23	6	Modéré	Poussières et papiers soulevés. Petites branches, même sans feuilles, agitées.
5	32	9	Assez fort	Petits arbres, feuilles et branches moyennes agitées, fanions tendus. Formation de vagues sur les eaux. Moutons épars sur les lacs.
6	42	12	Fort	Grosses branches et petits arbres plus agités. Se fait entendre autour des maisons et autres objets fixes. Sur les vagues, crêtes d'écume blanche, quelques embruns.
7	53	15	Très fort	Arbres moyens très agités. Formation de nombreuses crêtes blanches sur les vagues. Gêne à l'avancement contre le vent. L'écume blanche commence à être soufflée en traînées orientées dans le lit du vent.
8	67	19	Tempétueux	Gros arbres agités, petites branches cassées. Marche contre le vent difficile.
9	81	23	Tempête	Branches moyennes cassées. Légers dommages aux maisons, tuiles emportées. Nombreuses traînées d'écume dans le lit du vent sur les lacs.
10	95	27	Forte tempête	Arbres entiers cassés ou déracinés. Dommages graves aux maisons.
11	110	31	Violente tempête	Graves destructions.
12	125	35	Ouragan	Destructions catastrophiques

Tableau 2.7.3: Vitesse et force du vent selon l'échelle de Beaufort.

Le vent est usuellement mesuré dans un site plat et découvert à 10 m au-dessus du sol. L'urbanisation et la végétation du site en réduise sa vitesse. Plus on s'élève au-dessus du sol et plus l'effet des obstacles s'amenuisent (figure 2.7.4).

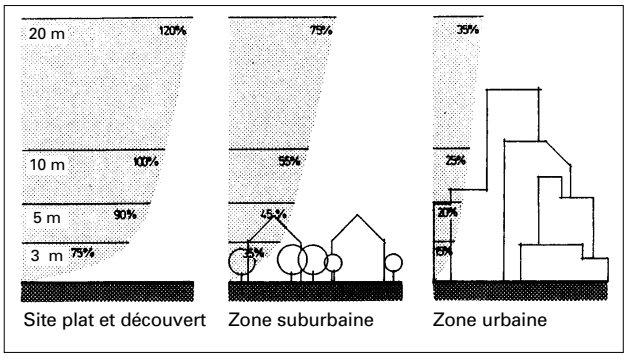


Figure 2.7.4: Vitesse du vent en fonction de la hauteur et de l'occupation du site par rapport au site standard de mesure du vent (10 m au-dessus du sol en un lieu plat et découvert).

Les obstacles peuvent ralentir le vent et créer des zones d'« ombre ». Ces dernières dépendent de la densité des obstacles et de leur dimensions (figures 2.7.5 et 2.7.6).

Dans certains cas, ils peuvent aussi accélérer le vent, lorsque les obstacles créent des rétrécissements (figure 2.7.7).

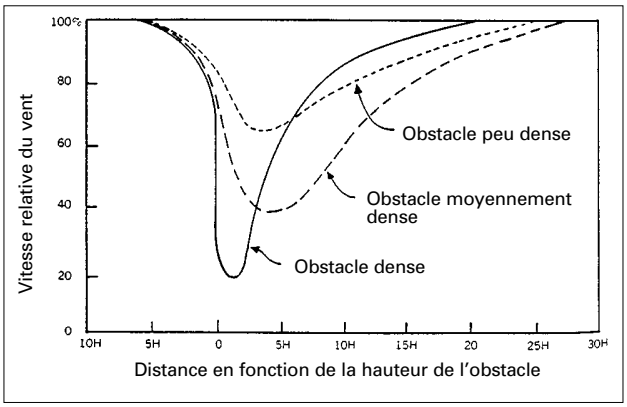


Figure 2.7.5: Vitesse du vent après un obstacle de hauteur H en fonction de la distance et de la densité de l'obstacle. La largeur de l'obstacle est d'environ 10 fois sa hauteur.

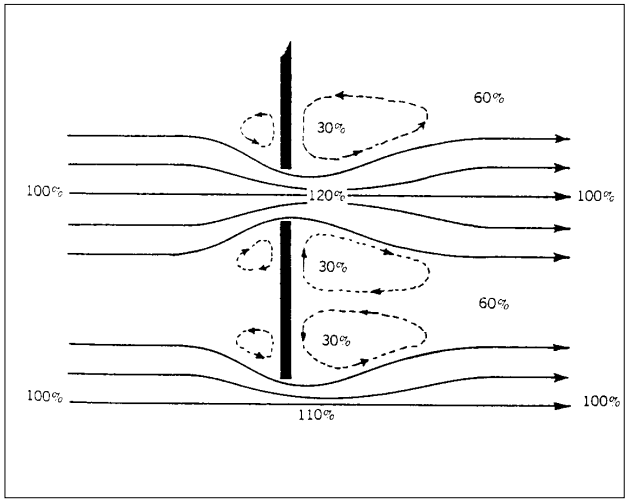


Figure 2.7.7: Accélération du vent par un obstacle créant un rétrécissement.

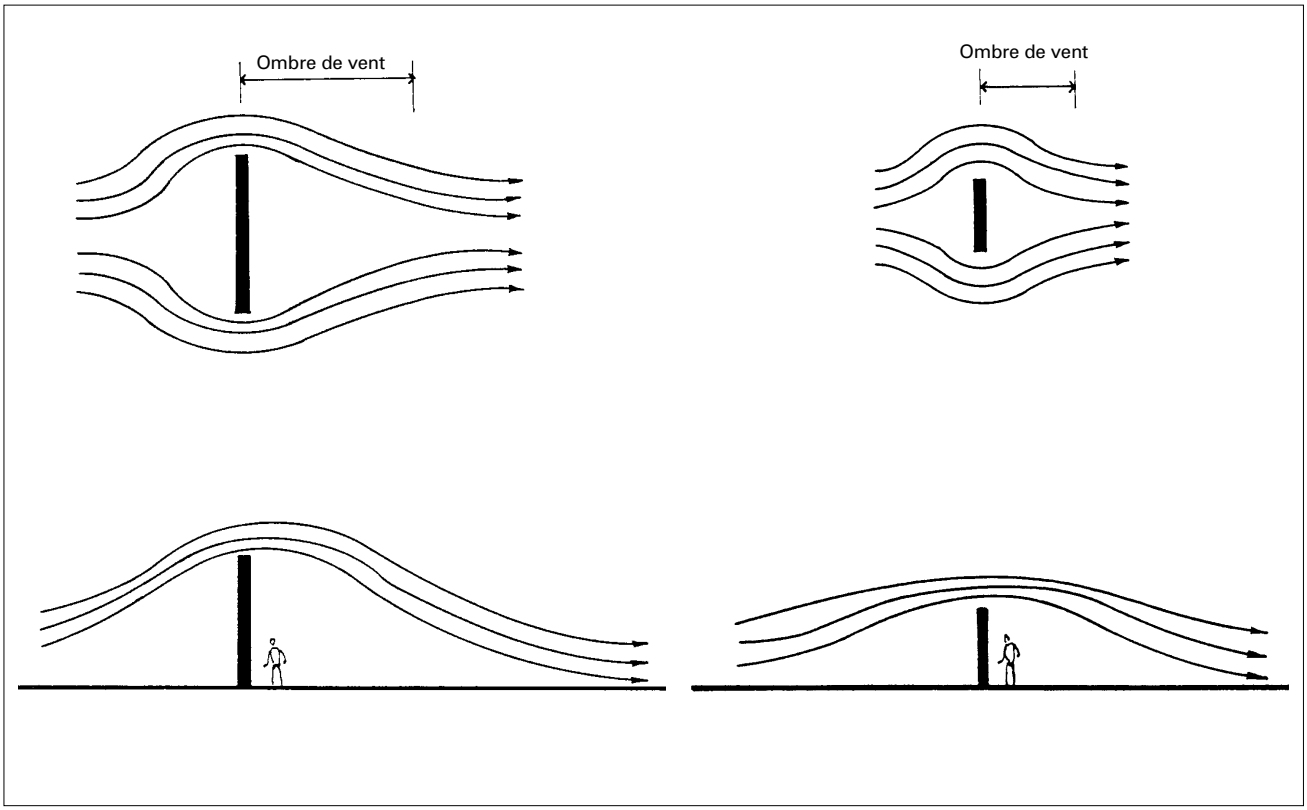


Figure 2.7.6: Zone d'ombre de vent en fonction de la dimension de l'obstacle; la dimension de l'ombre est proportionnelle à la hauteur de l'obstacle, à sa densité et à sa largeur.

Direction et fréquence des vents

Les vents peuvent être divisés en 3 catégories.

1) Les grands vents et les vents régionaux: ils sont créés par des phénomènes météorologiques à l'échelle du continent: anticyclone et dépression. Ils sont donc ressentis dans des grandes régions et peuvent durer plusieurs jours avec une certaine régularité. Les vents régionaux sont souvent une modification locale, due aux chaînes de montagnes et aux vallées, des grands vents.
2) Les vents d'orages: par leur origine ces vents sont locaux et apparaissent brusquement. Ils portent souvent le même nom que des vents régionaux.
3) Les brises: ce sont des vents très locaux créés par des différences de températures. Leur direction changent entre le jour et la nuit.

Un même vent portera souvent un nom différent suivant les régions.

L'étude des vents montre que la Suisse romande est divisée en 2 grandes régions:

1) le Jura, le plateau, le bassin lémanique et le Bas-Valais;
2) le Valais (sauf le Bas-Valais).

La recommandation SIA 384/2 [3] donne des classes d'exposition au vent durant l'hiver (tableau 2.7.8) pour de nombreuses localités.

Force	Vitesse [m/s]	Caractéristiques	
I	2	faible	
II	4	moyen	Beaufort 2 > 25%
III	6	fort	Beaufort 2 > 50%
IV	8	très fort	Beaufort 3 > 25%

Tableau 2.7.8: Classe d'exposition au vent selon la recommandation SIA 384/2.

Vents du Jura, du plateau, du bassin lémanique et du Bas-Valais

Cette région connaît deux grands vents, le sudois et la bise et deux vents régionaux principaux, le joran et la vaudaire.

Le sudois, ou vent d'ouest

Le sudois, appelé aussi simplement vent, est relativement chaud. Il est de secteur S à W, mais le plus souvent du SW. Il apparaît en toute saison et est de vitesse très variable. Il est souvent accompagné ou suivi de pluie.

La bise

C'est un vent froid, accompagné de pluie que dans 6% des cas. Elle est du NNE à Genève, de NNE à NE à Lausanne et du NE à Neuchâtel. De secteur NW, elle est rare sur la Riviera vaudoise et tourne au NNW dans la plaine du Rhône. La bise est rare de juin à septembre.

Le joran

Ce terme désigne deux sortes de vent.

Le joran de front froid, ou simplement joran, est un vent froid. Il est de secteur NW et est en général modéré. Il apparaît surtout au printemps.

Le joran d'orage est un vent violent qui atteint surtout le pied du Jura.

La vaudaire

Ce terme caractérise aussi deux sortes de vent, tous deux de secteur SSE à SE.

La vaudaire de fœhn, ou simplement fœhn, est un vent chaud. Il apparaît surtout au printemps et se fait sentir dans la plaine du Rhône et sur la Riviera vaudoise. Ce vent n'atteint Lausanne que lorsqu'il est très violent.

La vaudaire d'orage, ou simplement vaudaire, est un vent froid apparaissant d'avril à septembre dans la plaine du Rhône et sur le Haut-Lac.

Vents du Valais (sauf Bas-Valais)

Cette région connaît deux grands vents, le vent d'aval et le fœhn, et un vent régional, la lombarde.

Le vent d'aval

Ce vent est aussi appelé vent d'ouest car il est de secteur SW à WSW. Il apparaît surtout au printemps et en été et peut atteindre une vitesse de 6 m/s.

Le fœhn

Ce vent est le plus fort et le plus fréquent du Valais. Ce vent chaud et sec est de secteur NE à ENE. Sa vitesse moyenne est de 6 m/s et il apparaît surtout au printemps. Il est 10 fois plus fréquent l'après-midi que le matin.

La lombarde

C'est un vent tempéré de secteur E à ENE apparaissant seulement sur la rive droite du Rhône et au-dessus de 1000 m d'altitude. Il est très lié au fœhn et on le trouve surtout au printemps.

Vents du Jura, du plateau, du bassin lémanique et du Bas-Valais

Les brises locales

Ces vents existent partout mais sont surtout connus dans les régions lacustres.

Elles sont remontantes (du lac vers la terre) de jour et descendantes (de la terre vers le lac) de nuit. Le changement de direction s'appelle la reverse. Elles sont relativement faibles, 2 à 5 m/s sauf en hiver où elles sont quasiment inexistantes. Leur direction dépend de la situation locale.

Dans le Bas-Valais, la brise diurne est de secteur N à NNW et la brise nocturne de secteur SW.

Vents du Valais (sauf Bas-Valais)

Les brises locales

La configuration locale influence fortement la direction de ces vents.

La brise diurne est de secteur SW à WSW. Elle est presque inexistante en hiver; en été elle peut atteindre 5 m/s. La brise nocturne, de secteur NE, est faible (env. 1 à 1,5 m/s) en toute saison.

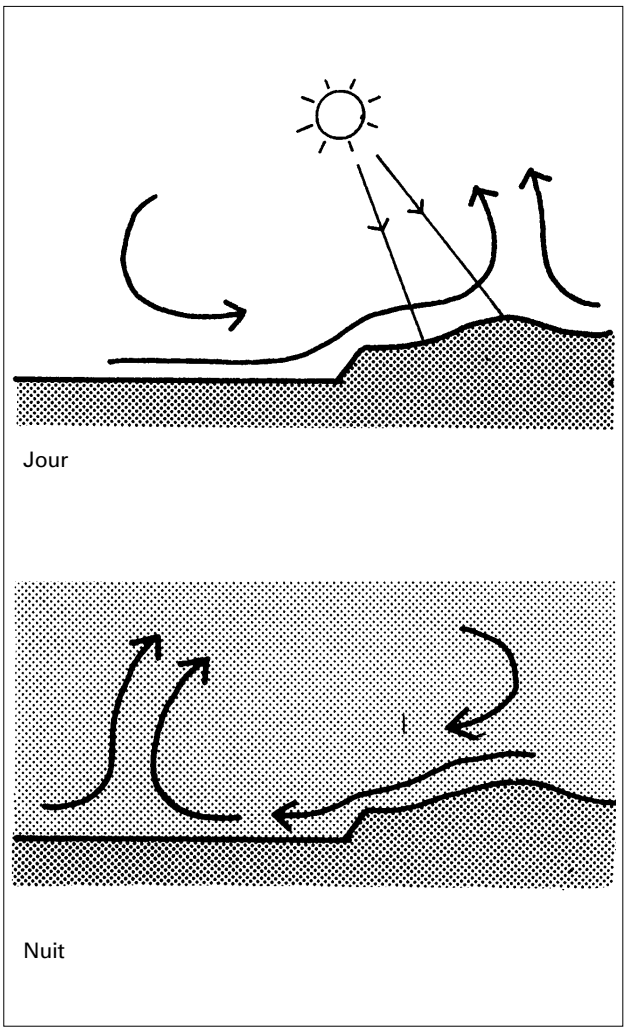


Figure 2.7.9: Brises locales dans une région lacustre. En été, le changement de direction (reverse) des brises se fait à Lausanne le matin entre vers 10h et le soir entre 20h et 21h.

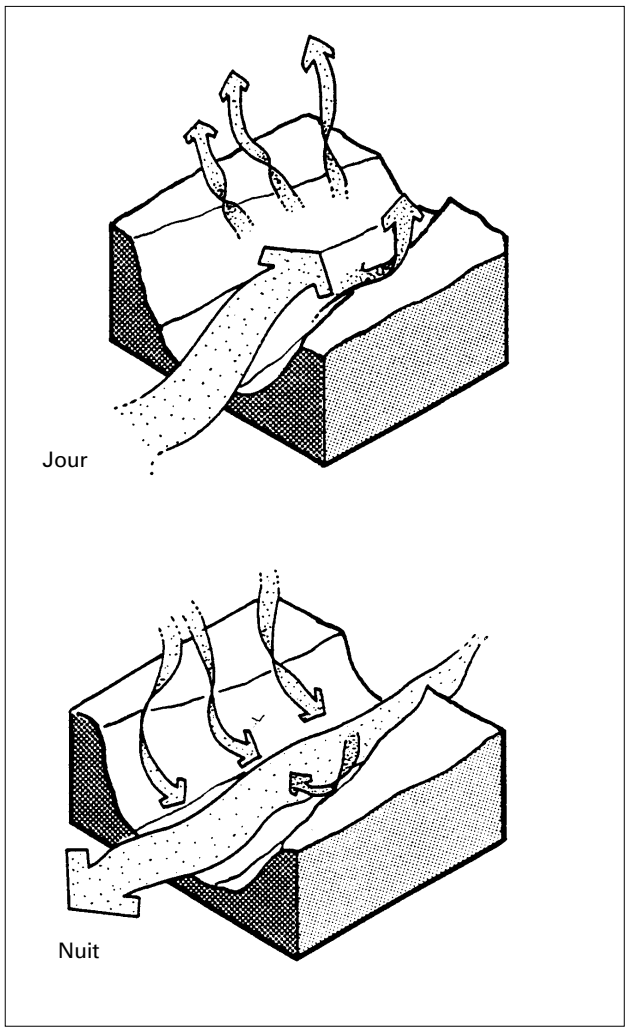


Figure 2.7.10: Brises locales dans une vallée. En été, le changement de direction (reverse) des brises se fait en Valais le matin entre 9h et 10h et le soir entre 19h et 22h.

2.8 Analyse globale

La végétation réagit globalement à l'ensemble des paramètres climatiques. Son observation permet donc de déterminer rapidement le microclimat local.

Le développement d'une cinquantaine de plantes a été finement observé sur l'ensemble du territoire suisse. Il en a résulté une carte des niveaux thermiques [11].

Une fois l'ensemble des caractéristiques climatiques du site connues, il est utile d'en dessiner une carte. La figure 2.8.1 montre un site comportant une colline et ses divers microclimats.

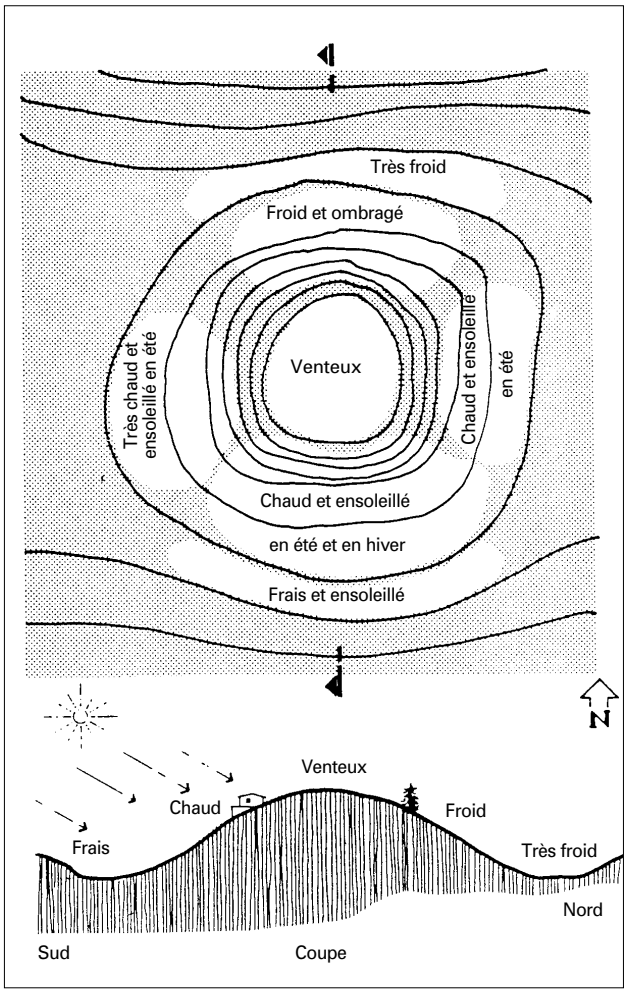


Figure 2.8.1: Plan et coupe d'un site comportant une colline avec ses divers microclimats.

2.9 Références

[1] Recommandation SIA 381/2 « Données climatiques relatives à la recommandation 380/1 `L'énergie dans le bâtiment' »
SIA, Zurich, 1991.

[2] Norme SIA 180 « Isolation thermique des bâtiments »
SIA, Zurich, 1988.

[3] Recommandation SIA 384/2 « Puissance thermique à installer dans les bâtiments »
SIA, Zurich, 1982.

[4] Dokumentation SIA D012 « Meteodaten für die Haustechnik »
SIA, Zurich, 1987.

[5] Dokumentation SIA D012a « Anhang zu `Meteodaten für die Haustechnik' »
SIA, Zurich, 1987.

[6] Recommandation SIA V382/2 « Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment »
SIA, Zurich, 1992.

[7] METEONORM – Energie solaire et météorologie – Notions de base, logiciel et manuel du concepteur
OFEN, Berne, juin 1995.

[8] Norme européenne prEN832 « Performance thermique des bâtiments – Calcul des besoins d'énergie de chauffage »
Comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles, 1995.

[9] Soleil et architecture – Guide pratique pour le projet
PACER, OFQC, Berne, 1991.

[10] Dokumentation SIA D 010 « Handbuch der passiven Sonnenenergienutzung »
SIA, Zurich, 1986.

[11] Niveaux thermiques de la Suisse (sur la base de relevés phénologiques effectués dans les années 1969 à 1973), 4 cartes à l'échelle 1 : 200 000
Service topographique fédéral, Wabern, 1975.

3. Analyse du programme

3.1	**Introduction**	**38**
3.2	**Confort hygrothermique**	**40**
3.3	**Aération**	**45**
3.4	**Confort visuel**	**46**
3.5	**Charges internes, gains internes**	**49**
3.6	**Références**	**52**

3.1 Introduction

Le but premier de la construction d'un bâtiment est d'assurer protection, confort et sécurité.

Satisfaire à ces trois exigences demande à l'architecte de résoudre une quantité de problèmes. Cela va bien au-delà des buts de ce manuel. Le présent chapitre se contente d'apporter, dans ce domaine, les notions qui aideront l'architecte à intégrer au mieux le bâtiment à son environnement et son climat. Il présentera les notions de confort et les causes, internes au bâtiment, de perturbation de ce confort.

L'homme désire en général des conditions autres que celles de son climat environnant. La construction d'un bâtiment crée alors un climat intérieur propre à satisfaire le confort de l'homme lui-même (habitations, bureaux, …) ou de ses activités (usines, entrepôts, …).

Un climat intérieur est satisfaisant lorsque, simultanément, il assure :

- le confort hygrothermique ;
- le confort olfactif ;
- le confort visuel ;
- le confort acoustique ;
- etc.

Le chapitre 3.2 présente le confort hygrothermique.

Le confort olfactif et la qualité de l'air sont traités au chapitre 3.3 « Aération ».

Le chapitre 3.4 résume les conditions de confort visuel.

Le confort acoustique et les moyens de l'obtenir ne sont pas traités dans ce chapitre. On consultera, par exemple, les ouvrages [1], [2] et [3].

Le chapitre 3.5 traite des sources internes de chaleur. Suivant leur importance et la période à laquelle elles sont présentes, elles seront considérées comme charges internes, source d'inconfort, ou gains internes, source d'énergie utilisable pour le chauffage.

Règles

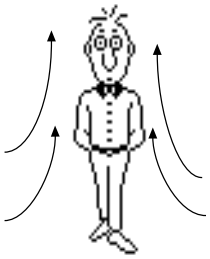
- En fonction du type d'activité et du niveau moyen d'habillement, on déterminera la température intérieure souhaitable. Cette température sera généralement 3 à 5 °C plus élevée en été qu'en hiver suite à un habillement plus léger.
- Au cours de la journée, on admettra une variation de cette température afin de bénéficier des apports solaires passifs en hiver et de la ventilation nocturne en été. Cette variation ne dépassera pas 3 à 5 °C dans les locaux occupés en permanence ; elle pourra dépasser 10 °C dans les locaux de passage (couloir) et les locaux non chauffés (serre)
- Dans l'habitat, un taux de renouvellement d'air de 0,4 à 0,6 h^{-1} est suffisant. Dans les locaux fortement occupé, on comptera, suivant le confort demandé, de 13 à 30 m^3/h pour chaque non fumeur et 20 à 70 m^3/h pour chaque fumeur.
- La lumière naturelle est la source lumineuse la plus efficace. Un dimensionnement et une répartition correcte des ouvertures permettra de limiter les besoins en éclairage artificiel :
  - surface de fenêtres : 10 à 25 % de la surface de plancher ;
  - fenêtres hautes ;
  - vitrages clairs.
- Pour autant qu'elles soient connues, les charges internes attendues dans le futur bâtiment seront déterminantes sur les choix constructifs. Si la charge interne est :

  faible : l'accent sera mis sur la couverture des besoins en chauffage du bâtiment ;

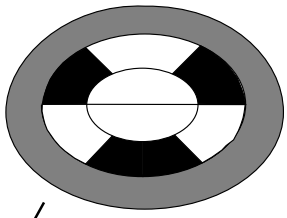
  moyenne : on se trouve dans une situation intermédiaire, il faudra examiner la répartition des charges dans le temps ;

  élevée : l'accent sera mis sur la protection solaire en été.

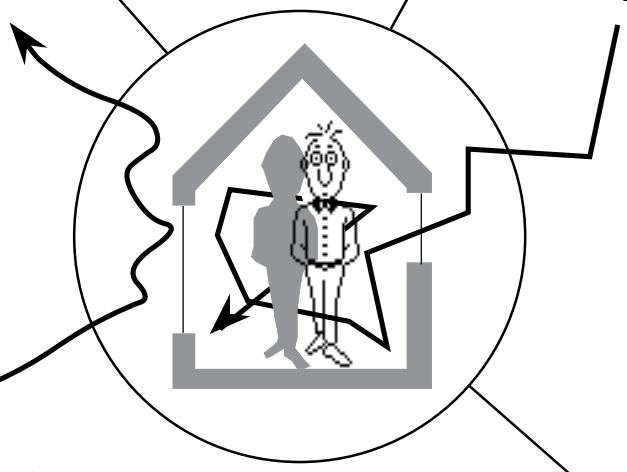
Confort hygrothermique
Chapitre 3.2
Page 40



Confort visuel
Chapitre 3.4
Page 46

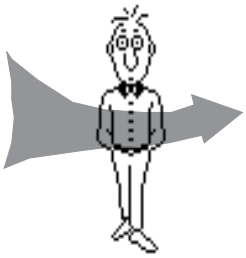


Charges internes, gains internes
Chapitre 3.5
Page 49



Concept énergétique: principes
Perturbations externes du confort
Chapitre 5

Aération
Confort olfactif
Chapitre 3.3
Page 45



3.2 Confort hygrothermique

Le confort et l'homme

La notion de confort thermique peut paraître très subjective ! Telles conditions seront confortables pour un individu et inconfortables pour un autre.

Des études très poussées ont été faites par Fanger [4] pour déterminer quels sont les paramètres du confort et ce qui différencie les individus.

Il est apparu que l'être humain en bonne santé est presque le même quelle que soit la race, l'âge, le sexe, la forme du corps, l'heure, etc. Il est alors possible de créer des conditions de confort propre à satisfaire une majorité de personnes, mais au maximum 95 %.

Dans la suite du chapitre 3.2 nous parlerons donc de :
- confort optimal lorsque 95 % des individus sont satisfaits ;
- confort si 90 % et plus des personnes sont satisfaites et
- d'inconfort lorsque plus de 25 % des personnes sont insatisfaites (ou moins de 75 % satisfaites).

La zone située entre 75 % et 90 % de satisfaction sera jugée plutôt confortable ou plutôt inconfortable suivant les cas.

Le corps humain échange constamment de l'énergie avec son environnement au travers des quatre processus suivants (figure 3.2.1) :
- le rayonnement ;
- la conduction ;
- la convection et
- l'évaporation.

La part des différents processus dépend de plusieurs paramètres. Deux sont liés directement à l'homme :
- son taux de métabolisme (activité) et
- son habillement.

Les autres sont liés à son environnement :
- la température de l'air ;
- la température des surfaces environnantes (sol, plafond, mur, fenêtre, radiateur, mobilier,...)
- le rayonnement solaire ;
- la vitesse de l'air et
- l'humidité relative de l'air.

L'activité de l'homme (tableau 3.2.2) se mesure usuellement en met et son habillement (tableau 3.2.3) en clo.

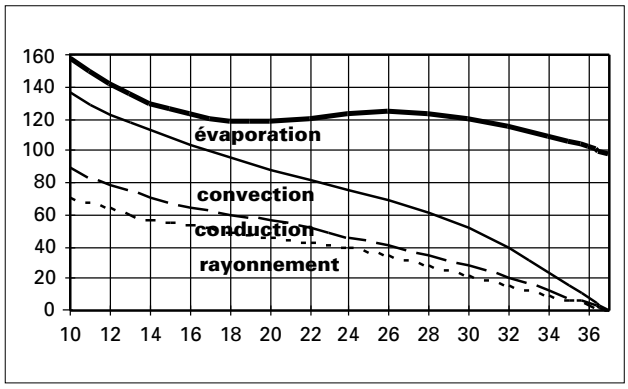


Figure 3.2.1 : Dégagement de chaleur [W] d'un homme en fonction de la température de son environnement.

Activité	Taux [met]	Dégagement de chaleur [W]
Sommeil	0,8	85
Assis tranquille	1,0	105
Travail d'horlogerie	1,1	115
Debout tranquille	1,2	125
Travail de bureau	1,2	125
Travail de laboratoire	1,6	165
Instituteur	1,6	165
Faire des achats	1,6	165
Vendeur	2,0	210
Travaux domestiques	2 à 3,5	210 à 365
Danse	2,5 à 4	260 à 420

Tableau 3.2.2 : Taux de métabolisme moyen de l'homme adulte correspondant à diverses activités.
1 met = 58,15 W/m² (= 50 kcal/h m²).
La surface moyenne du corps humain étant d'environ 1,80 m², 1 met correspond à 105 W.

Habillement	Résistance thermique [clo]
Nu	0
Shorts	0,1
Tenue d'été courte	0,3
Tenue d'été longue	0,5
Tenue de ville légère	0,8
Complet - veston - cravate	1.0
Idem avec manteau de coton	1,5
Tenue d'hiver fourrée	3,0

Tableau 3.2.3 : Résistance thermique des habits.
1 clo = 0,155 m²K/W (= 0,18 °C m² h/kcal).

Dans le climat intérieur usuel d'un bâtiment confortable, la vitesse de l'air est quasi nulle (pas de courants d'air), l'occupant est protégé du rayonnement solaire (stores) et la température des surfaces environnantes est très proche de celle de l'air. A chaque combinaison activité – habillement correspond donc une température optimale (figure 3.2.4) [5, 6].

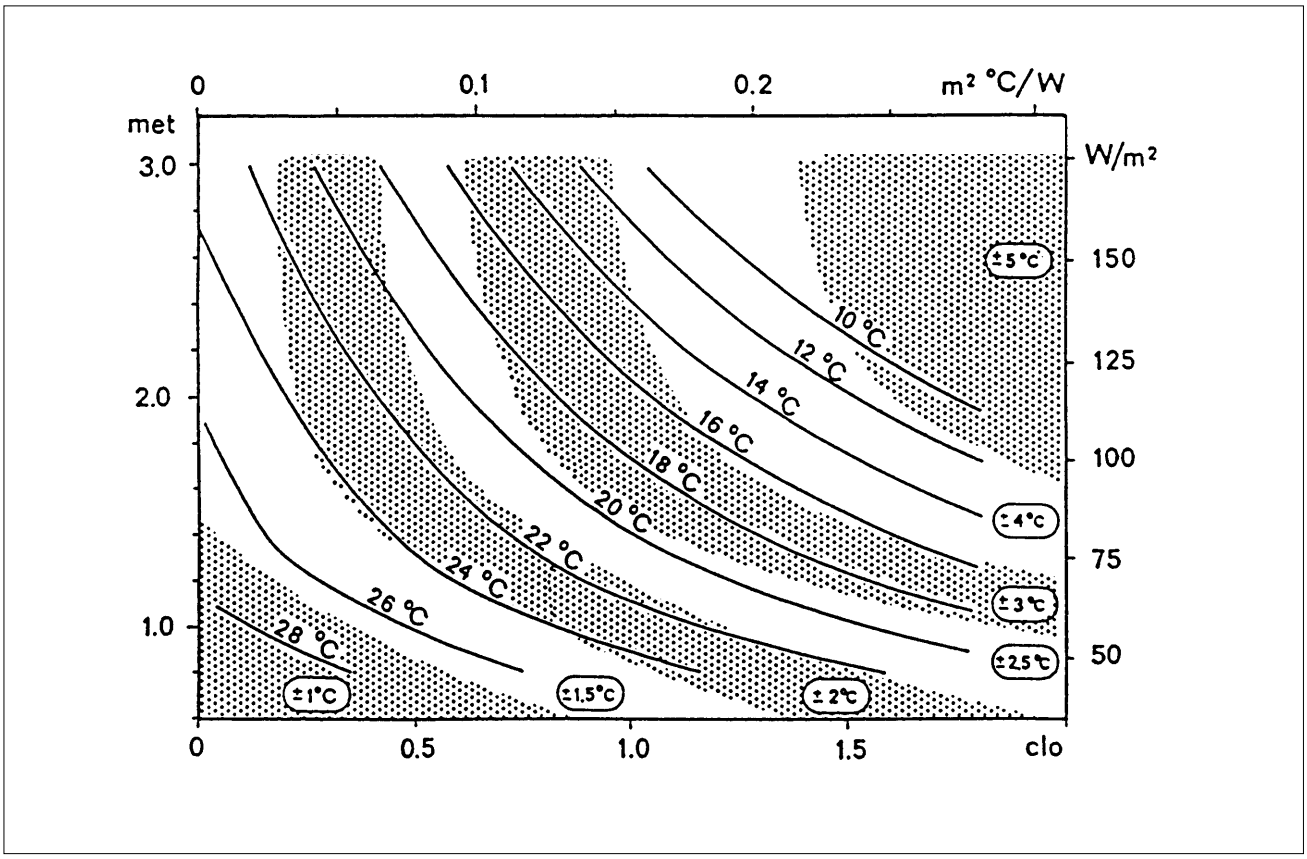


Figure 3.2.4: Température intérieure (air et surfaces) en fonction de l'activité et de l'habillement (pour une humidité relative de 50%).
Les lignes indiquent le valeur optimale. Les zones grisées représentent l'écart de température tolérable pour rester dans la zone de confort. Par exemple, pour une activité de bureaux (1,2 met) et un habillement d'été léger (0,5 clo) la température optimale (95% des personnes satisfaites) et de 24,5°C, mais le confort est assuré (90% des personnes satisfaites) tant que la température reste entre 23°C et 26°C (24,5±1,5°C).

La variation de l'humidité relative de l'air ne modifie que très légèrement la plage de température confortable (figures 3.2.5).

Lorsqu'on s'écarte de cette plage de température, il est encore possible d'assurer le confort en changeant d'autre paramètres.

En hiver, le rayonnement solaire par exemple peut compenser une température faible (figure 3.2.6). On perçoit naturellement cela lorsqu'on se met, sans rajouter de manteau, à l'extérieur dans un endroit abrité du vent et exposé au soleil.

En été, un mouvement d'air nous donne une sensation de fraîcheur, bien que cet air soit chaud.

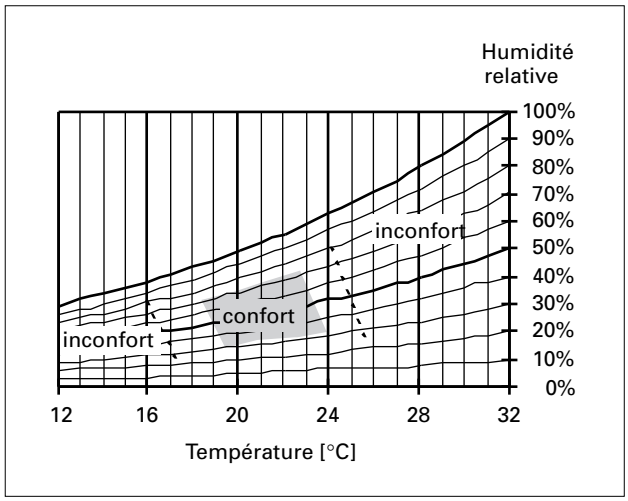


Figure 3.2.5a : Conditions de confort hivernales : pour une activité de 1,2 met et un habillement de 1 clo. Par exemple, pour une humidité relative de 40 %, une température entre 19,5 et 23,5°C est ressentie comme confortable par plus de 90 % des individus.

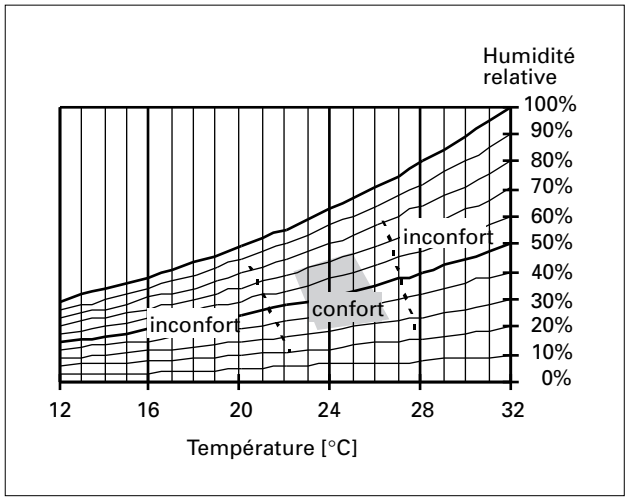


Figure 3.2.5b : Conditions de confort estivales : pour une activité de 1,2 met et un habillement de 0,5 clo. Par exemple, pour une humidité relative de 60 %, une température entre 22,5 et 25,5°C est ressentie comme confortable par plus de 90 % des individus.

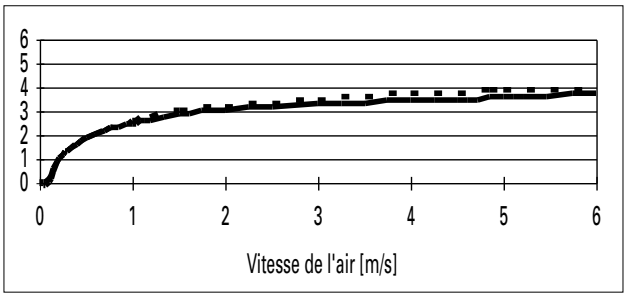


Figure 3.2.6a: Correction qu'il faut apporter à la température ambiante (température de l'air et température des surfaces) en fonction d'un courant d'air (trait continu: hiver, pointillé: été) afin de donner la même sensation de confort.

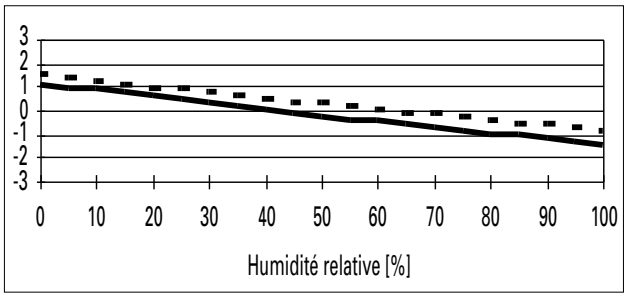


Figure 3.2.6b: Correction qu'il faut apporter à la température ambiante (température de l'air et température des surfaces) en fonction de l'humidité relative (trait continu: hiver, pointillé: été) afin de donner la même sensation de confort.

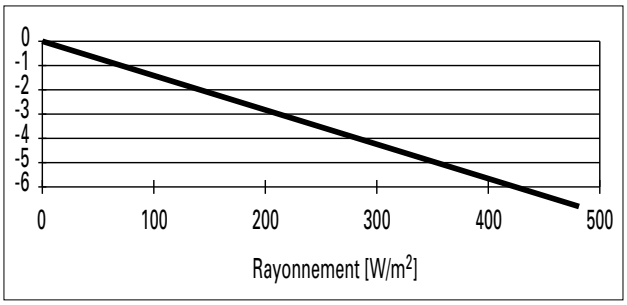


Figure 3.2.6c: Correction qu'il faut apporter à la température ambiante (température de l'air et température des surfaces) en fonction du rayonnement solaire reçu directement par l'homme afin de donner la même sensation de confort.

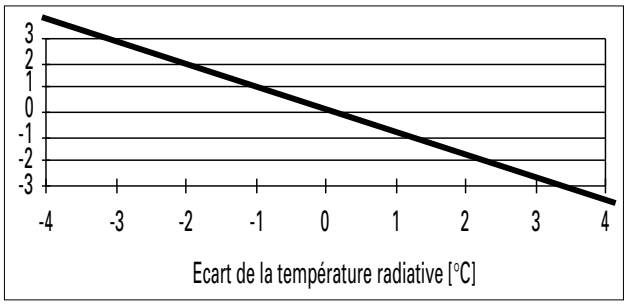


Figure 3.2.6d: Correction qu'il faut apporter à la température de l'air en fonction de l'écart entre la température moyenne des surfaces (température radiative) et la température de l'air afin de donner la même sensation de confort. Cet écart de température peut par exemple être dû à une fenêtre peu isolante (verre simple ou double normal).

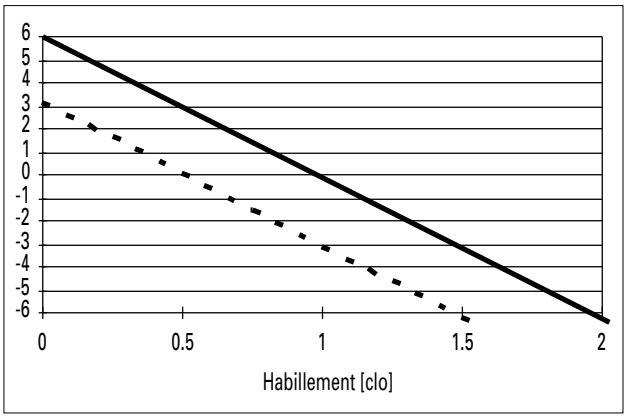


Figure 3.2.6e: Correction qu'il faut apporter à la température ambiante (température de l'air et température des surfaces) en fonction d'un changement d'habillement (trait continu: hiver, pointillé: été) afin de donner la même sensation de confort.

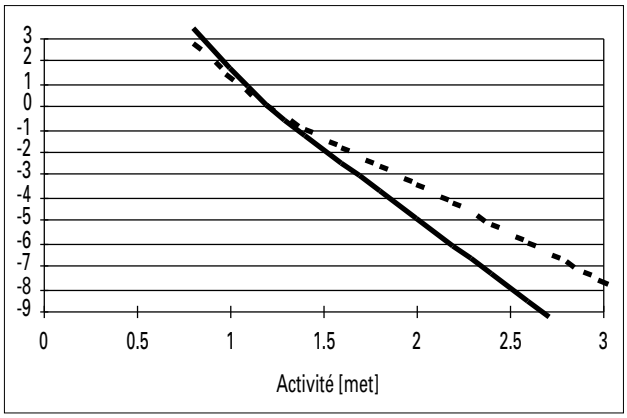


Figure 3.2.6f: Correction qu'il faut apporter à la température ambiante (température de l'air et température des surfaces) en fonction d'un changement d'activité (trait continu: hiver, pointillé: été) afin de donner la même sensation de confort.

Les conditions de base pour les figures 3.2.6 a-f sont: une activité de bureau standard de 1,2 met, un habillement de 1,0 clo en hiver et 0,5 clo en été, une humidité de 40% en hiver et 60% en été, pas de rayonnement solaire, pas de courant d'air. La température des surfaces environnantes est égale à celle de l'air.

Le confort et le bâtiment

En Suisse, les conditions climatiques ne correspondent pas souvent aux zones de confort. On utilise alors différents moyens afin que le climat intérieur se différencie du climat extérieur et assure notre confort. Avant de recourir au chauffage ou à la climatisation, de nombreuses possibilités sont utilisables (figure 3.2.7) :

- utiliser les gains internes ;
- favoriser les apports solaires passifs ;
- augmenter la masse thermique du bâtiment ;
- ventiler la nuit ;
- ...

Température intérieure

La température intérieure des locaux sera adaptée en fonction de l'activité, de l'habillement usuel, du temps de séjour dans un local et du niveau de confort demandé (tableau 3.2.8). Ainsi tout bâtiment sera divisé en plusieurs zones, chacune ayant une température et un niveau de confort différent de l'autre.

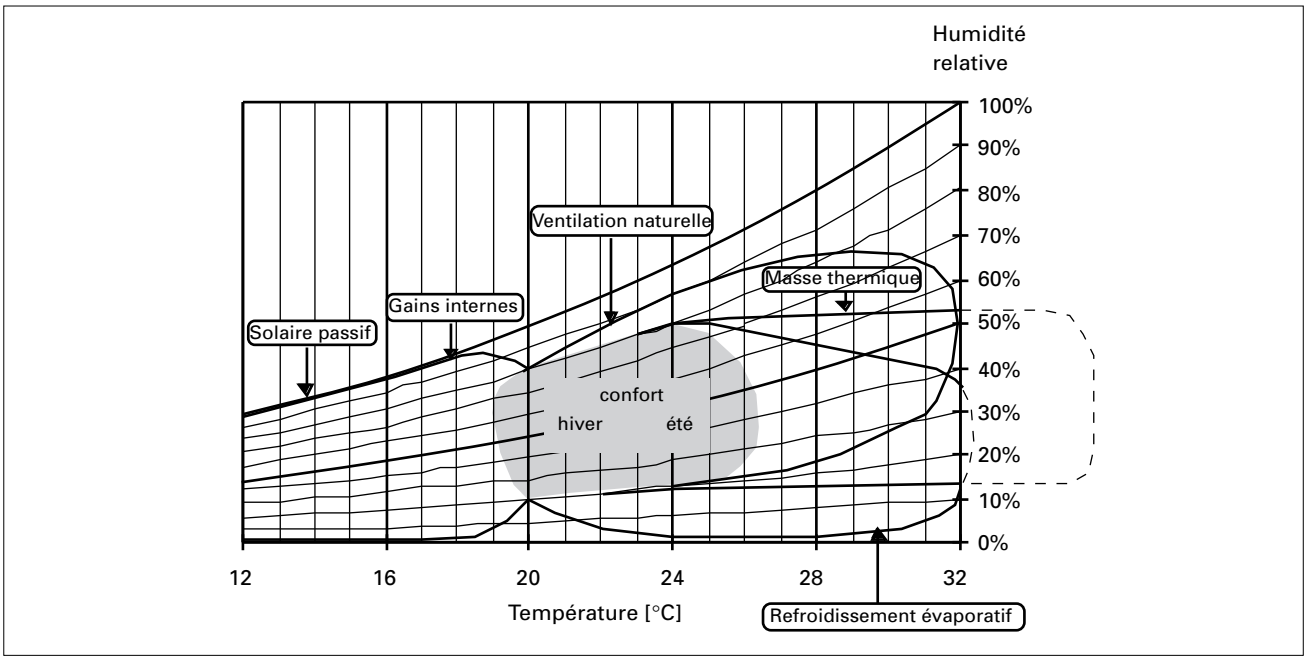


Figure 3.2.7 : En fonction du climat extérieur, moyens de correction pour ramener le climat intérieur dans la zone de confort.

Niveau de confort		Plage de température admissible Hiver	Eté
Faible	Cage d'escalier, locaux de passage	12 - 28°C	16 - 32°C
Moyen	Corridor	15 - 28°C	16 - 32°C
	WC	18 - 26°C	20 - 30°C
Elevé	Locaux de séjours, bureaux, écoles, restaurants, etc.	20 - 24°C	22 - 27°C
Conditions particulières	Salles de bains	22 - 26°C	23 - 30°C
	Hôpital Centre informatique Machine	Selon directives particulières du maître de l'ouvrage	

Tableau 3.2.8 : Températures intérieures recommandées ; on utilisera le domaine de variation admissible pour utiliser au mieux les apports solaires passifs en hiver et la ventilation nocturne en été.

3.3 Aération

Plusieurs raisons peuvent nous conduire à aérer un bâtiment :

- l'envie d'avoir un contact plus étroit avec le monde extérieur ;
- créer un mouvement d'air (même chaud) pour améliorer notre sensation de confort ;
- créer un courant d'air (froid) pour rafraîchir le bâtiment, ou
- changer l'air pour améliorer sa qualité.

La première raison relève du confort « psychologique »… Les effets de la seconde sont présentés au chapitre 3.2. Les moyens et l'efficacité sur le bâtiment d'un courant d'air sont présentés au chapitre 5.

Améliorer la qualité de l'air a trois buts :

- assurer la santé de l'occupant ;
- satisfaire le confort olfactif.
- assurer la conservation du bâtiment.

Ce qui signifie en pratique amener de l'oxygène aux occupants et diluer les divers polluants :

- gaz carbonique (dioxyde d'azote CO_2) dû à la respiration humaine ;
- odeurs et impuretés diverses (fumée, solvants, etc.) dues à l'homme et à son activité ;
- humidité due à l'activité humaine (respiration, douche, cuisine, plantes,…);
- gaz carbonique, humidité,… dus à la combustion (source de chaleur) ;
- substances diverses provenant du bâtiment (radon) ou de son agencement (formaldéhyde).

Les besoins vitaux en oxygène sont très vite couvert puisque il suffit par personne d'environ 0,2 m^3/h.

La sensation de confort olfactif est liée, entre autres, à la concentration en gaz carbonique. Afin d'évacuer ce dernier, le besoin en air frais est, par personne, de :

- 15 m^3/h pour éviter l'inconfort (moins de 25 % de personnes insatisfaites) ;
- 30 m^3/h pour assurer le confort (plus de 90 % de personnes satisfaites).

L'humidité apportée par l'homme est évacuée par les débits ci-dessus. Au cas où les autres sources d'humidité sont nombreuses une aération supplémentaire, et variable avec la saison, sera nécessaire afin d'éviter des dégâts au bâtiment.

En fonction de la quantité de cigarettes fumées, ces valeurs seront largement augmentées (jusqu'à 70 m^3/h et plus).

Par temps très froid (milieu de l'hiver), on admet généralement un inconfort plus grand afin de réduire les pertes thermiques dues à l'aération. Dans ce cas le taux de renouvellement d'air est d'au moins 0,3 h^{-1}, ou s'il s'agit d'un local fortement occupé, l'aération par personne sera de 13 m^3/h pour un non-fumeur et 20 m^3/h pour un fumeur [7].

Evacuer les polluants avant qu'ils ne soient dilués permet d'assurer une haute qualité d'air avec un minimum d'aération.

Cela a un certain nombre de conséquences sur l'organisation interne du bâtiment :

- les locaux dont les besoins en aération sont grands doivent être placés en façade ;
- l'air des cuisines (et des locaux sanitaires) chauffé par le rayonnement solaire ou les gains internes ne peut pas être transféré dans des locaux plus frais ;
- les cuisines et les locaux sanitaires doivent être disposés aux endroits où, par aération naturelle, l'air sort du bâtiment et non là où il y rentre (voir chapitre 5).

Si ces dispositions ne peuvent être suivies, une aération mécanique sera nécessaire afin d'assurer la qualité de l'air.

3.4 Confort visuel

Assurer pour l'homme le confort visuel et bien plus difficile que le confort thermique. Les études ont montré que les différences entre individu peuvent être très grandes (figure 3.4.1) et que, statistiquement, il n'est pas possible de satisfaire simultanément plus de 75% des personnes (alors que ce maximum est de 95% pour le confort thermique). Les appréciations doivent donc être redéfinies et nous parlerons de:

- confort optimal lorsque 75% des individus sont satisfaits;
- confort si 60% et plus des personnes sont satisfaites et
- d'inconfort lorsque plus de 75% des personnes sont insatisfaites (ou moins de 25% satisfaites).

Trois conditions doivent être simultanément observées afin d'assurer le confort visuel:

- un niveau d'éclairement adéquat;
- des contrastes modérés et
- un bon rendu des couleurs.

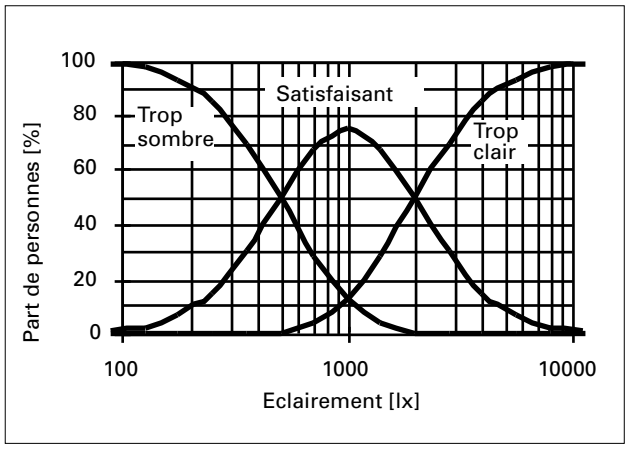


Figure 3.4.1: Pourcentage de personnes satisfaites en fonction de l'éclairement (dans des conditions de contraste excellentes et une activité à exigences moyennes).

Eclairement

L'éclairement est la quantité de lumière (flux lumineux) reçu par une surface (le plan de travail) et se mesure en lux (lx). Il provient d'une source lumineuse (soleil, lampe) non seulement directement mais aussi par réflexion sur les parois et les objets.

L'œil a heureusement, grâce à son iris qui joue le rôle de diaphragme, la faculté de s'adapter à des éclairement qui peuvent être fort variables (tableau 3.4.2).

Situation	Eclairement [lx]
Journée d'été très ensoleillée (midi)	100000
Ciel couvert en juin (midi)	20000
Ciel couvert en décembre (midi)	7000
Ciel couvert 1h après le lever du soleil	3500
Intérieur des bâtiments	60 à 2000
Nuit de pleine lune	0,25
Nuit de nouvelle lune	0,01
Limite de perception de l'œil	10^{-9}

Tableau 3.4.2: Exemples d'éclairement.

Contrairement au confort thermique, la sensation de confort visuel varie sensiblement avec l'âge (figure 3.4.3) et les valeurs d'éclairement données ci-après ne sont que des moyennes qu'il y aura lieu d'adapter en fonction des occupants prévus.

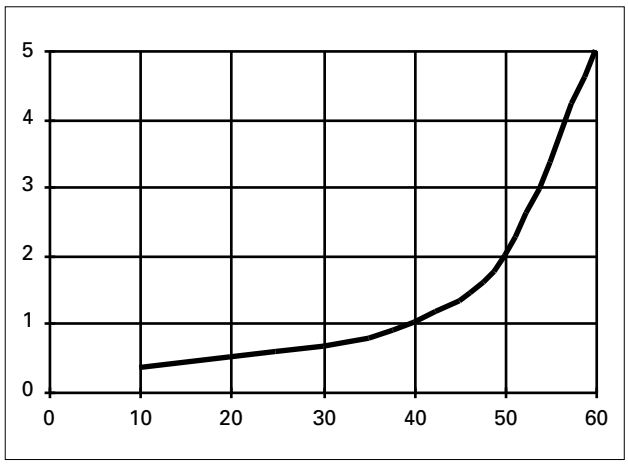


Figure 3.4.3: Variation de l'éclairement souhaité en fonction de l'âge.

Facteur de lumière du jour

Une grandeur annexe, couramment utilisée en éclairage naturel, est le facteur de lumière du jour (FLJ). C'est le rapport de l'éclairement mesuré à l'intérieur d'un bâtiment à l'éclairement mesuré simultanément à l'extérieur sur un plan horizontal (figure 3.4.4).

Cette valeur permet de caractériser l'ambiance lumineuse d'un local (tableau 3.4.5).

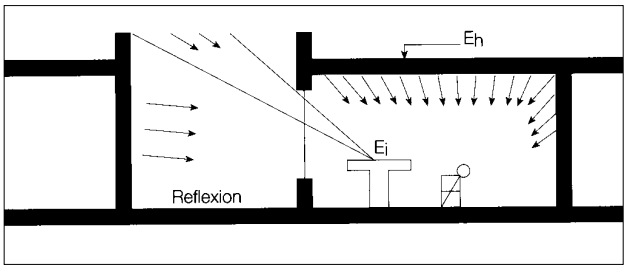


Figure 3.4.4: Définition du facteur de lumière du jour:
Eh = éclairement horizontal à l'extérieur par ciel couvert
Ei = éclairement sur le plan de travail à l'intérieur
FLJ = Eh/Ei = facteur de lumière de jour

Contraste

Pour le confort de l'œil, les contrastes doivent être modérés.

Un contraste est un rapport de luminance, ou, plus communément, un rapport de brillance, de surface lumineuse ou éclairée.

Les contrastes admissibles ne sont pas les mêmes pour tout le champ visuel (figure 3.4.6). Dans sa partie centrale (champ de travail), le rapport des luminances ne devraient pas dépasser 1:3. Ceci s'applique également au travail à l'ordinateur où l'écran et le document (feuille de papier) font tous deux partie du champ de travail.

Facteur de lumière du jour	Appréciation	Ambiance lumineuse perçue	Relation avec l'extérieur
<1% 1 à 2%	Très faible à faible	Sombre à peu éclairé	Refermé sur lui-même, isolé
2 à 4% 4 à 7%	Moyen à élevé	Peu éclairé à lumineux	Ouvert par endroits sur l'extérieur
7 à 12% >12%	Elevé à très élevé	Lumineux à très lumineux	Largement ouvert, lié au monde extérieur

Tableau 3.4.5: Ambiance lumineuse perçue et relation du local avec l'extérieur en fonction du facteur de lumière du jour [8].

La luminance est la quantité de lumière (intensité lumineuse) émise par une surface, soit directement, soit par réflexion, et se mesure en candela par mètre carré (cd/m²).

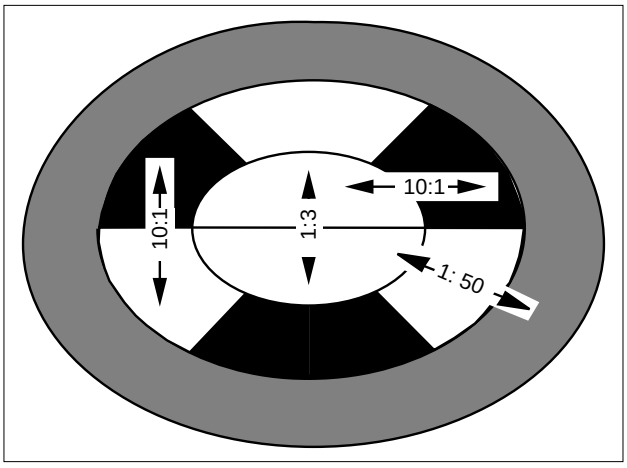


Figure 3.4.6: Contrastes admissibles:
– dans le champ de travail: 1 à 3,
– dans le champ visuel: 1 à 10,
– entre le champ de travail et le champ visuel: 1 à 10,
– entre le champ de travail et le reste du local: 1 à 50.

Rendu des couleurs

L'index de rendu des couleurs (tableau 3.4.7) décrit comment, par rapport au cas idéal, une couleur, éclairée par une source lumineuse, est perçue.

Trois causes peuvent conduire à un rendu de couleur inférieur à 100 :
- les sources d'éclairage artificiel ;
- des fenêtres à verres teintés ;
- des parois de couleurs intenses.

Pour des hautes exigences, inspection de couleur par exemple, l'index de rendu des couleurs devrait être supérieur à 90.

Classe	Propriété de rendu	Index de rendu (R)
1	Très bonnes	85 à 100
2	Bonnes	70 à 84
3	Suffisantes	40 à 69
4	Médiocres	moins de 40

Tableau 3.4.7 : Index de rendu de couleur et propriétés correspondantes.

Il convient de remarquer que la lumière a aussi des effets non visuels sur l'homme. Les études dans ce domaine sont encore très peu nombreuses. Il semblerait toutefois qu'un éclairement de 1000 à 2500 lux serait nécessaire une heure par jour afin d'éviter des baisses de performances (psychiques) saisonnières.

Besoins en éclairement

L'éclairement nécessaire à l'intérieur des locaux dépend de l'activité prévue. Les éclairements recommandés du tableau 3.4.8 sont très en dessous de l'éclairement optimal. Cela provient du fait qu'il est très difficile, et très coûteux, d'assurer à la fois un éclairement optimal et des faibles contrastes.

Un éclairement plus faible diminuera sensiblement les contrastes et finalement conduira à un meilleur (mais non optimal) confort visuel.

Exigences	Locaux, activités	Eclairement recommandé [lux]	Facteur de lumière du jour recommandé [%]	
			Minimum	Maximum
Réduites	Circulations Toilettes, caves	moins de 120	1,5	
Modérées	Entrées, chambres à coucher, séjour, restaurant, buanderies, salle de gymnastique	120 à 250	1,5	6 à 10
Moyennes	Cuisine, salles de bains, piscines, locaux de travail, salles de réunion, hôtellerie, écoles, logements, activité à l'ordinateur	250 à 500	1,5 à 2,5	6 à 10
Au-dessus de la moyenne	Laboratoire, atelier de mécanique, magasins, couture, lecture, écriture, dessin	500 à 1000	2,5 à 5	6 à 10
Elevées	Travaux manuels fins, ateliers de mécanique fine, studios de prise de vue	1000 et plus	5 et plus	10 à 15

Tableau 3.4.8 : Eclairements recommandés

3.5 Charges internes, gains internes

Chaque bâtiment comporte trois sources internes de chaleur:
- les occupants;
- l'éclairage et
- les divers appareils.

Les dégagements de chaleur de ces différentes sources peuvent être les bienvenus en hiver, car ils contribuent au chauffage du bâtiment, mais ils peuvent aussi être indésirables en été car ils provoqueront des surchauffes.

La même source de chaleur sera donc qualifiée de gain ou de charge suivant le point de vue.

Il faut ici remarquer que la quasi-totalité de l'énergie consommée par les appareils électriques se transforme finalement en chaleur. L'exception la plus notable est la (très faible) part de lumière qui sort du bâtiment par les fenêtres!

La seule connaissance de la densité d'occupation du bâtiment ou de la puissance électrique des appareils ne donne aucune information sur les dégagements de chaleur.

Il faut toujours prendre en compte les horaires de présence et les heures de fonctionnement.

Personnes

Les dégagements de chaleur des personnes dépendent évidemment de leur activité. Le tableau 3.5.1 donne la puissance spécifique dissipée par les occupants pour des locaux et une activité standard. On corrigera ces valeurs lorsque l'activité est plus élevée (voir chapitre 3.2).

Affectation	Densité d'occupation [m²/P]	Temps de présence [h/d]	Charges / gains internes instantanés [W/m²]	Charges / gains internes moyens sur 24 h [W/m²]
Villa	50	12	1,6	0,8
Immeuble d'habitation	30	12	2,7	1,3
Bureau à faible densité	20	8	4	1,3
Bureau à densité moyenne	10	8	8	2,7
Bureau à forte densité	5	8	16	5,3

Tableau 3.5.1: Puissance spécifique due aux occupants pour un taux d'activité standard SIA (80 W/personne).

Eclairage

La puissance électrique installée pour l'éclairage est directement fonction du niveau d'éclairement demandé (figure 3.5.2).

Les dégagements de chaleur qui en résultent sont eux liés à l'efficacité, ou plutôt à la non-efficacité, de l'éclairage naturel. C'est en fonction du degré d'autonomie de l'éclairage naturel (voir §§ 4.5 et 5.8) que l'on pourra déterminer les gains internes dus à l'éclairage artificiel.

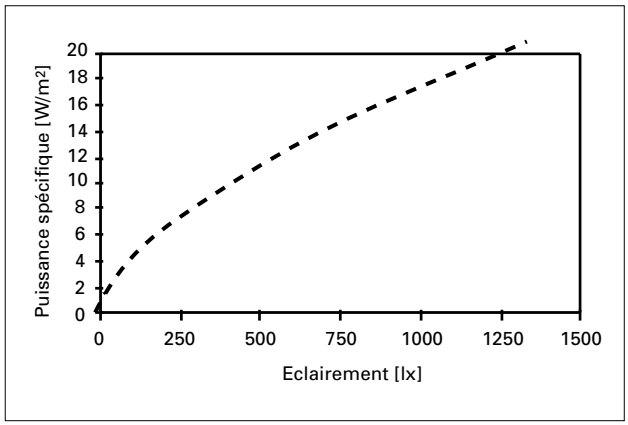


Figure 3.5.2 : Puissance spécifique installée de l'éclairage en fonction de l'éclairement (valeurs indicatives).

Appareils électriques

A l'exception des habitations, c'est la principale source de gains/charges internes. C'est une grandeur qui peut être extrêmement variable selon l'activité prévue dans les futurs locaux.

Une enquête approfondie doit être faite chez le maître de l'ouvrage. Malheureusement, ce dernier ne les connaît en général pas.

La puissance de raccordement électrique (pour les services industriels), pas plus que la somme des puissances nominales (fiches signalétiques) des appareils n'apportent de données utilisables.

Si le bâtiment en projet est destiné à accueillir les activités actuelles du maître de l'ouvrage, alors les factures d'électricité actuelles pourront apporter des précieuses informations sur les dégagements internes de chaleur.

Par rapport à une situation actuelle, deux phénomènes, agissant en sens contraire, peuvent en modifier l'importance :

- un déménagement peut s'accompagner d'une informatisation ou d'une intensification du parc de machines et ainsi conduire à une augmentation des charges internes ;
- les appareils de bureaux modernes sont conçus de sorte à consommer moins d'électricité et cette tendance continuera encore dans les années à venir (tableau 3.5.3).

	Valeur moyenne typique en mode d'exploitation normale	Bons appareils actuels*		Bons appareils futurs (1996-1999)*	
		Déclenché	Veille	Déclenché	Veille
Ordinateur personnel (sans l'écran)		5	30	3	10
Ordinateur personnel (avec l'écran)	150	5	60	3	13
Ecran d'ordinateur (jusqu'à 21 pouces)		5	30		3
Imprimante laser	100	3	25	1	2
Imprimante (autres types)	20	3	8	1	2
Photocopieuse	300	3	60	1	60
Fax	20	–	9	–	2

Tableau 3.5.3: valeurs de puissance [W] pour appareils de bureaux
** = selon les données de l'Office fédéral de l'énergie (Energie 2000). Des mêmes données existent pour les appareils domestiques.*

3.6 Références

[1] Norme SIA 181 « Protection contre le bruit dans le bâtiment »
SIA, Zurich, 1988.

[2] Manuel « Etudes et projets »
PI.1 Amélioration thermique des bâtiments, OFQC, 1983
Publication N° 724.500 f.

[3] Les installations techniques dans la planification intégrale, volume A
PI.2 Installations techniques des bâtiments, OFQC, 1987
Publication N° 724.608 f/1.

[4] Fanger, P. O.
Thermal Comfort
Robert E. Krieger Publishing company,
Malabar, Florida, 1982.

[5] International Standard 7730 Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort
ISO, Genève, 1984.

[6] Norme européenne EN 27730
Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique
CEN, Bruxelles, 1993 (?).

[7] Recommandation SIA 384/2 « Puissance thermique à installer dans les bâtiments »
SIA, Zurich, 1983

[8] L'électricité à bon escient
RAVEL, OFQC, Berne, 1993
Publication N° 724.302 f.

4. Performances

4.1	**Introduction**	**54**
4.2	**Performances énergétiques, règlements**	**56**
4.3	**Performances économiques: prix et coûts de l'énergie**	**59**
4.4	**Performances de confort**	**60**
4.5	**Performances d'éclairage naturel**	**61**
4.6	**Références**	**62**

4.1 Introduction

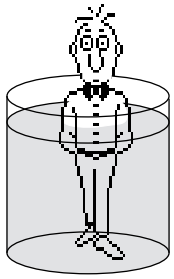
Dès la phase initiale d'un projet, on devrait se fixer des objectifs clairs en matière de performances. De tels objectifs ne doivent pas être considérés comme des contraintes, mais plutôt comme des guides qui permettent, à tout moment, de situer le projet par rapport aux buts attendus.

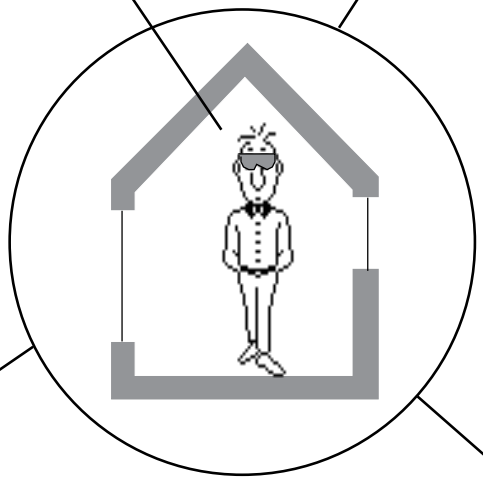
Règles

- Au niveau de l'énergie, le calcul de l'indice partiel de chauffage, à l'aide d'un logiciel simple, permet à tout moment de situer son projet par rapport aux objectifs ou par rapport à des constructions existantes.
- Une fois les besoins en énergie connus, il sera possible d'évaluer les coûts d'exploitation (ou du moins, la part liée à l'énergie) du bâtiment. La valeur absolue des coûts d'achat d'énergie n'entre pas seule en considération. On tiendra également compte des conséquences sur l'environnement qu'engendrera la production et la consommation de cette énergie.
- En plus des besoins en énergie, certains logiciels donnent une évaluation des risques de surchauffe (température moyenne attendue ou nombre d'heures de surchauffe). De telles prévisions sont très utiles pour évaluer la qualité du confort thermique et estimer, par exemple, l'efficacité des protections solaires.
- Quelques logiciels simulent l'éclairage naturel et donne une image photographique de l'intérieur d'un local. On obtient ainsi la quantité et la qualité de l'éclairage naturel. Ces logiciels sont toutefois encore assez complexe à utiliser et on les trouve surtout dans des bureaux d'ingénieurs ou des instituts universitaires.

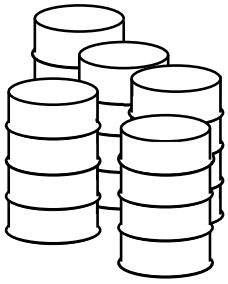
Performances d'éclairage naturel
Chapitre 4.5
Page 61

Performances de confort
Chapitre 4.4
Page 60





Performances énergétiques
Chapitre 4.2
Page 56



Performances économiques
Chapitre 4.3
Page 59

4.2 Performances énergétiques, règlements

Il existe de très nombreux moyens de caractériser la performance énergétique d'un bâtiment. Citons par exemple :

- la consommation d'énergie ;
- la fraction solaire ;
- le coefficient de transmission de chaleur moyen (coefficient k moyen) ;
- la demande d'énergie de chauffage ;
- l'indice énergétique ;
- ...

Consommation d'énergie

La consommation d'énergie se mesure, selon le vecteur énergétique utilisé :

- en unités énergétiques, kilowattheure (kWh) ou mégajoule (MJ), pour l'électricité et le chauffage à distance ;
- en unités volumiques, mètre cube (m^3), litre (l ou L) ou stère (st), pour le gaz, le mazout, le bois et le charbon ;
- en unité massique, kilogramme (kg), pour le bois ou le charbon.

La consommation d'énergie est utilisée pour déterminer de coût de l'énergie consommée, mais elle permet difficilement de caractériser la performance du bâtiment puisqu'elle dépend de la taille de celui-ci.

Electricité	1 kWh	=	3,6	MJ
Chauffage à distance	1 kWh	=	3,6	MJ
Gaz naturel	1 m^3	=	36,3	MJ
Mazout extra-léger	1 l	=	36	MJ
Bois (sapin sec)	1 st	=	5600	MJ
Bois (feuillus)	1 st	=	6000	MJ
Charbon	1 kg	=	29,3	MJ
Anciennes unités:				
Calorie	1 cal	=	4186,8	J
British thermal unit	1 btu	=	1055,1	J

Tableau 4.2.1: Correspondance des unités de consommation d'énergie

Fraction solaire

La fraction solaire, exprimée en pour cent, indique la part des pertes brutes couverte par l'énergie solaire. Cette valeur n'est pas vraiment représentative de la qualité de la construction. Un bâtiment avec une fraction solaire élevée et une mauvaise enveloppe peut consommer davantage qu'un bâtiment semblable avec une bonne enveloppe et une fraction solaire plus faible.

Coefficient k moyen

La valeur moyenne du coefficient transmission de chaleur, appelé coefficient k ou valeur k (W/m^2K), caractérise l'enveloppe du bâtiment. Elle néglige la situation du bâtiment (climat) et son utilisation (habitants) et ne tient presque pas compte des gains solaires.

La recommandation SIA 180/1 « Justification de la valeur moyenne de k de l'enveloppe des bâtiments » [1] indique comment la calculer et quelles sont les valeurs admissibles.

Demande d'énergie de chauffage

La demande d'énergie de chauffage indique la quantité d'énergie que l'installation de chauffage doit fournir au bâtiment pour maintenir la température intérieure désirée. Cette quantité est rapportée à la surface de référence énergétique (total de toutes les surfaces brutes de plancher qui correspondent à des locaux chauffés ou climatisés [2]) et s'exprime donc en MJ/m^2.

La recommandation SIA 380/1 « L'énergie dans le bâtiment » [3] donne la méthode de calcul de cette demande d'énergie de chauffage et indique les valeurs admissibles.

Le modèle d'ordonnance « Utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment » [4] précise comment appliquer la méthode de calcul définie dans la SIA 380/1 selon les spécificités de chaque canton. Les lois sur l'énergie de nombreux cantons de Suisse alémanique demande l'utilisation du modèle d'ordonnance. En Suisse romande, l'application de ce modèle d'ordonnance est encore en discussion.

Une norme, provisoirement codée prEN832 et nommée « Performance thermique des bâtiments – Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage » [5], est actuellement préparée par le comité européen de normalisation (CEN). Elle tient mieux compte que les normes ci-dessus de tous les éléments solaires que peut comporter un bâtiment. Une fois approuvée, elle entrera rapidement en vigueur, en Suisse aussi, et remplacera probablement la méthode de calcul de la SIA 380/1 dès 1997.

	SIA 180/1	SIA 380/1	Modèle d'ordonnance
ZH			**X**
BE			**X**
LU			**X**
UR			**X**
SZ			**X**
OW		**X**	
NW		**X**	
GL		**X**	
ZG			**X**
FR		**X**	
SO			**X**
BS			**X**
BL			**X**
SH	**X**		
AR		**X**	
AI	**X**		
SG		**X**	
GR			**X**
AG	**X**		
TG		**X**	
TI		**X**	
VD	**X**		
VS	**X**	**X**	
NE	**X**	x	x
GE	**X**		
JU			**X**

Tableau 4.2.2: Prescriptions d'isolations thermiques suivant les cantons (au 1.4.95).

Indice énergétique

L'indice énergétique, ou indice de dépense d'énergie [3], (E en MJ/m^2) est obtenu en divisant la consommation annuelle d'énergie totale (de tous les agents énergétiques) par la surface de référence énergétique (SRE).

Il se divise en:
- indice de dépense d'énergie de chauffage (Ech);
- indice de dépense d'énergie d'eau chaude (Eec);
- indice de dépense d'énergie sous forme d'éclairage, de force motrice et de fonctionnement des équipements de production (Eéfp).

ou en:
- indice de dépense d'énergie thermique (Eth);
- indice de dépense d'énergie électrique (Eél).

Suivant le mode de production de l'eau chaude, l'Eec est compté sous l'Eth ou l'Eél.

Les valeurs considérées comme satisfaisantes s'ajustent suivant le type de bâtiment (tableau 4.2.3).

De très nombreux logiciels permettent de calculer selon les diverses recommandations en vigueur. Ils sont disponibles auprès des fournisseurs de matériels de chauffage, des services cantonaux de l'énergie, d'écoles spécialisées ou d'instituts fédéraux. Une liste avec brève description, configuration nécessaire, coûts, peut être trouvée dans la documentation SIA D 503 « Catalogue du logiciel » [6] ou auprès de l'Office fédéral de l'énergie.

En annexe A.4.1, on trouvera une sélection de logiciels travaillant en langue française.

Affectation	Indice de dépense d'énergie thermique Eth [MJ/m^2]	Indice de dépense d'énergie électrique Eél [MJ/m^2]
Villas et maisons pour deux familles	400 *310	80 *130
Immeubles à appartements	410 *280	100 *150
Foyers pour personnes âgées, pour enfants, pour jeunes	410	100
Hôtels simples	410	200
Bâtiments administratifs: – à ventilation naturelle – à ventilation mécanique dans de grande partie du bâtiment – à climatisation (par ex. banque sans les centres informatiques)	 *240 *240 *240	 *80 *175 *250
Ecoles: – jardins d'enfants, écoles primaires, écoles secondaires – écoles secondaires supérieures, écoles professionnelles et professionnelles supérieures	 290 290	 30 100
Magasins simples (sans ventilation ni appareils frigorifiques)	*240	*100
Entrepôts, ateliers	*220	*80
Hautes écoles	320	200
Grands magasins (à climatisation et froid artisanal)	260	600
Etablissements de soins	470	150
Hôpitaux (généraux)	500	200
Piscines couvertes: – petites (SRE < 3000 m^2) – grandes (SRE > 3000 m^2)	 700 1000	 250 350

Tableau 4.2.3: Valeurs satisfaisantes des indices de dépense d'énergie concernant les bâtiments à construire (selon SIA 380/1).
** signifie que la production d'eau chaude est faite par un dispositif électrique.*

4.3 Performances économiques : prix et coûts de l'énergie

Discuter du coût de la construction du bâtiment n'est pas le but de ce chapitre. Il s'agit ici uniquement de prendre connaissance de la valeur de l'énergie. Une étude récemment faite [7] dont sont tirés les chiffres de ce chapitre, nous permet d'y voir plus clair.

Le prix est lié à ce que nous dépensons directement pour l'achat de l'énergie. Il comprend les coûts, dits internes, tels que coûts de matières premières, d'exploitation, de transformation, de stockage, de distribution, de capital et de main-d'œuvre. De plus, il dépend de l'offre et de la demande. Durant ces dernières années, ces prix étaient à la baisse (tableau 4.3.1).

Agent énergétique	Variation de prix
Electricité	-15%
Gaz naturel	-24%
Mazout extra-léger	-54%
Bois	-4%
Charbon	+2%

Tableau 4.3.1: Evolution des prix réels de l'énergie (prix nominaux diminués du renchérissement) de 1980 à 1992.

Toutes les activités liées à l'utilisation de l'énergie provoquent des effets secondaires. Les principaux sont :

- la pollution atmosphérique qui provoque des dommages aux forêts, des pertes de production agricole, des maladies, une dégradation plus rapide des bâtiments, etc. ;
- la pollution des eaux et du sol ;
- des dégâts naturels ;
- des dommages d'espaces naturels ;
- des maladies et décès dus aux activités de production normale de l'énergie.

A cela, s'ajoute d'une part l'effet de serre et d'autre part des risques d'accidents majeurs tels que rupture d'un barrage ou fusion du cœur d'un réacteur nucléaire.

Nous payons les coûts d'un certain nombres de ces effets secondaires de manières indirectes :

- impôts supplémentaires ;
- taxes diverses ;
- assurances maladies plus chères ;
- produits agricoles plus chers ;
- loyers plus élevés.

Ces coûts, non compris dans le prix de l'énergie, sont appelés coûts externes.

L'étude récente a déterminé le montant de ces coûts externes pour les principaux vecteurs énergétiques utilisés dans le bâtiment (tableau 4.3.2).

Agent énergétique	Prix de l'énergie [ct/kWh]	Coûts externes [ct/kWh]
Gaz naturel	5,0	3,4 - 5,1
Mazout ultra-léger	3,5	4,9 - 7,6
Copeaux de bois humide	4,0	0.9 - 2,1
Electricité:		
– sans coûts ext. de risque	14,5	0,7 - 1,6
– avec coûts ext. de risque	14,5	0,8 - 15,6

Tableau 4.3.2 : Coûts externes compte tenu des coûts des dommages et des coûts d'évitement de l'effet de serre (hypothèse la plus favorable !).
Pour l'électricité, la prise en compte du risque d'accident majeur est très difficile. Traduire les conséquences d'un très grand accident (coût d'environ 30'000 milliards de francs, mais probabilité d'un événement tous les 10 millions d'années) en coûts externes ne relève plus seulement des mathématiques mais aussi de la sociologie (comportement des individus face à un tel risque).

Une architecture qui se veut climatiquement équilibrée se doit, non seulement d'être en harmonie avec le climat local, mais aussi de préserver ce climat, et d'être en accord avec un développement durable (tel que défini lors du Sommet de la Terre de juin 1992 à Rio de Janeiro).

Une faible consommation d'énergie sera une conséquence naturelle d'une architecture climatique équilibrée. Mais si les coûts externes font partie des critères de choix du vecteur énergétique le bâtiment sera encore plus en harmonie avec la nature.

Certaines autorités cantonales ou fédérales, demandent déjà, d'une manière plus ou moins stricte, que les coûts externes fassent partie des divers critères de décision.

4.4 Performances de confort

Comme pour l'énergie ou le coût il y a lieu de définir, d'entente avec le maître de l'ouvrage, les performances de confort désirées.

Une température continue et stable est une notion théorique qui n'est ni souhaitable ni réalisable. En effet notre organisme est parfaitement adapté à des fluctuations de température, que ce soit au niveau du jour ou de la saison. Pour autant qu'elles soient raisonnables (quelques degrés), ces variations sont non seulement acceptables mais souhaitables.

Il n'est donc pas raisonnable de vouloir assurer une température parfaitement stable de jour et de nuit et encore moins justifié d'avoir une température intérieure identique en hiver et en été.

Au niveau du bâtiment, une légère fluctuation de température entre le jour et la nuit permettra en hiver de mieux profiter des gains solaires, la masse thermique pouvant alors accumuler l'excédent de chaleur durant la journée pour la restituer la nuit.

Cette même variation permettra en été de profiter de la fraîcheur de la nuit afin de refroidir la structure du bâtiment.

Lors de périodes extrêmes du climat (froid prolongé en janvier ou février, canicule en juillet ou août), il y a même lieu d'aller plus loin et de déterminer quel est l'inconfort tolérable. On définira par exemple la durée (nombre d'heures par an) pendant laquelle on tolérera que le confort des locaux n'est pas assuré.

Cette tolérance d'inconfort définie permettra :

- pour l'hiver de dimensionner adéquatement l'installation de chauffage ;
- en été d'éviter une climatisation ou des stores sur des façades rarement exposées au soleil (nord-est, nord-ouest).

Il faut noter que la tolérance, ou l'intolérance, du maître de l'ouvrage, a ici une très grande importance.

Par exemple, pour le même bâtiment administratif et pour la même période de canicule :

- si l'on tolère une fluctuation de température, une bonne ventilation nocturne évacuera la chaleur emmagasinée la journée précédente ;
- si l'on impose un habillement standard tel complet-veston-cravate, une climatisation sera presque nécessaire pour assurer une température supportable.

4.5 Performances d'éclairage naturel

Un éclairage naturel performant doit apporter une lumière suffisante pour permettre de se passer de l'éclairage artificiel pendant une certaine fraction du temps d'occupation du local.

Il existe un lien entre le facteur de lumière du jour (FLJ) et l'autonomie en éclairage (fig. 4.5.1): par exemple, avec un FLJ de 5% et une exigence d'éclairement de 500 lux, on peut être autonome durant 50% des heures de travail.

Cette dernière valeur (50% d'autonomie) est souhaitable pour le confort visuel et les économies d'énergie.

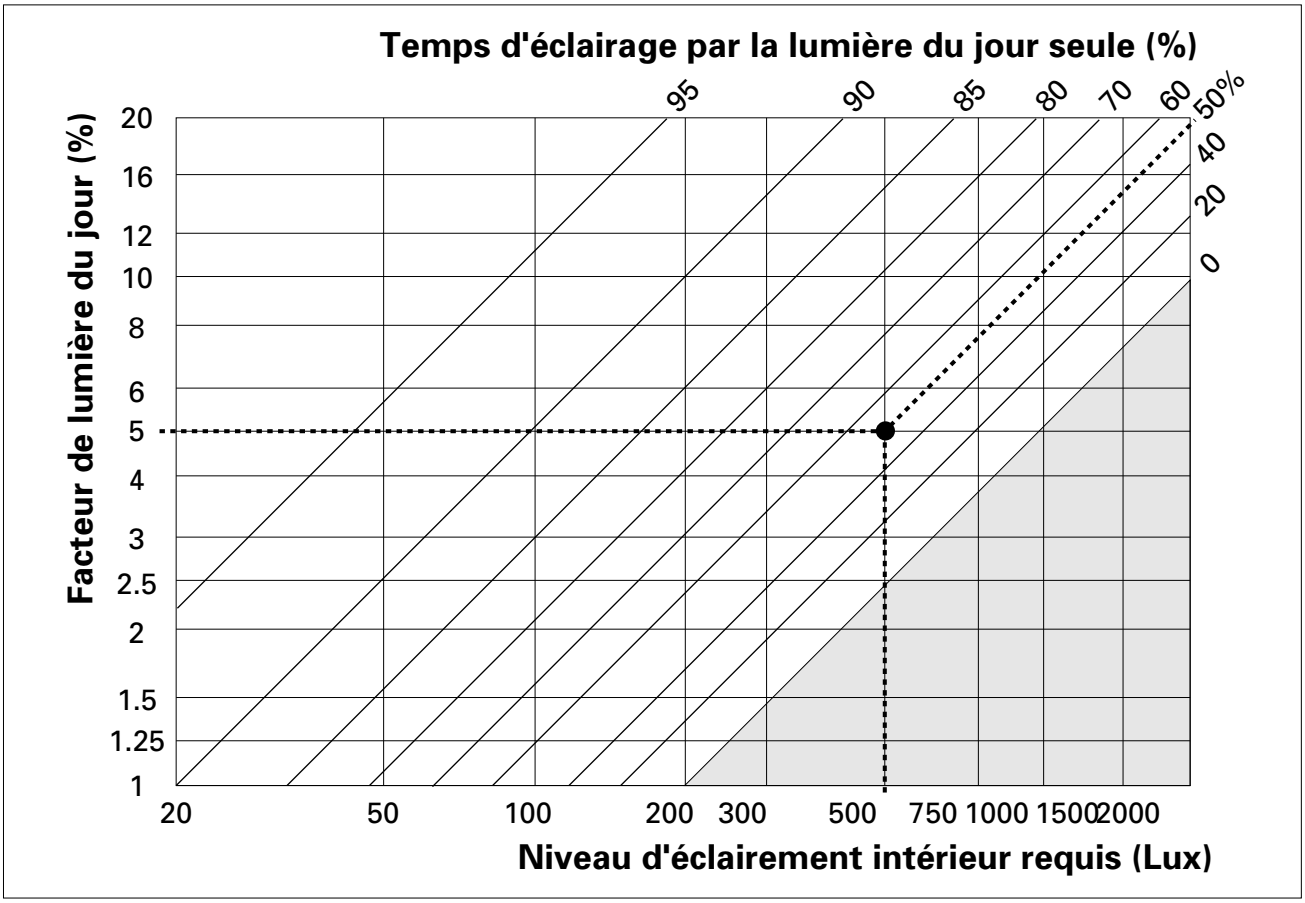


Figure 4.5.1: Temps d'utilisation des locaux avec lumière naturelle (sans éclairage artificiel) en relation avec le facteur de lumière du jour du local et l'éclairement demandé.

4.6 Références

[1] Recommandation SIA 180/1 « Justification de la valeur moyenne de k de l'enveloppe des bâtiments »
SIA, Zurich, 1988.

[2] Recommandation SIA 416 « Surfaces de plancher et cubes de construction »
SIA, Zurich, 1975.

[3] Recommandation SIA 380/1 « L'énergie dans le bâtiment »
SIA, Zurich, 1988.

[4] Utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment – Modèle d'ordonnance
OFEN, Berne, 1993.

[5] Norme européenne prEN832 « Performance thermique des bâtiments – Calcul des besoins d'énergie de chauffage »
Comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles, 1995.

[6] Documentation SIA D503 « Catalogue du logiciel »
SIA, Zurich, 1993.

[7] Coûts externes et surcoûts inventoriés du prix de l'énergie dans les domaines de l'électricité et de la chaleur
PACER, OFQC, Berne, 1994
Publication N° 724.270.7 f.

5. Concept énergétique: principes

5.1	**Capter le soleil**	**66**
5.2	**Stocker la chaleur**	**74**
5.3	**Distribuer la chaleur**	**80**
5.4	**Conserver la chaleur**	**86**
5.5	**Minimiser les gains solaires**	**96**
5.6	**Ventilation naturelle**	**106**
5.7	**Déphasage des gains et ventilation nocturne**	**116**
5.8	**Eclairage naturel**	**118**
5.9	**Références**	**127**

Les principes d'utilisation de l'énergie solaire passive et de la prise en compte du climat dans la conception d'un bâtiment doivent être intégrés dans un processus logique.

L'analyse du site, du climat, du programme et de ses exigences doivent aider le concepteur à choisir un parti et une stratégie : le concept énergétique du projet. Ce concept met en œuvre des principes qui seront présentés dans ce chapitre. Seuls quelques-uns de ces principes seront utilisés dans un concept. Les premières analyses devraient orienter le choix des principes applicables, l'architecte décidant finalement lesquels il désire intégrer dans son projet.

Les stratégies de contrôle du climat font appel à des principes physiques simples qui sont énumérés dans la figure 5.0.1. Les phénomènes d'échange thermique ont lieu sous forme de conduction, convection, rayonnement et évaporation. Selon la saison et le climat on utilisera chacun de ces principes de base pour élaborer une stratégie de contrôle propre au projet architectural.

L'aspect dimensionnement de base (prédimensionnement) est volontairement accentué dans la présentation de ces principes. Pour les détails d'exécution on se reportera à la bibliographie où des ouvrages de références sont présentés.

On traitera presque exclusivement de systèmes dits passifs (captage de l'énergie solaire ou refroidissement). On donne en annexe A5.3 un diagramme qui permet d'estimer les dimensions de la surface de capteurs solaires nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire.

Pour choisir les principes adéquats et les dimensionner on distingue deux périodes : l'hiver et l'été. En pratique on ne pourra pas aussi facilement séparer ces principes : le choix d'un concept pour la période froide aura des conséquences directes sur le comportement du bâtiment en période chaude.

STRATEGIES DE CONTROLE		CONDUCTION	CONVECTION	RAYONNEMENT	EVAPORATION
HIVER	FAVORISER LES GAINS		Minimiser la vitesse d'air sur la peau externe	Favoriser les gains solaires	
	RESISTER AUX PERTES	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air		
ETE	RESISTER AUX GAINS (SE PROTEGER)	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air	Minimiser les gains solaires	
	FAVORISER LES PERTES (EVACUER)	Favoriser les échanges avec le sol (terre)	Favoriser la ventilation	Favoriser le refroidissement par rayonnement	Favoriser le refroidissement par évaporation

Figure 5.0.1 : Principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique [1].

Période froide (hiver)

Dans un climat tempéré comme celui de la Suisse, l'énergie solaire peut être une contribution importante au chauffage d'un bâtiment. Pour atteindre ce but, il faut maîtriser les quatre principes de base:

- **Capter le soleil**: le rayonnement solaire est collecté et transformé en chaleur.
- **Stocker la chaleur**: l'énergie captée est stockée pour une utilisation différée.
- **Distribuer la chaleur**: la chaleur captée et stockée est distribuée aux parties du bâtiment qui requièrent du chauffage.
- **Conserver la chaleur**: la chaleur distribuée est retenue dans le bâtiment.

On fait une première distinction: selon le mode de captage/stockage/distribution de la chaleur on parle de systèmes solaires passifs à gain direct ou à gain indirect.

Il n'est pas possible, comme on l'a imaginé au début de l'utilisation de l'énergie solaire passive, de compenser une faible conservation de l'énergie (enveloppes mal isolées) par un fort captage de l'énergie solaire. Ceci devient vrai aux latitudes plus basses, au niveau de la Méditerranée par exemple.

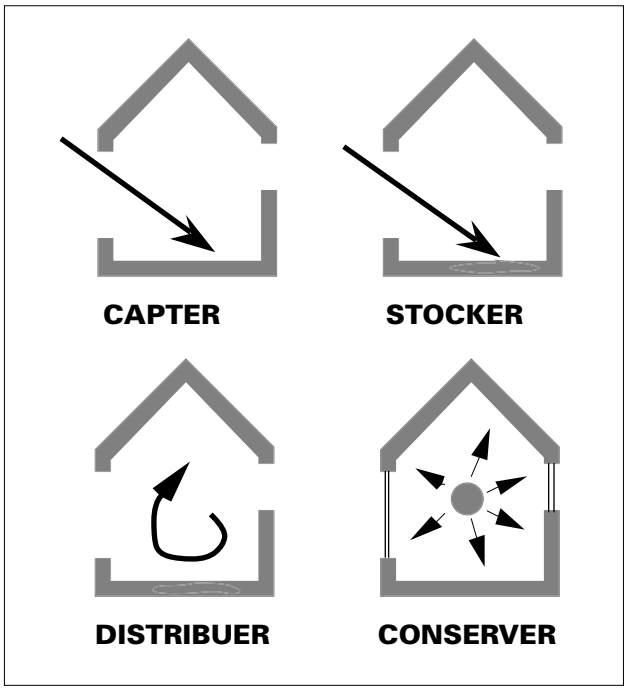


Figure 5.0.2: Période froide: les 4 stratégies de base [2].

5.1 Capter le soleil

Base

Le captage se fait principalement par des surfaces vitrées, qu'elles correspondent à des fenêtres, des murs-capteurs ou des collecteurs solaires.

L'énergie solaire interceptée par une surface opaque isolée (murs, toit) ne pénètre pas vraiment dans le bâtiment, mais est en majorité rediffusée vers l'extérieur: cet apport peut être négligé en hiver.

En tant qu'élément de captage seul (en faisant abstraction de ses fonctions d'apport de lumière et de ventilation naturelle, voir chapitres 5.6 et 5.8), la dimension des fenêtres doit correspondre à la disponibilité du soleil (site, orientation, inclinaison) et à la demande de chaleur (pertes du bâtiment: transmission et renouvellement d'air).

Seule une étude du bilan gains/pertes permettra de bien dimensionner une surface de captage. Dans les gains, on intégrera les gains internes dus au dégagement de chaleur des appareils et des personnes (voir chapitre 3, Analyse du programme).

Pour des bâtiments ou des zones de bâtiment présentant des gains internes importants, il n'est pas judicieux de prévoir des surfaces de captage supplémentaires. On se tiendra au minimum nécessaire à l'éclairage naturel.

Voir aussi

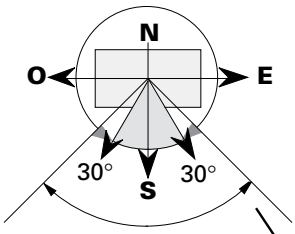
- Chapitre 2 Analyse du site
- Chapitre 5.2 Stocker la chaleur
- Chapitre 5.3 Distribuer la chaleur
- Chapitre 5.4 Conserver la chaleur: la serre
- Chapitre 5.5 Minimiser les gains solaires
- Chapitre 5.8 Eclairage naturel
- Annexe A4 Performances

Règles

- Pour permettre un captage optimal, le **site** devrait être dégagé (libre d'obstacles proches) entre 9 et 15 heures en hiver (novembre à février), soit des azimuts de ± 30 à 45° du Sud.
- En façade Sud, un **réflecteur horizontal** d'une longueur de 1 à 2 fois la hauteur du capteur (fenêtre) augmente le rayonnement hivernal de 20 à 40%.
- La surface de captage (surface vitrée) devrait représenter de **20 à 30%** de la surface de plancher pour du logement et du bâtiment administratif [1, 3, 5, 7, 12, 13, 14].
- Le **75% de cette surface** devrait se trouver dans des orientations allant du Sud-Est au Sud-Ouest (± 30° du Sud).
- La préférence devra toujours être donnée à des systèmes à gain direct. Par faible ensoleillement, ce sont les seuls à conserver de bonnes performances.
- S'il n'est pas possible de laisser **fluctuer la température** intérieure de plus de 4°C (bureau, salle de classe, chambre d'hôtel ou d'hôpital, etc.), il ne faudrait pas dépasser **15 à 20%** de la surface de plancher. Les 10 à 15% de captage supplémentaires devraient se faire sous forme de gain indirect.
- Si la surface de captage dépasse les 30% il faut:
  - **déphaser** le gain du jour sur la nuit (voir 5.2 Stocker la chaleur);
  - **distribuer** l'énergie captée à des locaux éloignés des façades (voir 5.3 Distribuer la chaleur).
- Si le captage se fait exclusivement par **gain indirect**, la surface de captage devrait être augmentée d'un facteur 1.2 (+ 20%).
- Les capteurs équipés d'**isolation transparente** sont à dimensionner comme des fenêtres standards.
- Une **serre** sera aussi dimensionnée de la même façon qu'un gain indirect: la surface de captage sera la surface frontale de la serre.
- Choisir des **vitrages** isolants doubles avec une couche IR (**k ≤ 1.5 W/m², K**). Des verres doubles sans couche (k = 3 W/m², K) pourraient se justifier sur des locaux peu ou **pas chauffés** (espace tampon, serre, vérandas, sas d'entrée, etc.).

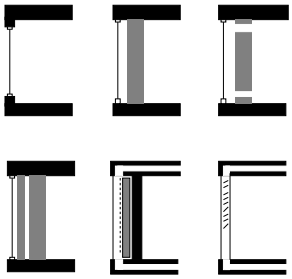
Situation
Les surfaces de captage devront se situer principalement sur l'arc ensoleillé d'hiver. L'aménagement extérieur dégagera la zone de captage (± 45° à l'Est et à l'Ouest du Sud).
Page 68

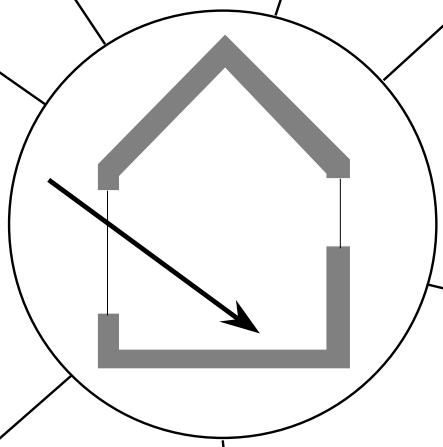
Orientation-inclinaison
Privilégier les orientations Sud et les positions verticales de captage. On maximise le soleil incident durant l'hiver tout en minimisant les problèmes de surchauffe en été.
Pages 68 à 70



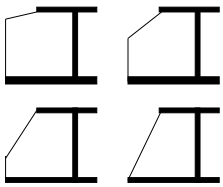
Est Ouest Nord
En dehors de l'orientation Sud-Est à Sud-Ouest (Sud ± 30°), les surfaces de captage ne sont plus efficaces: on y met des fenêtres nécessaires aux prises de jour ou de vue.
Chapitre 5.8

Types de capteur
Un capteur se réduit la plupart du temps à une fenêtre classique. Il existe plusieurs variantes.
Page 70

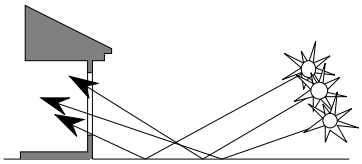




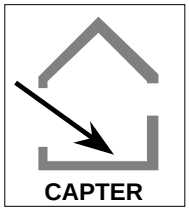
Serre
Une serre chauffée ou non chauffée est aussi un capteur.
Page 73
(voir aussi chapitre 5.4)



Sol
Le traitement de la surface du sol extérieur devant les surfaces de captage, permet d'augmenter le rayonnement incident par réflexion.
Page 68



Surface de référence
La surface de plancher de référence est celle qui peut être chauffée par les capteurs: directement ou indirectement via la distribution de la chaleur.
Page 72



Situation

Les surfaces de captage devront se situer principalement sur l'arc ensoleillé d'hiver. Leur situation intégrera l'effet des masques proches et lointains mis en évidence dans l'analyse du site.

L'aménagement extérieur dégagera la zone de captage: ± 30° à 45° à l'Est et à l'Ouest du Sud.

Le traitement de la surface du sol extérieur devant les surfaces de captage, permet d'augmenter le rayonnement incident par réflexion (figure 5.1.3).

Orientation-inclinaison

On essayera toujours de privilégier les orientations Sud et les positions verticales de captage. On maximise ainsi le soleil incident durant l'hiver tout en minimisant les problèmes de surchauffe en été (figure 5.1.4).

Les ouvertures en toiture (figures 5.1.5 et 6) devraient autant que possible éviter de prendre le soleil horizontalement, le captage étant maximal en été. On tentera de privilégier le captage vertical Sud. Dans les halles industrielles, les salles de gymnastique, les atria, des systèmes de sheds ouverts au Sud et équipés de dispositifs anti-éblouissement offrent des performances de captage solaire nettement supérieures à celles de sheds ouverts au Nord ou de lanterneaux, tout en garantissant le confort estival.

En dehors de l'orientation Sud-Est à Sud-Ouest (Sud ± 30°), les surfaces de captage ne sont plus efficaces: on parlera de fenêtres nécessaires aux prises de jour (voir 5.8 Eclairage naturel) ou de dégagement pour la vue mais plus de « capteurs » solaires.

REVETEMENT DE SOL	ρ
Neige fraîche	0.70 ... 0.80
Béton brut	0.30 ... 0.50
Gazon, herbe	0.10 ... 0.20
Terre cuite	0.20 ... 0.50
Terre, sable	0.15 ... 0.25
Bois brut ou teinté	0.05 ... 0.20
Asphalte, enrobé, macadam	<0.10 ... 0.15
Pierre	0.15 ... 0.20
Herbe sèche	0.30
Plan d'eau, lac	.03 ... 0.10

Figure 5.1.1: Coefficients de réflexion du rayonnement solaire global de différents revêtements de sol extérieur [1].

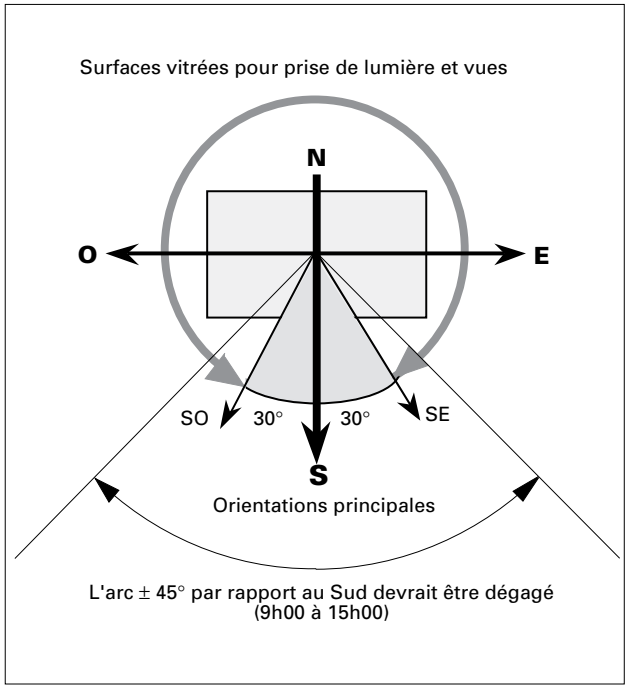


Figure 5.1.2: Orientation privilégiée des surfaces de captage [5].
Pénalités pour une désorientation du Sud de:
± 30° → - 5%
± 40° → - 10%
± 50° → - 20% (surchauffes!)

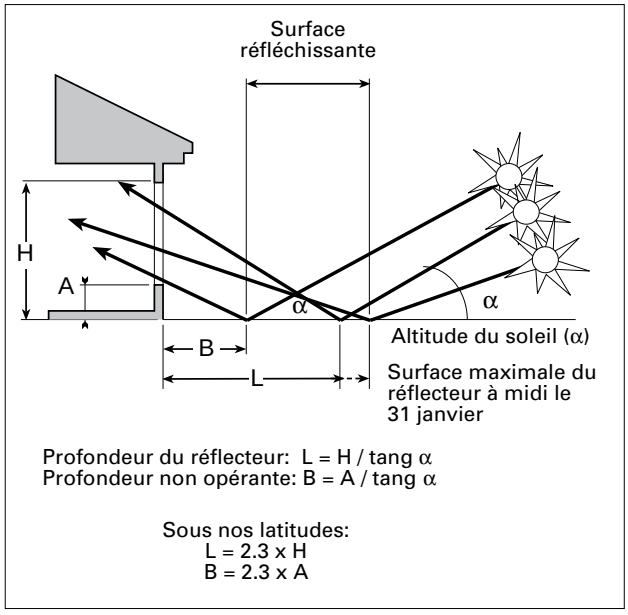


Figure 5.1.3: Une surface de sol à « haut pouvoir de réflexion » devant les fenêtres (capteurs) verticales éclairées par le soleil d'hiver (Sud) augmente le gain solaire [1].

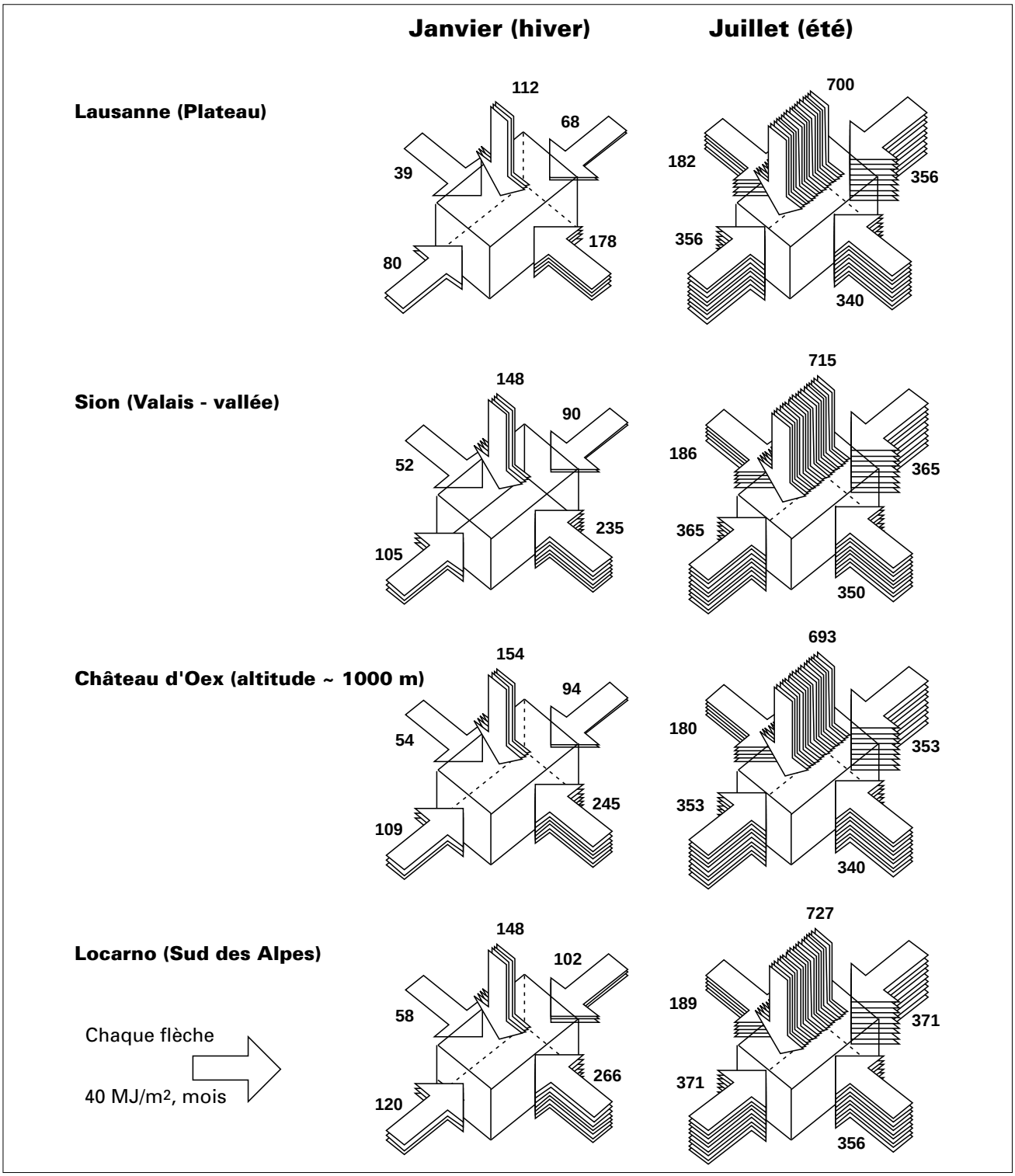


Figure 5.1.4: Rayonnement solaire incident sur les cinq faces d'un cube pour quatre types représentatifs de climats suisses et deux mois de l'année. Chaque flèche représente 40 MJ/m², mois. Les chiffres sur les diagrammes donnent la somme mensuelle du rayonnement incident sur chaque face en MJ/m², mois [3, 4].
On remarque, pour toutes les stations, la prédominance du soleil sur la façade Sud en hiver (plus du double des faces Est et Ouest), l'équilibre de l'ensoleillement des faces Sud, Est, Ouest, en été la dominante du soleil sur la face horizontale durant cette saison. Seule la façade Sud est nettement privilégiée en hiver. La face horizontale (toiture) est assez ensoleillée en hiver (moitié de la façade Sud) mais elle est par contre fortement frappée en été d'où des surchauffes difficilement maîtrisables.
Le choix de l'orientation privilégiée des capteurs-fenêtres n'est pas conditionné par la situation climatique régionale (voir point 2, Analyse du site pour les influences du microclimat).

Type de captage

Un capteur se réduit la plupart du temps à une fenêtre classique. Le choix de la qualité thermique (coefficient k) de la fenêtre devrait être fait sur la base d'un bilan gains/pertes de chaleur global (fenêtres, murs, sols, toitures, etc.).

Les systèmes à gain indirect ont des performances (énergie utile au mètre carré de surface de captage) plus faibles que les systèmes à gain direct. Ce sont par contre les seuls systèmes qui permettent des taux de couverture solaire dépassant 25 à 45 % de la demande d'énergie de chauffage. Leur complexité et leur coût les rendent par contre peu compétitifs (figure 5.1.7).

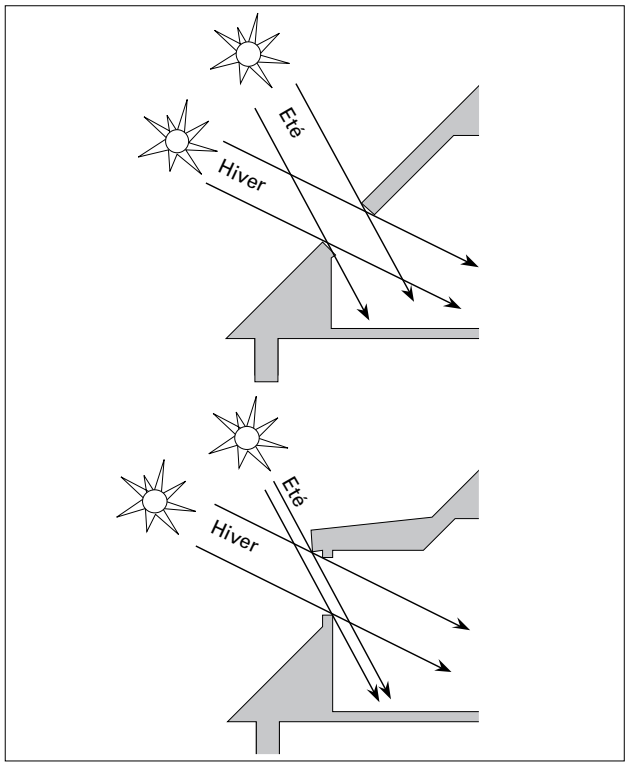


Figure 5.1.5: Prise de soleil dans les toitures: une fenêtre inclinée offre la même pénétration au soleil d'été qu'à celui d'hiver, ce qui pourrait entraîner des surchauffes. Alors qu'une fenêtre verticale Sud (chien assis, shed) privilégie le soleil d'hiver [1].

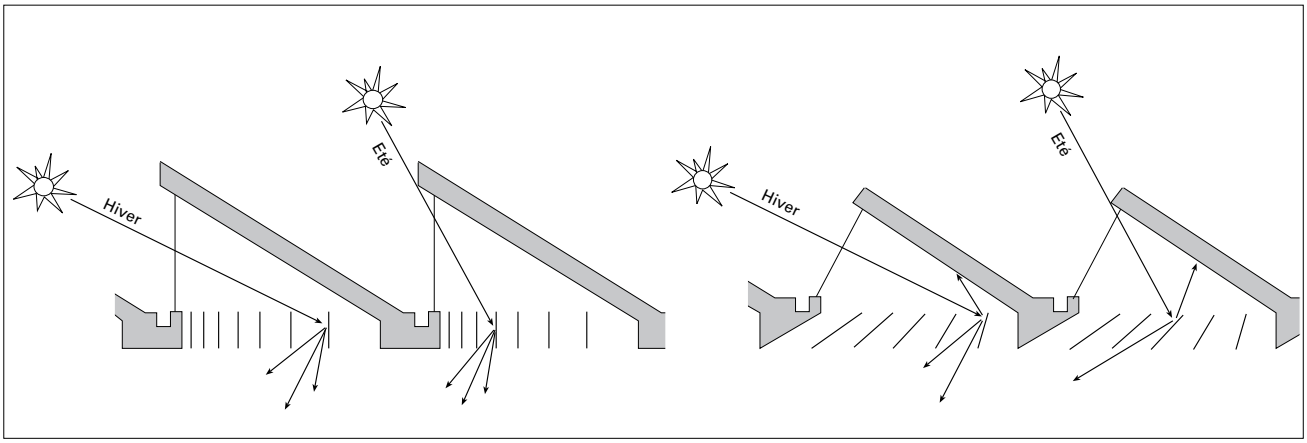
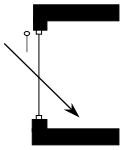


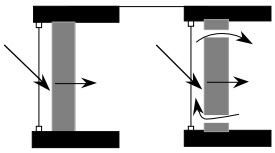
Figure 5.1.6: Les prises de lumière et de soleil en toiture peuvent combiner efficacité énergétique (captage du soleil en hiver) et confort thermique et visuel (protection contre une pénétration du soleil au sol de la halle, uniformisation de l'éclairage naturel). Des systèmes de sheds ouverts au Sud et équipés de lames verticales ou inclinées remplissent cette fonction (voir annexe A5.1 pour le mode de dimensionnement de ce type de sheds) [6].



Fenêtre

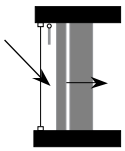
Gain direct

- Mode de captage le plus simple, déphasage faible.
- Fluctuation importante de la température intérieure jour/nuit.
- Stock dans l'enveloppe interne des locaux: contrainte.
- Performance élevée provenant du fait que tout rayonnement solaire, aussi faible soit-il, est utilisé (pas de rayonnement de seuil).
- Faible coût.
- Difficile de dépasser 15 à 20 % de surface de captage rapportée à la surface de plancher sans générer des surchauffes en été et en hiver aussi.
- Forte exposition des meubles et des objets soumis au rayonnement solaire (risque de dégradations dues aux UV).
- Point faible: perte nocturne engendrée par le vitrage en contact direct avec les locaux chauffés, en partie soluble avec les vitrages à haute performance actuels.
- Pénétration de la chaleur captée sur une profondeur de 6 à 10 m selon le mode de distribution interne (surface de passage, nombre de niveaux).

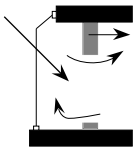


Mur massif

Mur trombe: mur massif + circulation d'air



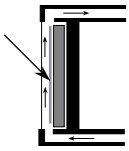
Mur massif + isolation transparente



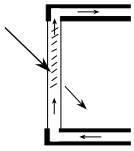
Double-peau Serre

Gain indirect

- Capteur - stockeur: la chaleur est restituée aux locaux adjacents avec un déphasage de quelques heures.
- Fluctuations de température limitées dans les locaux adjacents mais importantes dans la zone de captage.
- Performance plus faible que celle d'un gain direct (jusqu'à deux fois).
- Systèmes souvent utilisés en complément d'un gain direct pour assurer des taux de couverture solaire supérieurs.
- Confort des locaux adjacents plus élevé que dans le cas d'un gain direct.
- Perte du contact direct avec l'extérieur.
- Coût nettement plus élevé que celui d'un gain direct. Surcoût en partie compensé pour la serre (mise à disposition d'un espace supplémentaire partiellement chauffé).
- Point faible: la perte de chaleur à travers le vitrage. Problème résolu par l'utilisation d'une isolation transparente pour les murs massifs, d'un verre performant pour les serres. Les murs massifs avec ou sans circulation d'air n'offrent pas des performances suffisantes en Suisse sans dispositif isolant supplémentaire.
- Profondeur limitée de pénétration de la chaleur dans les locaux.



Mur capteur solaire



Fenêtre capteur translucide

Capteur + boucle convective

- Le capteur est soit rapporté à la façade, soit intégré à la fenêtre, un réseau de canaux amène la chaleur captée vers un stock d'où elle sera diffusée dans les locaux. C'est de l'air qui sert à véhiculer la chaleur. Cet air est mis en mouvement par un ventilateur ou, quelque fois par thermocirculation naturelle. Ces procédés s'apparentent aux systèmes solaires actifs.
- Le capteur translucide permet en outre, par faible ensoleillement, un gain direct en relevant le store à lames.
- Performances faibles, le captage à haute température nécessitant un rayonnement de seuil élevé.
- Coûts élevés.
- Distribution de la chaleur sur de grandes profondeurs, la haute température du captage permettant de limiter la section des gaines de distribution et la taille du stock.
- Systèmes permettant d'atteindre des taux d'autonomie solaire élevés, la gestion de l'énergie solaire captée pouvant être totalement maîtrisée. Ils entrent par contre en concurrence avec des systèmes solaires actifs à eau qui sont souvent plus souples à l'utilisation et plus rentables.

Figure 5.1.7: Différents types de capteur: le rayonnement solaire traverse un matériau transparent ou translucide (vitre, isolation transparente) et est absorbé par une surface sombre (le sol et les murs de la pièce), une surface de captage spécifique (tôle, lamelles) ou un élément capteur-stockeur (mur). Leur différenciation entre systèmes est plus liée à la capacité de laisser pénétrer la lumière et la chaleur qu'à leur performance [3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16].

Dimensionnement

Seule une étude du bilan gains/pertes permettra de bien dimensionner une surface de captage. Ce contrôle ne peut s'effectuer que lorsque le concept de base (captage – stockage – distribution) est défini.

Tous les ratios recommandés sont donnés sous **Règles**. Le dimensionnement tiendra compte des locaux réellement chauffés par les surfaces de captage mises en œuvre (figure 5.1.9).

Type de vitrage	k W/m², K	g (%)	τ (α = 0°) (%)
Simple clair	5.9	86	90
Isolant double	3.0	73	81
Isolant triple	2.2	69	73
Isolant double IR	1.3 ... 1.6	65	78
Isolant double + 2 films IR	0.6 ... 0.7	55	65
Double + 2 films IR (HIT)	0.6 ... 0.7	20 ... 65	30 ... 60
Isolant double anti-solaire	2.0 ... 3.0	30 ... 60	25 - 50
Pavés de verre	3.0 ... 3.5	60	55

Tableau 5.1.8: Caractéristiques des principaux vitrages commercialisés [7].
k Coefficient de transmission thermique (verre seul)
g Coefficient de transmission énergétique global (soleil)
τ Coefficient de transmission de la lumière visible

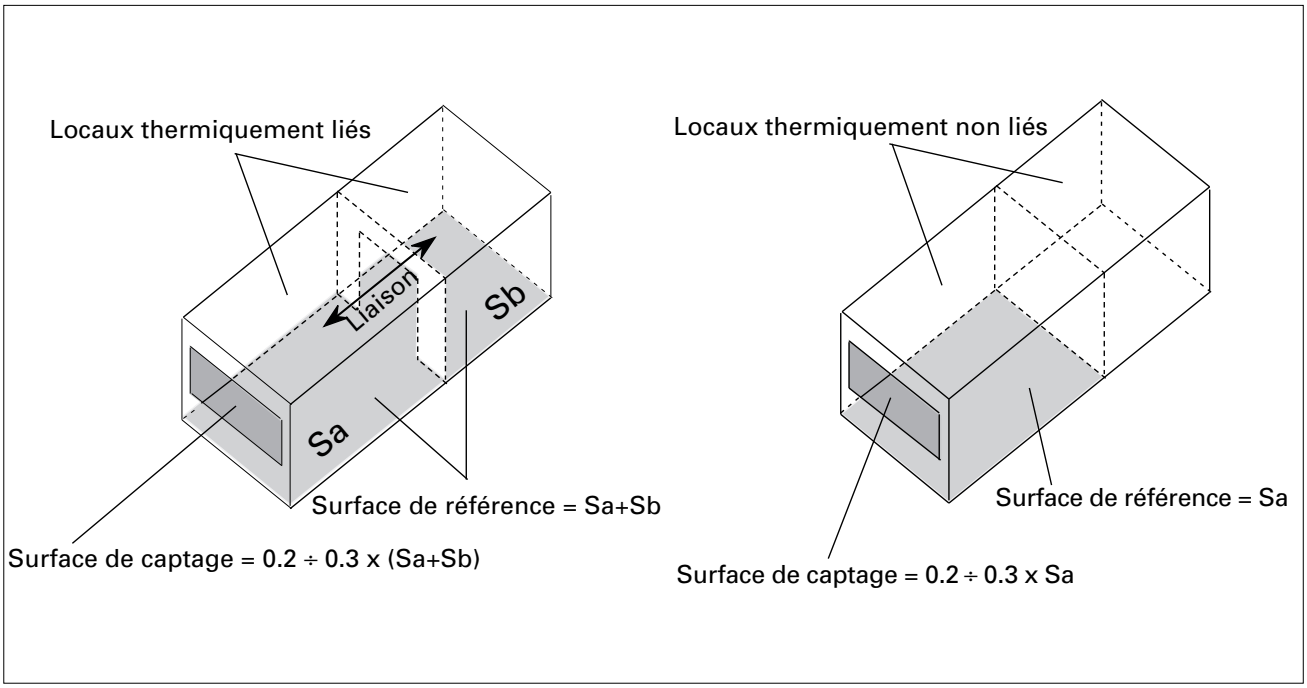


Figure 5.1.9: La surface de plancher de référence est celle qui peut être chauffée par les capteurs: directement ou indirectement via la distribution de la chaleur. Le dimensionnement tiendra compte des locaux réellement chauffés par les surfaces de captage mises en œuvre. Toutes les surfaces de captage supplémentaires doivent être connectées, soit à des stocks permettant de déphaser les gains (voir 5.2 Stocker la chaleur, soit à d'autres locaux non chauffés directement par le soleil (voir 5.3 Distribuer la chaleur). Sinon, ces surfaces de captage supplémentaires ne seront pas utilisées directement et induiront des surchauffes (gains solaires en excès).

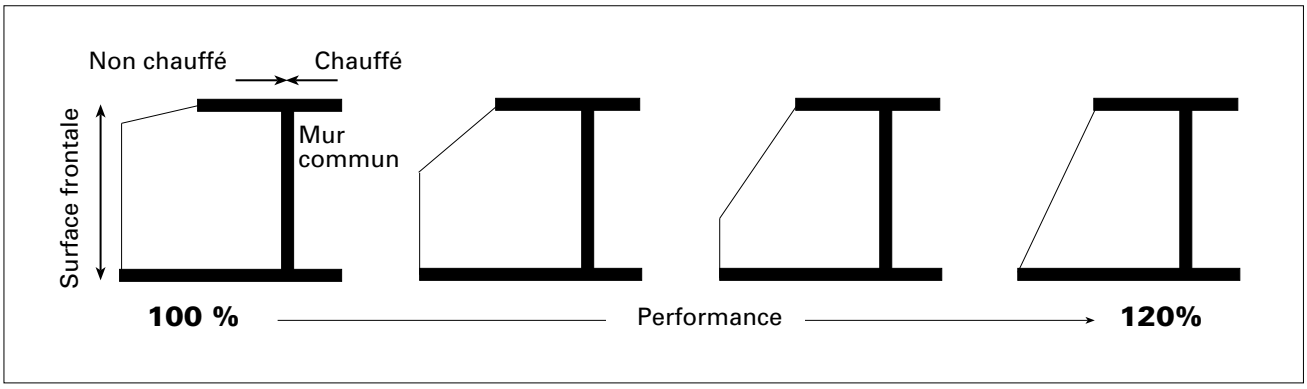


Figure 5.1.10: A surface frontale équivalente d'une serre accolée au Sud d'un bâtiment avec un mur de maçonnerie commun, les performances ne varient que de 20% lorsque l'on fait varier l'angle d'inclinaison de la face avant (les parois latérales de la serre sont isolées et non vitrées). Plus l'inclinaison de la face se rapproche de la verticale, moins des problèmes de surchauffe se poseront en été [5].

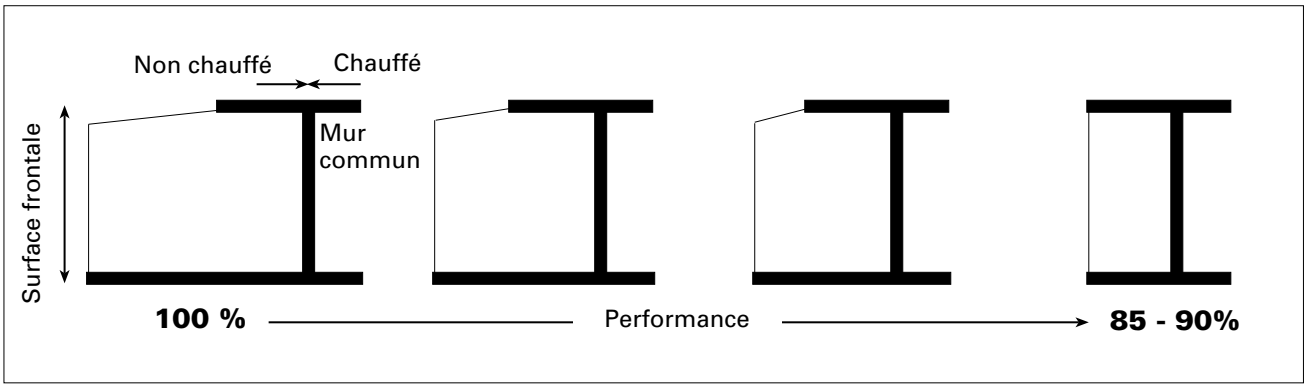


Figure 5.1.11: A surface frontale équivalente d'une serre accolée au Sud d'un bâtiment avec un mur de maçonnerie commun, les performances ne varient que de 10 à 15% en fonction de la taille et de l'angle de la partie vitrée de la toiture de la serre. Le captage vertical prédomine nettement. Plus l'inclinaison de la face se rapproche de la verticale, moins des problèmes de surchauffe se poseront en été [5].

5.2 Stocker la chaleur

Base

Selon le mode de couplage entre le capteur solaire et l'espace à chauffer on distingue principalement deux types de systèmes:

- **Le gain direct**: le captage est lié directement à l'espace à chauffer qui stocke lui-même la chaleur en excès. Le stock est représenté principalement par les parois et les dalles constituant l'enveloppe du local. Même si une partie du rayonnement capté chauffe directement le stock (le sol par exemple), on parle de gain direct.
- **Le gain indirect**: le captage est lié indirectement à l'espace, l'énergie captée transite par le stock.

Le choix entre les deux systèmes se fait sur des critères de **« confort »**, de **performance** et de **taux de couverture** des besoins par le soleil:

- Un gain direct subit des amplitudes de température plus élevées qu'un gain indirect du fait que l'occupant « habite le capteur et marche sur le stock ».
- Un gain direct est plus performant qu'un gain indirect: à surface de captage équivalente un gain direct couvre une part plus importante des besoins en chaleur. La majorité des surfaces de captage d'un gain direct servant aussi de fenêtres (lumière, ventilation, contact visuel) leur coût n'est à imputer que partiellement au système solaire.
- Il n'est guère possible de dépasser un taux de couverture des besoins en chaleur de 40% avec un gain direct sans entraîner, en toutes saisons, des surchauffes difficilement maîtrisables.

On rencontre toutes les combinaisons possibles entre ces deux systèmes.

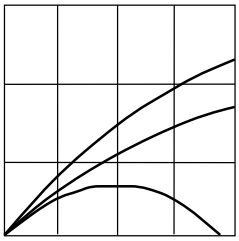
Règles

- Le **stockage** est caractérisé autant par sa **surface d'échange** que par sa **masse totale**.
- En dessous d'une surface relative de captage (surface de captage rapportée à la surface de plancher) de **10 à 15%, aucun stockage particulier n'est nécessaire** [14].
- Pour un système à **gain direct**, le rapport surface de stockage – surface vitrée devrait être au minimum de 3 pour du béton. Ce rapport devrait être porté à **4 pour des briques silico-calcaires** et à **6 pour de la terre cuite**. La surface de stockage est la partie du mur, du sol ou du plafond en contact direct avec la zone de captage (le local lui-même dans un gain direct, le vitrage ou la serre dans un gain indirect) [3, 5, 7].
- Pour un système à **gain indirect** (mur, serre), on admet habituellement que la surface de stockage doit être **équivalente à la surface de captage** (surface frontale de la serre par exemple) [5].
- Pour un système à **gain direct**, au-delà de **10 à 15 cm** selon le matériau (béton, terre cuite), l'**épaisseur** n'a plus d'influence notoire sur les performances [5].
- Pour un système à **gain indirect**, l'**épaisseur** devrait passer à **25 cm pour du béton et 20 cm pour de la brique terre cuite** ou silico-calcaire. Le mur-stock doit déphaser l'amplitude de chaleur de la zone de captage vers les espaces à chauffer [7].
- Dans une **serre**, le **mur interface** serre - locaux chauffés devrait être **massif** (10 à 20 cm). Il sera **isolé** selon le type de **climat** et de **vitrage** de la serre (voir figure 5.4.10) [12].
- Dans un système à **gain direct**, le coefficient d'**absorption des surfaces lourdes** devrait être le plus élevé possible (couleurs sombres), celui des éléments légers (tapis, cloisons légères, meubles, …) le plus faible possible (couleurs claires). Un coefficient d'absorption élevé est supérieur à **0.6** (couleur du béton brut) [3].
- Dans un système à **gain direct**, la **distribution des masses** dans un espace n'a pas une grande importance: les masses peuvent se trouver au sol, au plafond ou dans les murs [5].

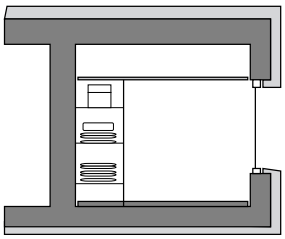
Voir aussi

- Chapitre 5.1 Capter le soleil
- Chapitre 5.3 Distribuer la chaleur
- Annexe A4 Performances

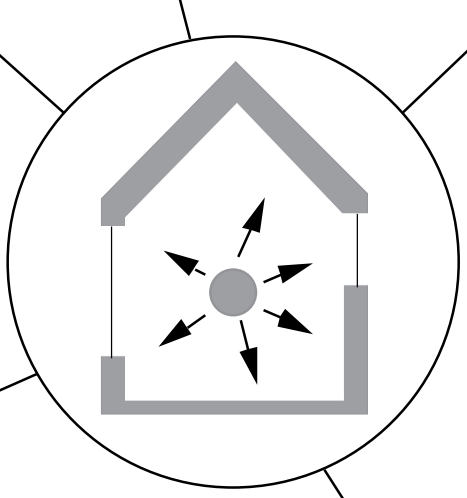
Masse / Capteur
Le stockage et le captage sont étroitement liés.
Pages 78 à 79



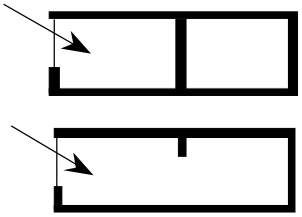
Isolation de la masse
La masse doit être en contact avec le capteur ou l'air.
Page 77



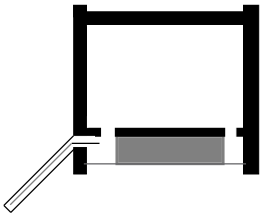
Masse
La surface compte autant que l'épaisseur de la masse.
Page 76



Stockage annexe
La masse de locaux annexes peut participer au stockage.
Page 78



Stocks dissociés
Des stocks dissociés de la structure permettent des déphasages plus longs.
Page 79



Prise en compte des masses

Qu'est-ce qui participe au stockage dans un local ?

Sous **Règles**, sont définis les coefficients d'absorption des surfaces de stockage, leur épaisseur et leur surface.

La masse participant au stockage doit se trouver à l'intérieur de l'enveloppe isolée du local, la distribution des masses n'ayant par contre pas une grande importance.

La surface de stockage doit être libre par rapport au local : tous les revêtements peu conducteurs tels que tapis, parquets, faux plafonds atténuent ou même annihilent l'efficacité de ces masses. Pour les faux plafonds acoustiques, Il existe des solutions pour garder un couplage convectif entre la surface de stockage et l'ambiance (figures 5.2.4 à 6).

REVETEMENT	α
Peinture noire	0.92
Peinture gris foncé	0.91
Peinture bleu foncé	0.91
Peinture brun foncé	0.88
Gris argenté	0.80
Peinture brune ou grise	0.79
Peinture gris clair	0.75
Brique rouge	0.70
Béton brut	0.65
Peinture orange	0.58
Peinture jaune	0.57
Peinture vert clair	0.47
Blanc cassé	0.30
Peinture blanche	0.21

Figure 5.2.2 : Absorption solaire de divers matériaux : un coefficient supérieur à 0.6 est considéré comme élevé [1].

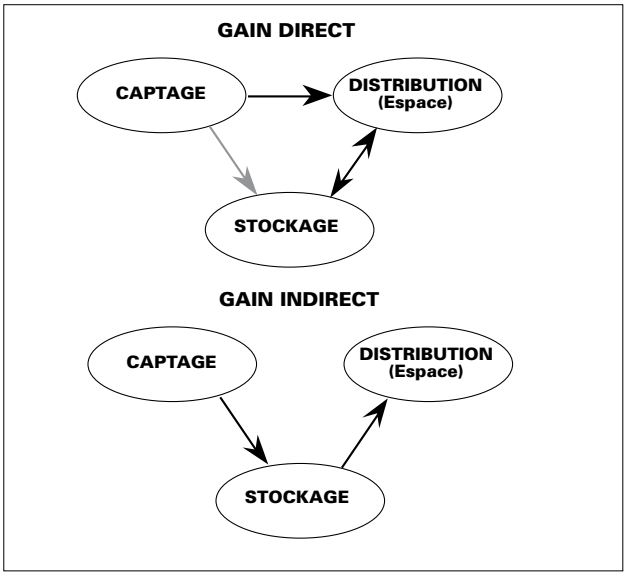


Figure 5.2.1 : Classement des systèmes solaires passifs en gain direct, liaison directe entre le capteur et l'espace et gain indirect, liaison indirecte entre le capteur et l'espace, l'énergie transitant par le stock.

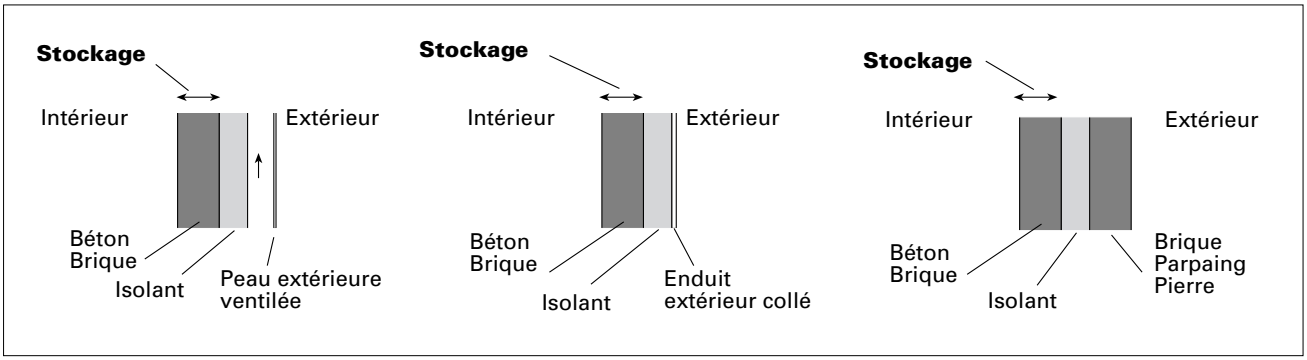


Figure 5.2.3 : Tous les éléments lourds et inertes situés à l'extérieur de la peau isolée ne participent pas au stockage de la chaleur captée. Ces trois murs, avec un matériau identique et de même épaisseur à l'intérieur de l'enveloppe isolée, offrent un stockage équivalent.

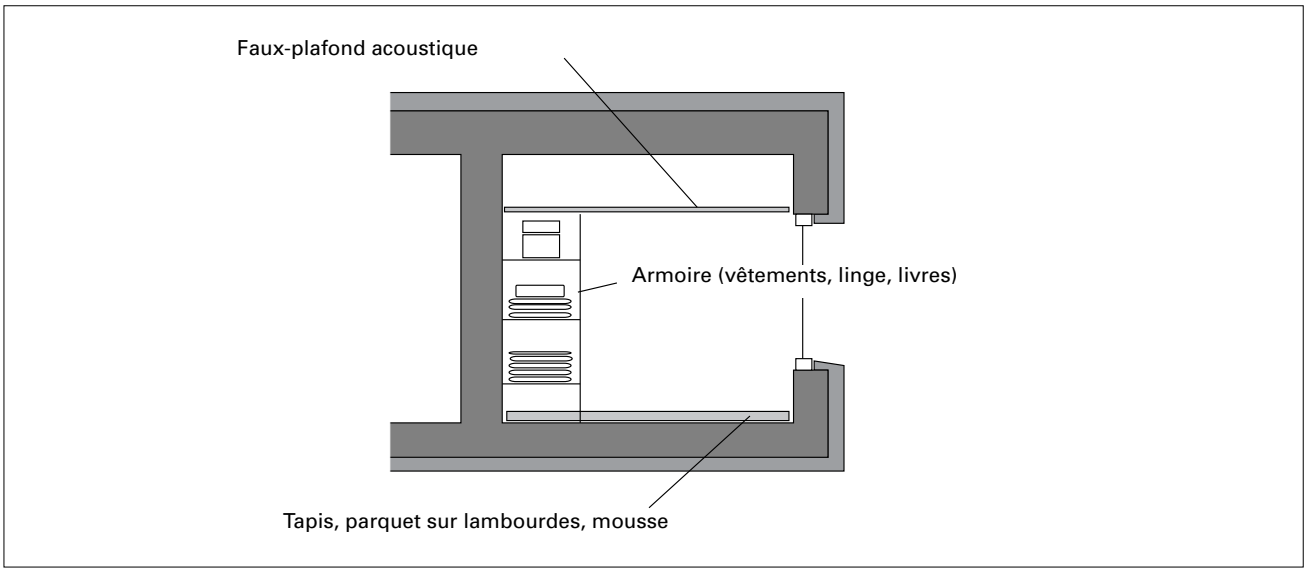


Figure 5.2.4: La masse, pour participer au stockage, doit être en contact avec le capteur ou le médium de captage (l'air). Tous les revêtements isolent la masse des flux d'énergie et l'empêchent de participer pleinement.

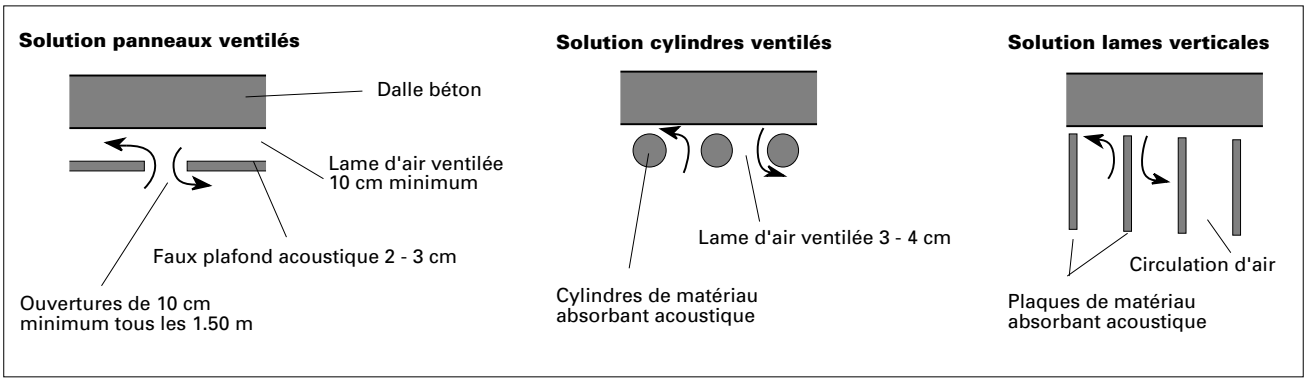
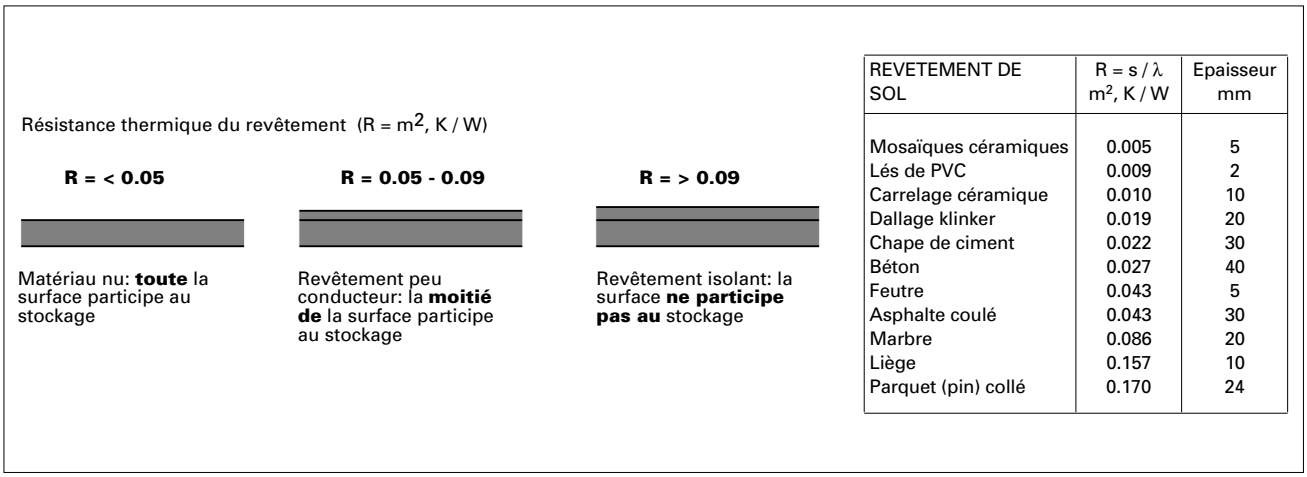


Figure 5.2.5: Restitution d'un couplage convectif entre un plafond (dalle) et l'ambiance tout en résolvant les problèmes acoustiques.



REVETEMENT DE SOL	R = s / λ m², K / W	Epaisseur mm
Mosaïques céramiques	0.005	5
Lés de PVC	0.009	2
Carrelage céramique	0.010	10
Dallage klinker	0.019	20
Chape de ciment	0.022	30
Béton	0.027	40
Feutre	0.043	5
Asphalte coulé	0.043	30
Marbre	0.086	20
Liège	0.157	10
Parquet (pin) collé	0.170	24

Figure 5.2.6: Prise en compte des surfaces de stockage en fonction de la résistance thermique de leur revêtement (voir tableau) [15].

Dimensionnement

Plusieurs paramètres déterminent le dimensionnement d'un stockage: la surface de stockage rapportée à la surface de captage, l'épaisseur de la parois, les caractéristiques thermiques du matériau. La majorité de ces règles a été énoncée sous **Règles.**

On limite habituellement le stockage à un déphasage jour-nuit, c'est-à-dire 12 heures de stockage et 12 heures de déstockage. Des durées plus importantes de stockage ne sont que rarement utiles sous nos climats. Elles ne peuvent être atteintes qu'avec des stocks dissociés (galets, eau).

Les règles suivantes devraient être respectées:

– Le couplage entre les différentes surfaces de stockage d'un même local peut être radiatif ou convectif. On peut coupler les surfaces de stockage d'un autre local pour améliorer les performances d'un système: ce couplage ne peut être que convectif. Les surfaces de stockage du local adjacent ne pourront participer au stockage de l'énergie captée dans le premier local que dans une moindre mesure: on admet généralement que ce stockage auxiliaire présente seulement un tiers de l'efficacité du précédent (figure 5.2.7).

– Un des moyens de mieux utiliser la capacité de stockage d'un local est d'augmenter les amplitudes de température jour-nuit: réduction nocturne de la consigne de chauffage, acceptation de températures plus élevées la journée. Ces amplitudes plus marquées ne sont pas toujours compatibles avec tous les modes d'utilisation des espaces.

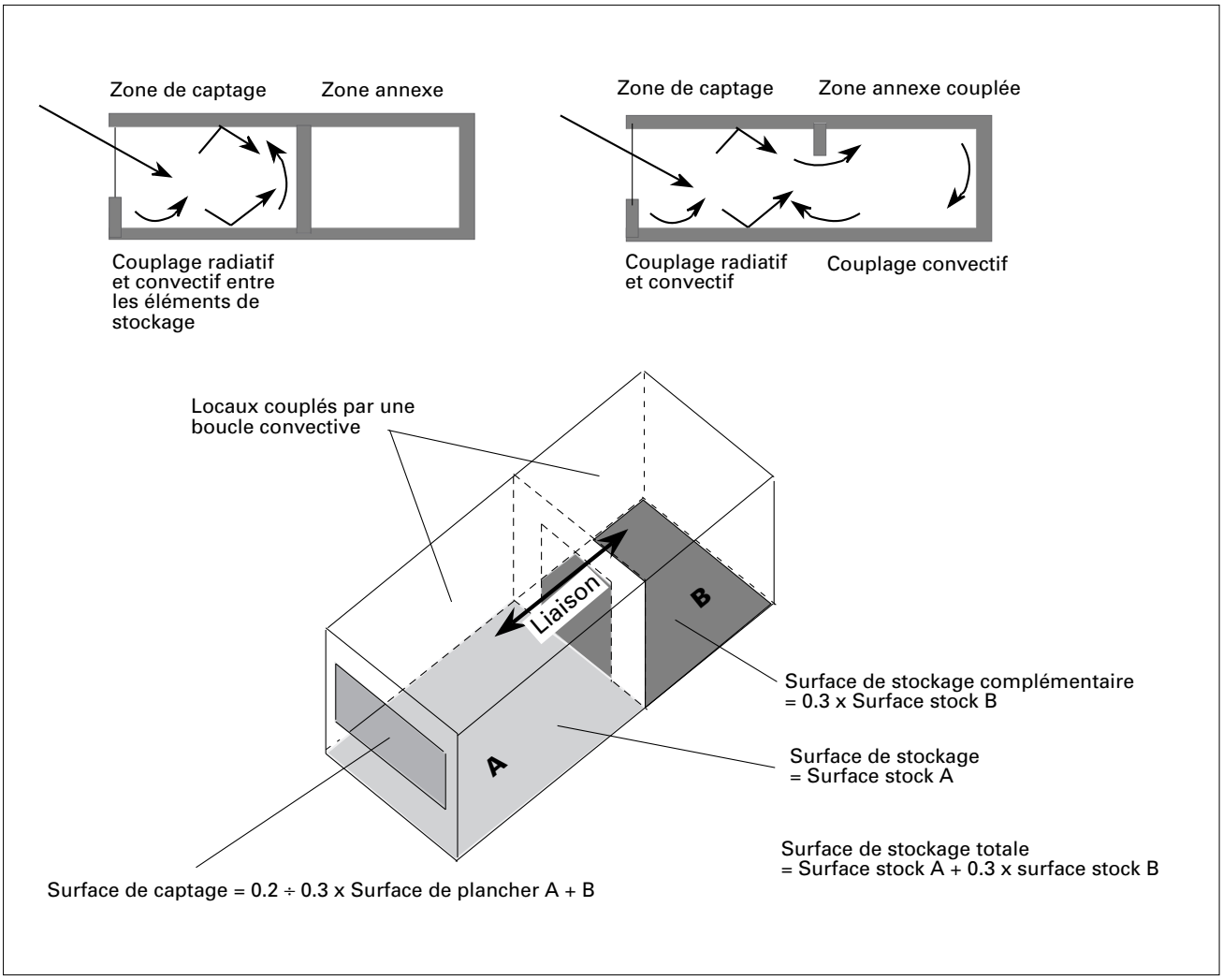


Figure 5.2.7: Couplage entre la surface de stockage d'une zone de captage et la surface de stockage d'une zone annexe. (Dimensionnement de l'échange entre les locaux: voir 5.3 Distribuer la chaleur).

Type de stockage

On utilise habituellement la **structure même du bâtiment** (dalles, murs) pour stocker la chaleur solaire captée. Le mode de construction suisse (dalles béton, murs lourds) ne nécessite généralement pas de masse supplémentaire pour stocker la chaleur.

Seules quelques types de construction (construction bois, structures légères avec un cloisonnement flexible) ne mettent pas à disposition du stockage suffisamment de masse: bâtiments administratifs avec faux plancher et faux plafond. Dans ces cas il faut, soit trouver un stock supplémentaire dissocié de la structure, soit diminuer les gains solaires et internes pour limiter l'énergie à stocker. Sans un stock suffisant, des problèmes pourraient se poser en période chaude (voir 5.5 à 5.7).

Dans les systèmes à gain indirect, on utilise parfois des **stocks dissociés de la structure des locaux**: lit de galets, cuve à eau, dalle creuse. L'avantage est que le stock se retrouve au cœur du bâtiment. Ces systèmes se rapprochent plus de systèmes solaires actifs avec des capteurs solaires en façade, un stock séparé, des ventilateurs pour le transfert de l'air. Leur dimensionnement fait appel aux mêmes techniques que celui des systèmes actifs. Ces systèmes, malgré une sophistication accrue, n'offrent pas des performances supérieures à celles d'un gain direct avec stockage dans la masse des murs et des dalles.

Ils permettent par contre une meilleure gestion de l'énergie accumulée. Leur coût assez élevé et leur mode d'exploitation souvent complexe les rendent peu attractifs.

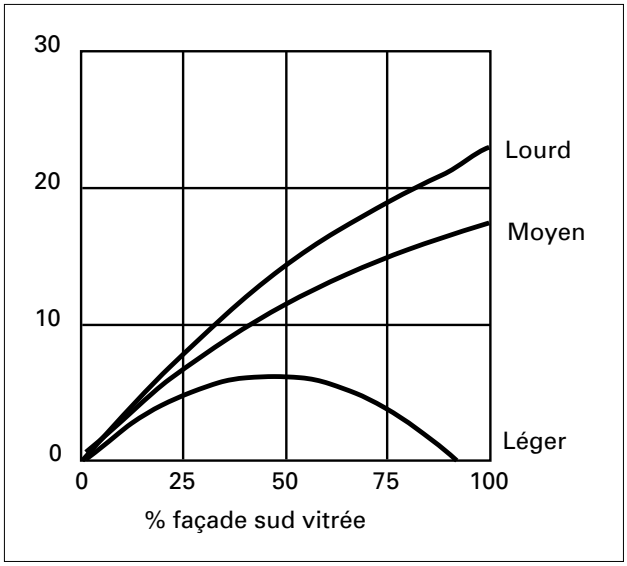


Figure 5.2.8: Interdépendance entre surface de captage, stockage et performance pour un système à gain direct. La surface de captage (vitrage Sud) est liée à la taille du stock. Les performances sont limitées par le stock aussi bien que par la surface de captage [5].

Bâtiment bien isolé (k_{moyen} = 0.35 à 0.5 W/m², K).

***Léger**: construction en bois: ossature, sols, cloisons.*
***Moyen**: idem léger avec le sol ou les murs en béton (épaisseur de 5 cm)*
surface de stock béton = 3 x surface de captage
***Lourd**: idem léger, avec le sol ou les murs en béton (épaisseur de 10 cm)*
surface de stock béton = 3 x surface de captage.

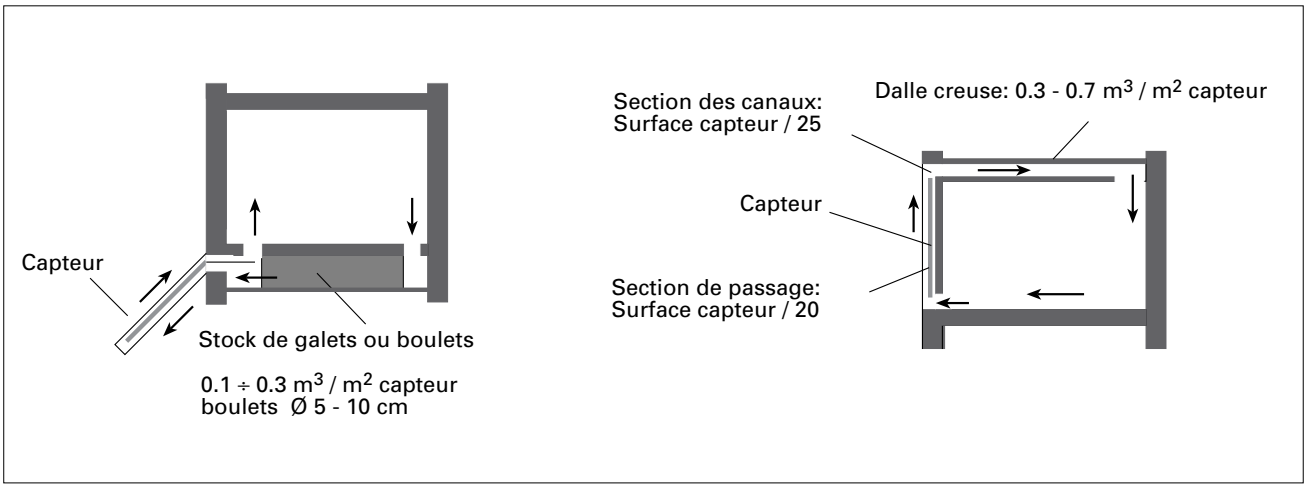


Figure 5.2.9: Stockage en lit de galets ou dalle creuse avec collecteurs à air en façade. Dimensionnement de base [4, 7, 13, 17].

5.3 Distribuer la chaleur

Base

Idéalement un bâtiment solaire passif devrait distribuer la chaleur directement aux zones où elle sera utilisée, sans nécessiter un système de distribution. Ceci n'est pas toujours possible : dans une zone au Nord du bâtiment, la chaleur devra souvent y être amenée.

La distribution de la chaleur nécessite souvent un déplacement dans l'espace (distribution) et dans le temps (déphasage).

Règles

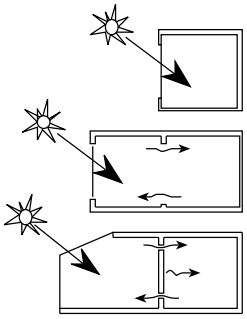
- Dans un **système à gain direct autonome** (l'espace capteur-stockeur ne chauffe que lui-même), la distribution de la chaleur se fait sur le **même principe que le captage - stockage**. Le respect des règles définies précédemment (voir 5.1 et 5.2) suffit à assurer une bonne distribution de la chaleur.
- Dans un **système à gain direct excédentaire** (l'espace capteur-stockeur chauffe d'autres locaux n'ayant pas un accès direct au soleil), si la distribution de la chaleur se fait par un échange convectif naturel (mouvement d'air), la section de passage entre l'espace primaire (chauffé directement) et l'espace secondaire (chauffé par le premier) représentera ~ 10 % de la surface de captage surnuméraire (voir figure 5.3.2).
- Pour un système à **gain indirect** (mur ou serre), le mur interface avec l'espace à chauffer devrait présenter des ouvertures sur **3 à 10 %** de sa surface (différence de hauteur entre entrée et sortie $\Delta h = 2$ m). Les règles de proportionnalité s'appliquent [5].
- Les **sections données** pour les transferts convectifs devraient être respectées sur l'**entier du trajet de l'air** (aller et retour). Toute obstruction diminue fortement le débit d'air. Dans les systèmes à convection naturelle, les portes, couloirs, cages d'escalier, locaux servent à conduire cet air.
- Il est possible d'**évaluer l'intérêt d'une distribution de chaleur d'une zone de captage à une autre** en utilisant un programme de calcul de bilan (voir annexe A4) : dans un premier temps on calcul séparément le bilan des deux zones (aucun transfert entre zones), dans un deuxième temps on regroupe les deux zones dans un seul calcul (transfert parfait entre les deux zones). La différence des deux bilans (somme des bilans des deux zones ou bilan d'une zone regroupant les deux) est la différence maximale à attendre d'un transfert. En réalité l'apport sera plus faible, le transfert nécessitant une légère surchauffe d'une zone par rapport à l'autre.

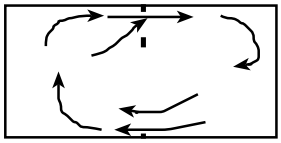
Voir aussi

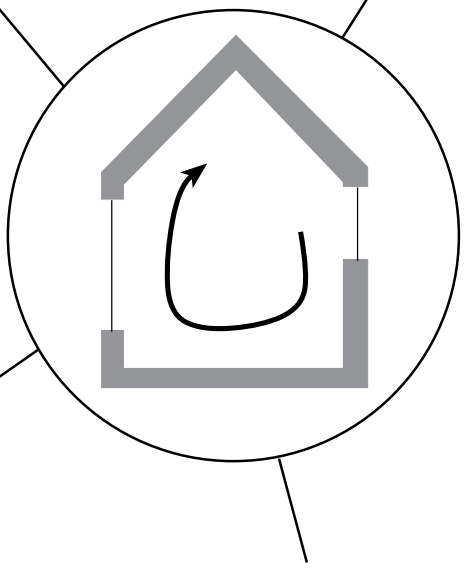
- Chapitre 5.1 Capter le soleil
- Chapitre 5.2 Stocker la chaleur
- Annexe A5.4 Effet de cheminée
- Annexe A4 Performances

Boucles convectives
La distribution de la chaleur captée fait appel aux échanges par rayonnement ou convection.
Pages 82 à 83

Porte
Une ouverture haute améliore le transfert à travers une porte.
Page 84

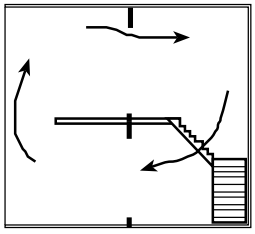






Capteur dissocié
Les plus hautes températures atteintes dans un capteur dissocié facilitent le transfert de chaleur.
Page 84

Hauteur
Doubler la hauteur dans une boucle convective améliore de 40% le transfert de chaleur.
Pages 82 à 85



Dimensionnement

Dans un système à gain direct où le captage, le stockage et la distribution sont situés dans un même espace, la distribution de la chaleur s'effectue par convection naturelle et rayonnement infrarouge principalement. Les règles appliquées au stockage (surface, matériau, revêtement) sont les mêmes pour la distribution. Pour ne pas réduire l'échange radiatif, on évitera les revêtements métalliques sur les éléments de stockage (peinture métallique ou feuilles de métal brut). Un métal laqué n'est pas considéré comme un revêtement métallique (voir 5.5, figure 5.5.8).

Dans un système à gain direct (capteur habité) le dimensionnement des surfaces de transfert sur des espaces secondaires peut se faire selon la règle définie dans la figure 5.3.2. Pour des hauteurs, températures ou rapports de surfaces différents, les règles de proportionnalité définies ci-dessous s'appliquent.

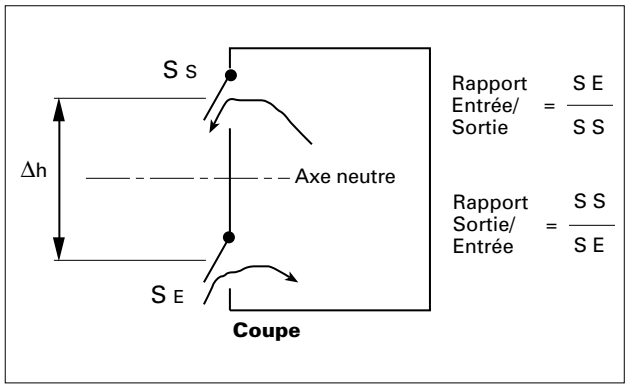


Figure 5.3.1: Dimensionnement d'une ouverture servant à distribuer la chaleur d'un espace de captage vers un espace secondaire.

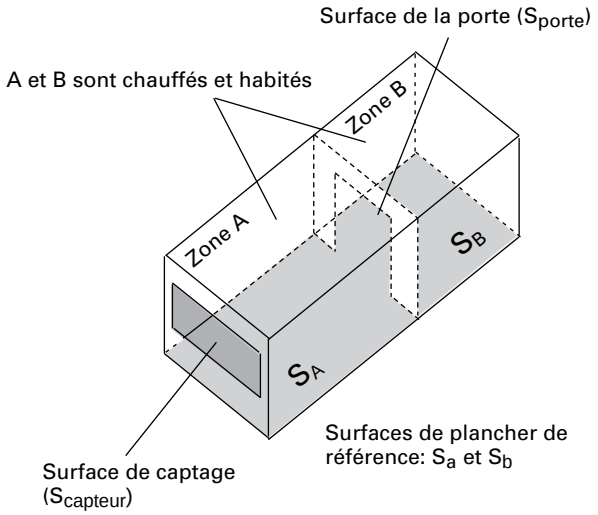
Boucles convectives: règles de proportionnalité

Le transfert de chaleur par boucle convective entre deux zones obéit aux règles de proportionnalité suivantes (voir annexe A5.4):

- Le débit est directement proportionnel à la surface des ouvertures.
- L'efficacité maximale est obtenue par des surfaces équivalentes d'ouvrant. Si l'on augmente la surface d'une ouverture sans changer l'autre on augmente le débit des facteurs suivants (voir figure 5.3.1):

Rapport Entrée/ Sortie	Rapport Sortie/ Entrée	Augmentation du débit total %	
1 : 1	1 : 1	0	réf.
1 : 1.5	1.5 : 1	17	
1 : 2	2 : 1	26	
1 : 3	3 : 1	34	
1 : 4	4 : 1	37	
1 : 6	6 : 1	38	

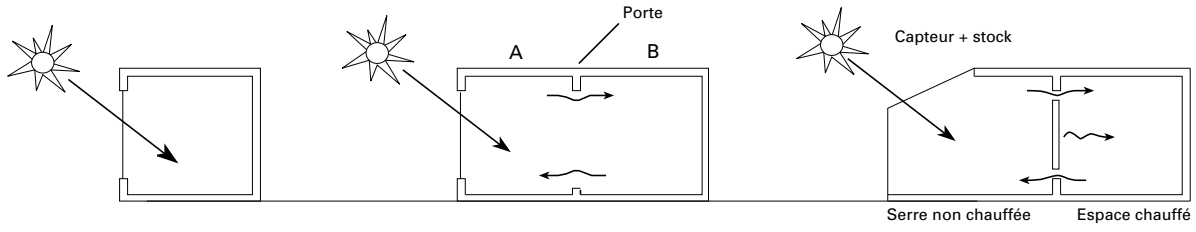
- Le débit est proportionnel à la racine carrée de la différence de hauteur. Un doublement de la hauteur augmente le débit de 40%.
- Le débit est proportionnel à la racine carrée de la différence de température entre la zone chaude et la zone froide. Un doublement de la différence de température entre zones augmentera le débit de 40% mais le transfert de chaleur de 180% car la chaleur transférée est directement proportionnelle au produit du débit et de la différence de température.



La zone A est en façade, elle est équipée d'une surface de captage (fenêtre) direct. Cette surface dépasse la limite nécessaire au chauffage de la zone A. De la chaleur captée en A devra être transférée en B (zone Nord). On admet que la surface de captage nécessaire à A est de 0.25 x S_A (figure 5.1.9). Le reste de cette surface de captage ($S_{capteur}$ - 0.25 x S_A) servira à chauffer B.

Le transfert de chaleur convectif nécessitera une surface totale de 10% de la surface de captage restante (attribuée à B). Cette surface est admise pour une différence de hauteur de 2 m entre entrée et sortie d'air (des ouvertures au raz du sol et au raz du plafond), des ouvertures équivalentes en surface et une différence de température ne dépassant pas 5° entre les zones A et B.

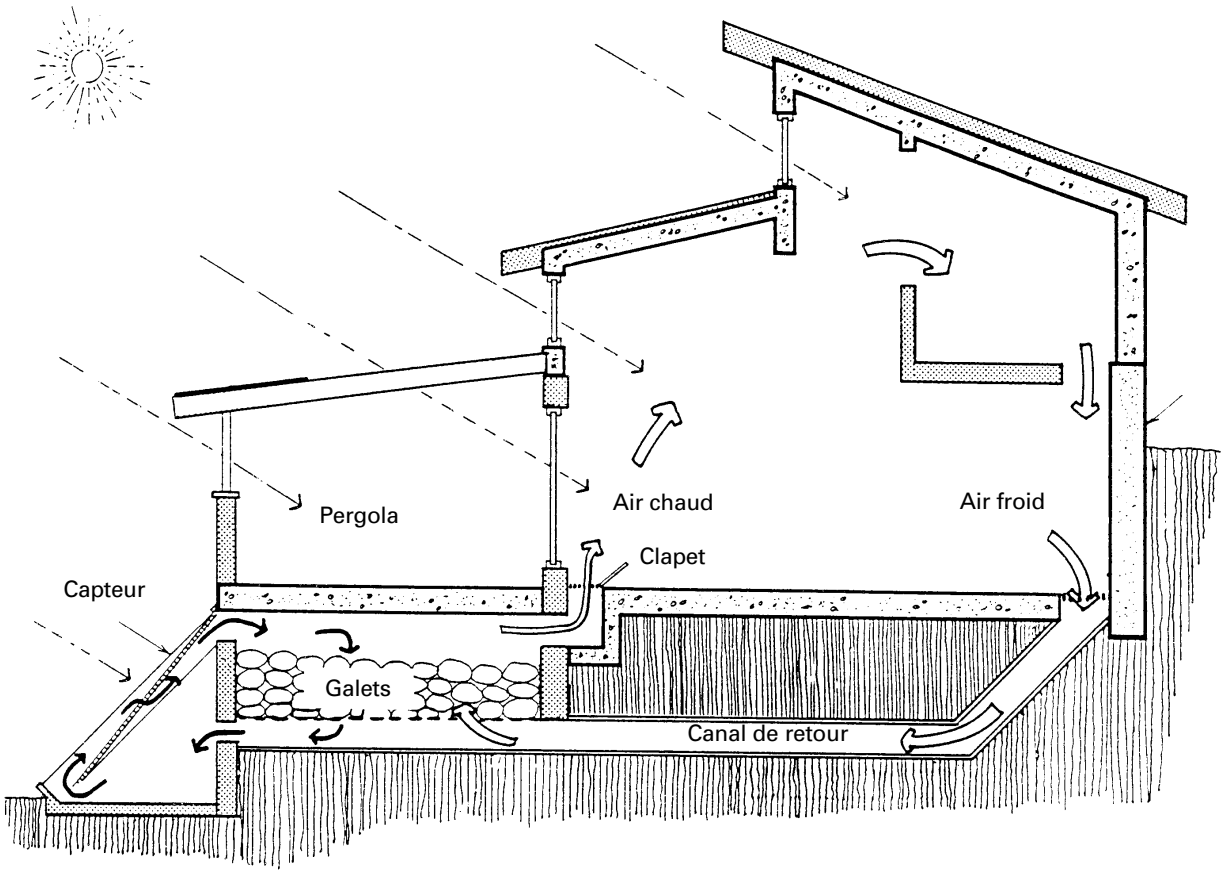
Figure 5.3.2: Dimensionnement d'une ouverture servant à distribuer la chaleur d'un espace de captage vers un espace secondaire.



Captage, stockage, distribution dans un même espace.

Captage, stockage primaire dans un espace A.
Distribution et stockage secondaire dans un espace B.

Capteur et stock primaire sont séparés de l'espace à chauffer. La distribution à lieu à travers le mur interface (directe par convection naturelle, déphasée à travers le mur).



Captage, stockage, distribution sont dissociés.
Le bâtiment devient une machine. Le système se dimensionne comme système solaire actif.

Figure 5.3.3: Différents modes de distribution de la chaleur [12].

Amélioration du transfert

Lorsque le transfert d'air s'effectue à travers une seule porte, la partie basse de la porte verra de l'air circuler dans un sens et la partie haute dans un sens opposé. On admet généralement que la porte peut être divisée en deux parties égales représentant chacune les ouvertures basses et hautes. La différence de hauteur de référence est la demi-hauteur de la porte (distance entre les axes des deux ouvertures).

En réalité on observe une contraction du flux d'air dans la partie haute ce qui a comme conséquence que l'air circule plus lentement dans la partie basse. Il y a des effets positifs: le courant d'air ressenti par les personnes est plus faible et négatifs: le transfert est moins efficace, les deux ouvertures n'ayant pas la même taille (voir figure 5.3.4).

L'aménagement d'une ouverture dans la partie haute des portes améliore sensiblement le transfert (voir figure 5.3.5).

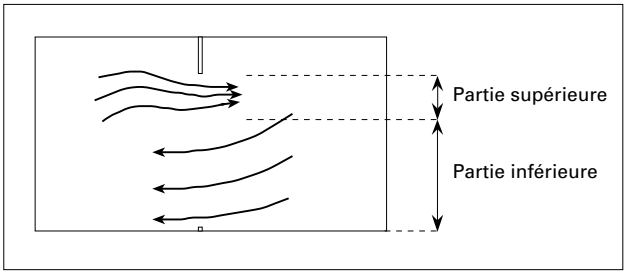


Figure 5.3.4: Ouverture unique entre deux locaux (porte). L'écoulement de l'air de la zone chaude vers la zone froide s'effectue essentiellement par la partie supérieure de l'ouverture à haute vitesse. Le retour de l'air froid vers la zone chaude s'effectue à faible vitesse dans la plus grande partie de l'ouverture [4].

Enfin si l'on utilise plusieurs principes de base pour améliorer le transfert de chaleur on peut atteindre une grande efficacité et concevoir des bâtiments avec une profondeur importante et une utilisation généralisée de l'énergie solaire passive (voir figure 5.3.6).

Stocks dissociés

Dans les systèmes dissociés (stock en lit de galets ou dalles creuses, capteurs à air), les canaux de distribution de l'air doivent être isolés lorsqu'ils traversent des zones que l'on ne désire pas chauffer. La distribution de la chaleur stockée dans un lit de gravier peut se faire par convection forcée (ventilateur) ou par transmission à travers la dalle de couverture ou les murs (convection naturelle et rayonnement). Le mode de distribution n'influence que très peu les performances de ce type de système [17].

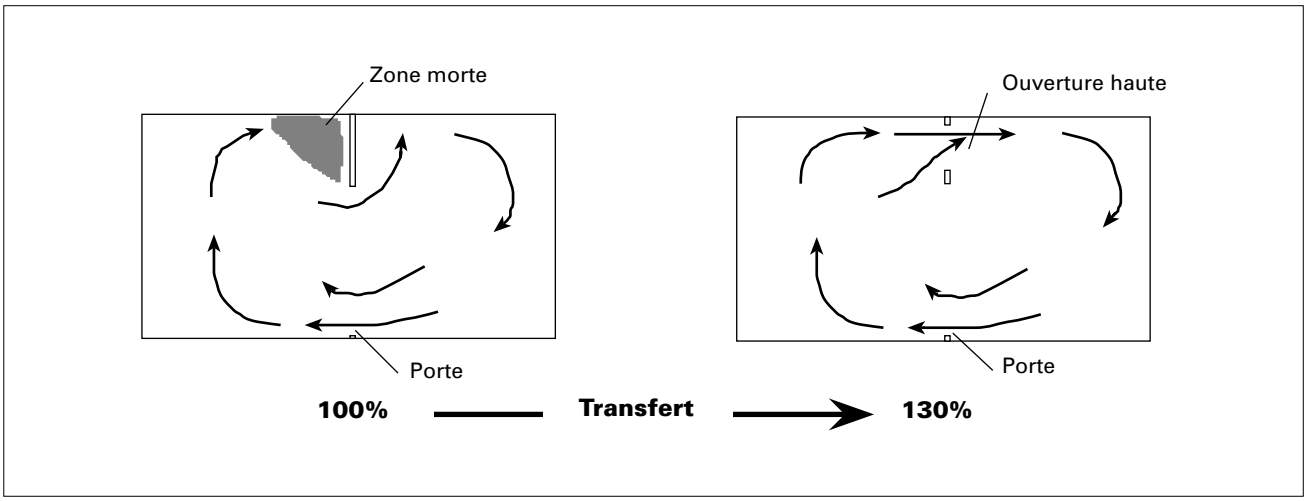
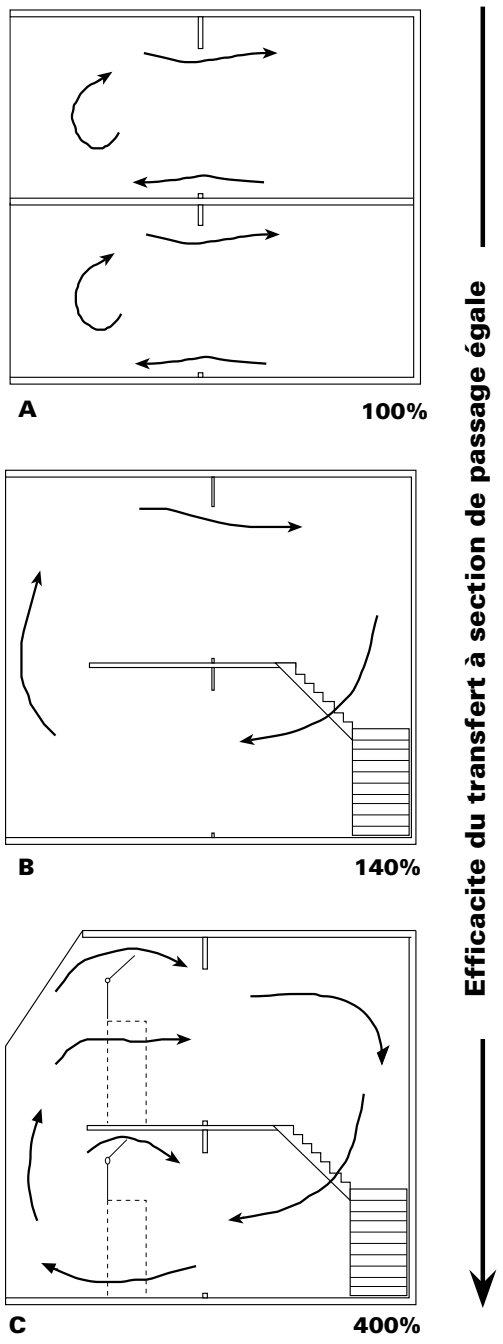


Figure 5.3.5: Amélioration du transfert de chaleur entre deux zones au moyen d'une ouverture haute [4].



A

Les 2 niveaux sont dissociés. La différence de température est faible (< 3°÷ 5°) car les locaux sont habités et la différence de hauteur est, elle aussi, faible (< 3 m). Les portes servent de passage haut et bas entre les locaux avant et arrières.

B

Les 2 locaux avant communiquent. Les 2 locaux arrière sont réunis par l'escalier. La différence de température est toujours faible (< 3 ÷ 5°), mais la différence de hauteur est plus élevée (5 ÷ 6 m). Les portes et l'escalier servent de gaine de passage. Le gain de B par rapport à A est dû uniquement au doublement de la hauteur (+ 40 %).

C

La serre, capteur dissocié de l'espace de séjour, autorise des températures plus élevées, la différence de température peut être plus élevée entre les espaces capteurs et les espaces secondaires (6 ÷ 10°). La différence de hauteur reste élevée (5 ÷ 6 m). Les portes entre la serre et les espaces chauffés et l'escalier servent de gaine de passage.
Le gain de C par rapport à A est dû au doublement de la hauteur (+ 40%) et au doublement de la différence de température (+ 40% de débit d'air). La différence de température doublée équivaut à doubler l'énergie transférée, d'où le gain d'un facteur 4 entre A et C.

Figure 5.3.6: Transfert de chaleur convectif entre zones de captage et espaces chauffés secondaires. Les chiffres se réfèrent au transfert de la chaleur et non pas au débit d'air transféré.

5.4 Conserver la chaleur

Base

Il n'est pas possible, sous nos latitudes, de compenser une perte importante de chaleur par une augmentation des gains solaires. L'enveloppe des bâtiments sera donc nécessairement bien isolée et « étanche » à l'air.

Si l'on peut s'inspirer des techniques de l'architecture traditionnelle (vernaculaire) pour résoudre les problèmes de conservation de la chaleur, de nouvelles techniques de construction (double mur, isolation, verres avec couches à faible émissivité, etc.) permettent de se libérer de certaines techniques anciennes très contraignantes (espaces tampons, formes compactes, isolations nocturnes des fenêtres).

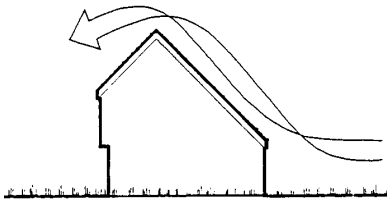
Règles

- La **qualité minimale d'isolation thermique** de tous les éléments de l'enveloppe des bâtiments est régie, dans la majorité des cantons suisses, par la loi. La loi s'appuie sur les recommandations SIA 180, 180/1 et 380/1 (voir **tableau 5.4.4**).
- La **continuité de l'enveloppe isolée** est un critère important de la conservation de la chaleur. Dans une enveloppe bien isolée chaque point faible perd presque autant de chaleur que l'ensemble isolé.
- Le **facteur de forme** (rapport surface d'enveloppe sur volume chauffé, A/V dans SIA 180/1) n'est pas déterminant dans un bâtiment climatiquement équilibré et bien isolé. Il reste un paramètre déterminant dans les bâtiments anciens peu ou pas isolés.
- Tous les locaux habités, même occasionnellement, doivent jouir d'un renouvellement d'air naturel ou mécanique minimum (**0.2 Ren/h minimum**) pour évacuer les polluants qui s'y dégagent.
- Toutes les **installations de ventilation** assurant un renouvellement d'air seront équipées de **récupération** de chaleur.
- Dès qu'un mur est bien isolé (≥ 10 cm d'isolant), lui adjoindre un espace tampon ou l'enterrer n'améliore pas sensiblement sa résistance thermique [18].
- Toutes les **ouvertures** (fenêtres, portes) devraient être conçues en fonction des vents dominants froid d'hiver : leur **disposition**, leur **protection** et leur **étanchéité** [12].
- Une **serre non chauffée** ouverte sur le soleil (espace tampon dynamique) atténue les pertes des espaces contigus et génère des gains. Si elle doit un jour être **chauffée** ses vitrages auront un coefficient **k < 1.5 W/m², K** [5].

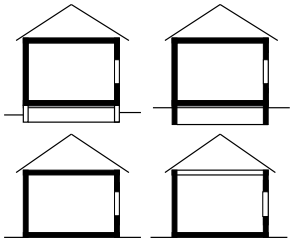
Voir aussi

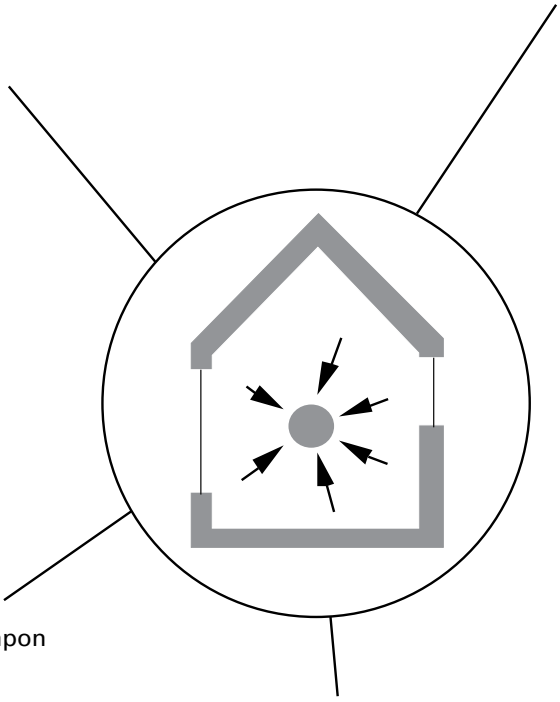
- Chapitre 2.7 Analyse du site (vent)
- Chapitre 5.1 Capter le soleil (serres)
- Annexe A5.2 Logiciel de calcul DIAS
- Annexe A5.5 Température d'un espace tampon

Protection contre le vent
Page 88

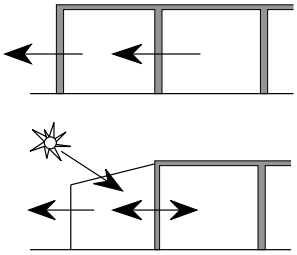


Continuité de la peau
Toute interruption de l'isolation doit être évitée
Page 89

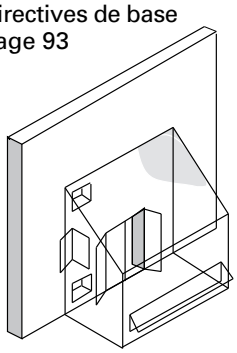




Tampon
On distingue entre tampon statique et dynamique
Page 90



La serre
Directives de base
Page 93



Situation

L'analyse du site met en évidence des zones plus chaudes ou plus froides. L'implantation du bâtiment peut, si possible, exploiter ce zoning climatique.

L'effet le plus marqué de la situation sur la conservation de l'énergie est l'influence du vent sur les déperditions du bâtiment. Par une situation appropriée ou la mise en place d'un protection contre les vents dominants d'hiver, l'effet du vent sur les façades, les toitures et surtout les ouvertures (inétanchéité) peut être réduit.

La figure 5.4.1 montre que si la vitesse du vent peut être réduite d'un facteur deux devant la façade d'un bâtiment, les pertes par infiltration d'air seront elles réduites d'un facteur quatre.

La forme du bâtiment peut aussi se conformer aux flux d'air en les accompagnant plutôt qu'en essayant de lutter contre la pression du vent (figure 5.4.2).

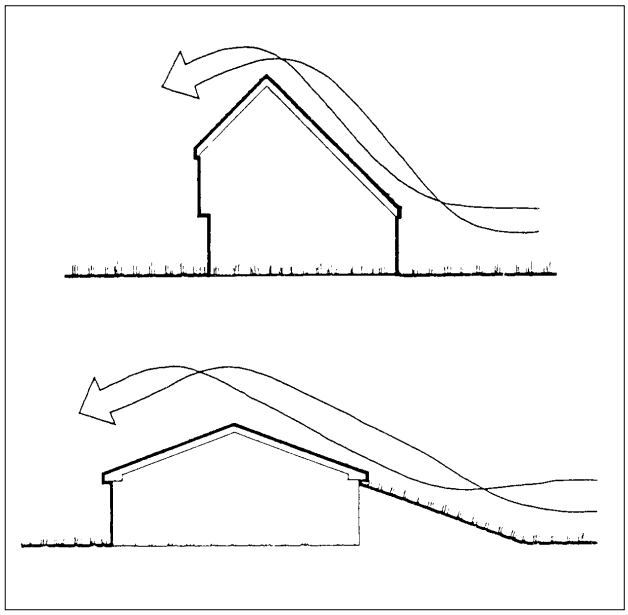


Figure 5.4.2: La forme du toit, vu l'implantation dans le terrain, minimise la prise au vent du bâtiment [1, 12].

Enveloppe

C'est autant la continuité de la peau isolée qui est importante que la qualité isolante de cette peau. Le problème se pose particulièrement avec les combles, les sous-sols, les garages et en général les locaux annexes. Les ambiguïtés du début des études sur la nécessité de chauffer ou non tel ou tel espace secondaire ne sont levées qu'après que les décisions quant à la situation de la peau isolée n'aient été prises. Des interfaces entre des locaux chauffés et des locaux non chauffés se retrouvent ainsi non isolés (voir figure 5.4.5).

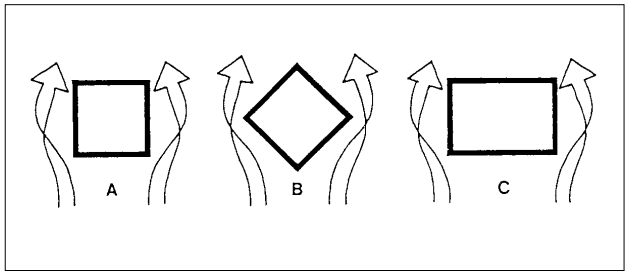


Figure 5.4.3: Une forme compacte est la première règle pour minimiser la prise au vent. L'orientation est aussi importante. Le bâtiment B a la même taille et configuration que le plan A, ses façades offrent pourtant une prise apparente au vent équivalente à celle du plan C, car le bâtiment est tourné de 45° par rapport à la direction du vent froid [1].

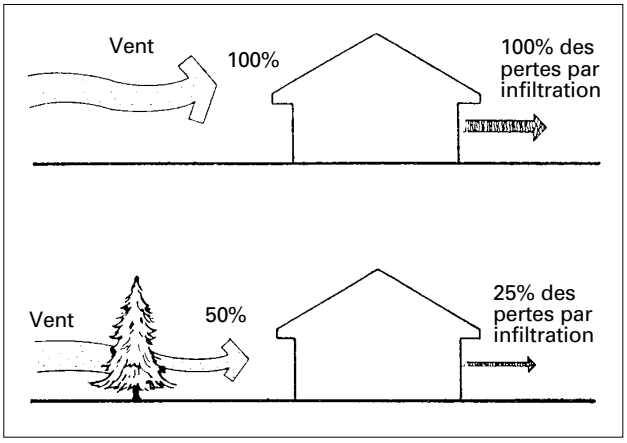


Figure 5.4.1: Une faible réduction de la vitesse du vent par un écran induit une forte réduction des infiltrations d'air [12].

Un autre problème est la multitude d'éléments de liaison entre les deux voiles d'un mur. Toutes ces attaches ou agrafes nécessaires à la fixation du parement et qui traversent l'isolant diminuent les performances thermiques du mur de plus de 30 %.

La qualité thermique de chaque élément constituant l'enveloppe isolée peut être dimensionnée sur des critères:

- Légaux (normes SIA 180/1 ou 380/1 ou Modèle d'ordonnance, voir tableau 5.4.4).
- Technico-économiques: optimisation économique de l'épaisseur d'isolant. Quelle est la rentabilité financière de chaque centimètre d'isolant supplémentaire étant entendu que chaque nouveau centimètre d'isolant est moins efficace que le précédent.
- De confort: température minimale de surface par temps froid pour assurer le confort des occupants (voir SIA 180).
- De performance globale: limiter la consommation globale d'un bâtiment dont la géométrie est connue: rééquilibrer le rapport gains/pertes (voir annexe A4. Performances).

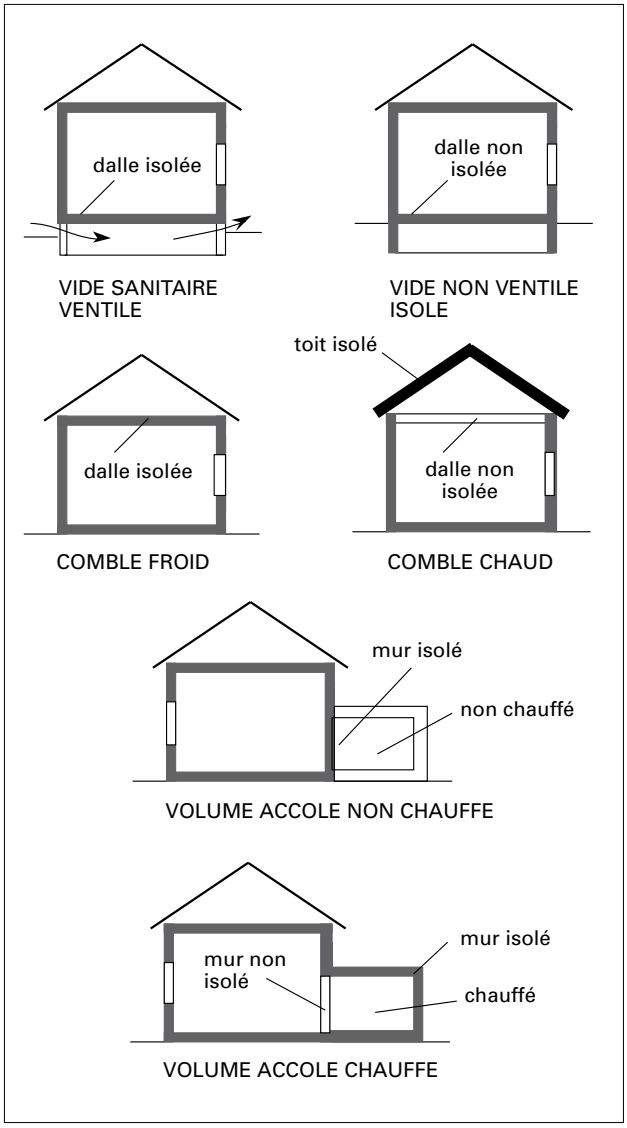


Figure 5.4.5: Continuité de la peau isolée: exemples.

ELEMENT	k W/m², K		Epaisseur d'isolant cm	
	Max	Recommandé	Min.	Recommandée
Mur	0.4	0.3	9	12
Toit (en pente ou plat)	0.4	0.3	9	12
Sol (sur vide ou extérieur)	0.4	0.3	9	12
Fenêtre	2.6	2.0	–	–
Mur contre terre	0.5	0.4	7	10
Sol en terre-plein	0.5	0.4	7	9

Selon SIA 380/1: performances ponctuelles requises. L'épaisseur d'isolation indiquée n'est qu'une indication basée sur une composition « standard » des autres couches de l'élément.

Tableau 5.4.4: Coefficients d'isolation minimaux recommandés [19].

Facteur de forme

Le rapport de la surface d'un bâtiment rapportée à son volume est appelé facteur de forme. Dans une architecture, dont la performance énergétique est basée sur la conservation de la chaleur, réduire ce facteur est fondamental. Ce facteur joue aussi un rôle très important pour des bâtiments dont la peau est peu ou pas isolée (bâtiments anciens). Il devient par contre secondaire avec des enveloppes bien isolées. Ce facteur de forme n'a même aucun sens lorsque l'on veut maximiser les gains solaires en hiver ou l'éclairage naturel. Dans des bâtiments avec de forts dégagements de chaleur interne la minimisation du facteur de forme pourrait même avoir comme conséquence le recours à une climatisation (trop grande compacité des locaux).

Renouvellement d'air

Tous les locaux habités, même occasionnellement, doivent jouir d'un renouvellement d'air naturel ou mécanique minimum (0.2 Ren/h minimum) pour évacuer les polluants internes (matériaux, solvants, fumées, odeurs, gaz carbonique) (voir chapitre 3.3, Aération).

Si la ventilation est mécanique, une récupération de la chaleur permettra de minimiser les pertes de chaleur dues à ce renouvellement. Si la ventilation du bâtiment est naturelle, ce renouvellement se fera, lorsque les locaux ne sont pas occupés, par les fuites ménagées dans l'enveloppe: fentes, joints des fenêtres et des portes. La perméabilité doit être «contrôlée» et non accidentelle comme c'est souvent le cas dans les toitures lambrissées où le film pare-vapeur et pare-air n'a pas été raccordé correctement. Cette perméabilité nécessaire de l'enveloppe rend le bâtiment très sensible au vent. Si l'on n'y prend garde, par jour venté, le renouvellement d'air sera multiplié par 2 ou 3, ce qui entraînerait des pertes excessives et un inconfort notoire. La protection contre le vent des façades exposées revêt donc toute son importance (voir *Situation* dans ce chapitre).

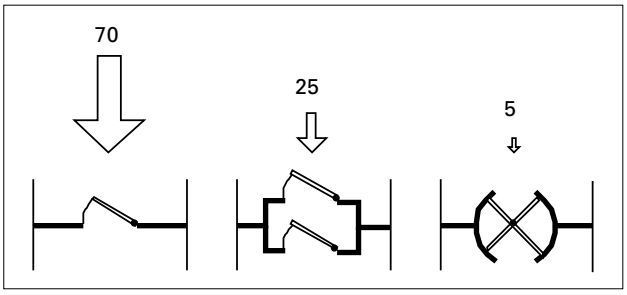


Figure 5.4.6: Efficacité d'un sas sur une porte. Le chiffre représente le débit d'air (m³) généré par une ouverture de porte [12].

Bâtiments enterrés

Enterrer certaines façades d'un bâtiment pour diminuer ses surfaces de déperdition est, comme pour les espaces tampons, une technique très efficace si l'on ne dispose pas d'isolation dans ce mur. Un mur bien isolé n'a pas besoin d'être enterré pour être protégé du froid.

L'expérience montre que le nécessaire drainage disposé au pied du mur et la percolation de la pluie réduit considérablement l'intérêt de cet enfouissement. Des mesures in situ ont montré que cette technique diminuait de 7 % les pertes d'un mur (comparé à un mur non enterré) ce qui équivaut à un centimètre supplémentaire d'isolant! [18]. L'enfouissement d'un bâtiment pourrait être justifié par une protection contre la chaleur plutôt que contre le froid.

Espaces tampons statiques

L'espace tampon est un local «non chauffé» situé entre un espace chauffé et l'extérieur. Il est dit statique car il est chauffé uniquement par les pertes de l'espace chauffé à travers la paroi interface entre les deux espaces. Traditionnellement, c'est-à-dire avant l'utilisation d'enveloppe extérieure bien isolée, c'était le seul moyen de protéger une paroi extérieure. Aujourd'hui la protection d'un mur avec une couche isolante est un moyen plus simple et plus performant que la création d'un espace tampon.

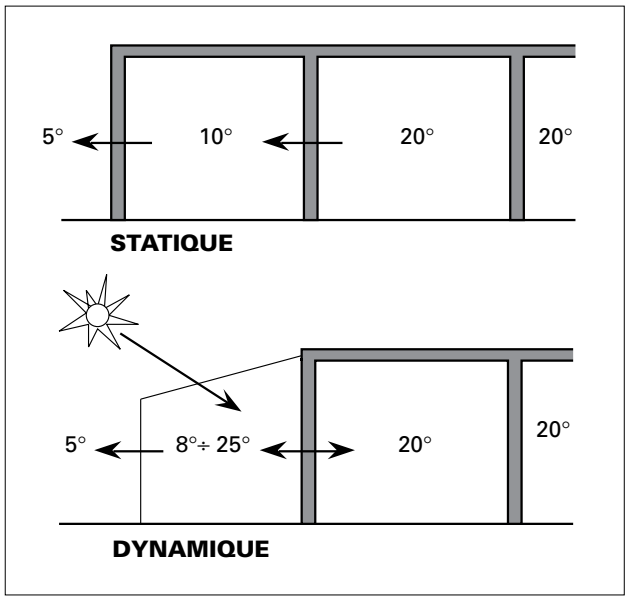


Figure 5.4.7: Espaces tampons statiques et dynamiques. Avec le tampon statique, le flux de chaleur va toujours de l'espace chauffé vers l'extérieur en passant par le tampon. Avec le tampon dynamique, la situation est la même en période froide sans soleil mais, par jour ensoleillé, le flux s'inverse entre l'espace chauffé et le tampon.

Néanmoins, on peut disposer judicieusement les locaux annexes nécessaires, ceux-ci pouvant jouer le rôle de tampon: comble non chauffé, garage, stock, dépôt, bûcher sans pour autant créer des espaces pour disposer de tampons avec l'extérieur. Seuls les sas équipant les portes donnant sur l'extérieur et limitant le renouvellement d'air indésirable généré par l'ouverture de la porte, sont des espaces tampons très efficaces (voir figure 5.4.6).

La situation des locaux annexes, en tampon sur les faces Nord des bâtiments, pourrait diminuer l'éclairage naturel des locaux de travail dans les bâtiments administratifs (figure 5.4.8).

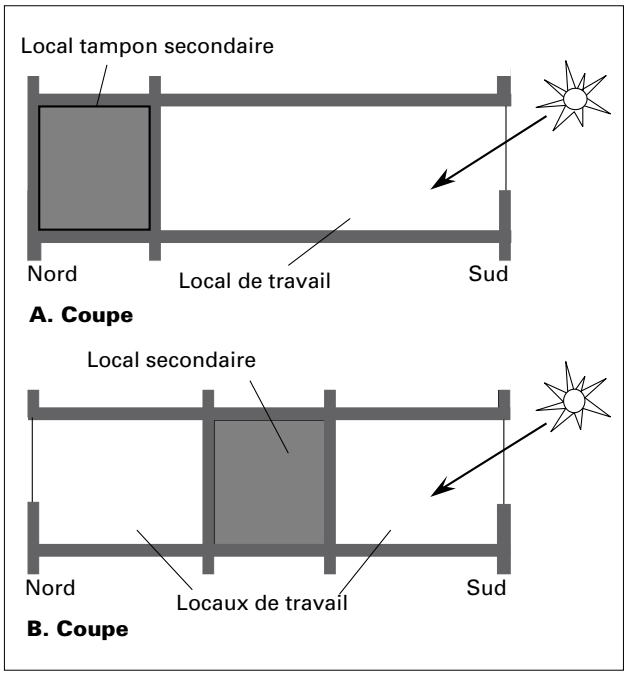


Figure 5.4.8: Les locaux annexes utilisés en tampon ne doivent pas hypothéquer l'éclairage naturel (A). Dans les bâtiments administratifs on les situera plutôt au centre ou en sous-sol (B).

Espaces tampons dynamiques

L'espace tampon «dynamique» n'est pas chauffé seulement par les pertes de chaleur des espaces chauffés contigus, mais aussi par des gains solaires ou internes. Cela signifie que, durant certaines périodes, sa température est supérieure ou équivalente à celle des espaces chauffés. Ces serres, vérandas ou même atrium, selon leur situation et leur taille, peuvent jouer un rôle important dans le bilan thermique d'un bâtiment.

Leur surface vitrée sera dimensionnée comme celle d'un élément de captage (voir chapitre 5.1, Capter le soleil). Les murs d'interface et les stocks ont été aussi traités aux chapitres 5.2, Stocker la chaleur et 5.3, Distribuer la chaleur. Le problème de la surchauffe sera traité au chapitre 5.6, Ventilation naturelle.

La figure 5.4.12 résume le dimensionnement des principaux éléments d'une serre. La pratique montre que certains de ces espaces tampons, conçus comme non chauffés à l'origine, ont été chauffés par la suite, leur intégration dans le plan nécessitant leur chauffage (voir figure 5.4.10). Si une serre doit être chauffée et que l'on désire conserver de bonnes performances énergétiques, il faut considérer les règles suivantes:

– tenir une serre hors gel (>5°) n'hypothèque en rien ses performances: elle reste une serre non chauffée jusqu'à une température de consigne de 8°C [5];
– chauffer une serre à 18°C diminue ses performances de 50% si ses vitrages sont des double vitrages isolants, de 10% seulement s'ils sont des double vitrages isolants avec couche à faible émissivité IR ($k < 1.5\ W/m^2, K$) [5].

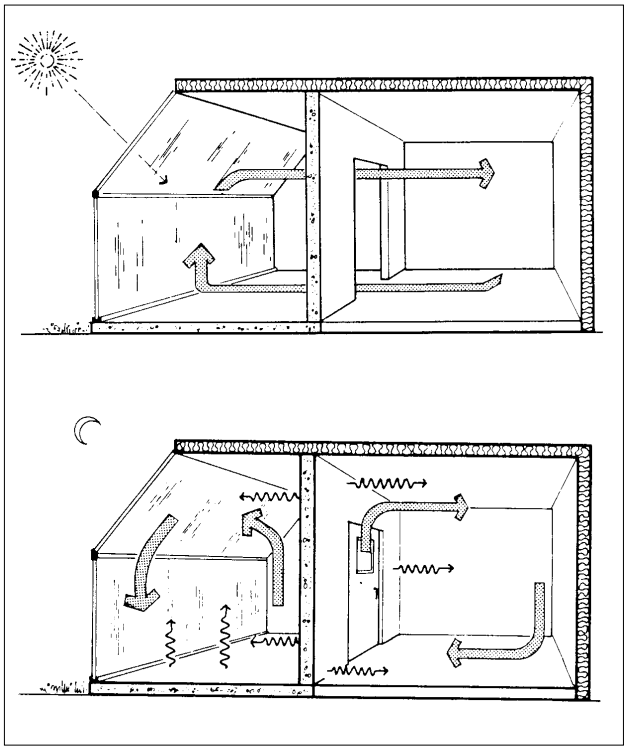
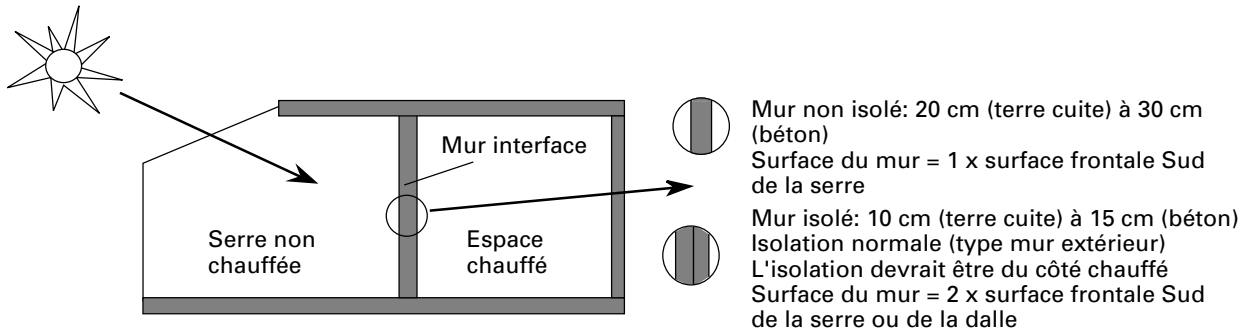


Figure 5.4.9: Espace tampon dynamique. Durant la journée, la serre collecte de la chaleur qui devrait être distribuée aux espaces contigus. Durant la nuit, la serre doit être isolée des espaces «chauffés». A la différence des espaces tampons statiques, un transfert entre les espaces chauffés et tampons est favorable selon les conditions climatiques [12].



Vitrage serre	Climat doux (plateau, altitude < 600 m)	Climat froid ou chaud (plateau, altitude > 600 m et Sud des alpes)
Simple verre	mur isolé	mur isolé
Double verre	mur non isolé	mur isolé
Double verre + IR	mur non isolé	mur non isolé

Figure 5.4.10: Qualités requises pour le mur interface (stock) entre une serre et des espaces chauffés [12].

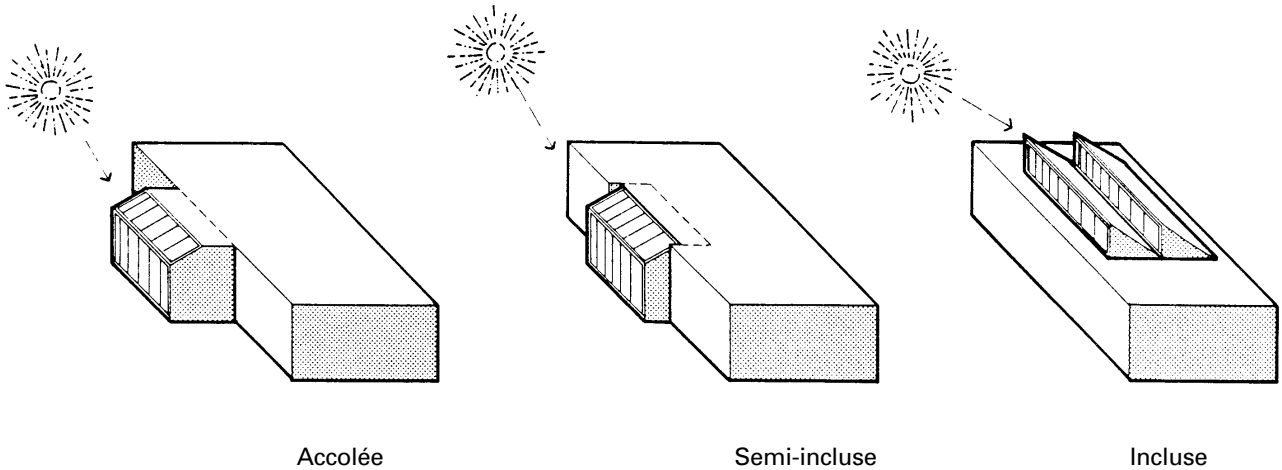


Figure 5.4.11: Différents modes d'articulation d'une serre avec un bâtiment [12].

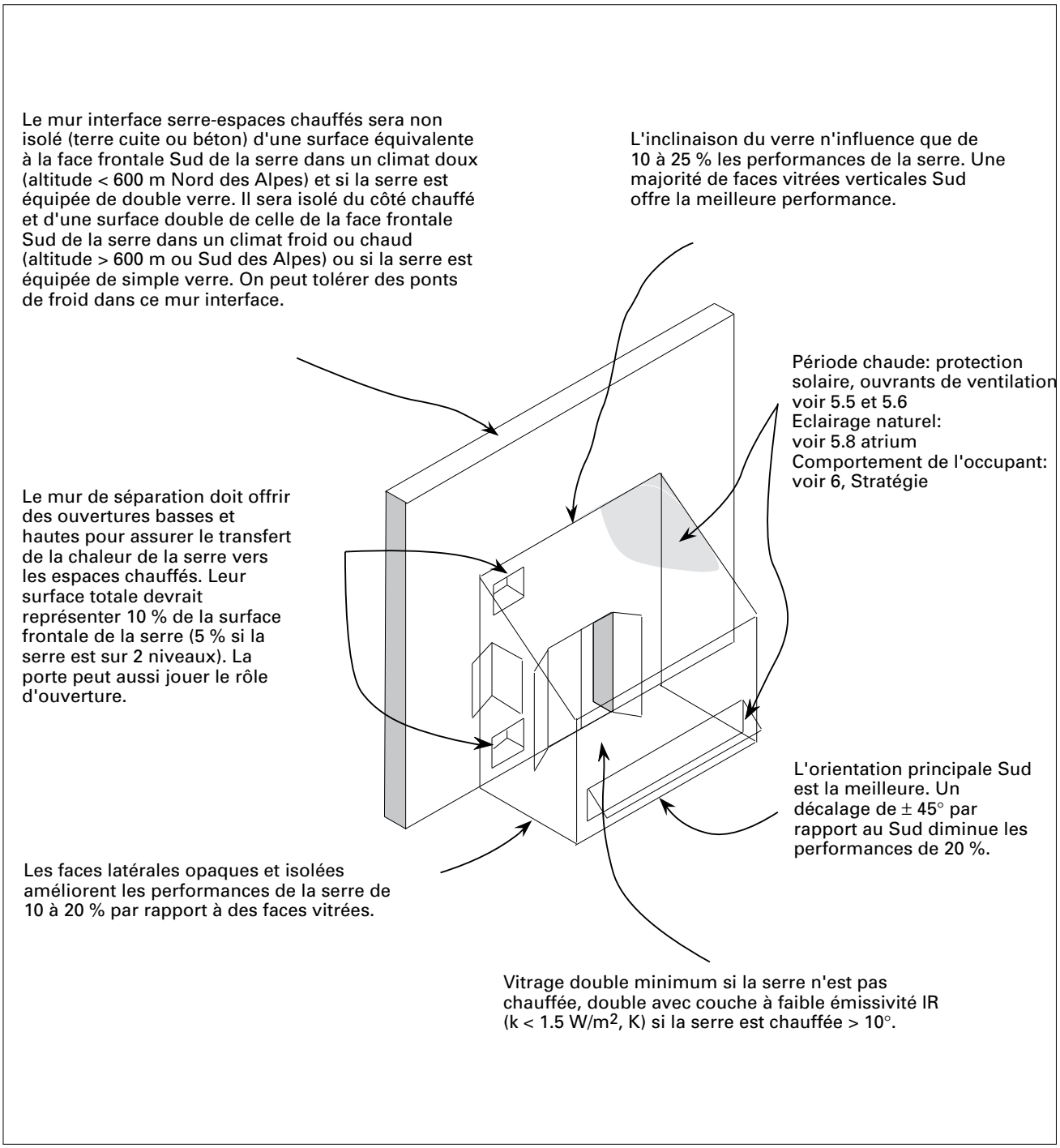


Figure 5.4.12: Directives de base pour le dimensionnement des éléments d'une serre (espace tampon dynamique) [4, 5, 7, 12, 16, 20, 21].

Période chaude (été)

On fera appel aux mêmes quatre grands principes physiques (conduction, convection, rayonnement et évaporation) pour contrôler le climat d'été. Simplement on utilisera souvent l'effet inverse par rapport à la stratégie d'hiver: par exemple on se protège du rayonnement solaire plutôt que de le laisser pénétrer dans le bâtiment.

Certains principes, comme le refroidissement par rayonnement (vers le ciel durant la nuit) ou par évaporation ne sont pas très efficaces sous notre climat très humide. Ces deux principes peuvent par contre être mis en œuvre dans les installations de conditionnement des bâtiments.

STRATEGIES DE CONTROLE		CONDUCTION	CONVECTION	RAYONNEMENT	EVAPORATION
HIVER	FAVORISER LES GAINS		Minimiser la vitesse d'air sur la peau externe	Favoriser les gains solaires	
HIVER	RESISTER AUX PERTES	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air		
ETE	RESISTER AUX GAINS (SE PROTEGER)	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air	Minimiser les gains solaires	
ETE	FAVORISER LES PERTES (EVACUER)	Favoriser les échanges avec le sol (terre)	Favoriser la ventilation	Favoriser le refroidissement par rayonnement	Favoriser le refroidissement par évaporation

Figure 5.5.1: Principes physiques et stratégies de contrôle en architecture climatique [1].

Le choix d'une architecture plus ouverte sur l'extérieur augmente sa sensibilité aux éléments climatiques. Si la stratégie pour la période froide était de laisser entrer le soleil dans le bâtiment, et de limiter les pertes de chaleur, celle de la période chaude sera plutôt de minimiser tous les gains et de privilégier leur évacuation vers l'extérieur.

On applique les principes suivants:

- **Minimiser les gains solaires**: dès que la température extérieure excède la limite inférieure du confort, les gains solaires ne devraient pas rajouter à l'inconfort.
- **Minimiser les gains par transmission et infiltration**: retenir la chaleur à l'extérieur.
- **Favoriser la ventilation**: évacuer la chaleur captée en utilisant le renouvellement d'air par effet de cheminée ou par le vent, favoriser les échanges de chaleur entre le corps humain et l'air en augmentant les mouvements d'air.
- **Déphaser les gains du jour sur la nuit** généralement fraîche même en été.

Le jeu de tous ces principes, à des degrés divers selon le projet, permet généralement de réduire les périodes de surchauffe à quelques jours par été.

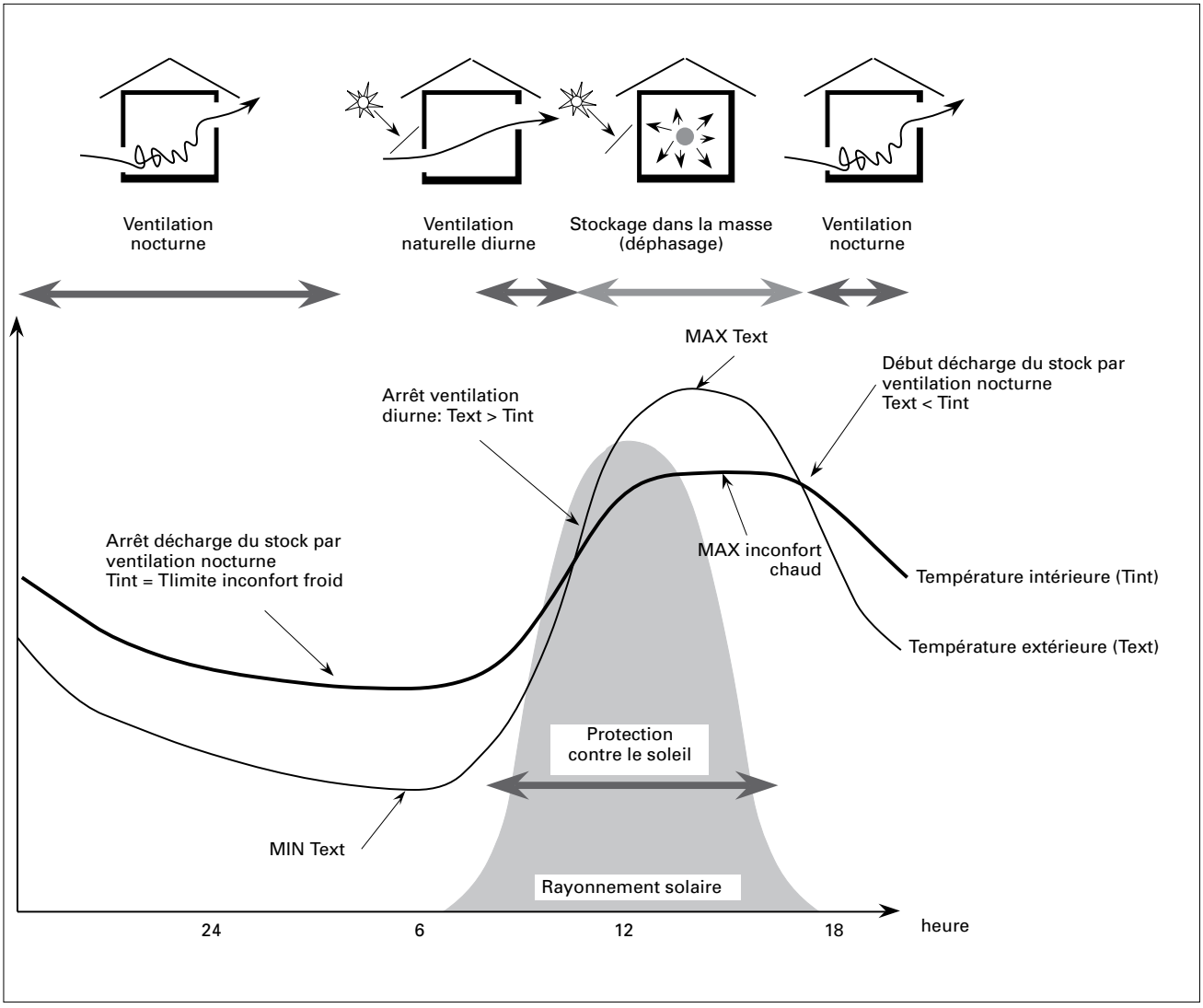


Figure 5.5.2: Stratégie de contrôle de la surchauffe: illustration de l'usage des différents principes dans le temps.

5.5 Minimiser les gains solaires

Base

La bonne maîtrise des gains solaires d'été permet dans la majorité des cas de se passer de tout système de refroidissement.

Ouvrir généreusement une architecture sur le soleil d'hiver rend les bâtiments plus sensibles aux surchauffes. Un soin particulier doit être apporté dans l'étude de son exposition au soleil d'été. On peut agir à différents niveaux.

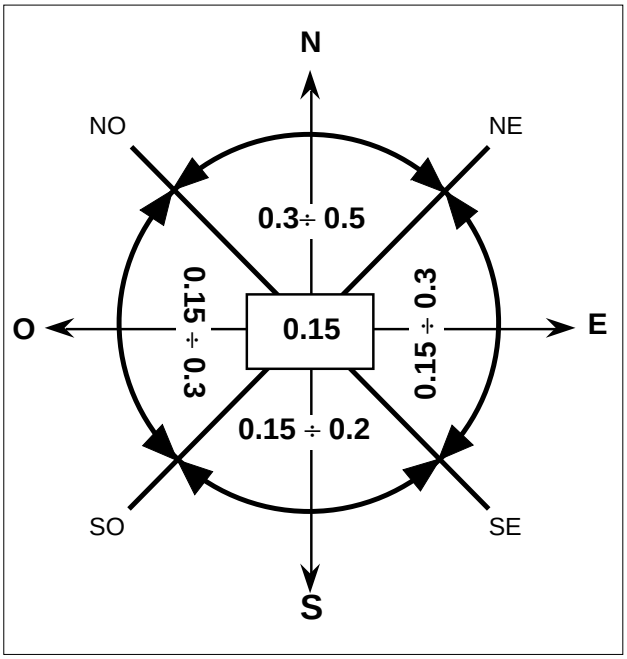
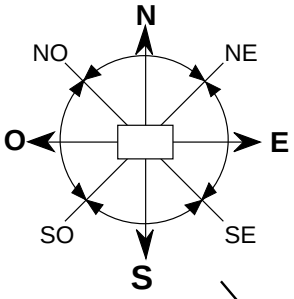


Figure 5.5.3: Niveau de protection solaire recommandé en fonction de l'orientation. La valeurs donnée est le coefficient g (transmission énergétique globale du complexe vitrage-protection solaire). La valeur donnée au centre du diagramme correspond à des fenêtres de toiture.

Règles

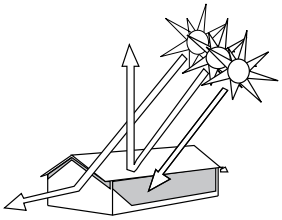
- Utiliser les **masques du site**: plantation, bâtiments adjacents, relief pour se protéger.
- Protéger du soleil le **sol** environnant le bâtiment par des plantations (arbres, treilles) ou des constructions (tonnelles) pour minimiser sa température [1, 12].
- Utiliser des **revêtements de sol clairs**, ou **végétaux** [1].
- Utiliser des **revêtements des murs et du toit clairs** pour diminuer les flux solaires absorbés ou les couvrir de végétation à feuilles caduques [1].
- Mettre des **peaux ventilées** sur les murs et toitures mal isolés [1].
- **Isoler les toits** à pans ventilés avec 12 cm minimum, les toits plats avec 14 cm.
- **Limiter** l'utilisation des **protections solaires fixes** aux bâtiments où les gains internes dominent et dimensionner la protection pour la période de surchauffe seulement [12].
- Eviter d'utiliser des **verres antisolaires** comme protection unique. Si l'on tient absolument à en utiliser, prendre des verres faiblement antisolaires et les combiner avec des protections mobiles.
- Faute d'un bilan des gains solaires plus précis, respecter le coefficient **g maximum selon l'orientation** défini dans la figure 5.5.3. Pour obtenir ces valeurs on peut combiner plusieurs protections.
- **Attention**: la performance globale (g) d'une combinaison de protections peut ne pas être égale au produit des performances (g) des éléments combinés (voir page 104, Combinaison de protections).
- Une **façade Nord** reçoit aussi du soleil en été. Elle devra être protégée si nécessaire. Une **toile intérieure** pourrait suffire.

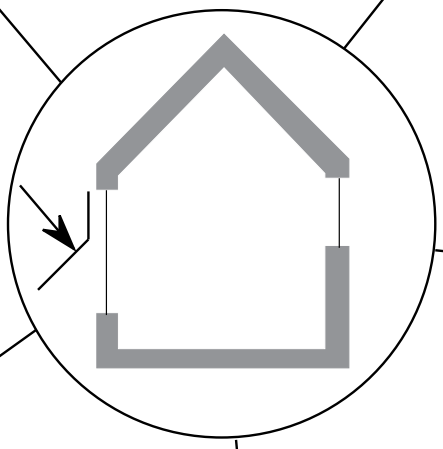
Performances recommandées
Protection en fonction de l'orientation
Page 96



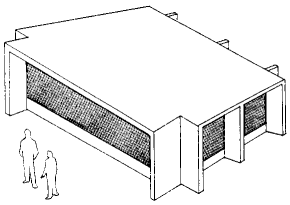
Revêtements
Les revêtements les moins absorbants seront situés sur :
- la toiture: à pans ou plate
- la façade Ouest, Sud-Ouest ou Nord-Ouest
- la façade Est, Sud-Est
- la façade Sud

Page 99

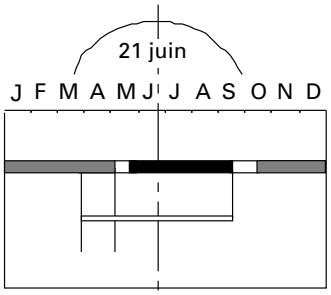




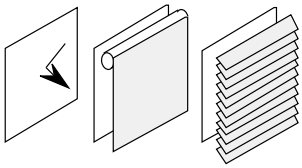
Lames horizontales et verticales fixes
Dimensionnement
Pages 101 à 103

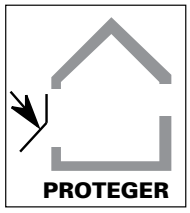


Brise-soleil fixe
Attention à la symétrie de l'effet des brise-soleil fixes dans l'année
Page 101



Protection mobile
Classement
Page 105





Situation

Le chapitre 2 « Analyse du site » présente les modes d'évaluation de l'exposition du site au soleil.

On peut:

- Utiliser les masques du site (plantation, bâtiments adjacents, relief) pour se protéger.
- Protéger du soleil le sol environnant le bâtiment par des plantations (arbres, treilles) ou des constructions (tonnelles) pour minimiser sa température: amélioration de l'efficacité de la ventilation naturelle et diminution du rayonnement solaire réfléchi par le sol.
- Utiliser des revêtements de sol soit clair, n'absorbant pas le rayonnement solaire, soit végétaux (gazon, pavés verts), évacuant le rayonnement capté par évapotranspiration.

Orientation

La figure 5.1.4 du chapitre 5.1 « Capter le soleil » montre qu'en été, les faces Est, Sud et Ouest reçoivent une part équivalente de rayonnement solaire. La face Nord en reçoit la moitié et la face horizontale (toiture) le double.

Par un choix judicieux de l'orientation des faces ou de leur importance relative (forme du bâtiment) on peut minimiser l'impact du soleil d'été.

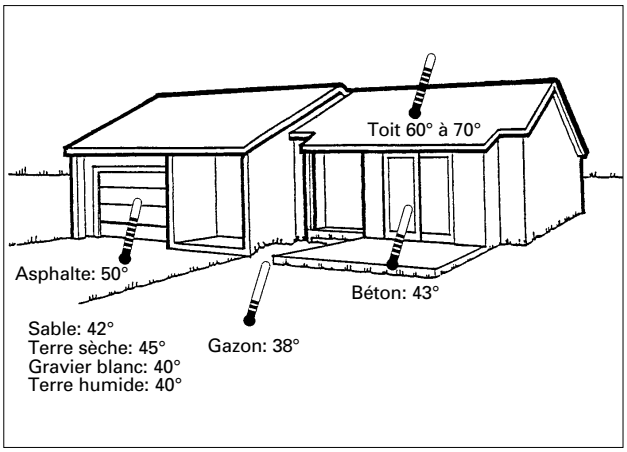


Figure 5.5.4: Température de différentes surfaces, un jour chaud et ensoleillé (exemple). Toutes les surfaces non végétales qui absorbent le rayonnement solaire n'arrivent pas à dissiper la chaleur captée par évaporation [1].

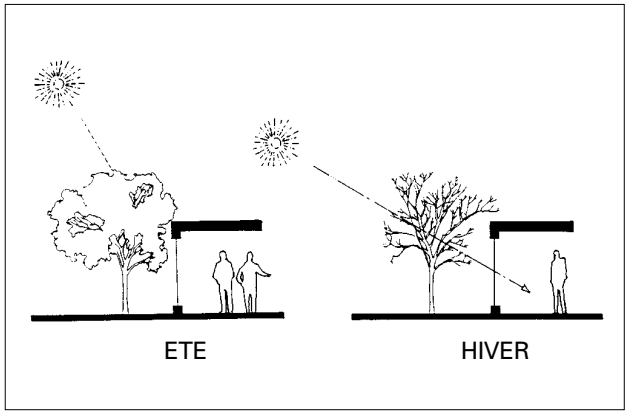


Figure 5.5.5: L'ombre apportée par les arbres dépend de l'espèce, de la période de végétation et de l'âge du plant. La transmission du rayonnement solaire peut être de 20% en été et de 70% en hiver selon le choix de l'arbre [1, 12].

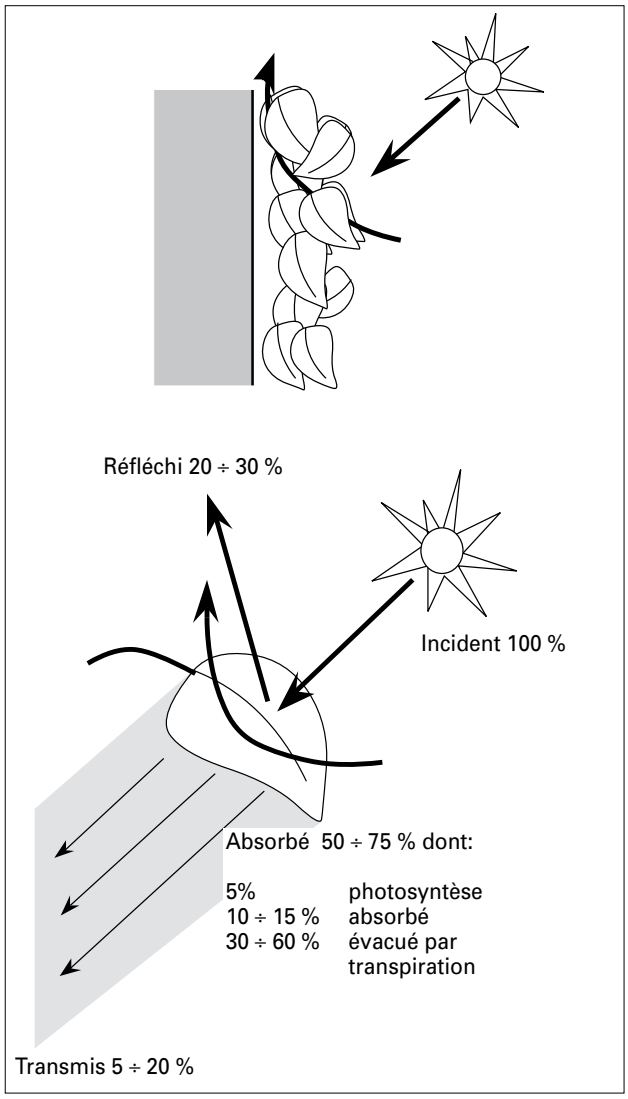


Figure 5.5.6: Une vigne vierge agit comme une protection solaire du mur. Elle refroidit l'air ambiant par transpiration des feuilles [1, 12].

Revêtements extérieurs

Selon l'orientation de la façade ou de la toiture, on devrait choisir des qualités de revêtement où des couleurs de parois opaques dans des gammes qui atténuent les gains solaires (facteur d'absorption faible) et favorisent l'émission de chaleur par rayonnement infrarouge (facteur d'émission élevé).

Pour limiter la surchauffe, seul le revêtement des faces exposées est sensible.

La surchauffe d'une surface exposée au soleil risque d'augmenter le flux qui traverse la paroi et chauffe l'intérieur mais surtout chauffera l'air nécessaire à une ventilation naturelle du bâtiment.

Par ordre d'importance, les revêtements les moins absorbants seront situés sur:
- la toiture: à pans ou plate;
- la façade Ouest, Sud-Ouest ou Nord-Ouest;
- la façade Est, Sud-Est;
- la façade Sud.

Un des moyens très efficaces de limiter la température de surface d'un mur est de le recouvrir de végétation (vigne, lierre, etc.).

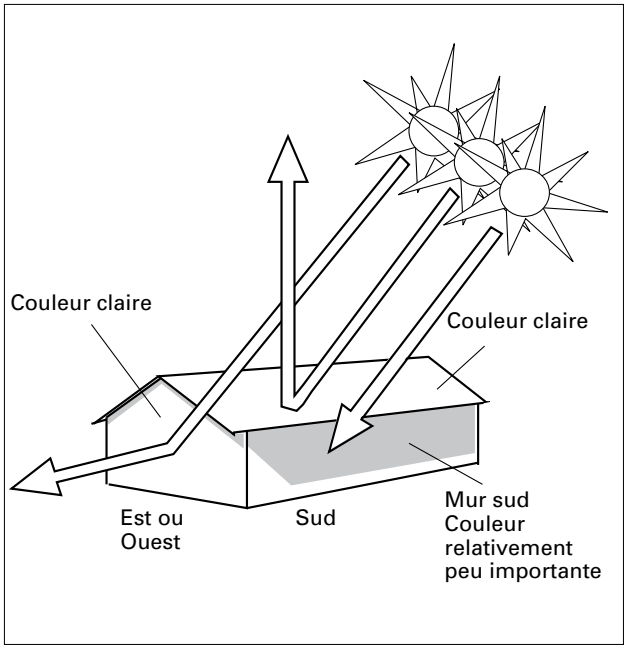


Figure 5.5.7: Choix des revêtements. En été, le soleil éclaire en priorité la toiture. Les murs Est et Ouest reçoivent déjà moitié moins de rayonnement. La façade Sud reçoit peu de soleil, surtout si elle est équipée d'un avant-toit [1].

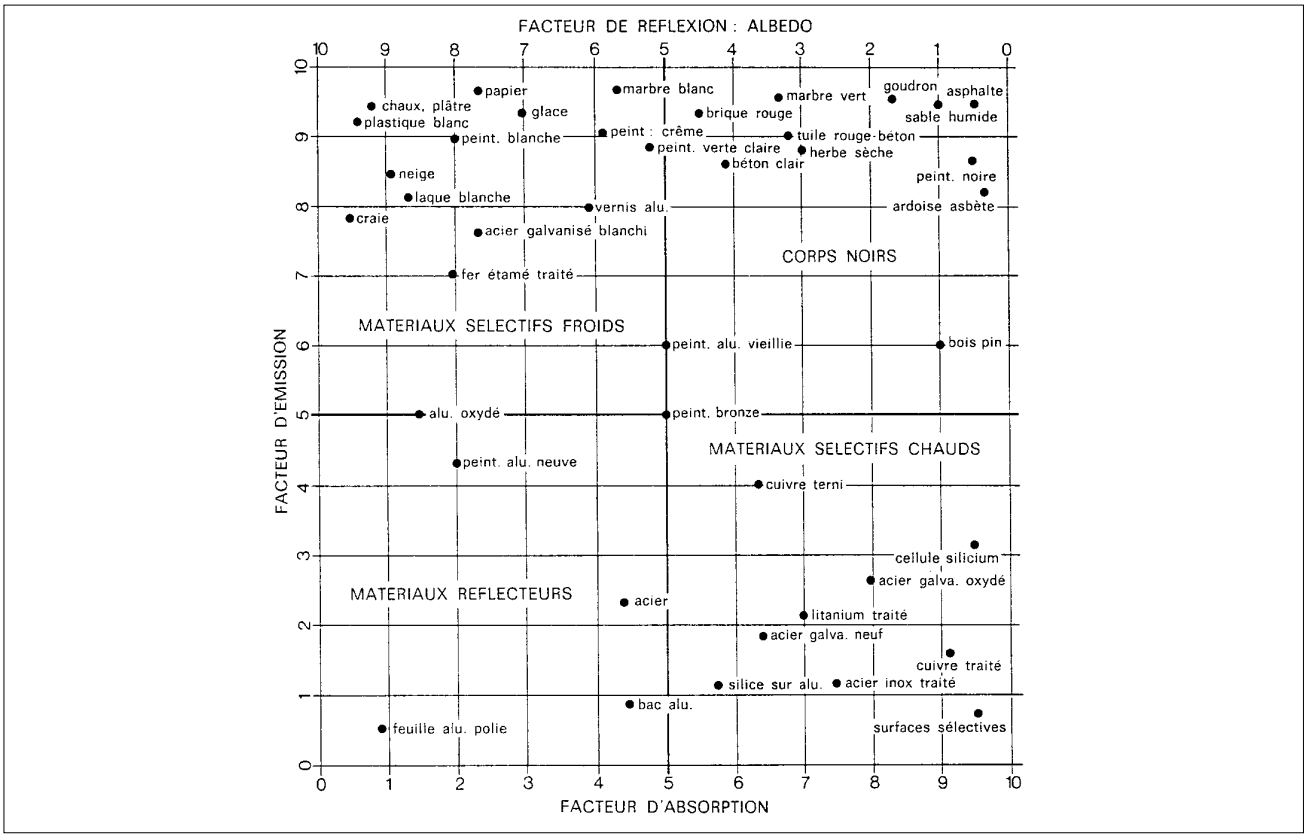


Figure 5.5.8: Tableau donnant les propriétés radiatives des principaux matériaux de revêtement. Pour minimiser les gains solaires, il faut choisir un matériau à faible facteur d'absorption et fort facteur d'émission, c'est-à-dire à gauche et en haut du tableau [8, 9].

Peau ventilée

Si les murs ou la toiture ne sont pas bien isolés, une peau extérieure, détachée de la paroi et ventilée naturellement, diminue le flux absorbé.

Cette solution est traditionnellement appliquée aux toits à 2 pans où le comble inhabité est très bien ventilé naturellement.

Toiture

En été, la toiture reçoit plus du double du rayonnement solaire d'une façade Ouest ou Sud. Sa protection est donc de la plus haute importance.

Si l'on dimensionne habituellement l'isolation des murs et dalles pour la période froide, on doit dimensionner celle de la toiture pour la période chaude.

Protections solaires fixes

Pour décider de l'opportunité de disposer une protection solaire fixe sur un bâtiment, il faut déterminer pour quelle période on désire protéger chaque façade. Pour cela, il faut analyser le type de bâtiment que l'on veut protéger (voir chapitre 3) pour distinguer les deux types principaux: bâtiments où les flux énergétiques entre l'intérieur et l'extérieur dominent, bâtiments où les flux énergétiques internes prédominent [12].

Il est très difficile de dimensionner une protection fixe pour un bâtiment où les échanges à travers l'enveloppe dominent car, si l'on veut limiter la protection à la période de surchauffe estivale (mi-juin à fin août) on hypothèque aussi une bonne partie de la saison de chauffage (avril à mai).

On peut donc tirer les règles suivantes:

- Pour un bâtiment où les échanges par l'enveloppe prédominent, les protections solaires devraient être plutôt mobiles.
- Pour un bâtiment où les échanges internes dominent, une protection solaire fixe peut être envisagée. Ceci est aussi vrai pour les bâtiments super isolés ($k_{moyen} < 0.3$ W/m^2, K).

Ces règles ne s'appliquent pas nécessairement à l'ensemble d'un bâtiment mais leur validité est limitée à certaines zones: dans tout bâtiment administratif on trouve des zones à forts dégagements internes (les bureaux par exemple) et d'autres à faible dégagements (les circulations par exemple).

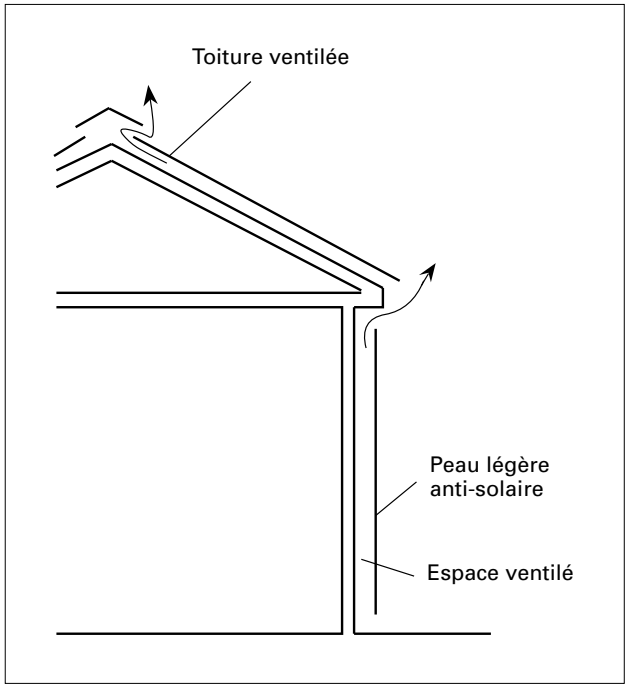


Figure 5.5.9: Des peaux légères ventilées diminuent l'impact du soleil sur les parois extérieures. Elles sont efficaces si la paroi qu'elles protègent est mal isolée [1].

Type de toiture	k_{limite} W/m^2, K	Epaisseur minimale d'isolant cm
Plate non ventilée	0.25	14
A pans ventilée	0.30	12

Tableau 5.5.10: Coefficient de déperdition thermique recommandé pour les toitures.

Brise-soleil horizontal

La figure 5.5.13 donne des proportions de brise-soleil horizontal habituellement utilisées. Si au sud, ces brise-soleil sont très efficaces, ils le sont beaucoup moins à l'est et à l'ouest où seules des lames verticales permettraient de se protéger efficacement du soleil bas sur l'horizon. Néanmoins un brise-soleil horizontal atténue le rayonnement solaire du milieu de la journée, le plus intense.

Ces brise-soleil horizontaux peuvent être complétés à l'est et à l'ouest par une toile verticale (voir figure 5.5.15).

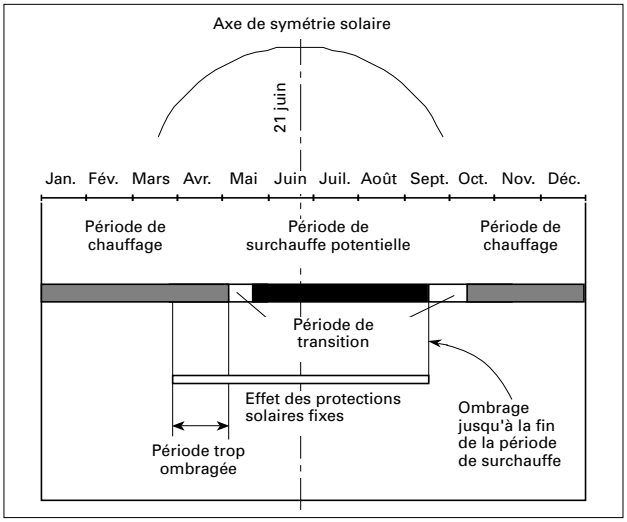


Figure 5.5.11: L'ombrage offert par une protection solaire fixe est symétrique par rapport au 21 juin, la période de surchauffe ne l'étant pas, on assiste à un excès de protection en fin d'hiver. Une protection mobile permet un ombrage en phase avec la période de surchauffe [12].

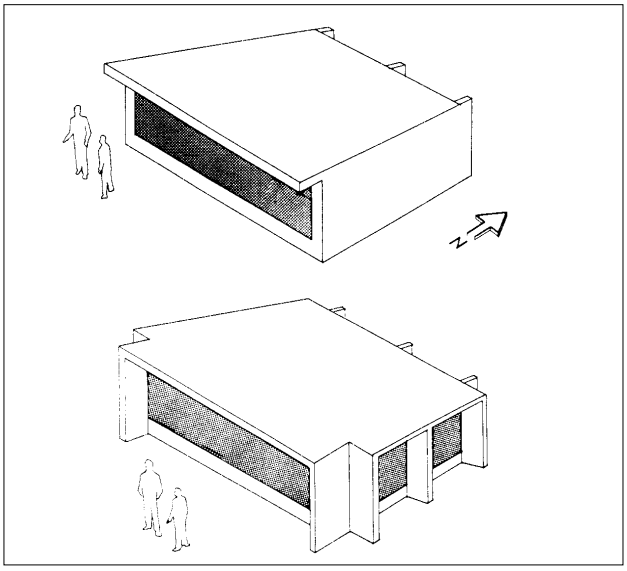
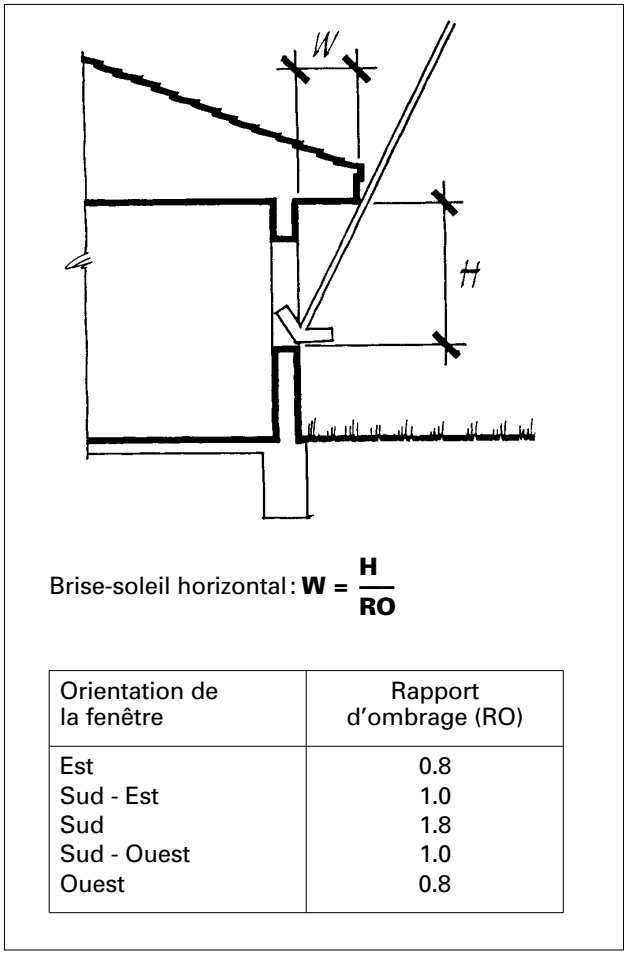


Figure 5.5.12: Chaque orientation requiert une protection adaptée [12].



Orientation de la fenêtre	Rapport d'ombrage (RO)
Est	0.8
Sud - Est	1.0
Sud	1.8
Sud - Ouest	1.0
Ouest	0.8

Figure 5.5.13: Dimensionnement d'un brise-soleil horizontal standard (W) en fonction de la hauteur de fenêtre à protéger (H) et de l'orientation de la façade au moyen du rapport d'ombrage (RO) [1].

Brise-soleil vertical

Sur les façades est, ouest et nord seules des lames verticales offrent une protection efficace contre la pénétration du soleil.

On dimensionne ces lames en fixant un angle limite de pénétration. Cet angle est pour notre latitude de 7° (D). Cette protection n'est pas totale mais elle évite toute pénétration du soleil entre 7 et 17 heures (heure solaire) (voir figures 5.5.15 à 5.5.18).

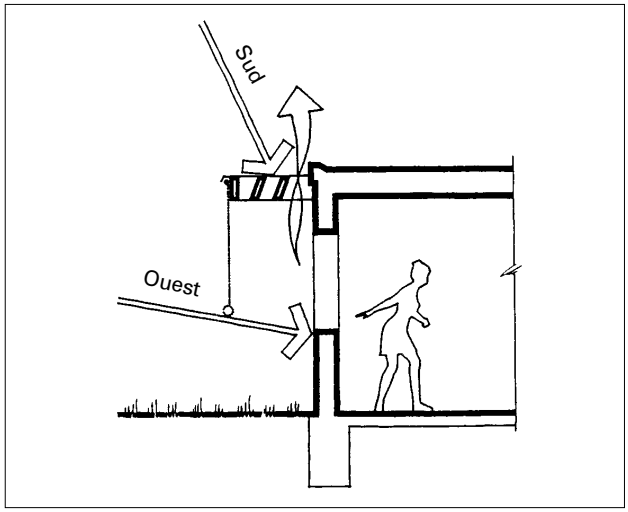


Figure 5.5.15: Un brise-soleil horizontal ajouré permet une meilleure ventilation naturelle. Dans les orientations est et ouest il peut être complété par une toile verticale [1].

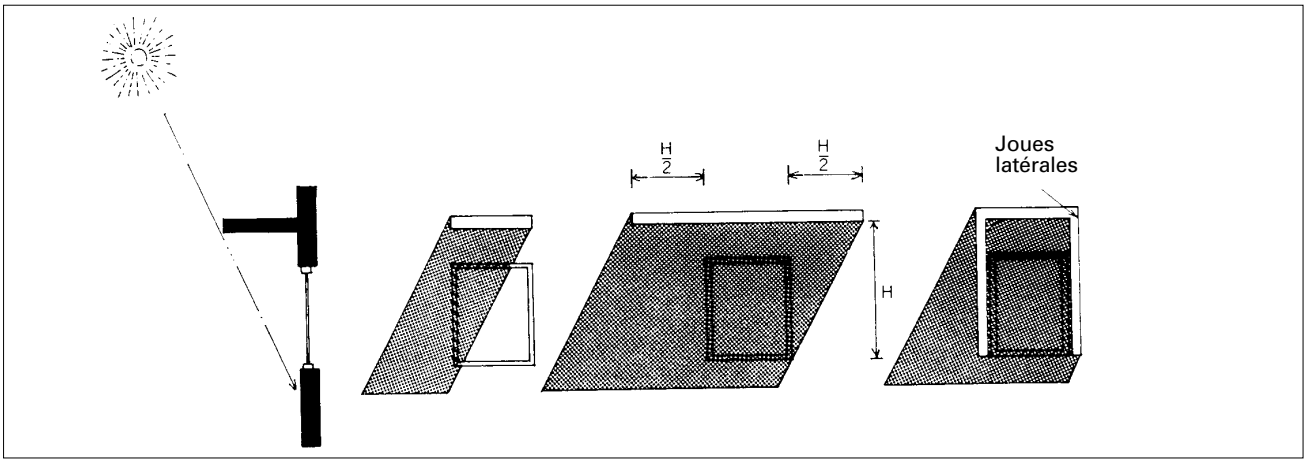


Figure 5.5.14: Un brise-soleil horizontal doit déborder de part et d'autre de la fenêtre pour être efficace ou être complété par des joues latérales [12].

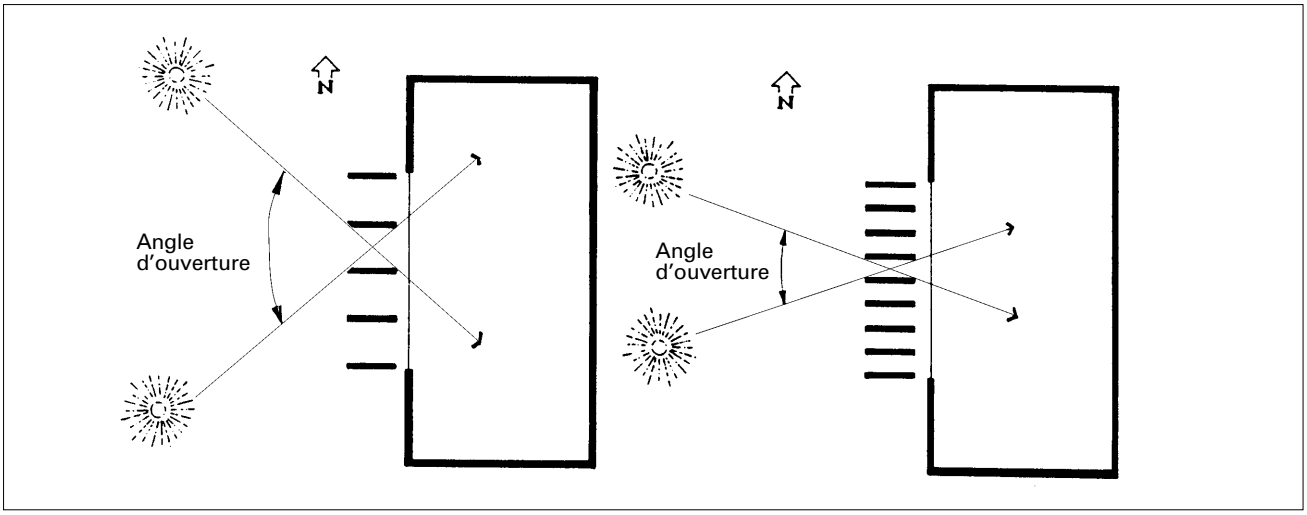


Figure 5.5.16: Une résille de lames verticales sur une façade Ouest (ou Est) réduit la pénétration du soleil. En jouant sur la profondeur ou l'espacement des lames on modifie l'angle d'ouverture [12].

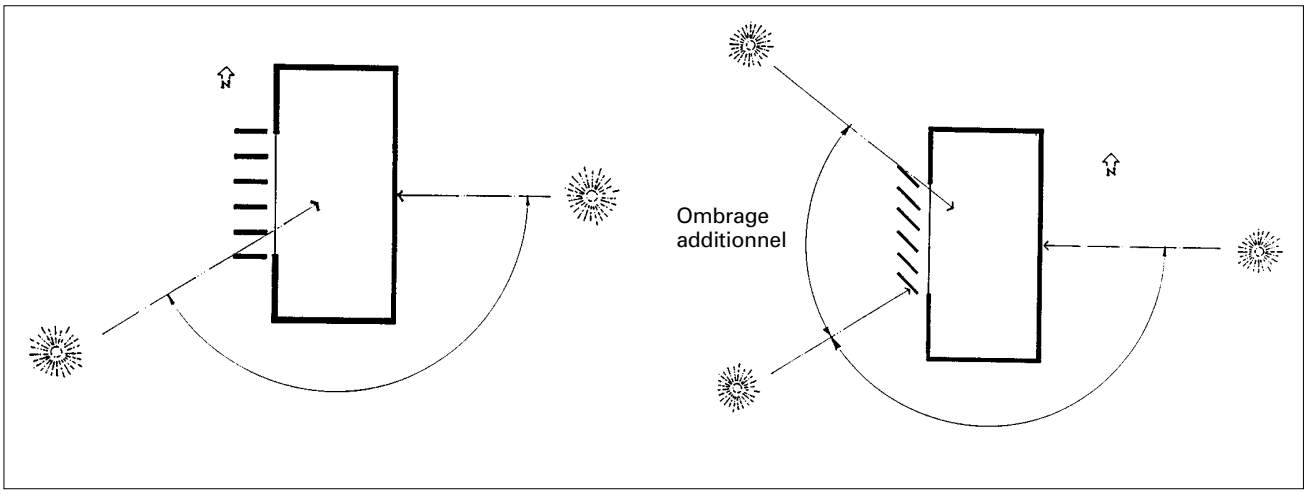


Figure 5.5.17: Des lames verticales mobiles restent perpendiculaires à la façade jusqu'à ce que le soleil pénètre. Ensuite leur rotation permet de bloquer toute pénétration de soleil [12].

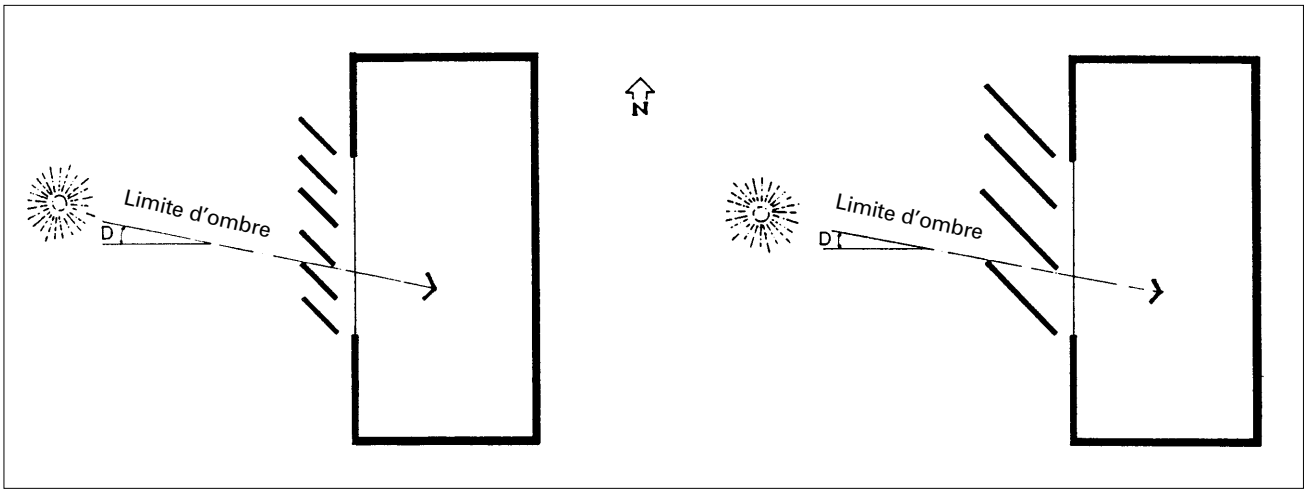
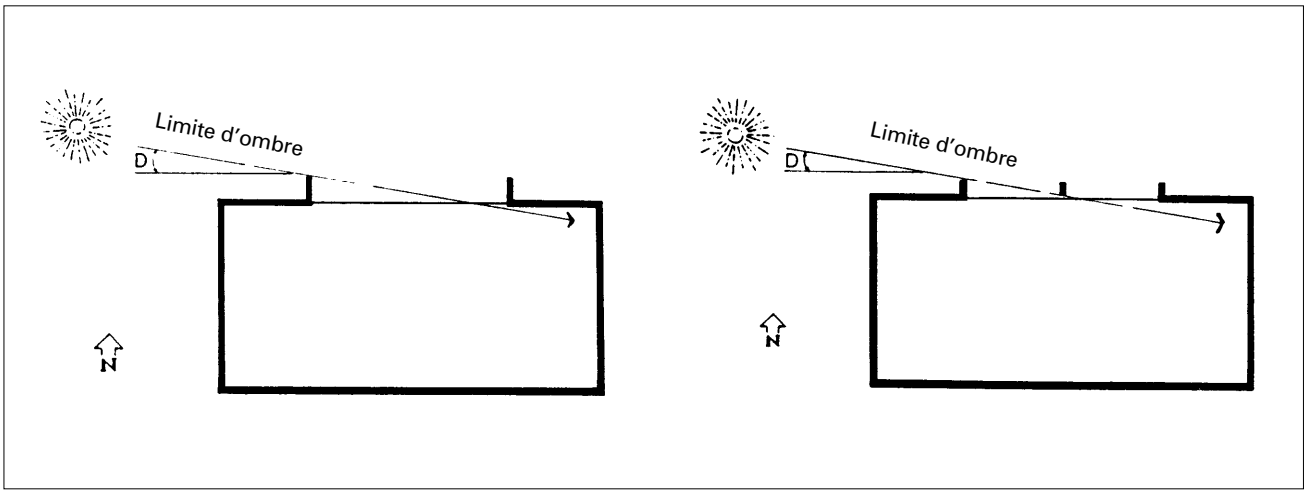


Figure 5.5.18: La « Limite d'ombre » d'angle D détermine la combinaison adéquate d'espacement des lames, de leur profondeur et de leur inclinaison pour des ouvertures Est et Ouest [12].



5.5.19: La « Limite d'ombre » d'angle D détermine les saillies nécessaires sur la façade nord [12].

Brise-soleil complexes

N'importe quelle combinaison de brise-soleil peut être calculée ou testée. Pour ce type de calcul il faut se reporter au chapitre 2 et aux annexes A2:

- tracé d'ombre: calcul;
- essais sur maquettes;
- utilisation de programme de DAO-CAO pour évaluer l'impact du soleil sur un bâtiment.

Verres antisolaires

Ce ne sont pas à proprement parler des protections solaires fixes car il n'est pas possible de sélectionner un type de verre selon l'orientation de la façade, de la saison ou de la course du soleil. Si c'est une protection, elle est climatiquement non équilibrée.

La majorité de ces verres a une transmission non régulière du spectre solaire et transmettent donc la lumière en la colorant. Il n'est pas possible de trouver un verre antisolaire efficace qui présente une transmission neutre (pas de dominante de couleur). Ils ont tous tendance à privilégier les couleurs bleu-vert.

Un verre antisolaire a un comportement unique car il atténue le rayonnement solaire de la même façon en été qu'en hiver, au sud qu'au nord ou à l'ouest. Il s'apparente donc plus à une protection solaire mobile qui aurait perdu sa mobilité. Le verre antisolaire sera traité sous le même point que les protections solaires mobiles.

Protections solaires mobiles

Ce type de protections offre toute la souplesse désirée. Selon le type de protection (toile, lames), sa couleur (claire, sombre) et sa position (à l'extérieur, à l'intérieur par rapport au vitrage), son efficacité varie beaucoup. Le tableau 5.5.20 présente un certain nombre de ces valeurs.

Quelques règles de base peuvent aider au choix:

- Plus une protection intérieure par rapport au vitrage est claire plus elle est efficace.
- Plus une protection extérieure par rapport au vitrage est sombre plus elle est efficace.
- Une même protection placée à l'extérieur par rapport au vitrage plutôt qu'à l'intérieur double presque son efficacité.
- Une protection sombre ou moyenne placée à l'intérieur par rapport au vitrage n'est efficace que dans un espace de grande hauteur (serre, atrium) très bien ventilé.

Les fournisseurs de protections solaires donnent certaines valeurs qu'il faut connaître pour juger de leur efficacité:

- La **transmission lumineuse** (TL ou T65 ou τ): c'est la lumière visible que laisse passer la protection. Cette valeur ne permet pas de juger de l'efficacité d'une protection, seule la partie visible du rayonnement solaire étant pris en compte dans cette valeur (voir chapitre 5.8 Eclairage naturel).
- Le **coefficient g**: c'est le coefficient de transmission globale énergétique totale d'une protection. Cette valeur permet de comparer des protections entre elles car le coefficient g englobe toute la transmission de chaleur (directe et indirecte).
- Le **coefficient d'ombrage (SC = Shading Coefficient)**: c'est la transmission globale d'énergie du système rapportée à celle d'un simple vitrage. Pour un simple vitrage SC = 1. On admet que g = SC x 0.85.

On utilise aussi ces caractéristiques pour juger du choix et de l'efficacité d'un verre antisolaire.

Combinaison de protections solaires

La combinaison de plusieurs protections solaires sur une même ouverture doit être évaluée avec soin.

Dans la majorité des cas l'effet de deux protections sera cumulé (le coefficient d'ombrage ou coefficient g résultant sera le produit des coefficients des deux protections). Par exemple: une faible avancée horizontale au Sud (g = ~0.5) et une toile intérieure claire (g = 0.4) présenteront un g ≈ 0.20.

Lors d'utilisation de verres ou de protections utilisant des propriétés de matériaux à faible émissivité dans l'infrarouge l'effet protecteur d'un élément supplémentaire au premier peut être imperceptible. Il faut donc être prudent lorsque l'on utilise des verres traités (antisolaires ou IR) combinés à des protections intérieures ou extérieures. Dans chaque cas on demandera au fournisseur une garantie de protection (facteur g ou SC) de la combinaison. Par exemple (figure 5.5.20): un verre antisolaire argent (g = 0.40) combiné à des lames verticales intérieures claires (g = 0.51 avec un simple verre soit g = 0.60 sans verre) devrait donner un g de 0.20 si l'effet des deux protections était additionné, alors que le g global n'est que de 0.33 pour cette combinaison (protection 40% moins efficace que l'addition!).

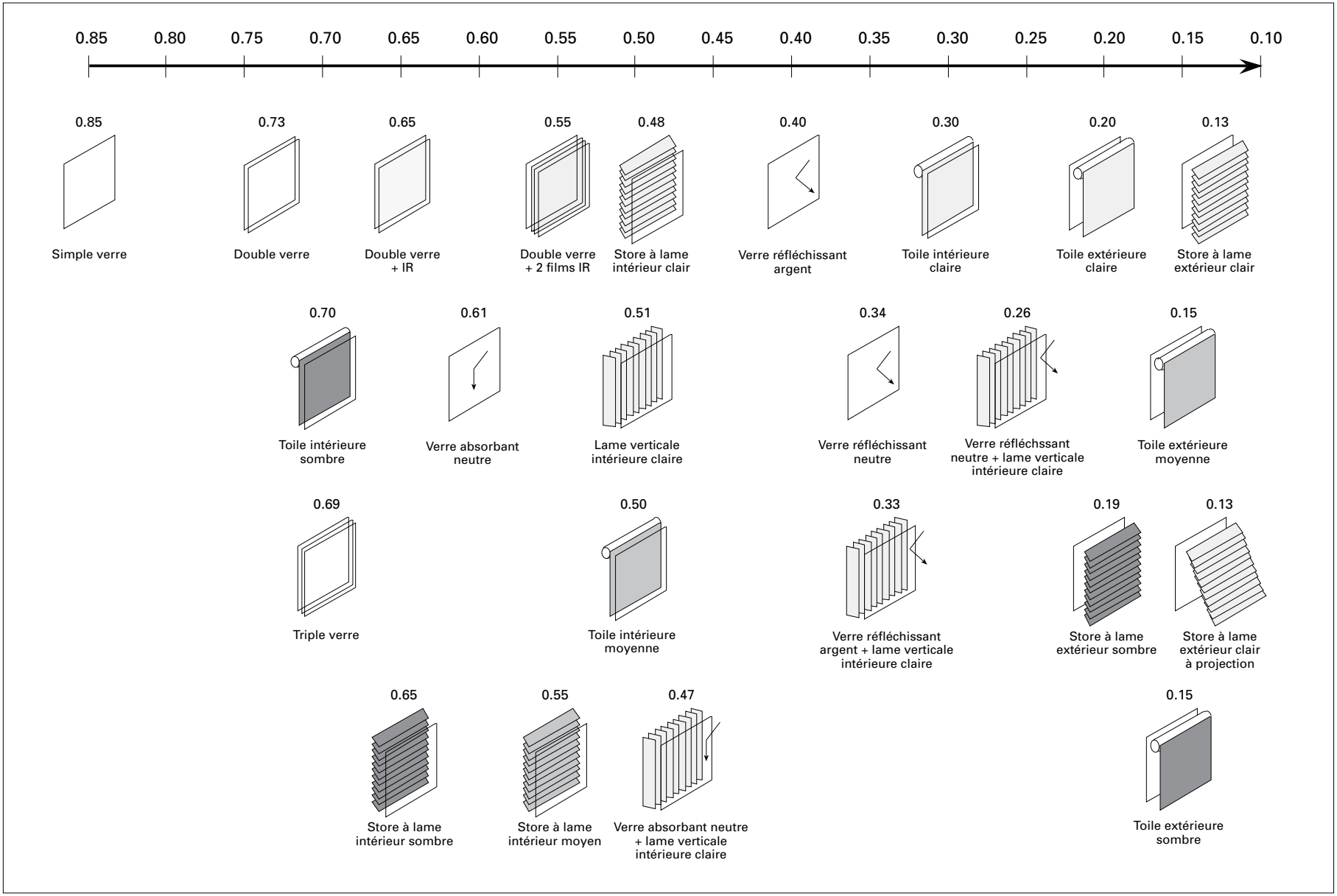


Figure 5.5.20: Protections solaires mobiles et vitrages classés selon leur performance: des moins bonnes aux meilleures. Les chiffres sur le diagramme représentent le coefficient g, transmission globale énergétique [adapté de 22].

5.6 Ventilation naturelle

Base

La ventilation naturelle remplit plusieurs fonctions:

- **Renouveler l'air des locaux** pour amener de l'air frais nécessaire à la respiration des occupants ou à l'évacuation des polluants internes: cette fonction est nécessaire aussi bien en hiver qu'en été.
- **Evacuer la chaleur**: les gains internes et solaires provoquent une élévation de la température interne. En été, cet excès doit être évacué.
- Améliorer l'échange de chaleur entre les personnes et l'air en augmentant la vitesse de l'air et donc l'**évaporation cutanée**.
- Evacuer, durant la nuit, la chaleur accumulée, durant le jour, dans la masse interne: la **ventilation nocturne** sera traitée au chapitre suivant (voir 5.7, Déphasage des gains et ventilation nocturne).

On distingue deux types de ventilation naturelle: celle due à la **pression du vent** et celle due à la différence de densité (température) entre l'air chaud et l'air froid (**effet de cheminée**).

L'**effet de cheminée** est dû à la différence de pression engendrée par la différence de densité entre l'air chaud et l'air froid: si l'air chauffe, une dépression se créera dans les zones basses d'un espace et une surpression dans les zones hautes. Si des ouvrants sont placés dans ces deux zones, les ouvrants bas aspireront de l'air extérieur plus frais et les ouvrants hauts expulseront vers l'extérieur de l'air intérieur plus chaud.

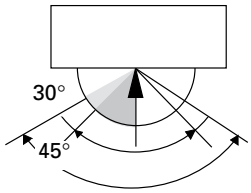
Voir aussi

- Chapitre 2 Analyse du site
- Chapitre 5.7 Déphasage des gains et ventilation nocturne
- Annexe A5.6 Ventilation et vent: méthode
- Annexe A5.4 Effet de cheminée

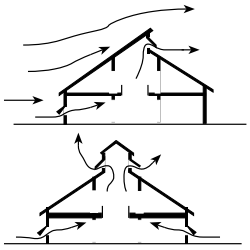
Règles

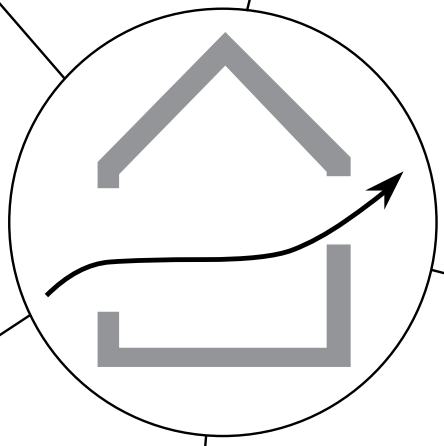
- On tentera toujours d'utiliser la **pression du vent** pour ventiler. Par rapport à l'effet de cheminée, l'utilisation du vent rend la ventilation naturelle plus efficace et permet de minimiser les ouvrants. Dans certains cas, on dimensionnera les ouvertures sans tenir compte du vent, les périodes de calme en été étant souvent importantes (voir 2, Analyse du site).
- Une **ventilation transversale** (vent) est **deux fois plus efficace** qu'une ventilation avec des ouvertures sur une seule face. Les ouvertures devraient donc se trouver sur des faces opposées ou adjacentes.
- L'**orientation de la façade** au vent ne devrait pas s'écarter du lit du vent de plus de 45°. La pression du vent reste néanmoins sensible jusqu'à un angle de 30° [11, 12, 14].
- En l'absence de données plus précises, les ouvertures nécessaires à une bonne ventilation estivale (évacuation de la chaleur) devraient représenter de **5 à 10% de la surface de plancher d'un local** [14].
- Dans une ventilation par effet de cheminée, l'efficacité est directement proportionnelle à la surface des ouvrants et à la racine carrée de la différence de hauteur (un doublement de la hauteur n'améliore l'efficacité que de 40%).
- Une **serre ou une double peau** devrait avoir 10% de sa surface frontale de verre ouvrante, répartie pour moitié au point bas et au point haut. Si la protection solaire est intérieure cette proportion devrait être de 20% [4, 5, 7].
- Une **ventilation** dite de **confort** (augmentation de l'évaporation cutanée) pour les périodes chaudes et humides nécessite des ouvertures dont la surface représente de 10 à 20% de la surface de plancher des locaux [12].
- Dans une **ventilation transversale**, les grands locaux devraient se situer de préférence au vent.
- Tous les ouvrants devraient être divisés en plusieurs éléments pour permettre un dosage de la ventilation en mi-saison et en hiver.
- Les **protections solaires** ne doivent pas obstruer le passage de l'air par les ouvertures.
- Pour qu'une ventilation soit efficace, l'air doit pouvoir **circuler à l'intérieur du bâtiment** (plan libre, cloisonnement adapté au mouvement de l'air) [12].

Orientation
Le vent reste efficace jusqu'à un angle de 30° entre la façade et sa direction.
Page 111

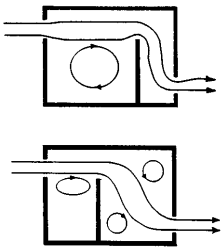


Dimensionnement des ouvrants
– Vent
– Effet de cheminée
Pages 108 et 109

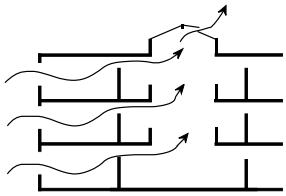




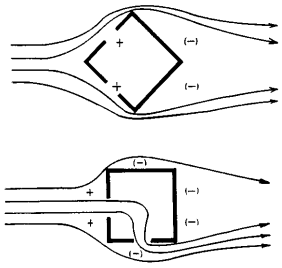
Balayage
Page 113

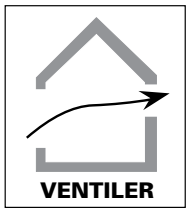


Ouvrants multiples
Effet de cheminée
Page 115



Position
Différence de pression entre ouvrants
Page 113





Dimensionnement

La figure 5.6.3 donne l'ordre de grandeur des ouvrants en fonction de la chaleur à évacuer et de la vitesse du vent ou de la hauteur entre ouvrants.

Par exemple:

- On a un vent moyen de 2.8 m/s, une ventilation transversale, un bâtiment de type administratif d'une surface de plancher de 600 m^2 avec peu de dégagements de chaleur interne (activité de bureau normale). Il faut une surface totale d'ouvrant représentant 8% de la surface de plancher des bureaux, soit 48 m^2, pour évacuer la chaleur dégagée. On disposera 24 m^2 sur la face au vent et 24 m^2 sur la face sous le vent. Si l'on admet que la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur peut monter à 4°C, cette surface totale se réduira à 18 m^2 (48 m^2 x 1.5°/4° = 18 m^2). Par contre si le vent fait un angle de 30° avec la façade, la surface totale d'ouvrants nécessaire deviendra 62 m^2 (48 m^2 x 1.3 = 62 m^2).
- On a une différence de hauteur de 5 m, une ventilation par effet de cheminée, un bâtiment de type logement d'une surface de plancher de 300 m^2. Il faut une surface totale d'ouvrant représentant 14% de la surface de plancher du logement, soit 42 m^2, pour évacuer la chaleur dégagée. On disposera 21 m^2 au point bas et 21 m^2 au point haut. Si l'on admet que la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur peut monter à 5°C, cette surface totale se réduira à 7 m^2 (42 m^2 x $(1.5°/5°)^{3/2}$ = 7 m^2).

Type d'ouvrant

Toutes les valeurs sont données pour des ouvrants à la française ou en imposte dont l'angle d'ouverture est de 45° au moins. Disposer des impostes de moins de 30° d'angle d'ouverture oblige de doubler la surface d'ouvrants. Des considérations de protection contre les intempéries peuvent obliger à limiter les angles d'ouverture. Des ouvertures vers le bas permettent souvent de conserver un bon angle d'ouverture tout en offrant une meilleure protection

Pour les sorties d'air, des dispositifs particuliers permettent d'augmenter l'effet de succion du vent (voir figure 5.6.2). La surface de sortie d'air peut d'autant être diminuée.

La figure 5.6.4 évoque le problème de la compatibilité entre ouverture des fenêtres pour la ventilation et protection solaire.

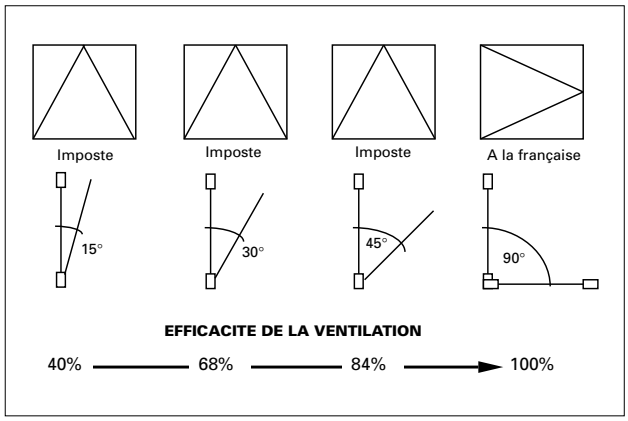


Figure 5.6.1: Type d'ouvrants et efficacité pour la ventilation. Tous les ouvrants ont la même surface.

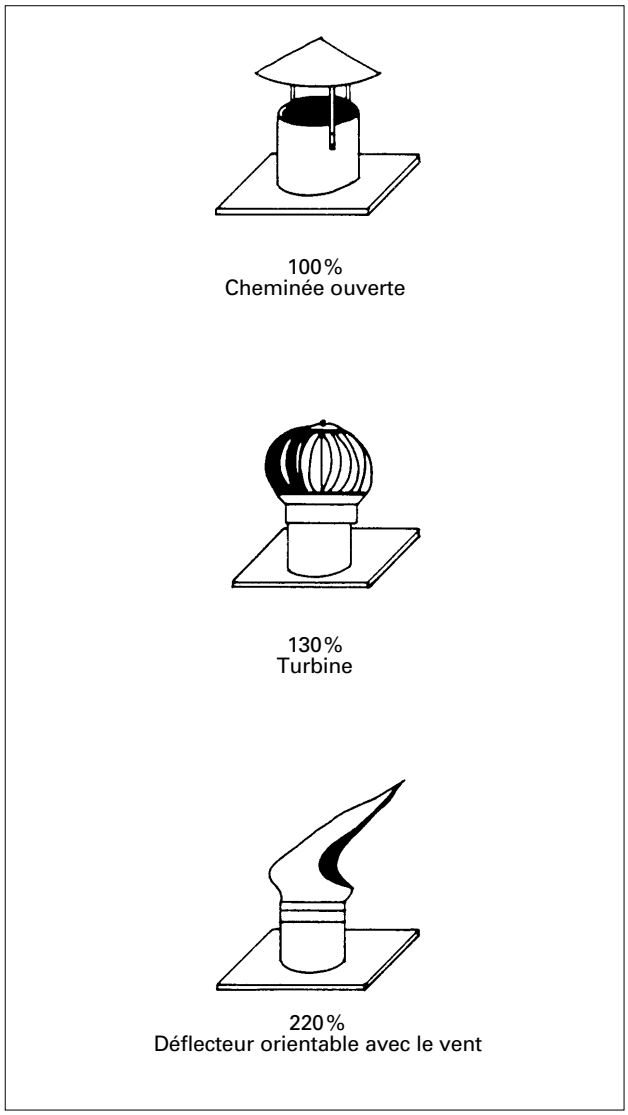


Figure 5.6.2: Une cape de sortie de l'air, selon sa géométrie, peut doubler la performance d'une cheminée d'évacuation d'air si on utilise le vent (pas d'amélioration si la ventilation est par effet de cheminée) [12].

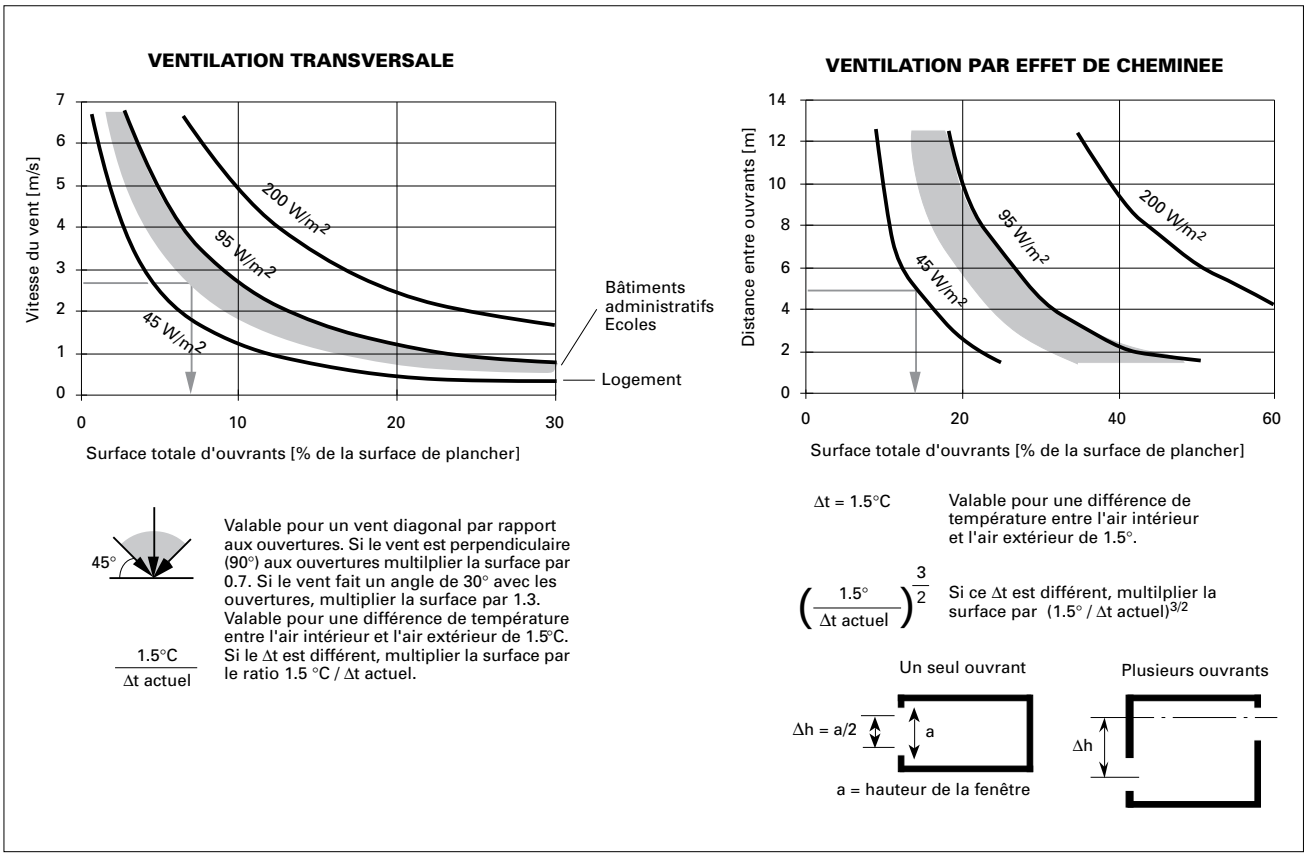


Figure 5.6.3: Surface d'ouvrant nécessaire à la ventilation naturelle en fonction du vent ou de la hauteur de la «cheminée» [11, 14].
Le vent est donné par l'analyse du site. En l'absence de valeur prendre 0.5 ÷ 1 m/s.
Les courbes correspondent chacune à une certaine quantité de chaleur à évacuer (gains internes + gains solaires en W/m² de plancher). La courbe inférieure correspond à un bâtiment vitré normalement (15 ÷ 20% de la surface de plancher), la courbe supérieure à un bâtiment très ouvert sur le soleil (≥ 30% de surface vitrée).
La surface des ouvrants est considérée comme équivalente à l'entrée et à la sortie et le passage de l'air peut se faire librement des entrées aux sorties (pas d'étranglements). Le diagramme donne la surface totale (somme des entrées et des sorties). La différence de hauteur entre les ouvrants d'entrée et de sortie d'air se mesure à l'axe des ouvertures.

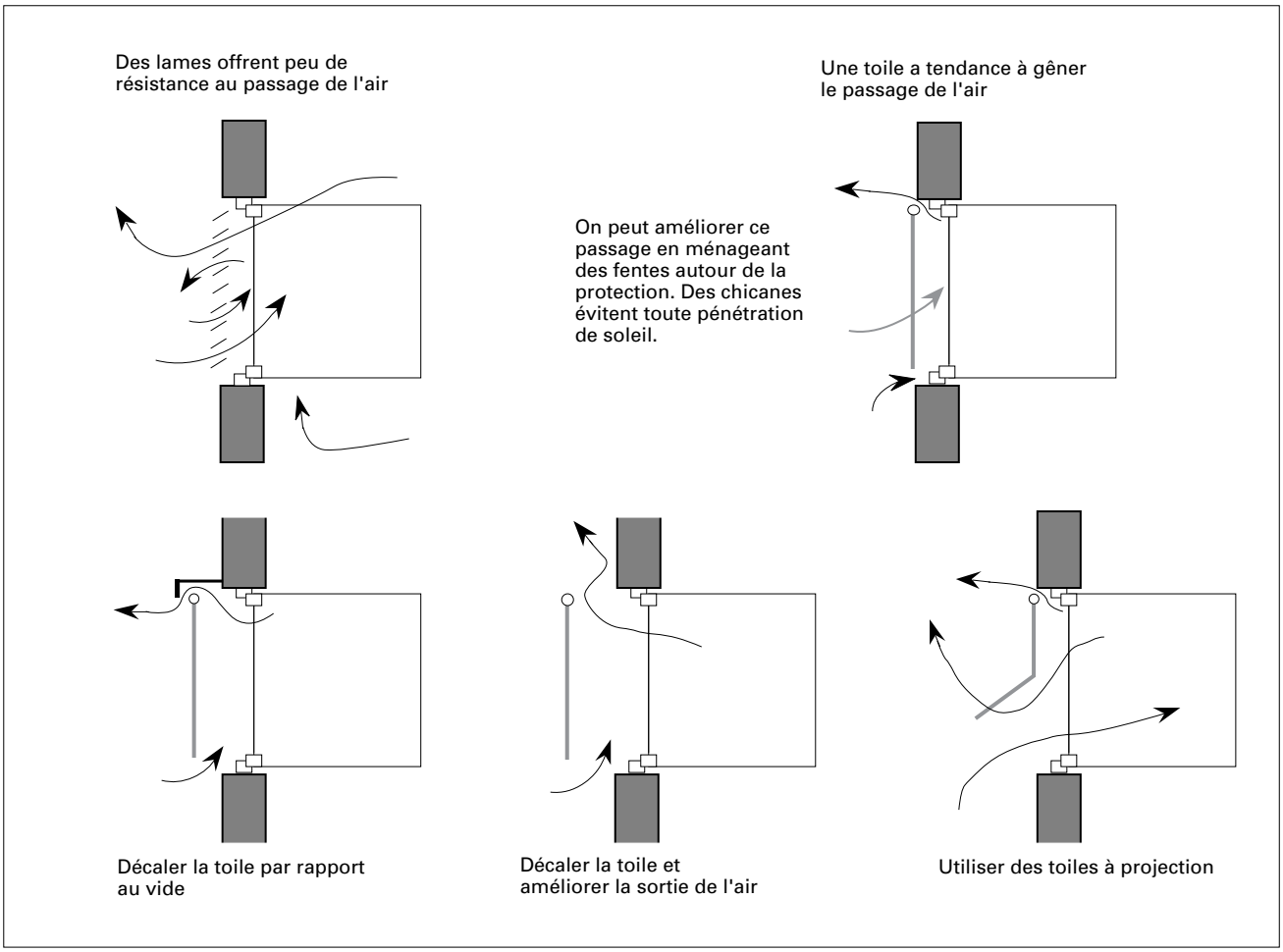


Figure 5.6.4: Ventilation naturelle et protection solaire. Si une fenêtre est utilisée pour ventiler, sa protection solaire ne devrait pas gêner le passage de l'air.

Principe

Les mouvements d'air sont dus à des différences de température ou à des différences de pression.

La ventilation due à la différence de température (effet de cheminée) a été traité au chapitre 5.3 Distribuer la chaleur, sous le point dimensionnement aux pages précédentes, plus particulièrement dans les figures 5.6.1 et 3 et en annexe A5.4 Effet de cheminée. Ce type de ventilation sera abordé en fin de ce chapitre (figure 5.6.18).

En annexe A5.6 est esquissée une méthode pour « maîtriser » les flux d'air dans un bâtiment. Ce chapitre se limitera à donner les quelques solutions standards pour améliorer la ventilation naturelle par effet du vent.

Le principe de base est illustré sur la figure 5.6.5.

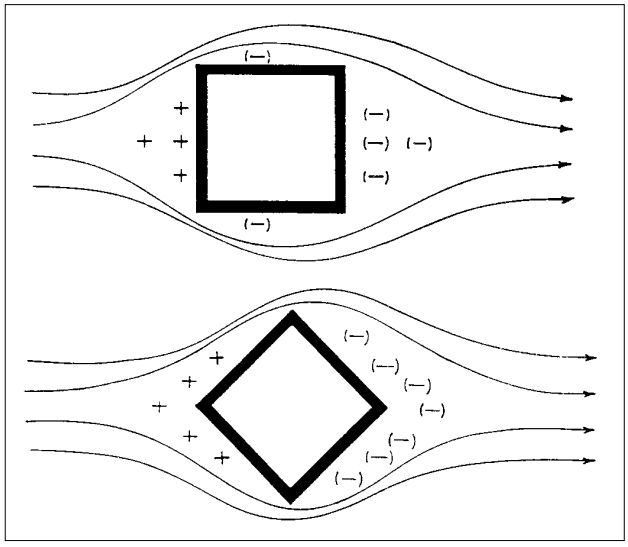


Figure 5.6.5: Le passage de l'air autour d'un bâtiment cause des zones à pression positive au vent et négative sous le vent [1, 12, 14].

Situation

Par l'implantation dans le site on peut améliorer la canalisation du vent sur la façade du bâtiment (figure 5.6.6).

L'orientation de la façade au vent joue aussi un rôle fondamental. Pour donner la liberté à l'orientation par rapport au soleil, des déflecteurs sous forme de murs ou de plantations peuvent corriger la direction du vent. Cette orientation par rapport au vent devrait être de 45° maximum (figure 5.6.7 et 5.6.8).

Un ombrage du sol autour du bâtiment peut aussi refroidir la brise estivale avant qu'elle ne participe à la ventilation (figure 5.6.9).

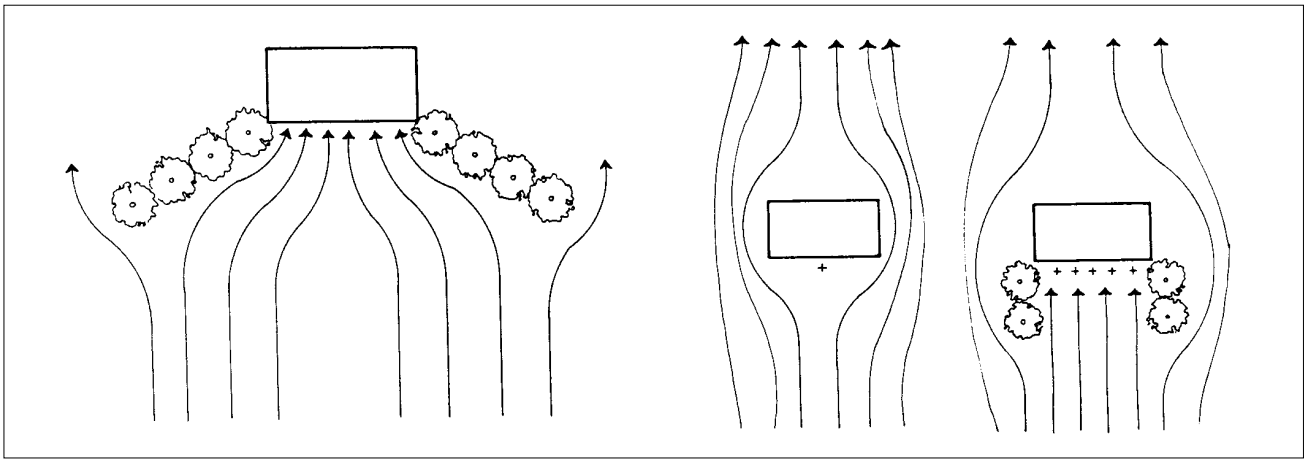


Figure 5.6.6: Des arbres et des buissons peuvent canaliser les brises vers le bâtiment. En empêchant le vent de contourner le bâtiment par ses côtés, quelques buissons ou arbres peuvent significativement améliorer la ventilation naturelle [12].

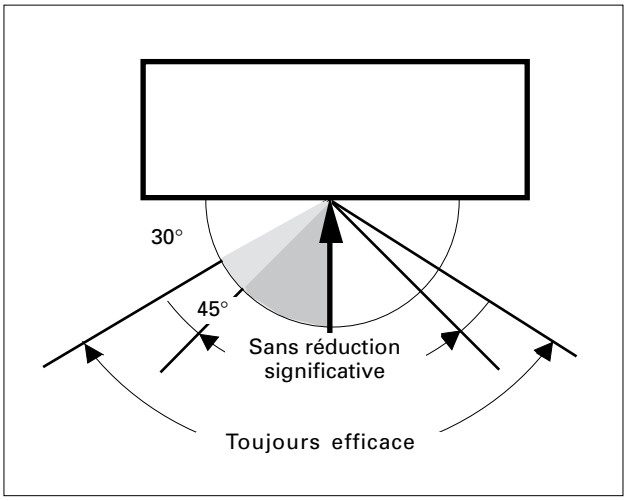


Figure 5.6.7: Orientation des façades par rapport au vent [1, 12, 14, 22].

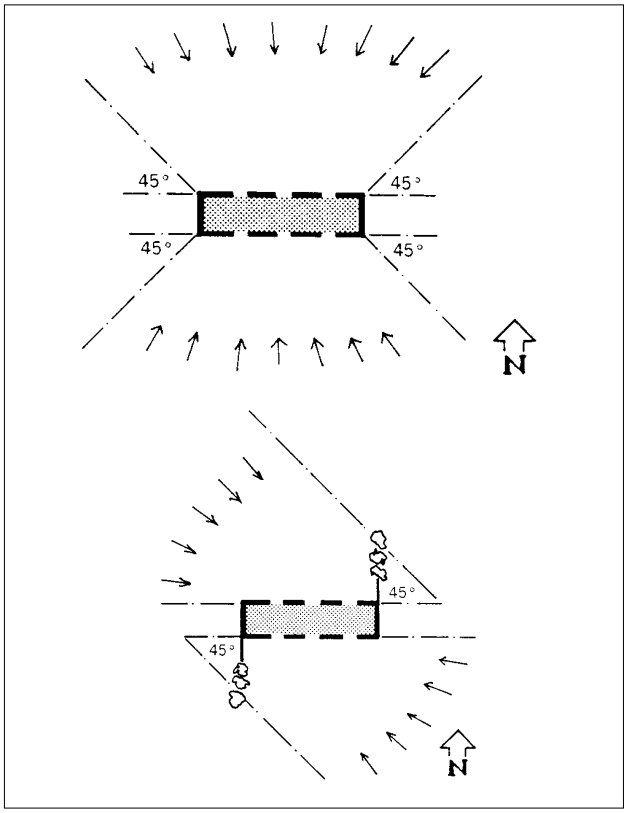


Figure 5.6.8: Des déflecteurs, sous forme de murs ou de haies, peuvent être utilisés pour changer la direction du vent de telle sorte que l'orientation optimale donnée par le soleil puisse être conservée [1, 12, 14, 22].

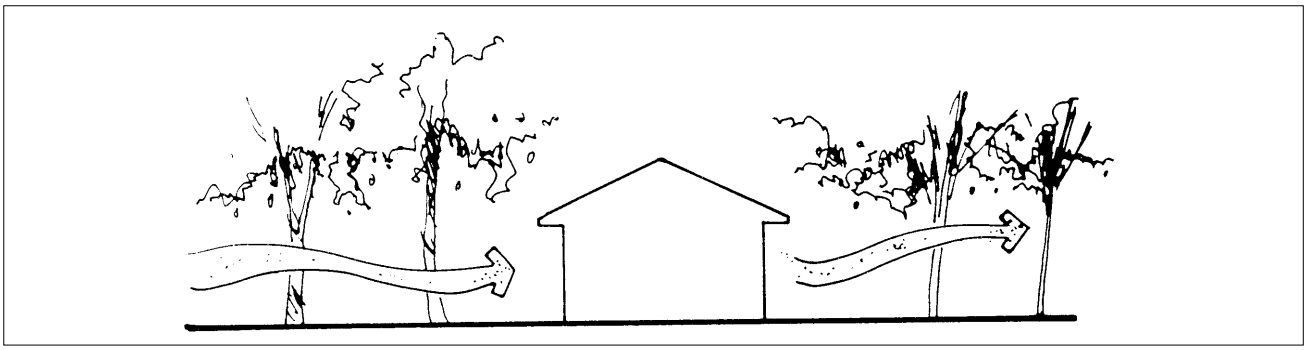


Figure 5.6.9: Un sol végétal, libre d'obstacle et ombré par des arbres, permet aux brises estivales de se refroidir avant de pénétrer le bâtiment [12].

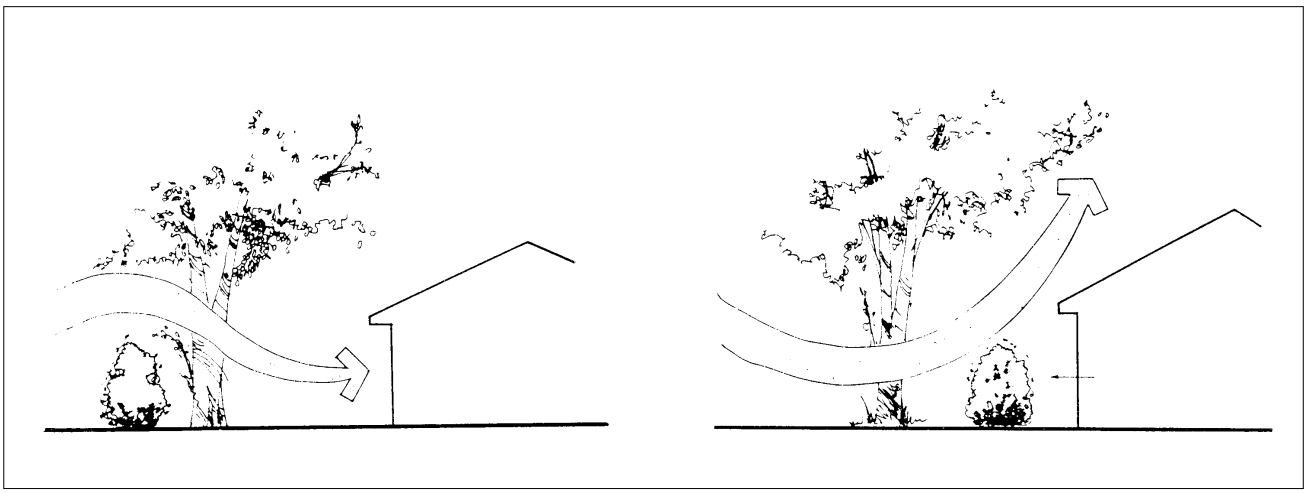


Figure 5.6.10: Pour maximiser la ventilation estivale il faut placer les buissons à une certaine distance du bâtiment et les arbres plus près. Une disposition inversée permet, en hiver, de protéger le bâtiment d'un vent excessif [12].

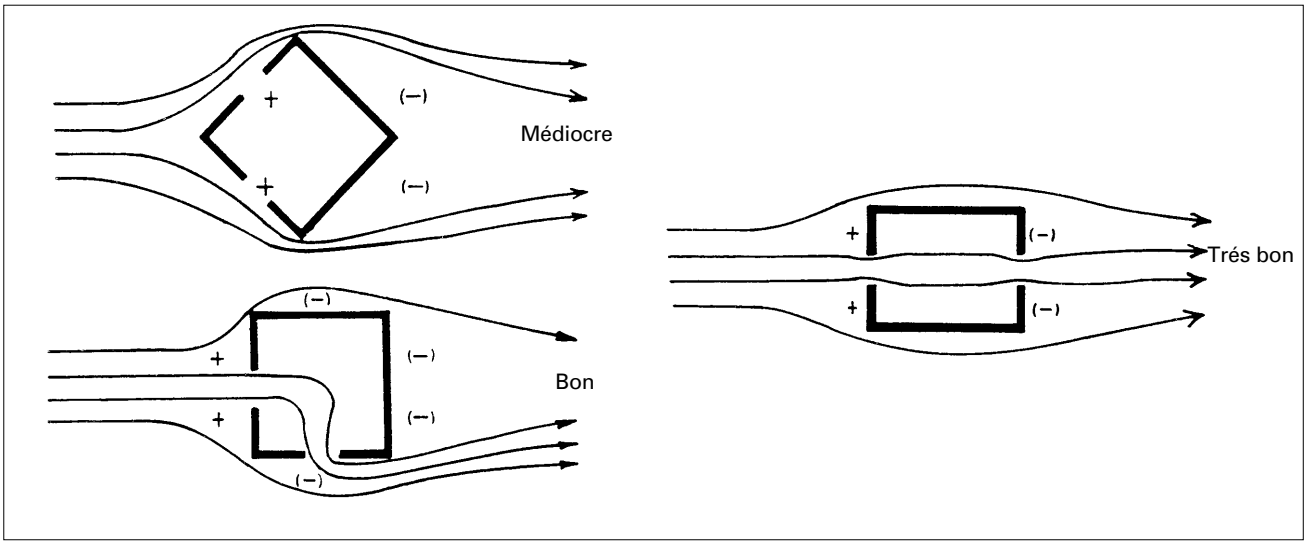


Figure 5.6.11: Une ventilation transversale entre des ouvertures situées sur des murs opposés est la meilleure solution. Une ventilation entre des ouvertures, situées sur des murs adjacents peut être efficace ou insignifiante selon la direction du vent [12]

Position des ouvrants

Les figures 5.6.11 à 13 présentent les principes de base du positionnement des ouvertures dans les façades et leur influence sur la ventilation naturelle.

Balayage

Les quelques principes évoqués dans les règles sont illustrés sur les figures 5.6.14 à 17.

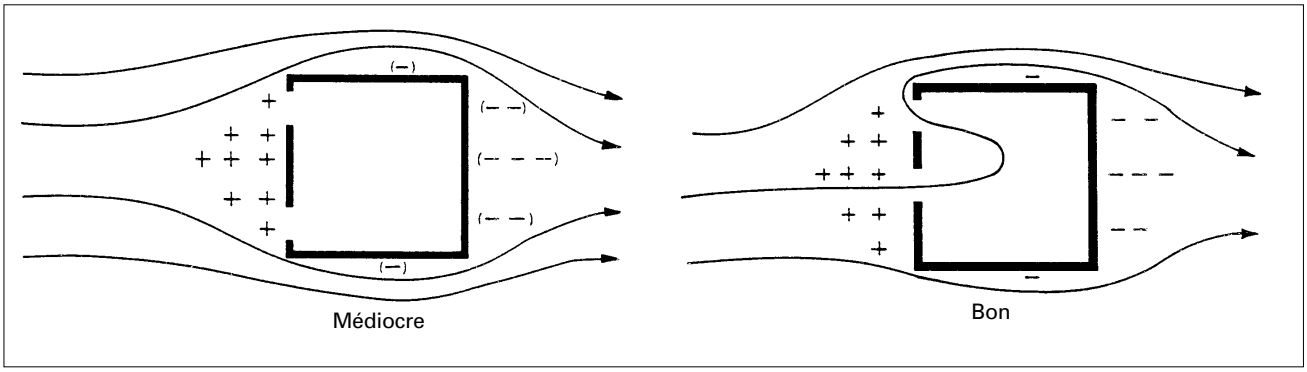


Figure 5.6.12: Une ventilation est possible avec des ouvertures sur une même face si elles sont placées de manière asymétrique, la pression au centre de la face étant plus élevée qu'au bord [12].

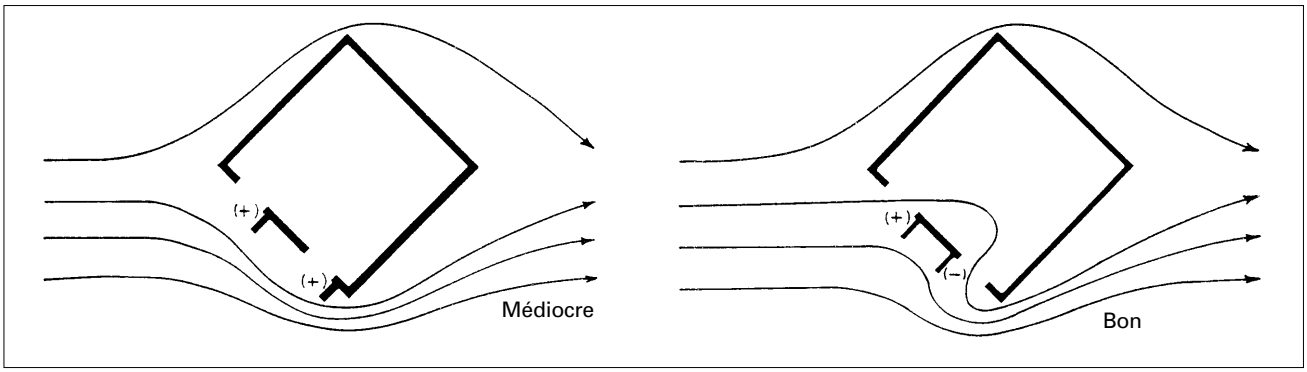


Figure 5.6.13: Des déflecteurs verticaux peuvent augmenter significativement la ventilation par des ouvertures placées sur une même face en créant des pointes positives ou négatives selon leur emplacement [1, 12, 14, 22].

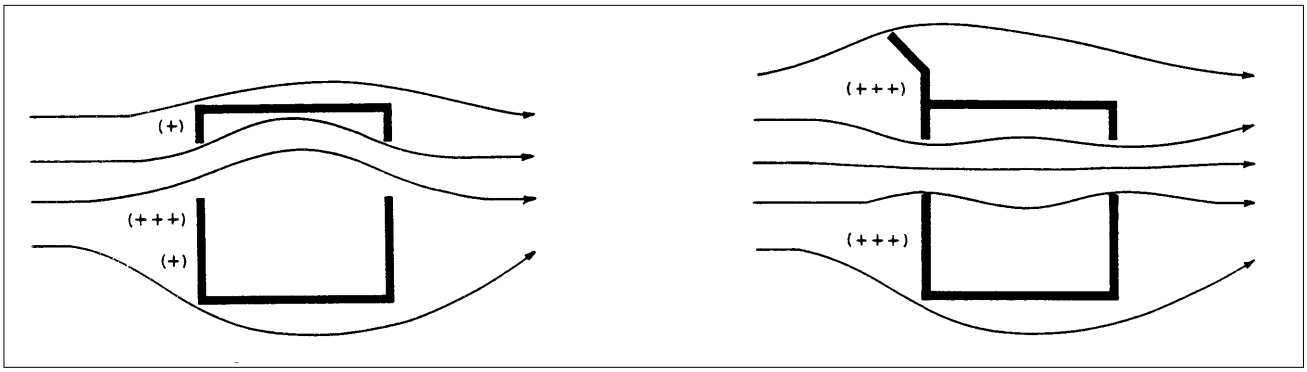


Figure 5.6.14: La pression positive plus importante à une extrémité de l'ouverture dirige l'air dans la mauvaise direction. Un déflecteur peut recentrer le flux d'air [1, 12, 14, 22].

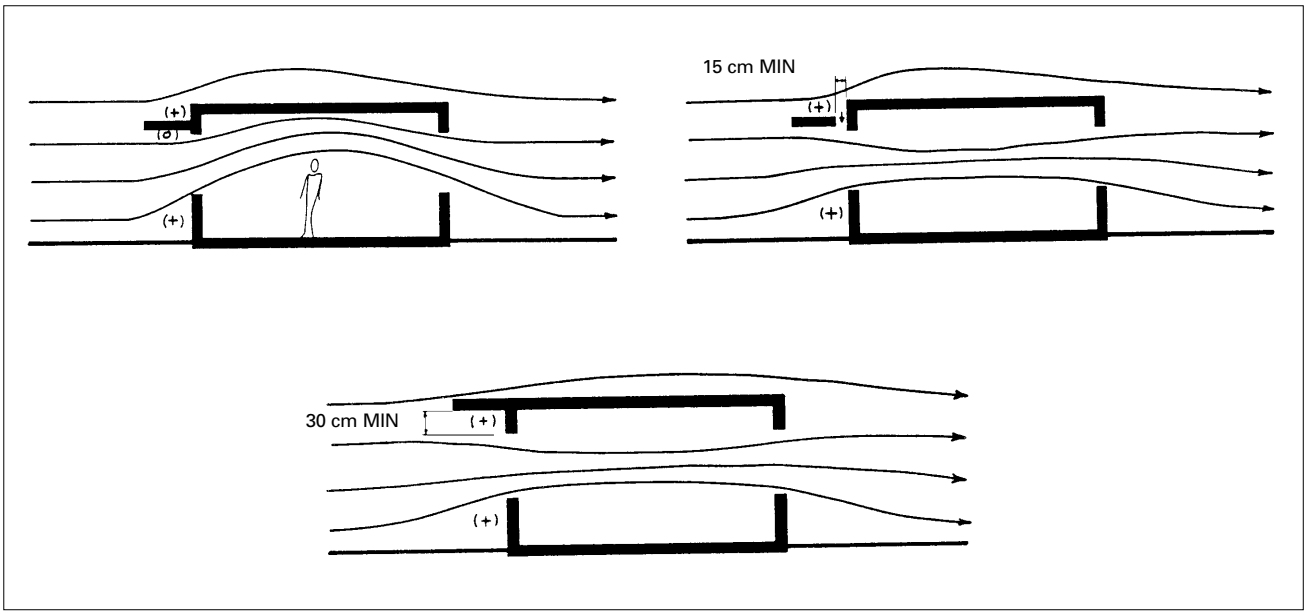


Figure 5.6.15: Avancée horizontale. Un déflecteur horizontal plein détourne les flux d'air vers le haut. Une fente ou un décalage rectifient le flux qui reste horizontal [1, 12, 14, 22].

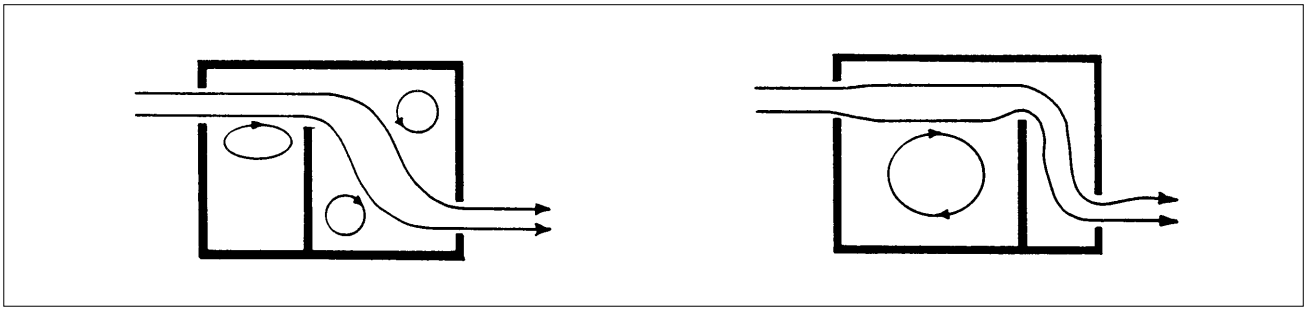


Figure 5.6.16: Un plan «libre» est préférable car les partitions internes augmentent la résistance au passage de l'air. Cependant la diminution de la ventilation et la distribution du flux d'air dépend de la position des partitions. La meilleure ventilation intervient lorsque le local le plus vaste est situé au vent [1, 12, 14, 22, 23].

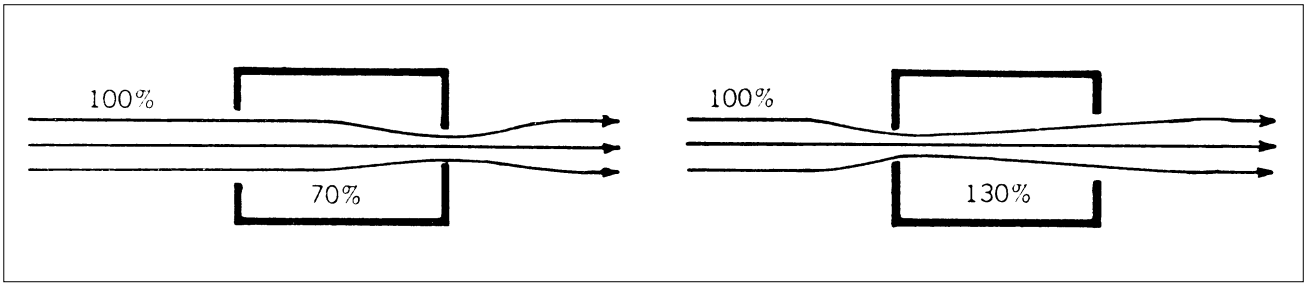


Figure 5.6.17: Les ouvrants d'entrée et de sortie devraient avoir la même taille pour le maximum d'efficacité. S'il n'est pas possible de leur donner la même taille, c'est les ouvertures d'entrée de l'air qui devraient être les plus petites pour maximiser la vitesse de l'air et le confort en été (les% se réfèrent à la vitesse et non au débit) [12, 22].

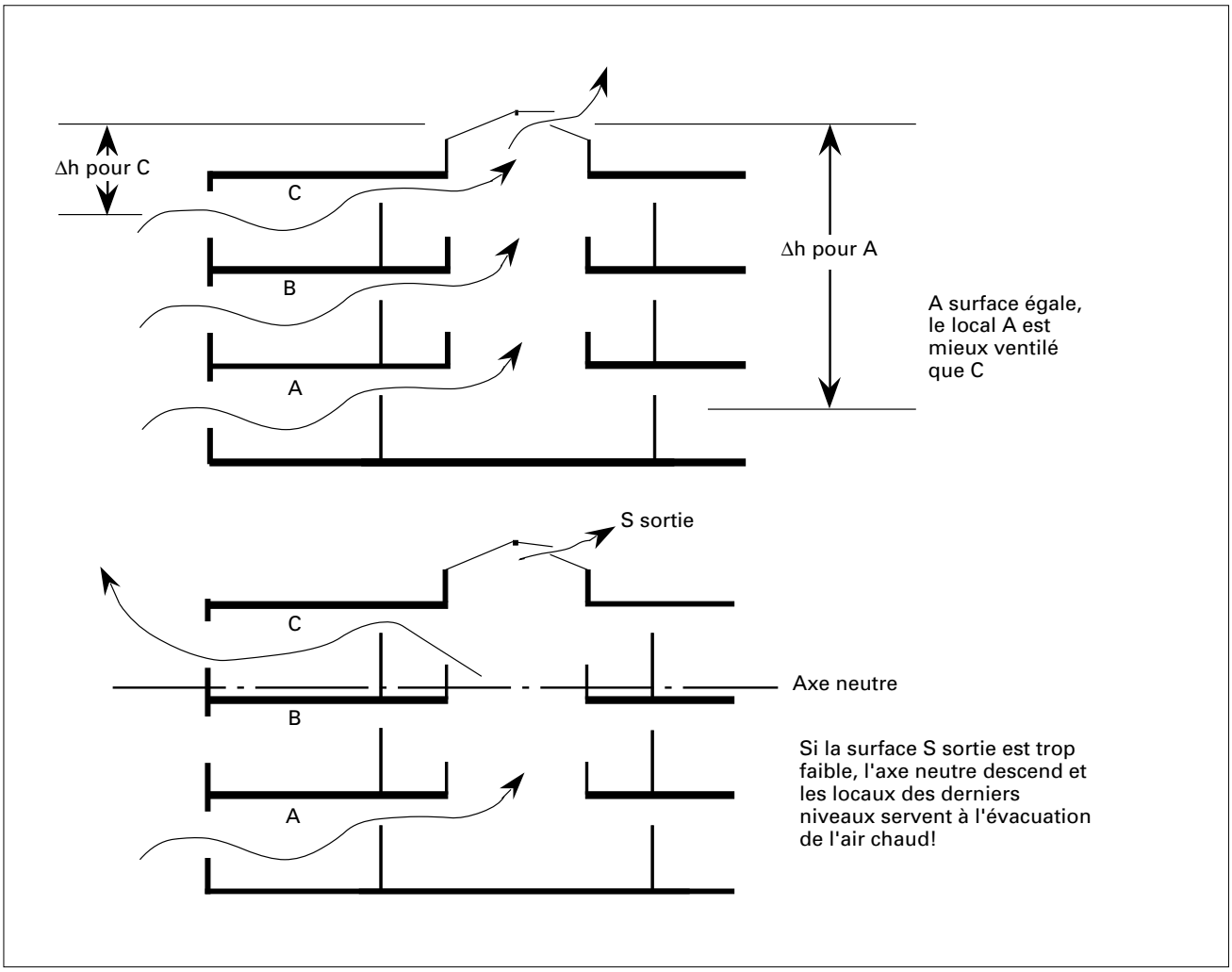


Figure 5.6.18: Effet de cheminée: ouvrants multiples répartis sur la hauteur. La maîtrise des mouvements d'air devient plus complexe.
L'axe neutre est le niveau où les pressions sont en équilibre. En dessous de cet axe, les ouvertures sont en dépression, en dessus elles sont en surpression. Cet axe se situe généralement à mi-hauteur entre les ouvrants bas et hauts. Lorsque la surface des ouvrants bas (entrée d'air) et hauts (sortie d'air) est trop différente, cet axe se déplace de la mi-hauteur vers le niveau des ouvrants de plus grande surface (vers le haut dans l'exemple de la figure).

5.7 Déphasage des gains et ventilation nocturne

Base

Dans les périodes très chaudes (canicules), la température extérieure dépasse, durant une partie de la journée, des valeurs confortables (27° à 30°). Il n'est donc pas possible d'utiliser la ventilation naturelle pour évacuer la chaleur apportée par le soleil (même si celle-ci est très réduite par des protections solaires) ou celle dégagée par les occupants sans surchauffer les locaux.

Le principe est le suivant:

- on **déphase les gains solaires** et internes en les stockant dans la masse du bâtiment;
- on **minimise les gains externes**: protections solaires, fenêtres fermées, isolations de la peau externe;
- on **évacue** cette chaleur accumulée durant la journée par un **renouvellement d'air nocturne** (ventilation naturelle): on profite des nuits plus fraîches.

Cette technique est traditionnellement utilisée dans tous les pays du Sud de l'Europe durant l'été.

Seule la combinaison de la masse nécessaire au stockage et de la ventilation nocturne est efficace.

Règles

- La **masse thermique** devait représenter de 1 à 2 m^2 par m^2 de surface de plancher. Au-delà de 15 cm de béton où de 20 cm de terre cuite, l'épaisseur de la masse n'est plus utile [4, 5, 7, 12, 13, 16, 21].
- Plus la masse est importante, plus les performances sont élevées.
- Schématiquement: dans un logement, au minimum **une dalle** devrait être libre ou **trois murs** du local, dans un bâtiment administratif **une dalle** au moins (sol ou plafond).
- Les règles développées au chapitre 5.2 quant aux **revêtements** appliqués sur les masses de stockage sont aussi valables ici.
- La **surface des ouvertures** nécessaires à la ventilation nocturne devait représenter de **10 à 15 %** de la surface de plancher (somme des entrées-sorties). Un vent régulier durant la nuit de 1 m/s minimum et une ventilation traversante permettent de diviser ces surfaces par deux [12, 14].
- Le flux d'air extérieur nocturne doit passer sur les masses à refroidir [12].
- Ces ouvertures seront utilisées la nuit et fermées durant les heures chaudes de la journée [12, 14].

Voir aussi

- Chapitre 2 Analyse du site
- Chapitre 5.2 Stocker la chaleur
- Chapitre 5.6 Ventilation naturelle

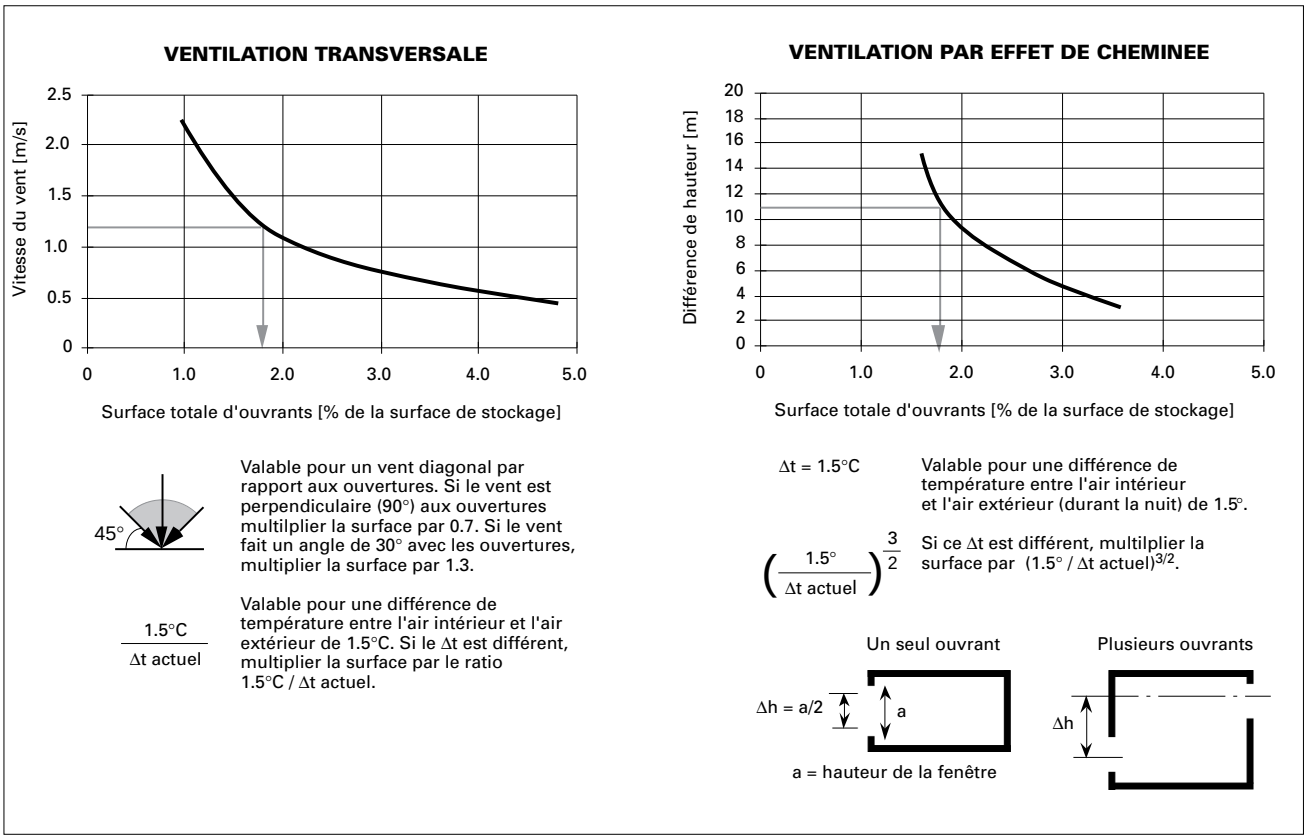


Figure 5.7.1: Surface d'ouvrant nécessaire pour décharger les masses durant la nuit en fonction du vent ou de la différence de hauteur entre les ouvrants [11, 4].
Le vent est donné par l'analyse du site. En l'absence de valeur prendre 1 m/s.
La surface de stockage se calcule comme celle du stockage passif (voir chapitre 5.2).
La surface des ouvrants est considérée comme équivalente à l'entrée et à la sortie. Le diagramme donne la surface totale (somme des entrées et des sorties). La différence de hauteur entre les ouvrants d'entrée et de sortie d'air se mesure à l'axe des ouvertures.

Dimensionnement

La figure 5.7.1 donne les ordres de grandeur de la taille des ouvrants en fonction de la masse thermique et de la vitesse du vent ou de la hauteur entre ouvrants.

Par exemple: avec un vent moyen de 1.2 m/s, une ventilation transversale, une surface de stockage de 400 m^2 égale à la surface de plancher des bureaux du bâtiment, il faut une surface totale d'ouvrant représentant 1.8% de la surface de stockage, soit 7.2 m^2, pour évacuer, durant la nuit, la chaleur stockée durant la journée. On disposera 3.6 m^2 sur la face au vent et 3.6 m^2 sur la face sous le vent. Si le vent fait un angle de 90° avec la façade (perpendiculaire), la surface totale d'ouvrants nécessaire deviendra 5 m^2 (7.2 m^2 x 0.7 = 5 m^2).

Si le même bâtiment doit être refroidi par effet de cheminée seulement et que la différence de hauteur entre les ouvrants bas et les ouvrants hauts est de 11 m on devra aussi disposer de 1.8% de surface totale d'ouvrants par rapport à la surface de stockage. La différence de température entre l'air intérieur (24°) et l'air extérieur durant la nuit (15°) est de 9°. La surface d'ouvrant ne sera plus de 7.2 m^2 mais de 0.5 m^2 (7.2 m^2 x $(1.5°/9°)^{3/2}$ = 0.5 m^2).

5.8 Eclairage naturel

Base

La prise de conscience que l'énergie consommée par un bâtiment ne se limitait pas à de la chaleur pour son chauffage ou à de l'électricité pour son refroidissement date d'une dizaine d'années. La redécouverte de l'importance de l'éclairage dans le bilan énergétique d'un bâtiment a réhabilité l'éclairage naturel.

Les développements actuels vont plus dans la direction d'outils informatiques sophistiqués et d'essais sur maquettes sous ciel artificiel. Néanmoins on voit aussi apparaître des outils informatiques plus simples permettant de « dimensionner » les éléments de prise de lumière. Ces outils se situent dans la phase de consolidation du projet (avant-projet).

Ce chapitre se limite à, partant des exigences en lumière naturelle définies au chapitre 3, donner quelques règles pour dimensionner des prises de lumière en éclairage monolatéral, zénithal ou à travers un atrium.

Le lien entre le FLJ et l'autonomie en éclairage est donné par la figure 4.5.1 au chapitre 4.5: par exemple, avec un FLJ de 5% et une exigence d'éclairement de 500 lux on peut être autonome durant 50% des heures de travail.

Règles

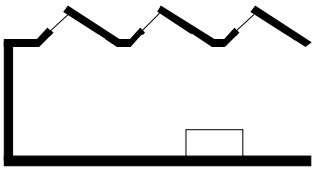
- Pour un **éclairage monolatéral**, la pénétration maximale de lumière utile est de **2.5 H**, H étant la hauteur comptée de la surface à éclairer (sol, table) au sommet de la fenêtre. Au delà de cette profondeur il faut soit créer un second jour, soit changer les proportions du local.
- Un **éclairage bilatéral** ou d'angle offre une **meilleure uniformité** qu'un éclairage monolatéral.
- La lumière étant additive, on peut additionner les FLJ donnés par plusieurs fenêtres dans un même espace.
- A surface vitrée équivalente, un **éclairage zénithal est trois fois plus efficace** qu'un éclairage latéral.
- Dans tous les locaux de travail ou de séjour, on doit pouvoir **contrôler le niveau de l'éclairage** naturel par des protections mobiles (store à lames, toiles). Ces protections peuvent être intérieures dans l'orientation Nord seulement.
- Utiliser des revêtements intérieurs avec des **coefficients de réflexion** le plus élevé possible: sol 0.30 à 0.50, murs 0.40 à 0.60, plafond 0.70 à 0.90 pour uniformiser l'éclairage intérieur.
- Un **atrium** présentant entre sa hauteur et sa largeur un ratio supérieur à 2:1 ne peut que s'éclairer lui-même (sol et coursive). Le ratio devrait être au maximum de 1:1 pour apporter aux locaux adjacents un éclairage supplémentaire sensible.

Voir aussi:

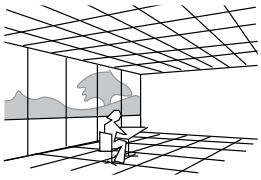
– Chapitre 3.4 Confort visuel

Proportions
Page 121

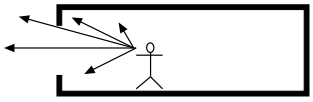
Facteur de Lumière du Jour (FLJ)
FLJ en fonction du ration surface vitrée sur surface de plancher
Page 121



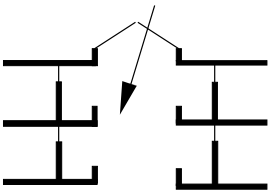
Coefficients de réflexion
Page 122



Eblouissement
Et comment y remédier ...
Page 123



Atrium
Règles, dimensions, ...
Pages 124 à 126



ECLAIRER

Dimensionnement

La figure 5.8.3 donne l'ordre de grandeur du Facteur de Lumière du Jour (FLJ) en fonction du rapport de la surface vitrée et de la surface de plancher pour des éclairages de type monolatéral ou zénithal.

Pour un éclairage bilatéral (fenêtres sur des faces opposées d'un local) le FLJ_{moyen} donné par la formule de la figure 5.8.3 est aussi valable mais pas le $FLJ_{minimum}$ qui sera beaucoup plus élevé.

Toutes ces formules sont valables pour un local clair, c'est à dire dont les revêtements de surface ont un coefficient de réflexion élevé. Si le local est sombre, le $FLJ_{minimum}$ peut être divisé par un facteur deux.

Toutes ces formules sont valables pour des fenêtres équipées de vitrage isolant double (τ = 81%). Le tableau 5.8.2 donne le coefficient de transmission des vitrages usuels.

Pour améliorer l'éclairage naturel en fond de local plusieurs artifices permettent d'augmenter la hauteur H pour une hauteur d'étage donnée (voir figure 5.8.1).

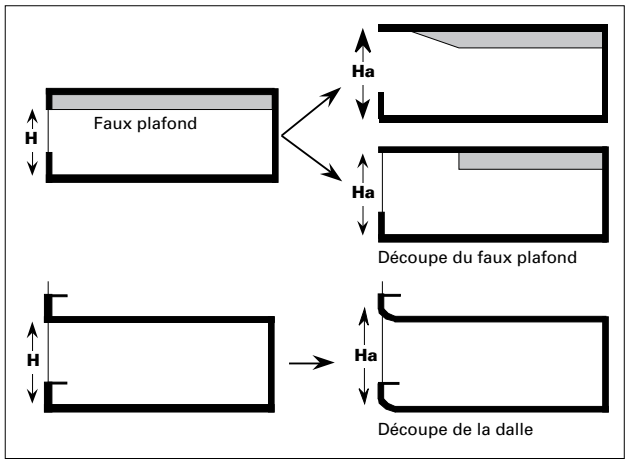


Figure 5.8.1: Différents modes d'augmentation de la hauteur de référence. Le $FLJ_{minimum}$ en fond de pièce n'est pas affecté et correspond à Ha.

Transmission des fenêtres

C'est le facteur principal qui déterminera la quantité de lumière qui pénétrera dans le local. Plusieurs facteurs définissent la transparence d'une fenêtre:

- Le *coefficient de transmission du vitrage*. Ce coefficient a une incidence lorsque l'on utilise des verres antisolaires ou absorbants (voir figure 5.8.2).
- L'*encrassement du vitrage*: en zone urbaine ou industrielle, ce facteur peut diminuer de plus de 20% la lumière qui traverse le vitrage.
- La *proportion des huisseries*. On calcule habituellement la surface du cadre et des baguettes en élévation pour évaluer sa proportion. L'atténuation de la transparence due au cadre est très importante avec des doubles fenêtres, les deux cadres étant souvent décalés. L'utilisation de cadres clairs (blancs par exemple) diminue l'effet de l'épaisseur du cadre.

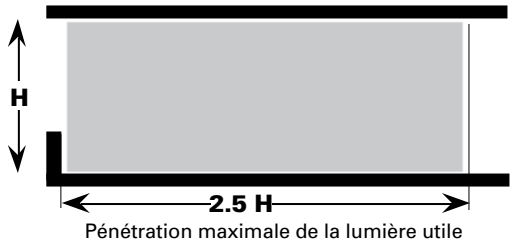
Type de vitrage	**Transmission lumineuse** (%)
Simple clair	90
Simple dépoli	80
Simple martelé	80
Isolant double	81
Isolant triple	73
Isolant double IR	78
Isolant double Antisolaire	25-50
Pavés de verre	55

Figure 5.8.2: Transmission lumineuse de quelques vitrages.

Eclairage monolatéral:

$$FLJ_{moyen} = 0.2 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

$$FLJ_{minimum} = 0.1 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

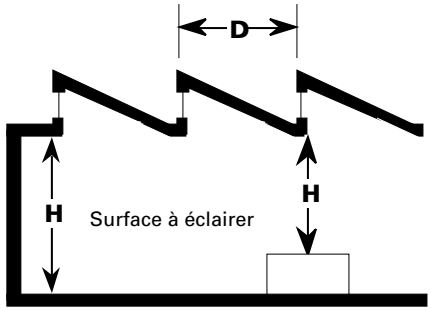


Eclairage zénithal (halles):

Sheds verticaux

$$FLJ_{moyen} = 0.2 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 1.5 \times H$

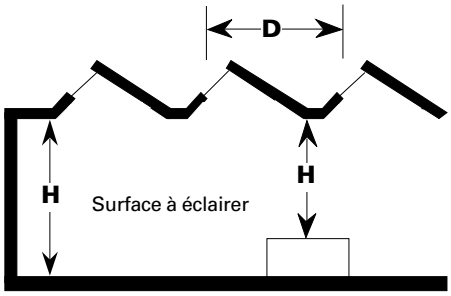


Sheds verticaux

Sheds inclinés (orientés au Nord)

$$FLJ_{moyen} = 0.33 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 2 \times H$



Sheds inclinés

Bande lumineuse

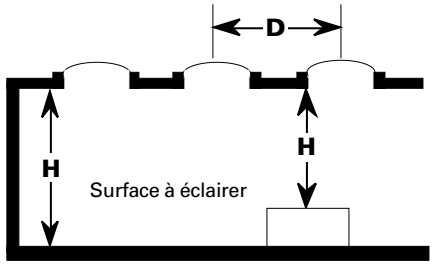
$$FLJ_{moyen} = 0.5 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 2 \times H$

Lucarnes ou coupoles

$$FLJ_{moyen} = 0.6 \times \frac{\text{Surface vitrée}}{\text{Surface de plancher}}$$

Eclairage homogène si: $D \leq 2 \times H$



Bandeau, coupole

Figure 5.8.3: Eclairage monolatéral ou zénithal, Facteur de Lumière du Jour (FLJ) en fonction des surfaces relatives et des proportions générales [11].

Ces règles sont valables pour les conditions suivantes:

- *Toutes les surfaces internes du local ont un coefficient de réflexion élevé (sol: 0.30, mur: 0.60, plafond: 0.70).*
- *Pour les éclairages zénithaux, on se limite à donner un FLJ moyen car, si l'on respecte les critères d'homogénéité, le ratio entre l'éclairage de la zone la plus claire et celui de la zone la plus sombre ne dépasse pas 2:1.*
- *Toutes ces valeurs sont données pour des jours uniformément couverts. Pour des jours clairs, ces formules restent valables pour des orientations Nord, Est et Ouest. Pour le Sud ou pour des vitrages horizontaux, on peut diviser les constantes de chaque formule par un facteur 3.*
- *Le vitrage est un double verre isolant standard (τ = 81%). Si le vitrage a un coefficient de transmission inférieur, multiplier les valeurs trouvées par le ratio:* $\frac{\tau \text{ actuel}}{\tau \text{ 81\%}}$

Coefficients de réflexion

Des revêtements intérieurs à haut pouvoir de réflexion de la lumière permettent :

– d'uniformiser l'éclairage naturel dans un local, donc améliorer le confort visuel (diminution des contrastes entre les zones claires et les zones sombres);
– d'éclairer le fond du local par multiréflexion sur les parois et le plafond. Entre un local clair et un local sombre, l'éclairement du fond du local (à plus de 4 m de la façade en éclairage monolatéral) est doublé.

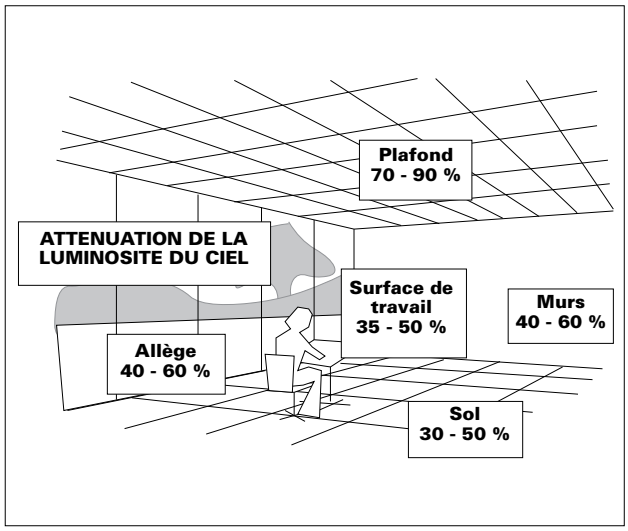


Figure 5.8.4: Coefficients de réflexion recommandés [24].

Eblouissements

La source principale d'éblouissement dans un local éclairé naturellement est la fenêtre.

Il existe plusieurs moyens pour diminuer cet éblouissement, ils sont schématisés sur la figure 5.8.6.

Un autre moyen est, comme on l'a vu précédemment, de disposer de revêtements clairs qui atténuent les contrastes dans une pièce.

MATERIAUX	ρ	PEINTURES	ρ
Erable, bouleau	~ 0.6	blanc	0.75 ... 0.85
Chêne clair verni	0.25 ... 0.35	gris clair	0.4 ... 0.6
Chêne foncé verni	0.1 ... 0.15	gris moyen	0.25 ... 0.35
Panneau de fibres de bois, crème	0.5 ... 0.6	gris foncé	0.1 ... 0.15
Granit	0.2 ... 0.25	bleu clair	0.4 ... 0.5
Calcaire	0.35 ... 0.55	bleu foncé	0.15 ... 0.2
Marbre poli	0.3 ... 0.7	vert clair	0.45 ... 0.55
Mortier clair, enduit à la chaux	0.4 ... 0.45	vert foncé	0.15 ... 0.2
Plâtre	~ 0.8	jaune clair	0.6 ... 0.7
Molasse	0.2 ... 0.4	brun	0.2 ... 0.3
Contreplaqué	0.25 ... 0.4	rose	0.45 ... 0.55
Béton brut	0.2 ... 0.3	rouge foncé	0.15 ... 0.2
Brique, tuile rouge neuve	0.1 ... 0.15		

Figure 5.8.5: Coefficient de réflexion (ρ) de revêtements usuels [25].

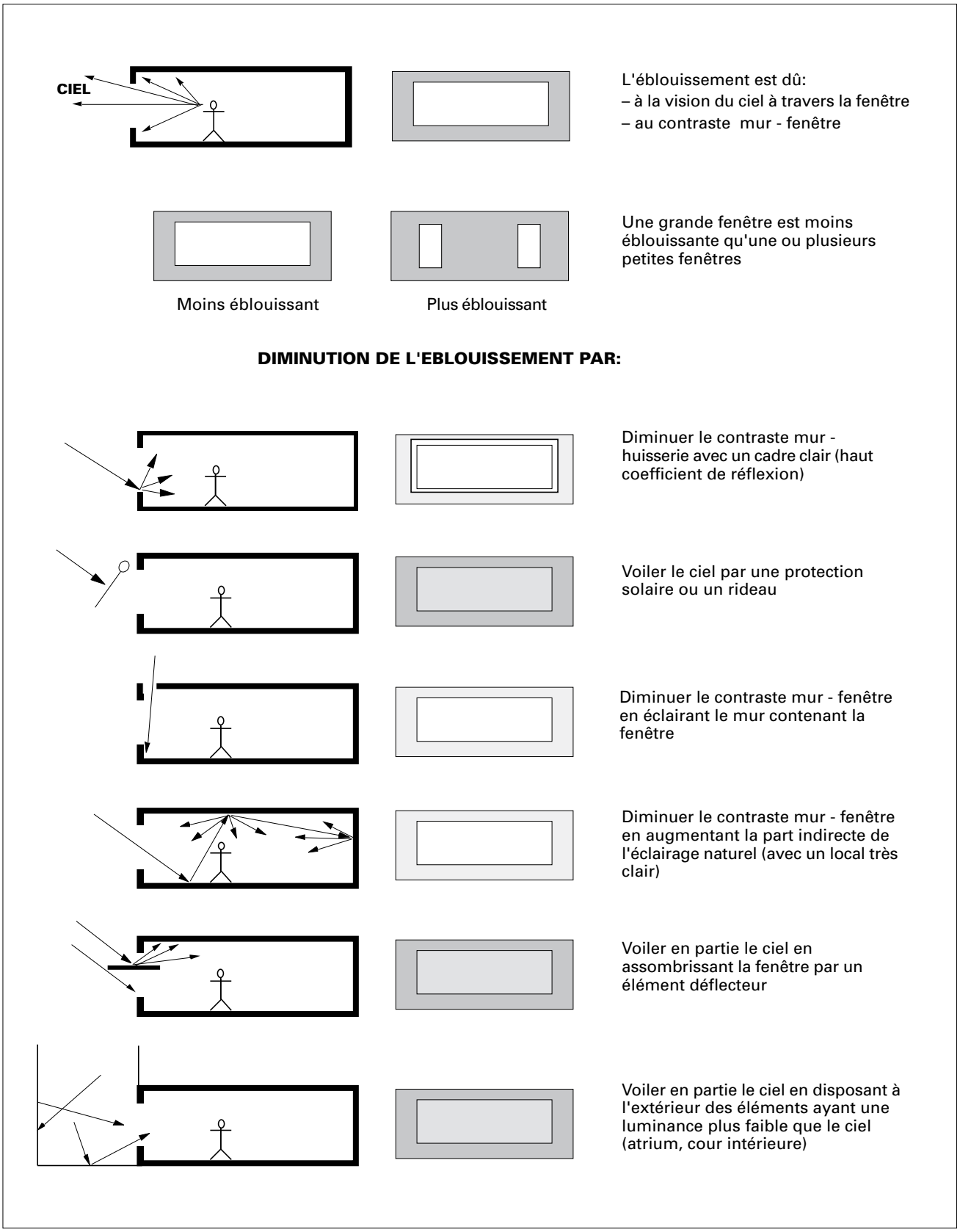


Figure 5.8.6: Eblouissement dû aux fenêtres: moyen d'y remédier [adapté de 26].

Atrium

Un atrium mal conçu ne peut que s'éclairer lui-même. Il aura rempli sa fonction thermique: espace tampon dynamique, espace transitoire entre l'intérieur et l'extérieur, zone d'activité saisonnière.

S'il doit apporter du soleil et de la lumière à l'intérieur d'un bâtiment profond, l'atrium doit respecter certaines règles:

– Une méthode simple est de donner des bons ou des mauvais scores selon les paramètres principaux qui vont conditionner la profondeur de pénétration de l'éclairage naturel dans les locaux adjacents (voir figure 5.8.7). On additionne les points obtenus et on en déduit la profondeur de pénétration de la lumière naturelle. Ces méthodes ont l'inconvénient d'être obscures et ne permettent pas de comprendre les principes qui sous-tendent ces valeurs.
– La figure 5.8.9 énumère les paramètres principaux et détaille les bonnes et les moins bonnes solutions.
– La figure 5.8.8 donne, en fonction de sa géométrie, le niveau d'éclairage naturel direct (non compris l'apport par multiréflexion sur les faces de l'atrium) au sol de l'atrium.
– La figure 5.8.10 permet, au moyen d'un nomogramme, d'évaluer l'apport de lumière naturelle d'un atrium à des locaux (bureaux) adjacents en fonction de paramètres géométriques et optiques de l'atrium.

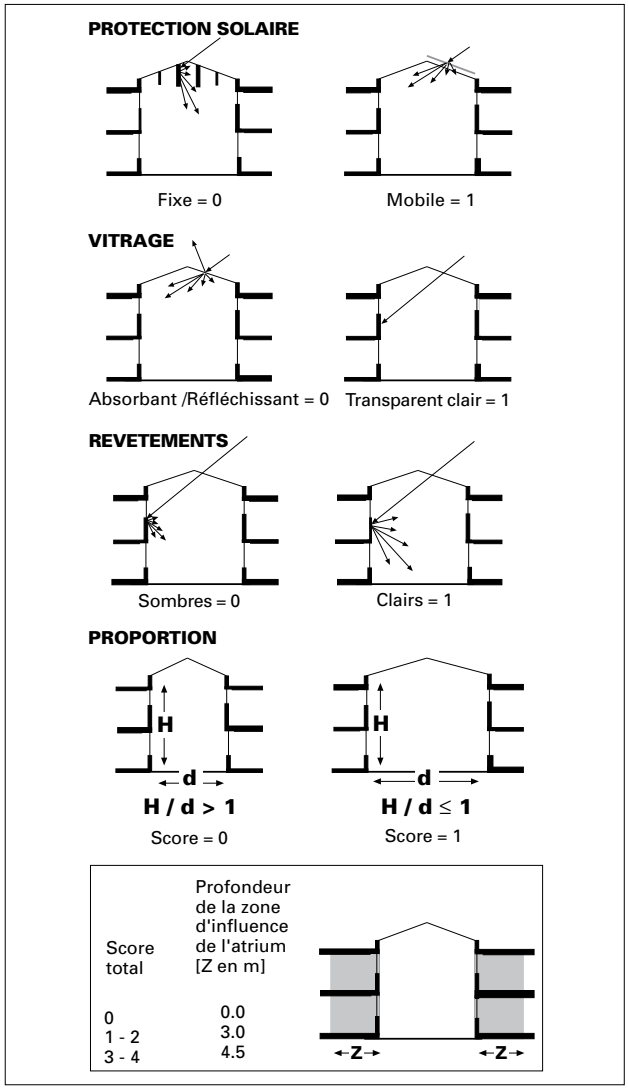


Figure 5.8.7: Profondeur de la zone éclairée naturellement en fonction des caractéristiques de l'atrium [16].

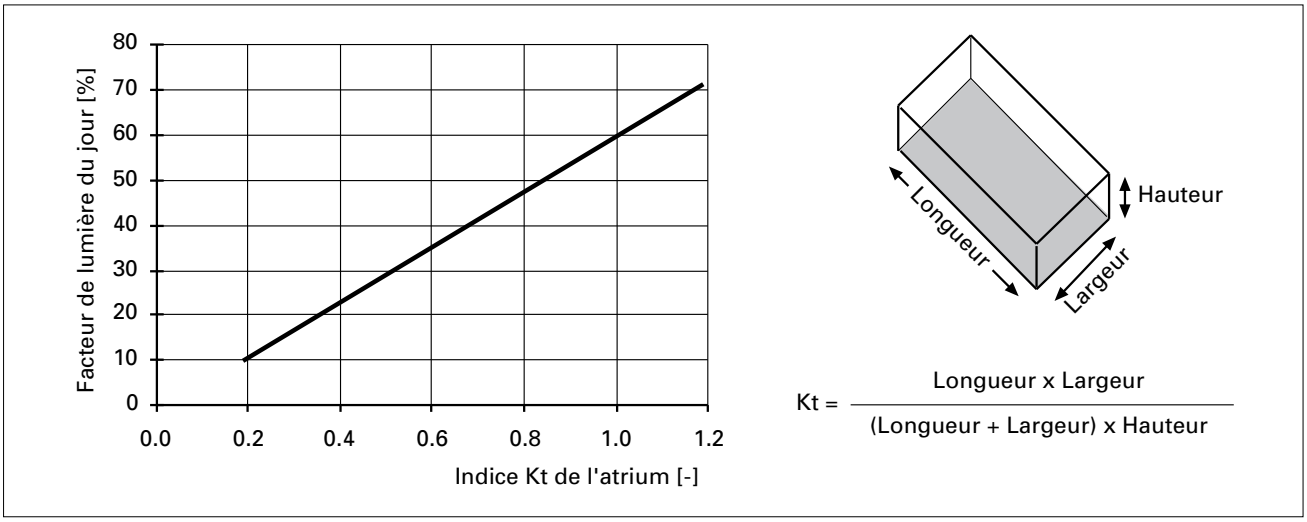
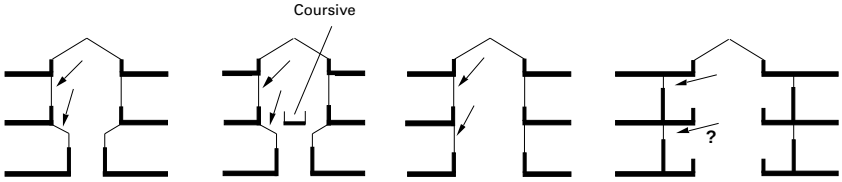


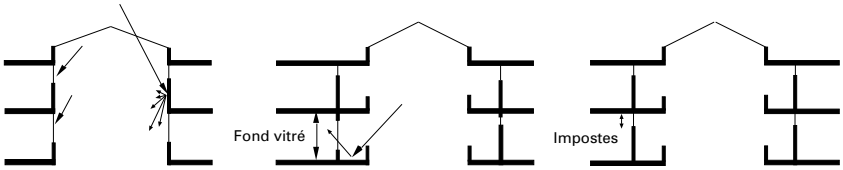
Figure 5.8.8: Niveau d'éclairement naturel du sol d'un atrium: part directe seule [16]. L'apport de lumière par multiréflexion sur les parois latérales de l'atrium est négligé.

BONNE SOLUTION → **MOINS BONNE SOLUTION**



Prises de jour dans l'atrium

La lumière étant essentiellement verticale dans un atrium (mis à part dans les parties hautes), toutes les saillies empêchent une pénétration de lumière dans les locaux adjacents. Les coursives devraient être supprimées ou rejetées au centre. Les prises de jour devraient recevoir la lumière sans obstructions horizontales importantes.

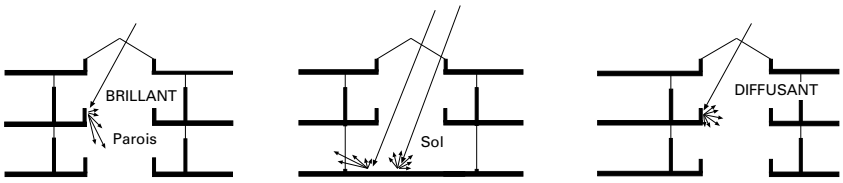


Position et taille de la prise de jour

La taille des fenêtres intérieures (prises de jour) devrait augmenter du haut vers le bas. Si des obstructions horizontales sont inévitables, le mur du fond des locaux adjacents devrait être entièrement vitré. Une imposte sur coursive n'apporte pas de lumière significative au fond du local.

Forme de l'atrium

Le puits de lumière devrait avoir une géométrie en entonnoir plutôt que verticale: la lumière verticale domine et l'éclairage des parois verticales au fond de l'atrium sont les paramètres déterminants.



Revêtements de surface

Les revêtements de surface des éléments verticaux devraient être brillants et clairs, le sol de l'atrium devrait avoir un revêtement diffusant et clair en son centre, brillant et clair en périphérie. S'il y a des coursives en périphérie de l'atrium, leur plafond et leur sol devraient être diffusants et clairs.

Proportions de l'atrium

Le rapport hauteur / largeur d'un atrium ne devrait pas dépasser 1:1 pour éclairer le fond des locaux adjacents du niveau bas de l'atrium. Un atrium dans un rapport au-delà de 2:1 n'aura que ses coursives éclairées.

Transparence de la verrière de l'atrium

La verrière supérieure de l'atrium devrait être la plus transparente possible:
- transmission élevée du verre;
- verre transparent et non diffusant;
- huisseries minces (cadres);
- structure porteuse légère créant le moins d'obstructions possibles à la pénétration de la lumière;
- l'huisserie devrait être de couleur claire et brillante;
- la protection solaire devrait être mobile, (non fixe) et modulable (protection des parties ensoleillées de la verrière en laissant pénétrer la lumière par les parties non ensoleillées).

Figure 5.8.9: Prises de jour sur un atrium: règles de base et paramètres principaux [24].

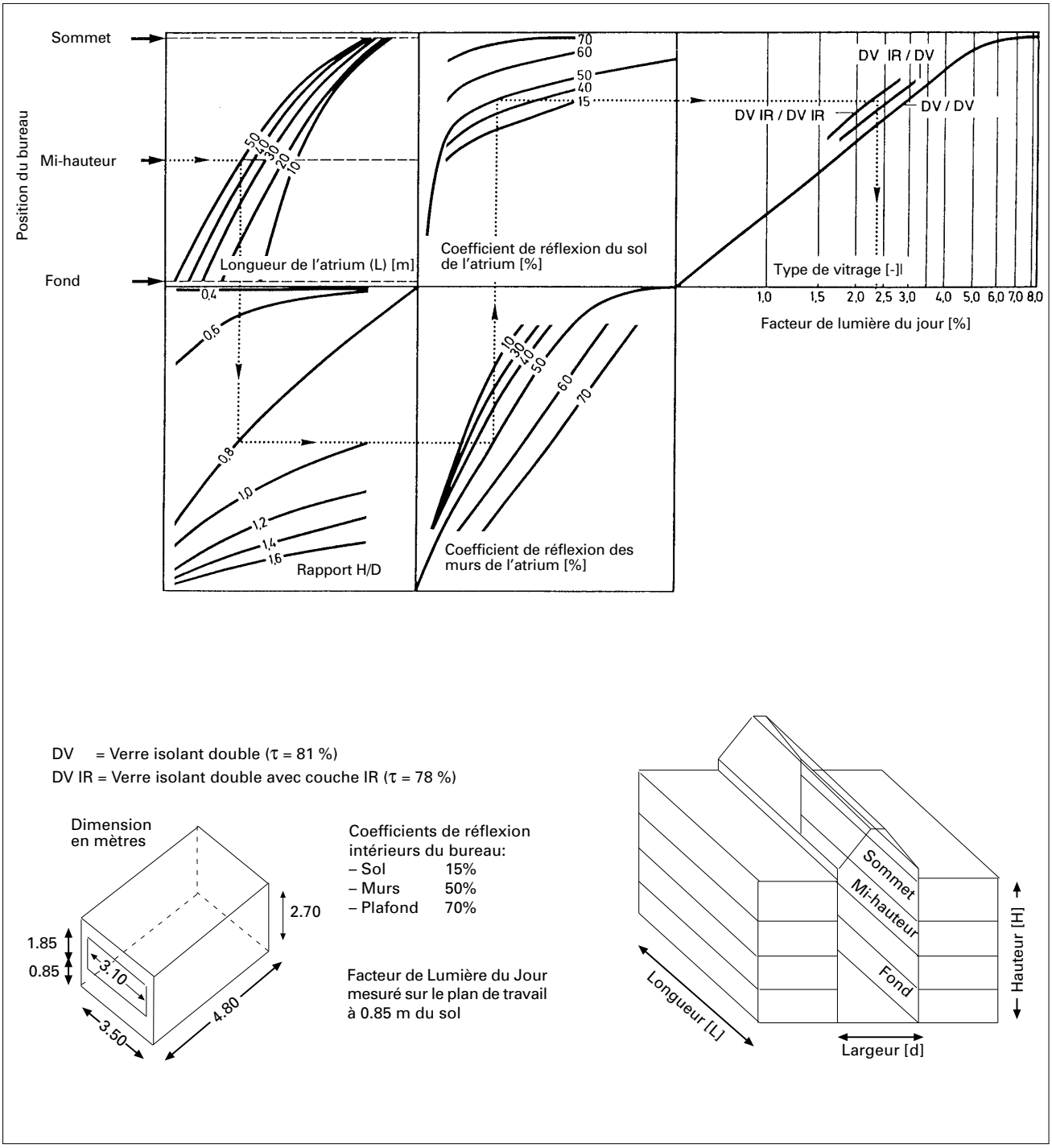


Figure 5.8.10: Nomogramme pour déterminer le FLJ_{moyen} de locaux adjacents à un atrium [17].
Les conditions du ciel sont un jour uniformément couvert selon CIE.
Le FLJ_{moyen} est donné sur un plan de travail horizontal à l'intérieur d'un bureau connecté à l'atrium dont la façade donnant sur l'atrium est vitrée à 60 %.
Exemple:
- *un atrium de dimensions: longueur 50 m, largeur 15 m, hauteur 12 m;*
- *les parois de l'atrium (parties opaques) ont un coefficient de réflexion de 0.50;*
- *le sol de l'atrium a aussi un coefficient de réflexion de 0.50;*
- *le vitrage entre l'atrium et l'extérieur est un double verre avec couche IR;*
- *le vitrage entre les bureaux et l'atrium est un double verre:*
- *le bureau est situé à mi-hauteur de l'atrium.*

On en déduit un FLJ_{moyen} sur le plan de travail du bureau de 2.30 %. Cet apport dû à l'atrium s'ajoutera à celui des fenêtres du bureau donnant sur l'extérieur.

5.9 Références

Voir aussi annexe A1, Bibliographie

[1] D. Watson, K. Labs
Climatic building design, energy-efficient building principles and practice
McGraw Hill Book Company, New York 1983

[2] Architecture et climat, centre de recherches en architecture, université catholique de Louvain (Belgique)
Energy concious design, a primer for architects
Batsford Limited, London 1992

[3] E. Mazria
Le guide de l'énergie solaire passive
Editions Parenthèses, Roquevaire 1981

[4] EPFL - ITB - LESO
Le soleil, chaleur et lumière dans le bâtiment
SIA D 056, Zürich 1990

[5] J.D. Balcomb, C.E. Kosiewicz, G.S. Lazarus, R.D. McFarland, W.O. Wray
Passive Solar Design Handbook, volumes 1-3
DOE USA, Washington 1982

[6] F. Moore
Concepts and practice of architectural daylighting
Van Nostrand Reinhold Company, New York 1985

[7] M. Zimmerman
Handbuch der Passiven Sonnenenergienutzung
SIA D010 Zürich 1986

[8] P. Bardou, V. Arzoumanian
Archi de soleil
Editions Parenthèses, Roquevaire 1978

[9] J.L. Izard, A. Guyot
Archi bio
Editions Parenthèses, Roquevaire 1979

[10] N.K. Bansal, G. Hauser, G. Minke
Passive building design, a handbook of natural climatic control
Elsevier, Amsterdam 1994

[11] B. Stein, J.S. Reynolds, W.J. McGuinness
Mechanical and electrical equipment for buildings
John Wiley & Sons, New York 1986

[12] N. Lechner
Heating cooling lighting, Design methods for architects
John Wiley & Sons, New York 1991

[13] W. Weber, R. Contini Knobel, J.C. Enderlin, P. Galinelli, B. Lachal, H. Marti, P. Minder, P. Schweizer
Soleil et architecture, guide pratique pour le projet
OFQC PACER, Berne 1991

[14] G.Z. Brown
Sun, wind, and light, architectural design strategies
John Wiley & Sons, New York 1985

[15] R. Sagelsdorff, T. Frank
Isolation thermique et maitrise de l'énergie dans le bâtiment, Elément 29
Industrie suisse de la terre cuite, Zürich 1993

[16] Divers auteurs
Energy in architecture, The European Passive Solar Handbook, CEE
Batsford Limited, London 1992

[17] IEA Solar Task 11
Passive solar commercial & institutional buildings, A Sourcebook of Examples and Design Insights
John Wiley & Sons, New York 1994

[18] A. Eggenberger
Thermische Messungen am erdgeschützen Wohnhaus in Wald mit verglaster Veranda
BEW + Eggenberger Bauphysik AG, Bern 1989

[19] SIA
L'énergie dans le bâtiment SIA 380/1
SIA, Zürich 1988

[20] LOG ID: J. Frantz, S. Hanke, M. Krampen, D. Schempp
Wintergärten, das Erlebnis, mit der Natur zu Wohnen, Planen bauen und gestalten
Falken Verlag, Niedernhausen 1986

[21] S. Yannas
Solar energy and housing design, 2 volumes
Architectural Association, London 1994

[22] V. Olgyay
Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism
Princeton University Press, Princeton 1963

[23] B. Givoni
L'homme, l'architecture et le climat
Editions du moniteur, Paris 1978

[24] P. Chuard, D. Chuard
L'éclairage dans les écoles, Projet de recherche EFFENS
OFEN 1992

[25] Divers auteurs
L'éclairage dans les bureaux, l'industrie et les surfaces de vente, RAVEL 4 fascicules
N° 724.329.1 à 4 f
OFQC RAVEL, Berne 1994

[26] P. Chauvel, J.B. Collins, R. Dogniaux, J. Longmore
Glare from windows: current view of the problem
Lighting Research and Technology Vol 14
N°1 1982

6. Démarche et stratégie

6.1	**Démarche**	**130**
6.2	**Stratégie**	**130**

6.1 Démarche

La démarche proposée est simple. Elle doit s'intégrer au processus « normal » de conception d'un bâtiment ou d'un plan d'aménagement.

Cette démarche passe par une phase d'analyse du site, du programme et de ses exigences et une phase de définition des objectifs à atteindre. Suite à cette première phase analytique, des principes pourront être choisis et appliqués pour, sur la base du concept architectural, déboucher sur le choix d'un parti.

Les techniques de dimensionnement présentées au chapitre 5 pourront être appliquées à cette première esquisse. Des programmes d'ordinateurs permettront, dans certains cas, d'affiner le prédimensionnement.

Ce n'est que dans une phase ultérieure du projet que l'architecte consultera un spécialiste qui pourra affiner le dimensionnement.

La notion d'architecture climatiquement équilibrée recouvre un vaste domaine : elle va d'architectures où cette recherche est la base de l'expression d'un bâtiment à des architectures dont l'expression formelle ne reflète en rien ces principes.

Toute démarche architecturale est un compromis subtile entre un grand nombre de contraintes que le concepteur doit reconnaître et évaluer. Cet ouvrage n'a la prétention que de rappeler les contraintes climatiques et de donner des outils pour les évaluer. Réduire la contrainte climatique au choix de l'épaisseur des isolants est un peu simpliste. Une architecture qui « intègre » les contraintes climatiques au même titre que les contraintes structurelles (statiques) ou économiques est une architecture climatiquement équilibrée.

6.2 Stratégie

La démarche peut apparaître comme un processus très logique et rationnel qui risque d'alourdir l'approche architecturale. En réalité l'expérience du concepteur va l'amener à utiliser des stratégies qui font appel à quelques principes de base plus faciles à maîtriser.

Le chapitre 5 apparaît comme une collection de principes souvent contradictoires et non hiérarchisés. Cette impression vient du fait que, si l'on veut embrasser tous les cas de figure (climat, site, programme), l'énumération des principes devient nécessairement éclectique.

En réalité, l'analyse du site et du programme et les contraintes autres que climatiques limitent énormément les principes utilisables. Si la démarche devrait permettre de sélectionner quels principes sont utilisables, la stratégie, c'est-à-dire le concept choisi, sélectionnera les principes à mettre en œuvre.

Les contradictions entre principes ne sont qu'apparentes, c'est l'absence de contraintes extérieures à celles du climat qui donne l'impression que le choix est très ouvert.

La figure 6.2.1 illustre un choix de stratégie pour la ventilation naturelle d'un bâtiment.

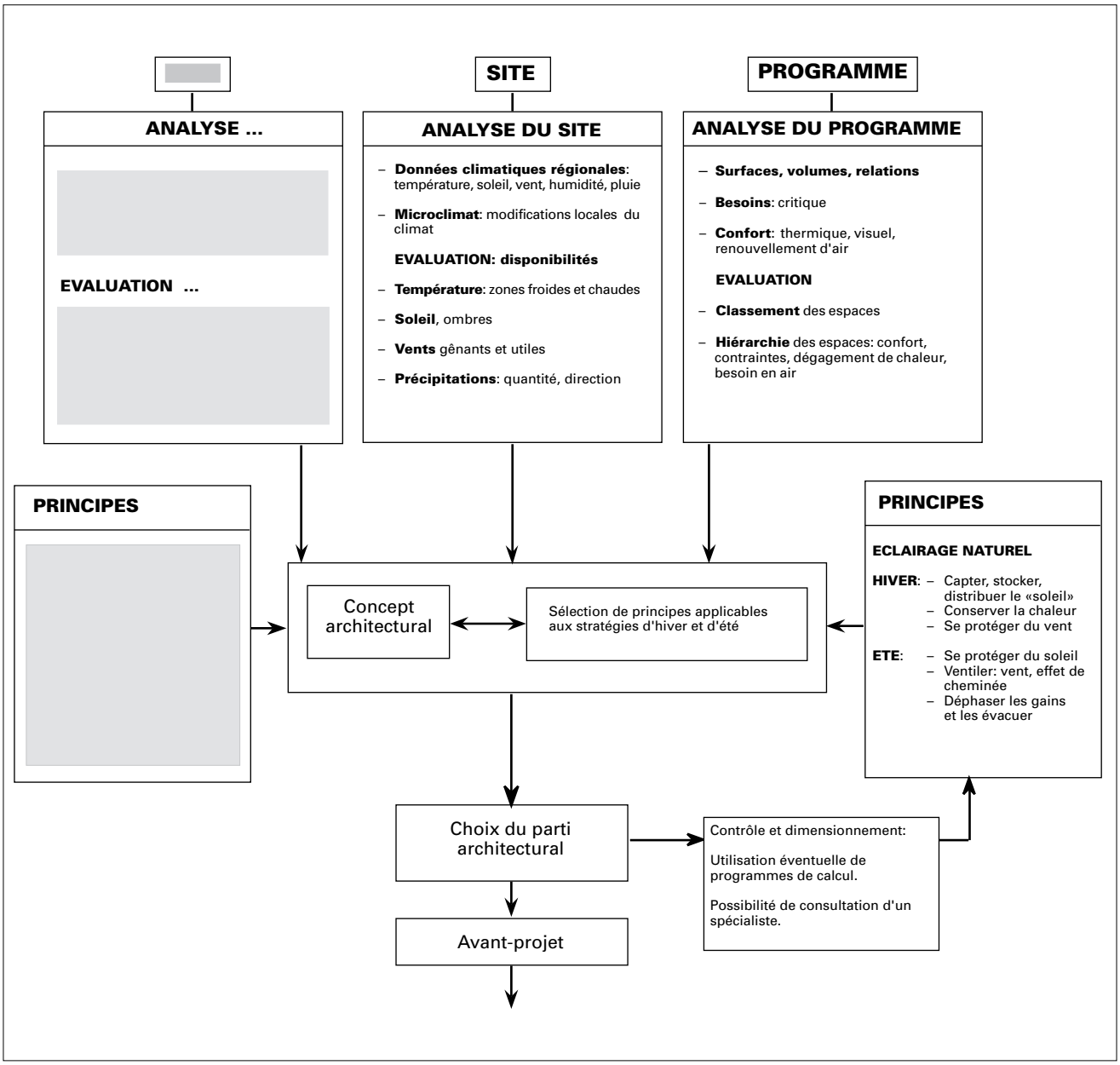
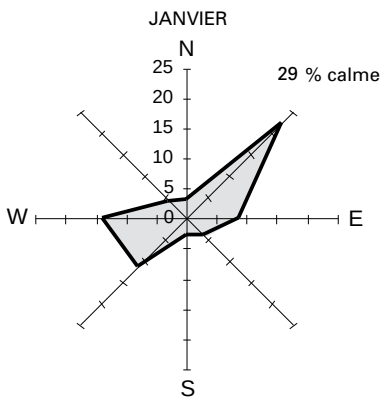
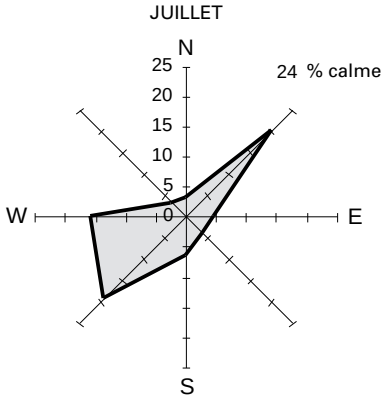


Figure 6.1.1: Représentation schématique de la démarche proposée.





ROSE DES VENTS DU SITE

Vents dominants SW-W et NE
en hiver et en été
En hiver: 29 % de calme (sans vent)
En été : 24 % de calme

HIVER

Si possible:
Protection des vents dominants
NE (bise) et SW-W (vent)

ETE

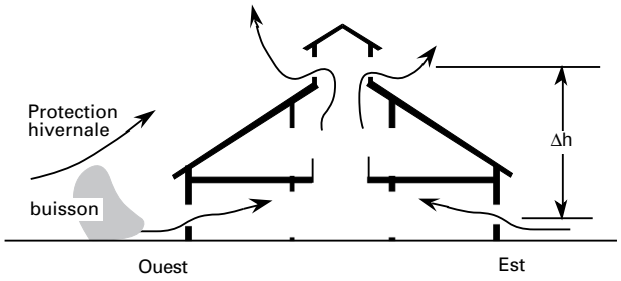
24 % de calme

CHOIX

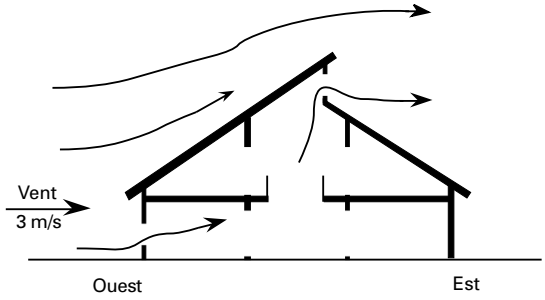
Il est inacceptable que, durant près de un quart de la journée, la ventilation soit insuffisante et que les locaux risquent de surchauffer.

Durant un quart de la journée, en période chaude (2 à 3 semaines sur ce site), le vent n'assurera pas une ventilation suffisante. La surchauffe qui en résultera est acceptable car limitée dans son intensité et sa durée.

VENTILATION PAR EFFET DE CHEMINEE



VENTILATION TRANSVERSALE



Ouvrants

Δh = 8 m entre ouvrants
Surface de plancher = 300 m^2
selon diagramme 5.6.3 page 109
Surface = 11 % de 300 m^2, soit 33 m^2 ouvrants
pour un Δt intérieur - extérieur = 1.5 °C
On admettra 5 °C
Surface ouvrant = 33 x (1.5 / 5)$^{3/2}$ = **5.4 m^2**

On protégera les ouvrants Ouest du vent dominant d'hiver par des buissons bas.

Ouvrants

Vitesse du vent = 3 m/s vent d'Ouest
Surface de plancher = 300 m^2
selon diagramme 5.6.3
Surface = 4 % de 300 m^2, soit 12 m^2 ouvrants
pour un Δt intérieur - extérieur = 1.5 °C
On admettra 5 °C
Surface ouvrant = 12 x (1.5 / 5) = **3.6 m^2**

On ne protégera pas les ouvrants Ouest du vent dominant d'hiver car le vent que l'on va utiliser en été pour ventiler vient de la même direction!

Figure 6.2.1: Choix d'une stratégie de ventilation naturelle – exemple.

Priorités

L'expérience montre que si l'on hiérarchise les contraintes climatiques énergétiques selon la figure 6.2.2, les choix des principes sont plus aisés à faire. Ce schéma tient compte à la fois des contraintes les plus difficiles (lumière par exemple) à intégrer et aussi de l'importance de ces choix sur l'efficacité énergétique globale du bâtiment (conservation de la chaleur par exemple).

Pour les choix de principe et de dimensionnement, on choisit habituellement deux saisons : l'hiver et l'été. Dans les mi-saisons, on admet que l'on passe d'un principe à l'autre selon le type de jour (clair, couvert, chaud, froid). Le problème pourrait se poser pour des systèmes qui impliquent des manipulations importantes au changement de saison (voir comportement de l'occupant).

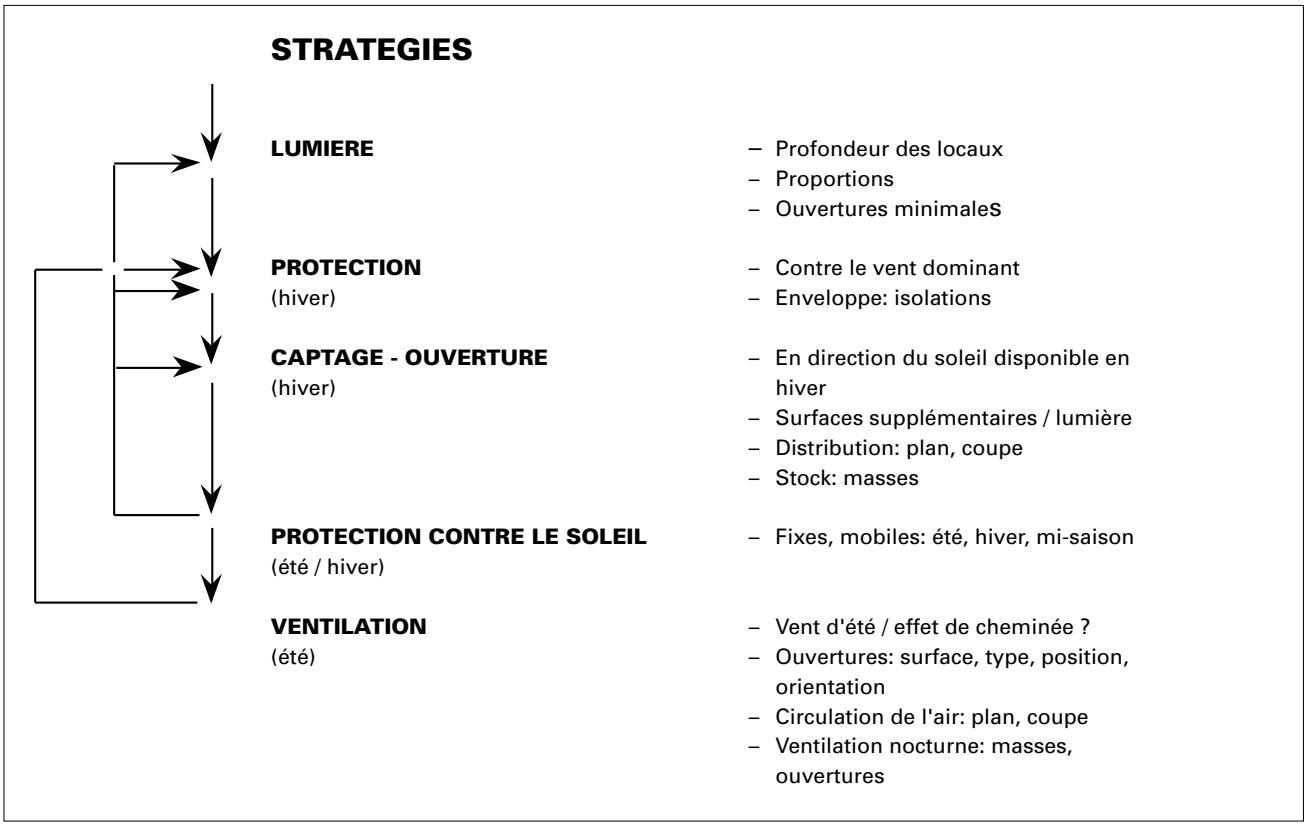
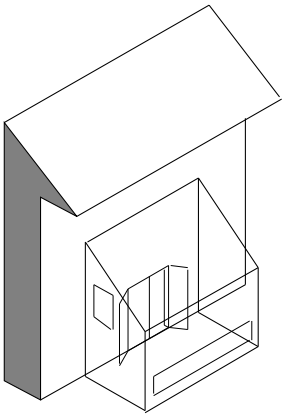


Figure 6.2.2 : Hiérarchisation des contraintes climatiques-énergétiques. Exemple de processus logique de prise de décisions.

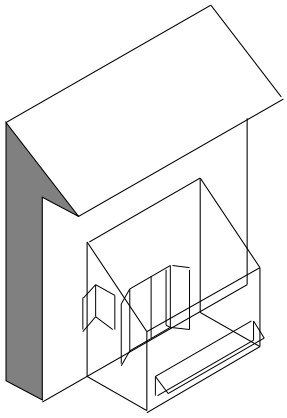
Comportement de l'occupant

Tous les principes qui impliquent un comportement particulier de l'occupant pour fonctionner correctement doivent être établis avec soin. Si, dans une habitation individuelle, on peut imaginer que l'occupant sera motivé par une bonne « conduite » de sa maison et que tabler sur son implication active dans son fonctionnement est réaliste, dans des logements collectifs ou des bâtiments non résidentiels (bâtiments administratifs, industrie, école) la participation active de l'utilisateur doit être limitée. Dans les bâtiments non résidentiels, on utilisera soit des technologies peu sensibles au comportement de l'utilisateur, soit faisant appel à des automatismes ou au personnel d'exploitation.



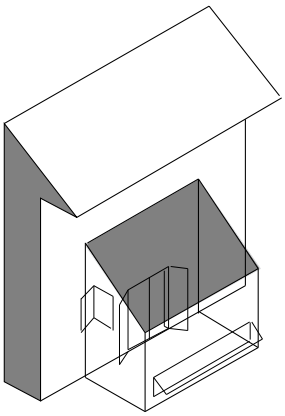
Hiver

- Aucune protection solaire.
- Le transfert de chaleur entre la serre (non chauffée) et les espaces chauffés se fait par ouverture des portes intérieures.
- Les jours sans soleil et la nuit les portes sont fermées.



Mi-saison

- Aucune protection solaire.
- Le transfert de chaleur entre la serre (non chauffée) et les espaces chauffés se fait par ouverture des portes intérieures.
- Les jours sans soleil et la nuit les portes et les ouvrants extérieurs sont fermés. Durant les périodes froides, la serre est utilisée comme en hiver.
- Les jours très chauds, les ouvrants extérieurs sont utilisés



Eté

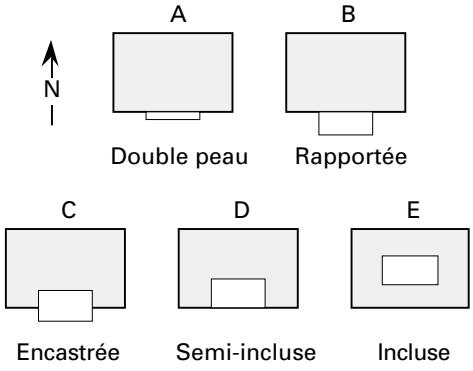
- Pose d'une protection solaire sous forme de nattes de roseaux (de mi-juin à septembre).
- Les ouvrants extérieurs restent ouverts jour et nuit.
- Les jours froids, ils sont fermés et les portes intérieures ouvertes pour chauffer la maison.

Figure 6.2.3: Manipulations saisonnières et journalières. Exemple d'une serre rapportée.

Pour faire ces choix, on distingue habituellement les points suivants :

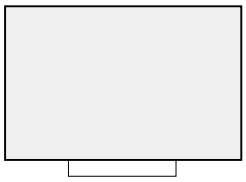
- **Compréhension** : un système doit être suffisamment simple pour être rapidement intégré par l'utilisateur.
- Tout système nécessitant un long **apprentissage** a peu de chance d'être bien utilisé.
- **Nombre de manipulations** : si l'on peut exiger une à deux interventions par jour, ou un changement saisonnier, il est irréaliste d'imaginer que l'utilisateur interviendra plus souvent.
- **Implication** : la conséquence directe du comportement sur sa consommation d'énergie ou son confort doit être claire et compréhensible.
- **Risques** : les conséquences d'une fausse manipulation doivent être limitées. Une surchauffe de 1 à 2°, parce que l'occupant a oublié d'utiliser les ouvrants permettant la ventilation durant la nuit précédente, est acceptable.
- **Anticipation :** la gestion optimale de la majorité des systèmes implique une anticipation de la météorologie. On laisse légèrement surchauffer un espace, car il fera froid sans soleil quelques heures plus tard, on protège du soleil une verrière non encore ensoleillée car la journée s'annonce belle et que l'on risque des surchauffes. Malheureusement, c'est ce type de comportement qu'il est très difficile à apprendre. Il ne faut donc pas qu'il soit indispensable au bon fonctionnement d'un système.
- **Gains d'espace** : tous les espaces-capteurs où les tampons dynamiques sont susceptibles d'être mal utilisés. Ils ne sont suffisamment chauffés par le soleil que durant 50 % de la période de chauffage, le reste du temps, ils devraient être séparés des espaces chauffés. Dans des logements collectifs il est très rare que les serres ne soient pas intégrées totalement aux espaces de séjours, donc chauffés indirectement (ouverture des portes) ou directement (appoint électrique) en continu. La conséquence est une augmentation de la consommation d'énergie du bâtiment. Une intégration de ce comportement prévisible dans la conception de la serre (choix du type de vitrages) permet de corriger l'effet négatif du comportement sur la consommation d'énergie.

La figure 6.2.4 illustre au moyen d'un exemple comment l'intégration d'un espace-capteur dans un projet implique un dimensionnement différencié et que le choix de la fonction (espace de dégagement, circulation, doublage) a des conséquences sur le comportement possible de l'utilisateur.

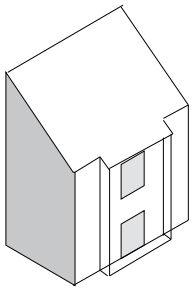


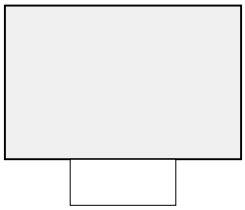
Les principes de fonctionnement de tous les éléments sont thermiquement (climatiquement) très semblables: apport énergétique identique dans des conditions identiques. Seule la variante E est moins favorable, son orientation zénithale la rendant peu performante en hiver.

Du point de vue architectural et de l'organisation des espaces, ce volume ne peut pas être considéré de la même façon dans les variantes A à E. On passe de A, où la double peau tient plus du revêtement de façade que de l'espace, à E où la serre peut difficilement être séparée des autres espaces.

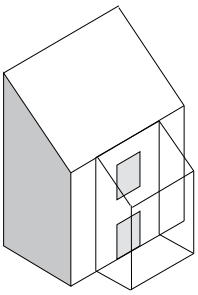


DOUBLE PEAU





SERRE RAPPORTEE



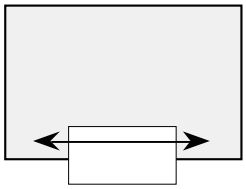
DOUBLE-PEAU

- Sa fonction est énergétique, thermique.
- Elle sera non chauffée.
- Elle permet une bonne gestion des gains solaires: déphasages, séparation entre espace habité et espace de captage.
- Bien qu'elle soit visitable (> 0.8 m de profondeur) c'est plus un mur (interface) qu'un espace.
- Sa faible profondeur la rend performante: peu de parties vitrées non verticales Sud.
- Elle n'apporte pas d'espace de séjour supplémentaire, elle devra donc se justifier financièrement par son apport énergétique

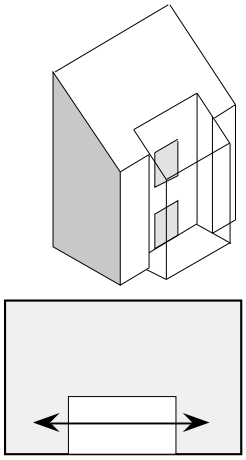
SERRE RAPPORTEE

- Sa fonction énergétique-thermique et ses performances sont comparables à la double-peau car elle est non chauffée.
- Elle est habitable durant l'été et 50% (la journée) durant la période de chauffage.
- En simple verre, elle condensera et gèlera durant plusieurs centaines d'heures par an (problème pour les plantes?). Si le mur interface est isolé, bien gérée (ouverture et fermeture des portes interfaces), son apport énergétique est important. Elle est difficilement chauffable en permanence (pertes trop importantes).
- En double verre, elle ne condensera et ne gèlera que quelques jours par an (climat intérieur méditerranéen). Bien gérée, son apport énergétique est important. Mal gérée, c'est-à-dire chauffée en continu, elle générera une consommation supplémentaire pour la maison. On parvient à la chauffer car le double-verre limite ses pertes.

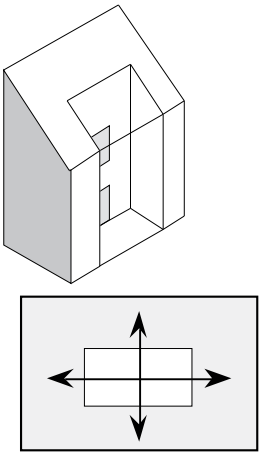
Figure 6.2.4: Elément solaire passif et organisation spatiale – l'exemple de la serre



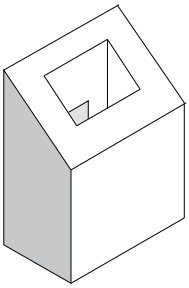
SERRE ENCASTREE



SERRE SEMI-INCLUSE



SERRE INCLUSE



SERRE ENCASTREE ou SEMI-INCLUSE

- Du point de vue énergétique-thermique elle est comparable à la serre rapportée. Ses performances seraient même meilleures car la part de vitrage Sud est plus importante, les faces latérales étant limitées ou supprimées.
- Du point de vue lumière naturelle, elle est meilleure car elle apporte de l'éclairage au cœur de la zone Sud du bâtiment.
- Son utilisation en continu est par contre hautement probable : sa situation à l'articulation des espaces la rend difficilement séparable !
- En intégrant les critères climatiques, énergétiques et fonctionnels, elle devrait être conçue comme un espace vitré chauffé ($k_{vitrage}$ < 1.3 W/m^2, K, $k_{profilé}$ < 3 W/m^2, K) et occupé en continu (protection solaire efficace et pratique, ventilation naturelle performante en mi-saison aussi).

SERRE INCLUSE – ATRIUM

- Sa fonction énergétique-thermique ne se justifie que si le bâtiment est profond (> 10 - 12 m). Elle pourrait ainsi faciliter la ventilation naturelle des espaces centraux.
- L'apport solaire est très faible en hiver et maximum en été. Le risque de surchauffe est élevé.
- L'apport de lumière est par contre très élevé (voir chapitre 5.8 : Eclairage naturel). Ça devrait être la fonction première de cet espace : apporter de la lumière.
- Il est encore plus illusoire de croire que cette « serre » ne sera pas chauffée en permanence. Seule sa transformation en véritable patio non couvert lui éviterait d'être chauffée !
- Mis à part les solutions techniques évoquées pour la serre semi-incluse au niveau des vitrages, le moyen de la rendre performante est de la concevoir comme un véritable puits de lumière (voir chapitre 5.8 : Eclairage naturel), de l'utiliser comme un moteur (colonne d'air chaud) pour améliorer la ventilation naturelle des espaces contigus. Sa fonction devrait aussi être compatible avec des amplitudes plus marquées de température (circulation horizontale et verticale, séjour temporaire, hall d'entrée, exposition).
- Son toit pourrait offrir une prise de soleil directionnelle vers le Sud : sheds ouverts au Sud par exemple.

Figure 6.2.4 : Elément solaire passif et organisation spatiale – l'exemple de la serre (suite).

Annexes

A1	**Bibliographie**	**141**
A2	**Analyse du site**	**145**
A4	**Performances**	**167**
A5	**Concept énergétique : principes**	**173**

A1. Bibliographie

Les ouvrages suivants ont servi à l'élaboration de ce manuel. Ils sont classés par grands thèmes. La plupart abordant l'ensemble des problèmes rencontrés, il est donc difficile de les classer.

Abréviations utilisées

CIE:	Commission internationale de l'éclairage
EPFL – ITB:	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de technique du bâtiment
HBT:	Ecole polytechnique fédérale de Zürich, Hochbautechnik Solararchitektur
ISM:	Institut suisse de météorologie, Zürich
OFEN – BEW:	Office fédéral de l'énergie
OFQC:	Office fédéral des questions conjoncturelles
PACER	Programme d'action «Energies renouvelables»
RAVEL:	Programme d'action «Utilisation rationnelle de l'énergie électrique»
SIA:	Société suisse des ingénieurs et architectes

Ouvrages généraux, manuels, démarche globale en architecture climatique

V. Olgyay
Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism
Princeton University Press, Princeton 1963

D. Watson, K. Labs
Climatic building design, energy-efficient building principles and practice
McGraw Hill Book Company, New York 1983

Architecture et climat, centre de recherches en architecture, université catholique de Louvain (Belgique)
Energy concious design, a primer for architects
Batsford Limited, London 1992

N.K. Bansal, G. Hauser, G. Minke
Passive building design, a handbook of natural climatic control
Elsevier, Amsterdam 1994

B. Stein, J.S. Reynolds, W.J. McGuinness
Mechanical and electrical equipment for buildings
John Wiley & Sons, New York 1986

N. Lechner
Heating cooling lighting, Design methods for architects
John Wiley & Sons, New York 1991

G.Z. Brown
Sun, wind, and light, architectural design strategies
John Wiley & Sons, New York 1985

B. Givoni
L'homme, l'architecture et le climat
Editions du moniteur, Paris 1978

V. Olgyay, A. Olgyay
Solar control and shading device
Princeton University Press, Princeton 1957

P. Lavigne, P. Brejon, P. Fernandez
Architecture climatique
Edisud, Aix-en-Provence 1994

O.H. Koenigsberger, T.G. Ingersoll, S.V. Szokolay
Manual of tropical housing and building
Longman, London 1973

Ouvrages généraux, manuels, démarche globale en architecture orientée solaire

E. Mazria
Le guide de l'énergie solaire passive
Editions Parenthèses, Roquevaire 1981

EPFL - ITB - LESO
Le soleil, chaleur et lumière dans le bâtiment
SIA D 056, Zürich 1990

J.D. Balcomb, C.E. Kosiewicz, G.S. Lazarus, R.D. McFarland, W.O. Wray
Passive Solar Design Handbook, volumes 1-3
DOE USA, Washington 1982

M. Zimmerman
Handbuch der Passiven Sonnenenergienutzung
SIA D010 Zürich 1986

Ouvrages généraux, manuels, démarche globale en architecture orientée solaire (suite)

S. Yannas
Solar energy and housing design, 2 volumes
Architectural Association, London 1994

P. Bardou, V. Arzoumanian
Archi de soleil
Editions Parenthèses, Roquevaire 1978

J.L. Izard, A. Guyot
Archi bio
Editions Parenthèses, Roquevaire 1979

W. Weber, R. Contini Knobel, J.C. Enderlin, P. Galinelli, B. Lachal, H. Marti, P. Minder, P. Schweizer
Soleil et architecture, guide pratique pour le projet
OFQC PACER, Berne 1991

Divers auteurs
Energy in architecture, The European Passive Solar Handbook, CEE
Batsford Limited, London 1992

IEA Solar Task 11
Passive solar commercial & institutional buildings, A Sourcebook of Examples and Design Insights
John Wiley & Sons, New York 1994

M. & H. Wachberger
Mit der Sonne bauen
Callwey München 1983

LOG ID: D. Schempp, M. Krampen, F. Möllring
Solares Bauen, Stadtplanung - Bauplanung
Rudolph Müller, Köln 1992

M. Sala, L. Ceccherini Nelli
Technologie solari, manueli di assistenza tecnica
Alinea editrice, Firenze 1993

IEA Solar Task 19
Solar Air Heated Buildings, working document
HBT Solarchitektur, Zürich 1992

G. Guenon, J.C. Kalmanovitch
Des serres pour habiter
Editions du Moniteur, Paris 1980

LOG ID: J. Frantz, S. Hanke, M. Krampen, D. Schempp
Wintergärten, das Erlebnis, mit der Natur zu Wohnen, Planen bauen und gestalten
Falken Verlag, Niedernhausen 1986

Ouvrages généraux, énergétique du bâtiment

R. Sagelsdorff, T. Frank
Isolation thermique et maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, Elément 29
Industrie suisse de la terre cuite, Zürich 1993

SIA
L'énergie dans le bâtiment SIA 380/1
SIA, Zürich 1988

P. Chiche, M. Herzen
Architecture et démarche énergétique
Editions J.R.Müller, Orbe 1985

R. Dehausse
Energétique des bâtiments, des secteurs tertiaires et résidentielles
Pyc éditions, Paris 1988

Exemples ou mesure de bâtiments solaires passifs

A. Eggenberger
Thermische Messungen am erdgeschützen Wohnhaus in Wald mit verglaster Veranda
BEW + Eggenberger Bauphysik AG, Bern 1989

M. Kunz
Zwei Solarhäuser unter der Lupe D058
SIA, Zürich 1990

A. Gütermann, P. Krüsi
Solarhaus Lenherr, Schwyz, Wintergarten-Fenster-kollektor-Kombination mit Boden-Wandspeicher
HBT Solarachitektur, Zürich 1992

A Binz, A. Gütermann
Die Optimierung des passiven und hybriden Sonnenenergienutzung an drei Projekten, IEA Task 8
BEW + NEFF, Bern 1986

P. Schlegel, C. Filleux
Passive Sonnenhäuser D011
SIA, Zürich 1987

Y. Brügger, D. Chuard, P. Jaboyedoff
Nouvelle université de Neuchâtel, mesure de la serre
BEW + HBT Solararchitektur, Zürich 1990

Eclairage naturel

F. Moore
Concepts and practice of architectural daylighting
Van Nostrand Reinhold Company, New York 1985

Eclairage naturel (suite)

Divers auteurs
L'éclairage dans les bureaux, l'industrie et les surfaces de vente, RAVEL 4 fascicules N° 724.329.1 à 4f
OFQC, RAVEL, Berne 1994

Divers auteurs
La lumière naturelle à bon escient, RAVEL publication N° 724.306 d/f
OFQC, RAVEL, Berne 1995

Y. Golay
Etudes typologiques, Programme LUMEN, «Lumière naturelle et énergétique du bâtiment»
EPFL – ITB, Lausanne 1994

Divers auteurs
Daylighting in architecture, An European Reference Book, CEE
James & James, London 1993

CIE
Daylight, Commission Internationale de l'Eclairage publication CIE N° 16
CIE 1970

Divers auteurs
Le travail à l'écran de visualisation
CNA, Lucerne 1991

P. Chuard, D. Chuard
L'éclairage dans les écoles, Projet de recherche EFFENS
OFEN 1992

P. Chauvel, J.B. Collins, R. Dogniaux, J. Longmore
Glare from windows: current view of problem
Lighting Research and Technology Vol 14 N°1
1982

Divers auteurs
Niveaux thermiques de la Suisse
4 cartes au 1: 200 000
Service topographique fédéral, Berne 1975

T. Baumgartner, U. Steinemann, W. Geiger
Meteodaten für die Haustechnik
SIA D012, Zürich 1987

M. Bouët
Climat et météorologie de la Suisse romande
Payot, Lausanne 1972

M. Schüepp, M. Bouët, M. Bider, C. Urfer
Klimatologie der Schweiz,
Regionale Klimabeschreibungen
ISM, Zürich 1978

M. Schüepp
Klimatologie der Schweiz,
Wind
ISM, Zürich 1973

W. Kirchhofer
Atlas climatologique de la Suisse
ISM, Zürich 1982 à 1995

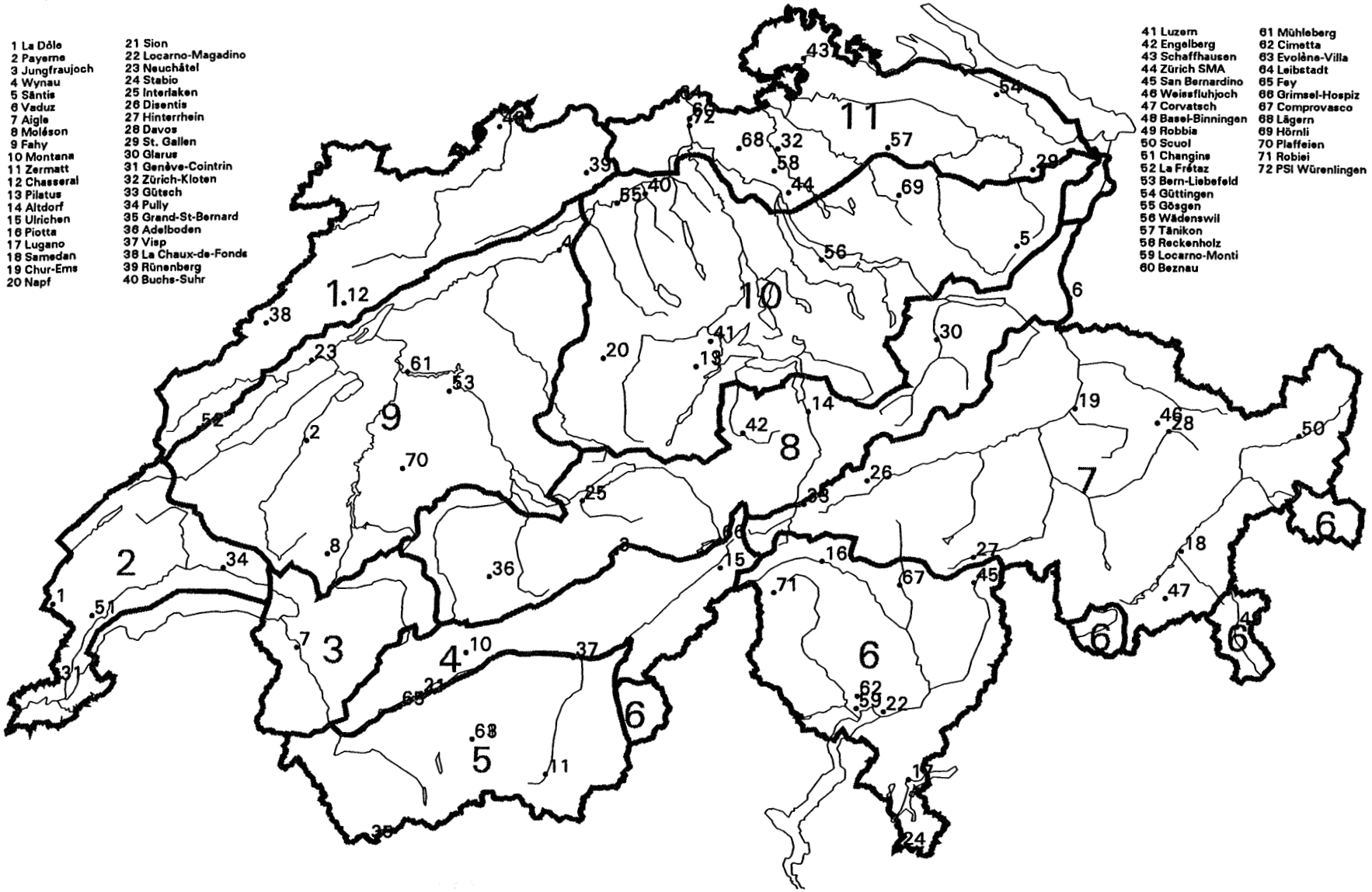
A2. Analyse du site

A2.1 Régions climatiques de la Suisse 146
A2.2 Variation de la température moyenne en fonction de la région climatique et de l'altitude 148
A2.3 Variation du rayonnement global horizontal en fonction de la région climatique et de l'altitude 151
A2.4 Course solaire en projection cylindrique 154
A2.5 Course solaire en projection stéréographique 155
A2.6 Course solaire: valeurs numériques 156
A2.7 Cadran solaire 157
A2.8 Caculateur d'ombre en projection cylindrique 158
A2.9 Calculateur d'ombre en projection stéréographique 159
A2.10 Logiciel de calcul METEONORM'95 160
A2.11 Etude d'ensoleillement avec le logiciel AUTOCAD 162
A2.12 Etude d'ensoleillement avec le logiciel ARCHICAD 164

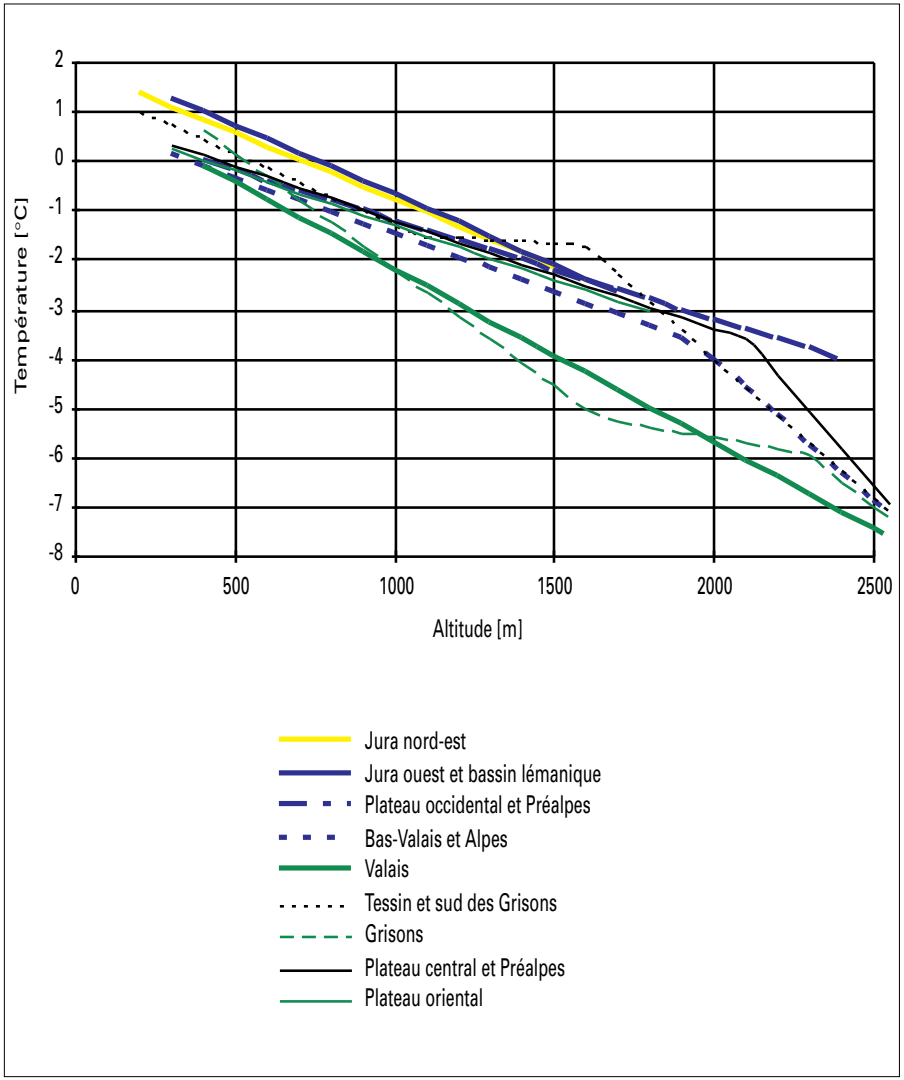
A2.1 Régions climatiques de la Suisse

1 Jura nord-est
2 Jura ouest et bassin lémanique
3 Bas-Valais et Alpes occidentales
4 Valais nord et Haut-Valais
5 Valais sud
6 Tessin et sud des Grisons
7 Grisons (y compris Engadine)
8 Alpes bernoises, centrales et orientales
9 Plateau occidental et Préalpes
10 Plateau central et Préalpes
11 Plateau oriental

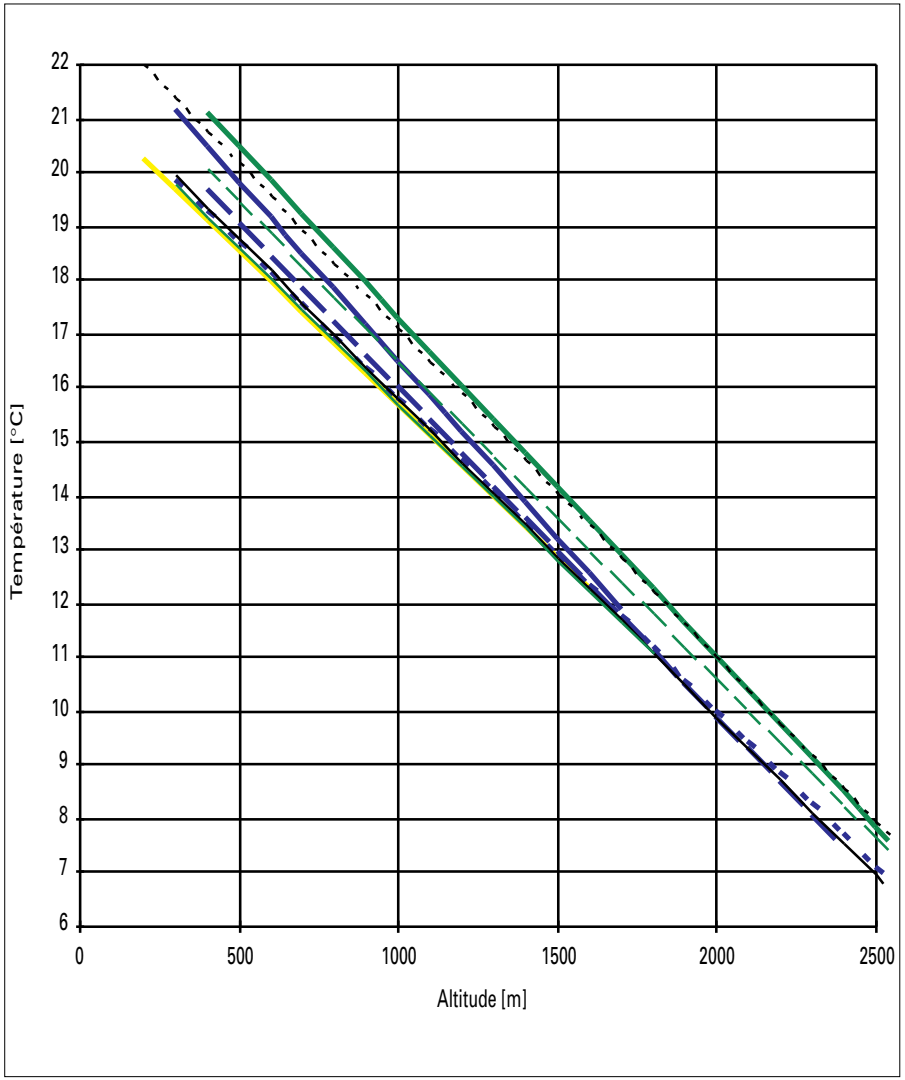
Stations Anetz avec les zones d'ensoleillement et de température



A2.2 Variation de la température moyenne en fonction de la région climatique et de l'altitude

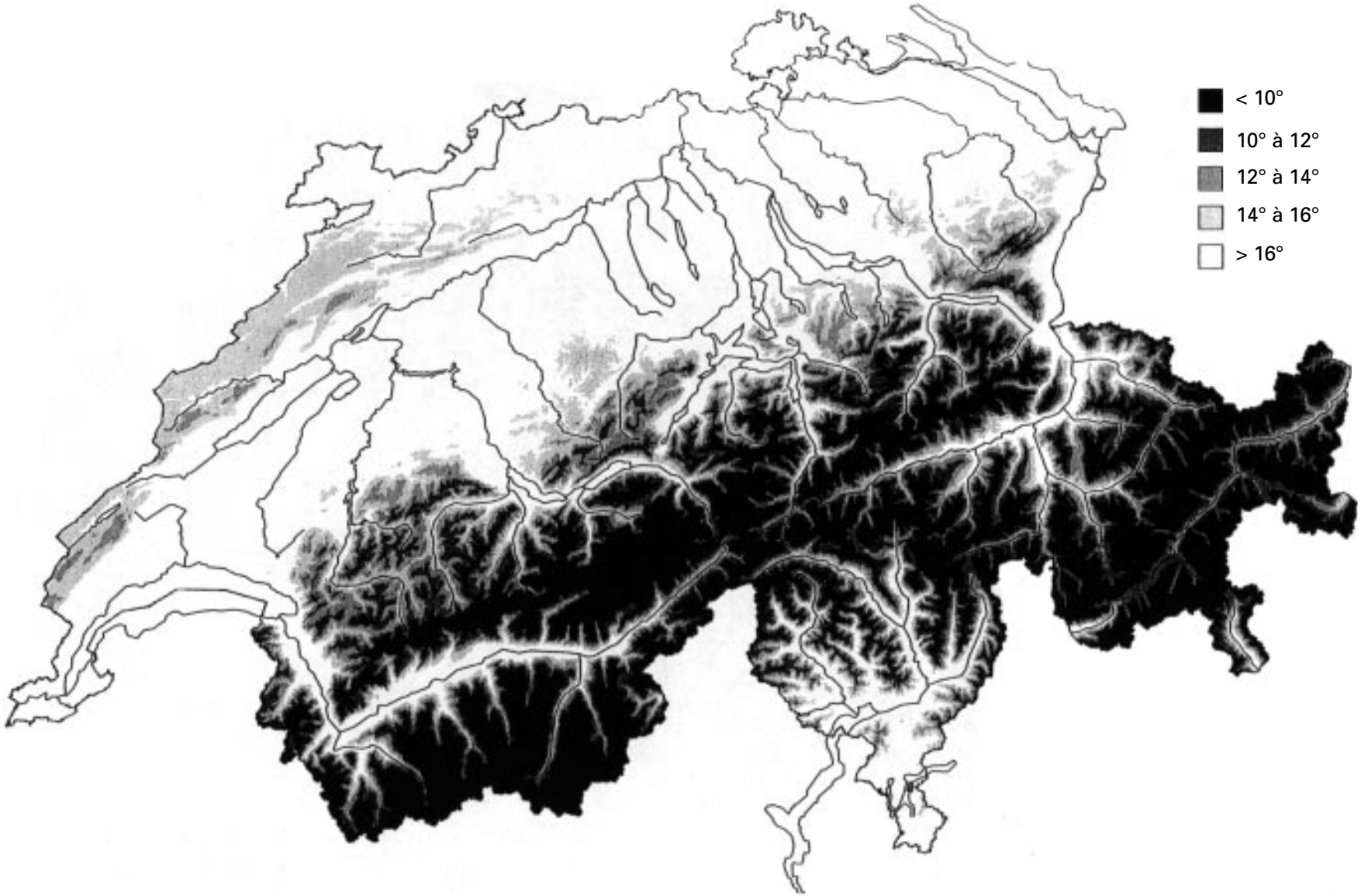


Janvier



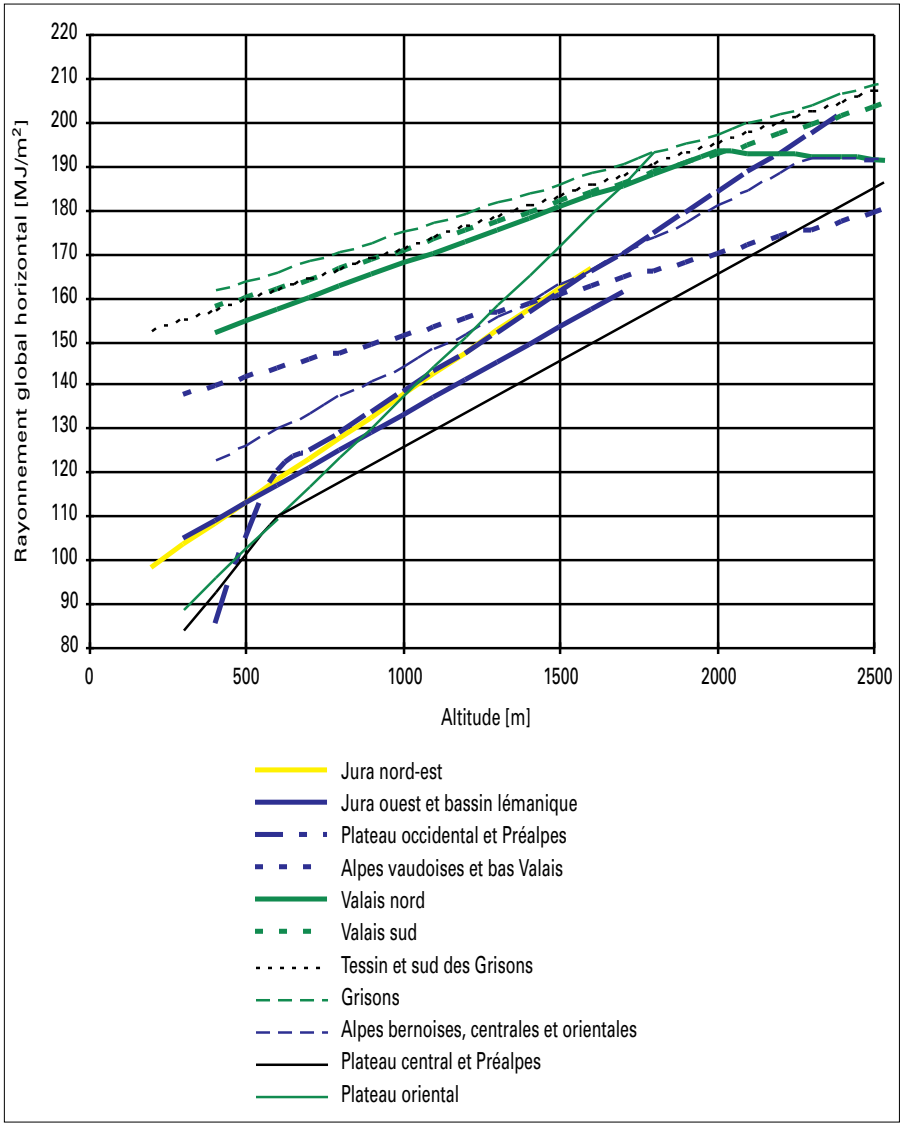
Juillet

Température en janvier [METEONORM]

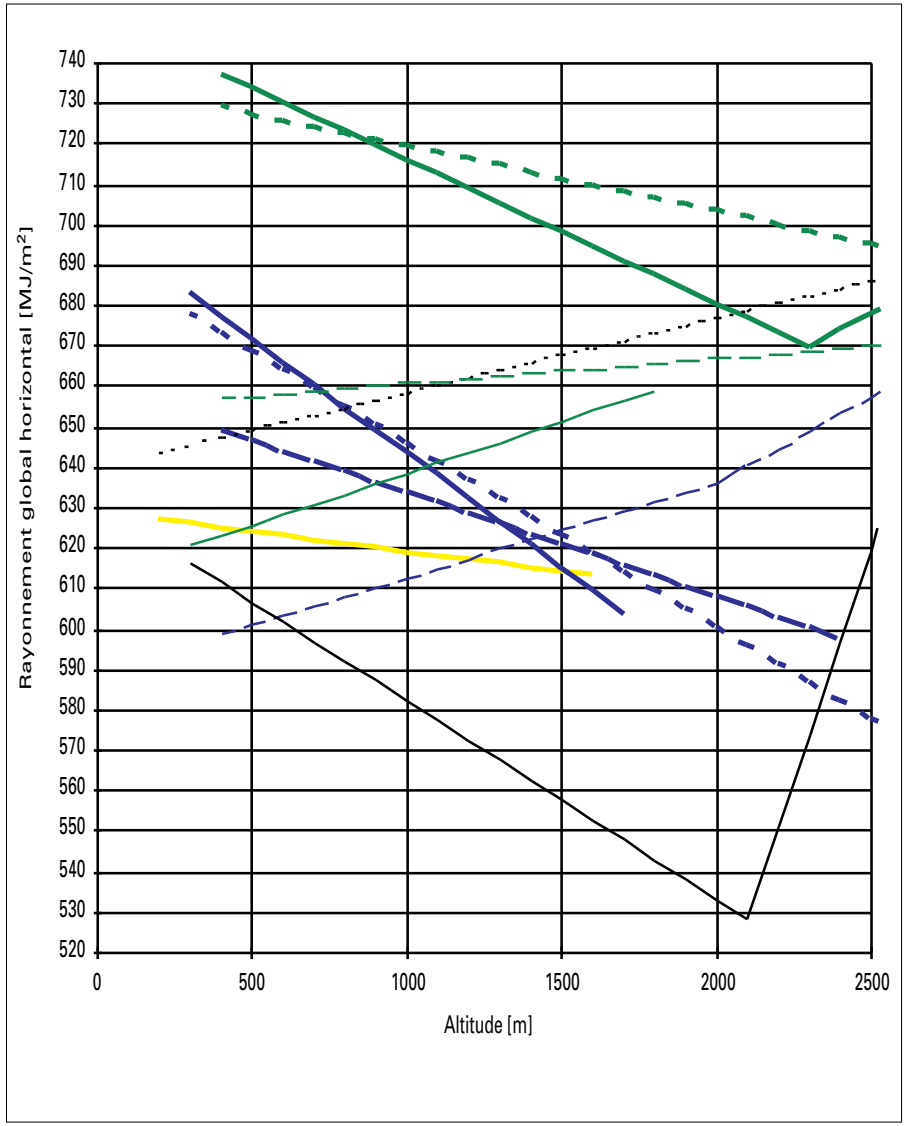


Température en juillet [METEONORM]

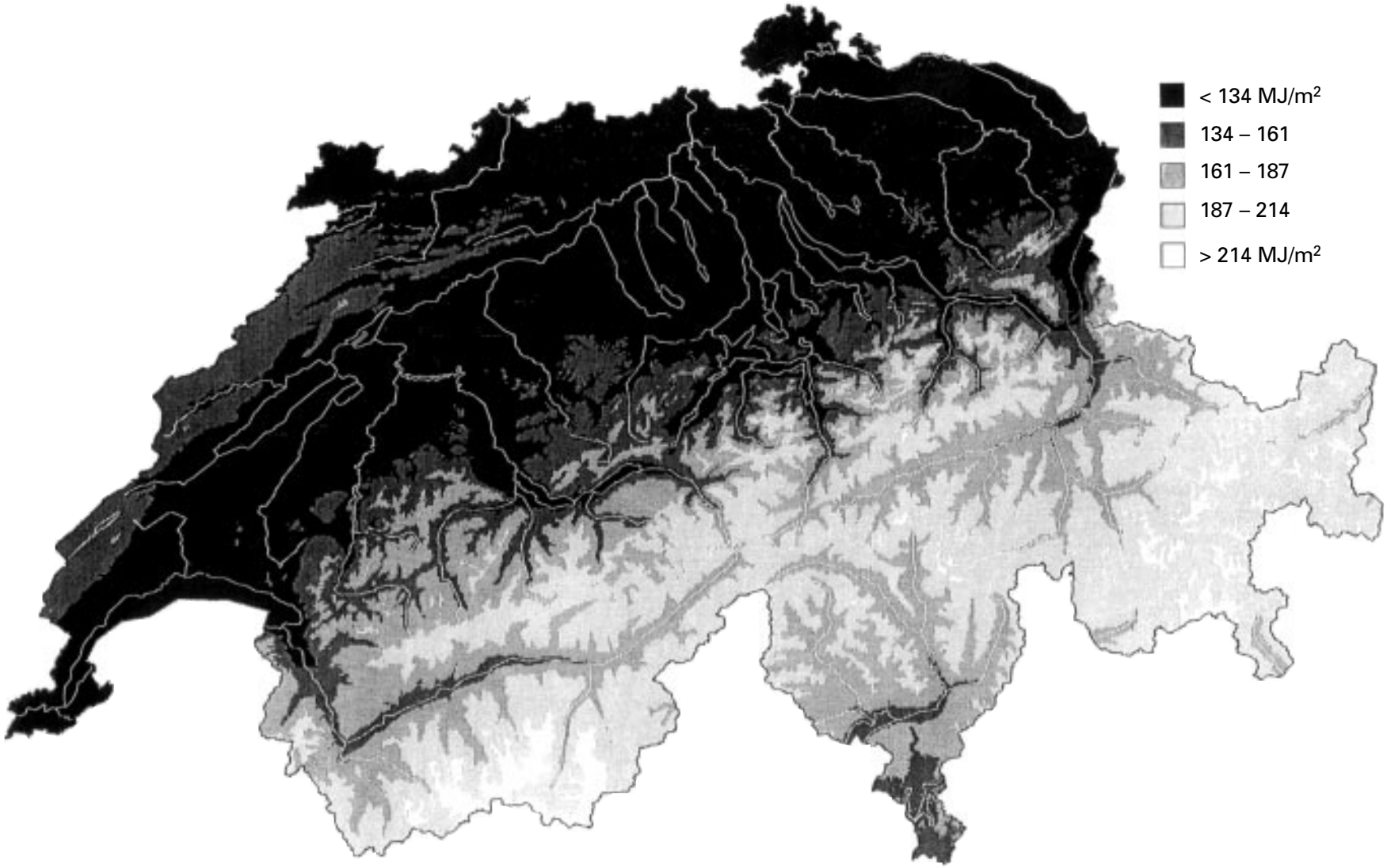
A2.3 Variation du rayonnement global horizontal en fonction de la région climatique et de l'altitude



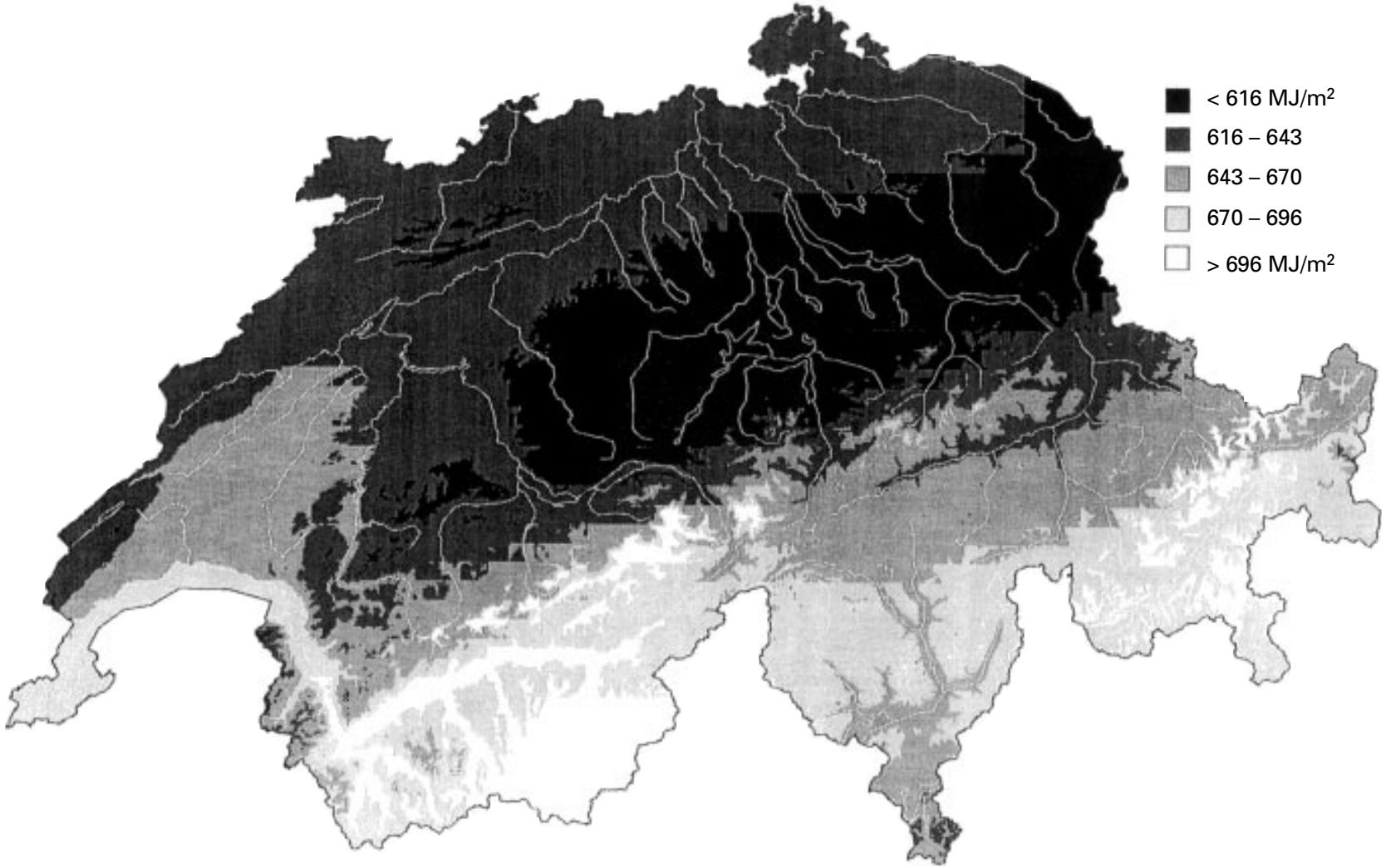
Janvier



Juillet

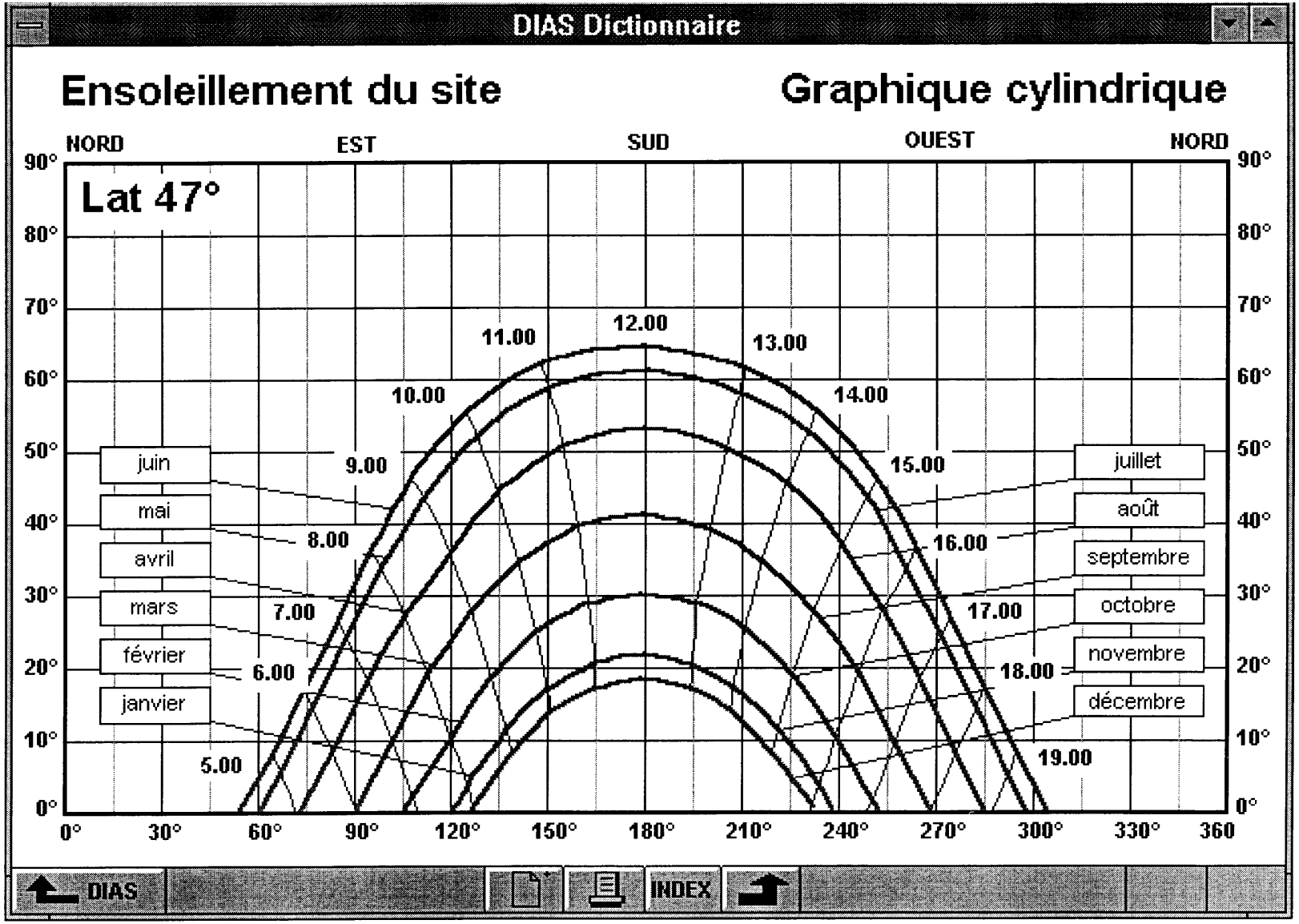


Rayonnement global horizontal en janvier

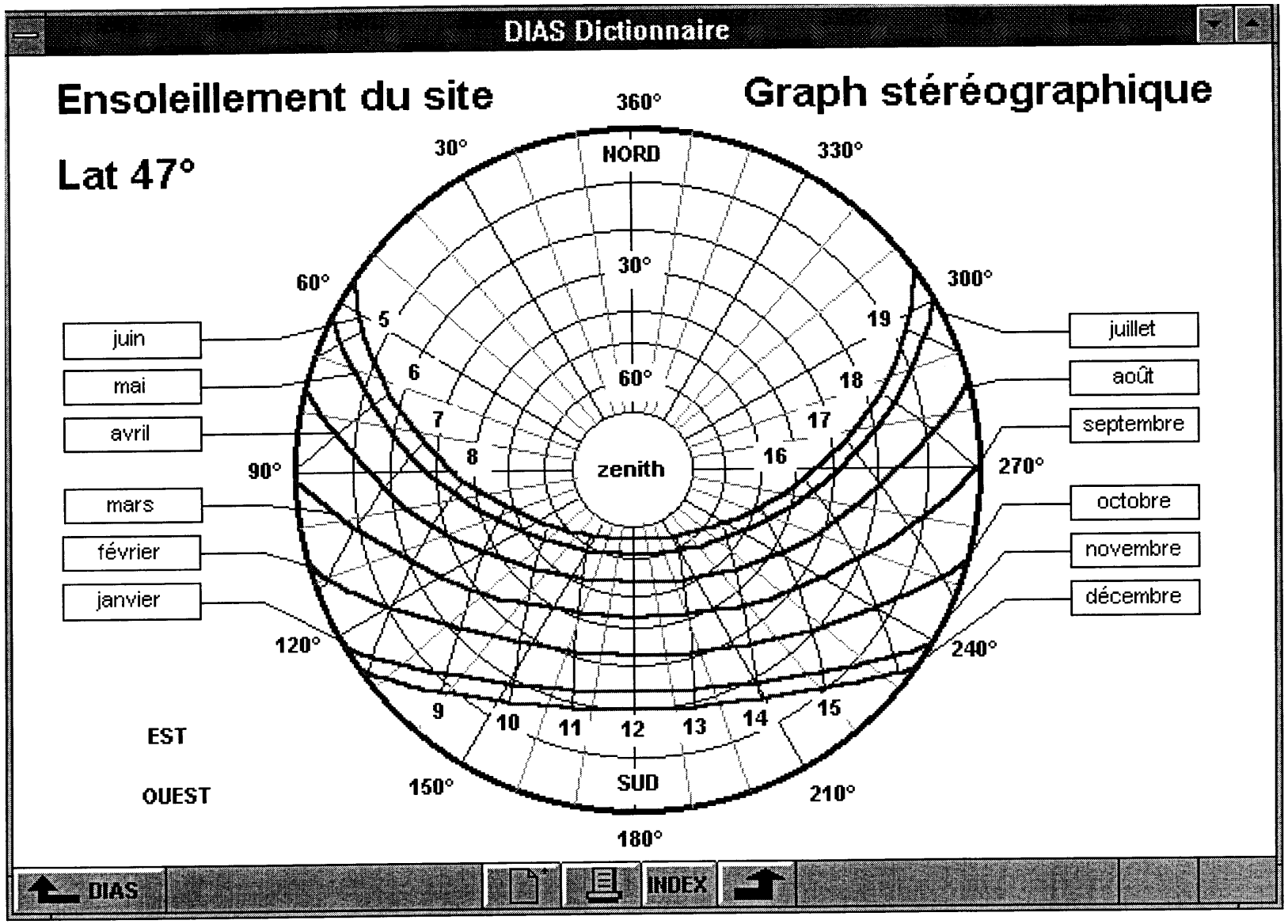


Rayonnement global horizontal en juillet [METEONORM]

A2.4 Course solaire en projection cylindrique
(heure solaire)



A2.5 Course solaire en projection stéréographique
(heure solaire)

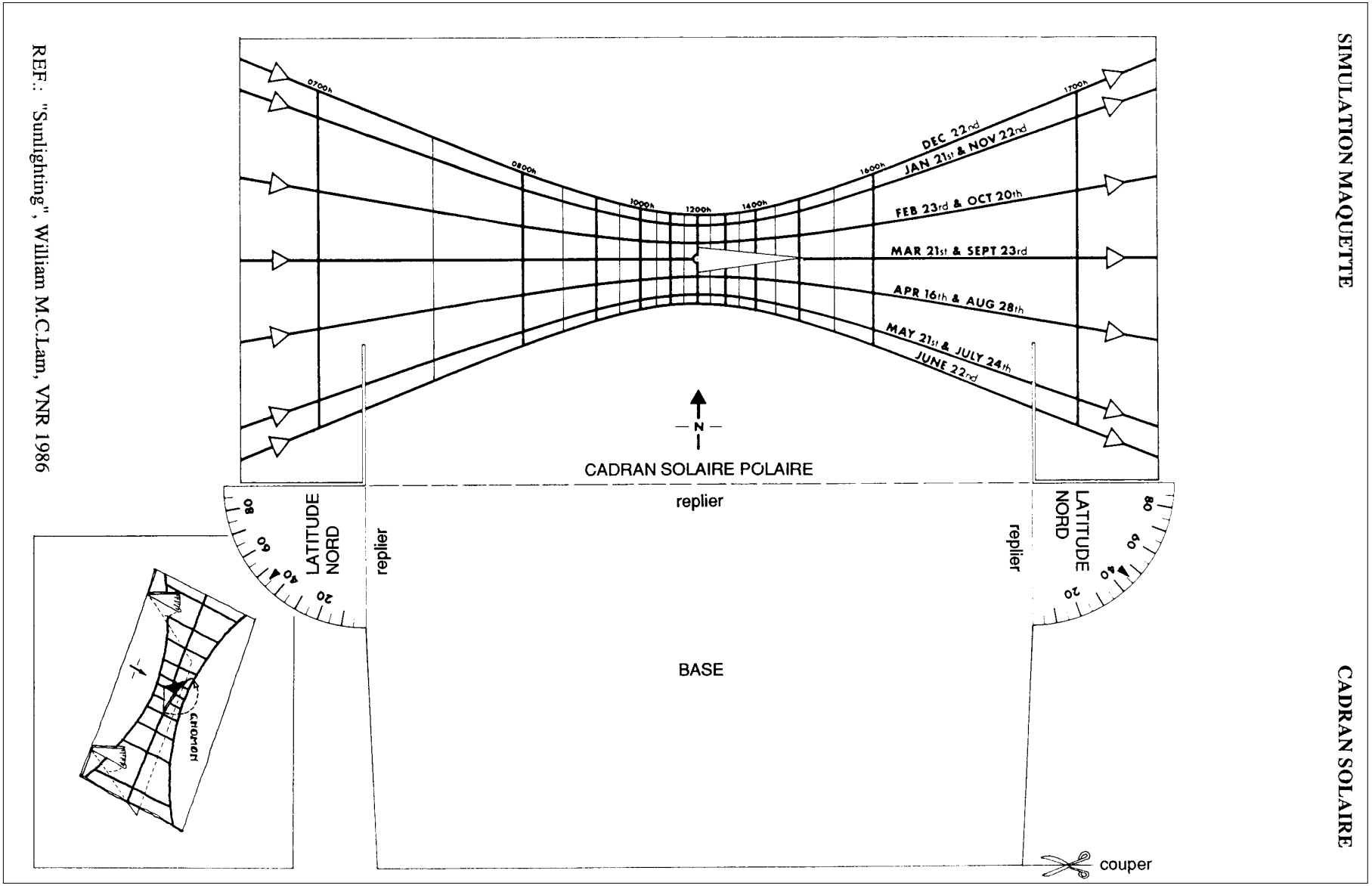


A2.6 Course solaire : valeurs numériques

		6 h		7 h		8 h		9 h		10 h		11 h		**12 h**		13 h		14 h		15 h		16 h		17 h		18 h		H.L - H.S.
Mois	Jour	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	**az.**	**ht.**	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	az.	ht.	
Janv.	1					127	2	139	9	151	15	165	19	**180**	**20**	195	19	209	15	221	9	233	2					35 min
	11					126	3	138	10	151	16	165	20	**180**	**21**	195	20	209	16	222	10	234	3					40 min
	21					125	4	137	12	150	18	165	22	**180**	**23**	195	22	210	18	223	12	235	4					43 min
Févr.	1					123	7	136	14	149	21	164	25	**180**	**26**	196	25	211	21	224	14	237	7					46 min
	11					122	9	134	17	148	24	164	28	**180**	**29**	196	28	212	24	226	17	238	9					46 min
	21			108	2	120	12	132	20	147	27	163	31	**180**	**33**	197	31	213	27	228	20	240	12	252	2			46 min
Mars	1			106	5	118	14	131	23	145	29	162	34	**180**	**36**	198	34	215	29	229	23	242	14	254	5			45 min
	11			104	7	115	17	128	26	144	33	161	38	**180**	**39**	199	38	216	33	232	26	245	17	256	7			42 min
	21	90	0	101	10	113	20	126	29	142	36	160	41	**180**	**43**	200	41	218	36	234	29	247	20	259	10	270	0	40 min
Avril	1	87	3	98	14	110	23	123	33	139	40	158	46	**180**	**48**	202	46	221	40	237	33	250	23	262	14	273	3	1 h 36 min *
	11	84	6	95	16	107	26	121	36	137	44	157	49	**180**	**51**	203	49	223	44	239	36	253	26	265	16	276	6	1 h 33 min *
	21	82	9	93	19	104	29	118	39	134	47	155	53	**180**	**55**	205	53	226	47	242	39	256	29	267	19	278	9	1 h 31 min *
Mai	1	80	11	90	21	102	31	115	41	132	50	154	56	**180**	**58**	206	56	228	50	245	41	258	31	270	21	280	11	1 h 29 min *
	11	78	13	88	23	99	33	113	43	129	52	152	58	**180**	**61**	208	58	231	52	247	43	261	33	272	23	282	13	1 h 28 min *
	21	76	15	86	25	97	35	111	45	127	54	150	61	**180**	**63**	210	61	233	54	249	45	263	35	274	25	284	15	1 h 29 min *
Juin	1	74	16	85	26	96	36	109	46	125	55	149	62	**180**	**65**	211	62	235	55	251	46	264	36	275	26	286	16	1 h 30 min *
	11	74	17	84	27	95	37	108	47	124	56	148	63	**180**	**66**	212	63	236	56	252	47	265	37	276	27	286	17	1 h 31 min *
	21	74	17	84	27	95	37	107	47	124	56	148	64	**180**	**66**	212	64	236	56	253	47	265	37	276	27	286	17	1 h 33 min *
Juil.	1	74	17	84	27	95	37	108	47	124	56	148	63	**180**	**66**	212	63	236	56	252	47	265	37	276	27	286	17	1 h 35 min *
	11	74	16	85	26	96	36	109	46	125	56	149	63	**180**	**65**	211	63	235	56	251	46	264	36	275	26	286	16	1 h 37 min *
	21	76	15	86	25	97	35	110	45	127	54	150	61	**180**	**64**	210	61	233	54	250	45	263	35	274	25	284	15	1 h 38 min *
Août	1	77	13	88	23	99	34	112	43	129	52	152	59	**180**	**61**	208	59	231	52	248	43	261	34	272	23	283	13	1 h 38 min *
	11	79	11	90	21	102	32	115	41	132	50	153	56	**180**	**58**	207	56	228	50	245	41	258	32	270	21	281	11	1 h 37 min *
	21	82	9	92	19	104	29	118	39	134	47	155	53	**180**	**55**	205	53	226	47	242	39	256	29	268	19	278	9	1 h 35 min *
Sept.	1	84	6	95	16	107	26	121	36	137	44	157	49	**180**	**51**	203	49	223	44	239	36	253	26	265	16	276	6	1 h 32 min *
	11	87	3	98	14	110	23	123	33	139	40	158	46	**180**	**48**	202	46	221	40	237	33	250	23	262	14	273	3	1 h 29 min *
	21	90	1	101	11	112	20	126	29	141	37	160	42	**180**	**44**	200	42	219	37	234	29	248	20	259	11	270	1	1 h 25 min *
Oct.	1			103	8	115	17	128	26	143	33	161	38	**180**	**40**	199	38	217	33	232	26	245	17	257	8			1 h 22 min *
	11			106	5	117	14	130	23	145	30	162	34	**180**	**36**	198	34	215	30	230	23	243	14	254	5			1 h 19 min *
	21			108	2	120	11	132	20	147	26	163	31	**180**	**32**	197	31	213	26	228	20	240	11	252	2			1 h 17 min *
Nov.	1					122	9	134	17	148	23	164	27	**180**	**29**	196	27	212	23	226	17	238	9					16 min
	11					124	6	136	14	149	20	164	24	**180**	**26**	196	24	211	20	224	14	236	6					16 min
	21					125	4	137	12	150	18	165	22	**180**	**23**	195	22	210	18	223	12	235	4					18 min
Déc.	1					126	3	138	10	151	16	165	20	**180**	**21**	195	20	209	16	222	10	234	3					21 min
	11					127	2	139	9	152	15	165	19	**180**	**20**	195	19	208	15	221	9	233	2					25 min
	21					127	1	139	9	152	15	166	18	**180**	**20**	194	18	208	15	221	9	233	1					30 min
	31					127	1	139	9	152	15	165	18	**180**	**20**	195	18	208	15	221	9	233	1					35 min

Azimut (az.) et hauteur (ht.) du soleil en fonction de la date et de l'heure solaire. L'azimut sud est à 180°.
H.L.-H.S. est l'écart entre l'heure légale et l'heure solaire (* désigne la période de l'heure d'été).
Par exemple le 11 février à 9 h (heure solaire), le soleil est au sud-est (az. = -134), à 17° au-dessus de l'horizon (ht. = 17) et l'heure légale est 9h46.

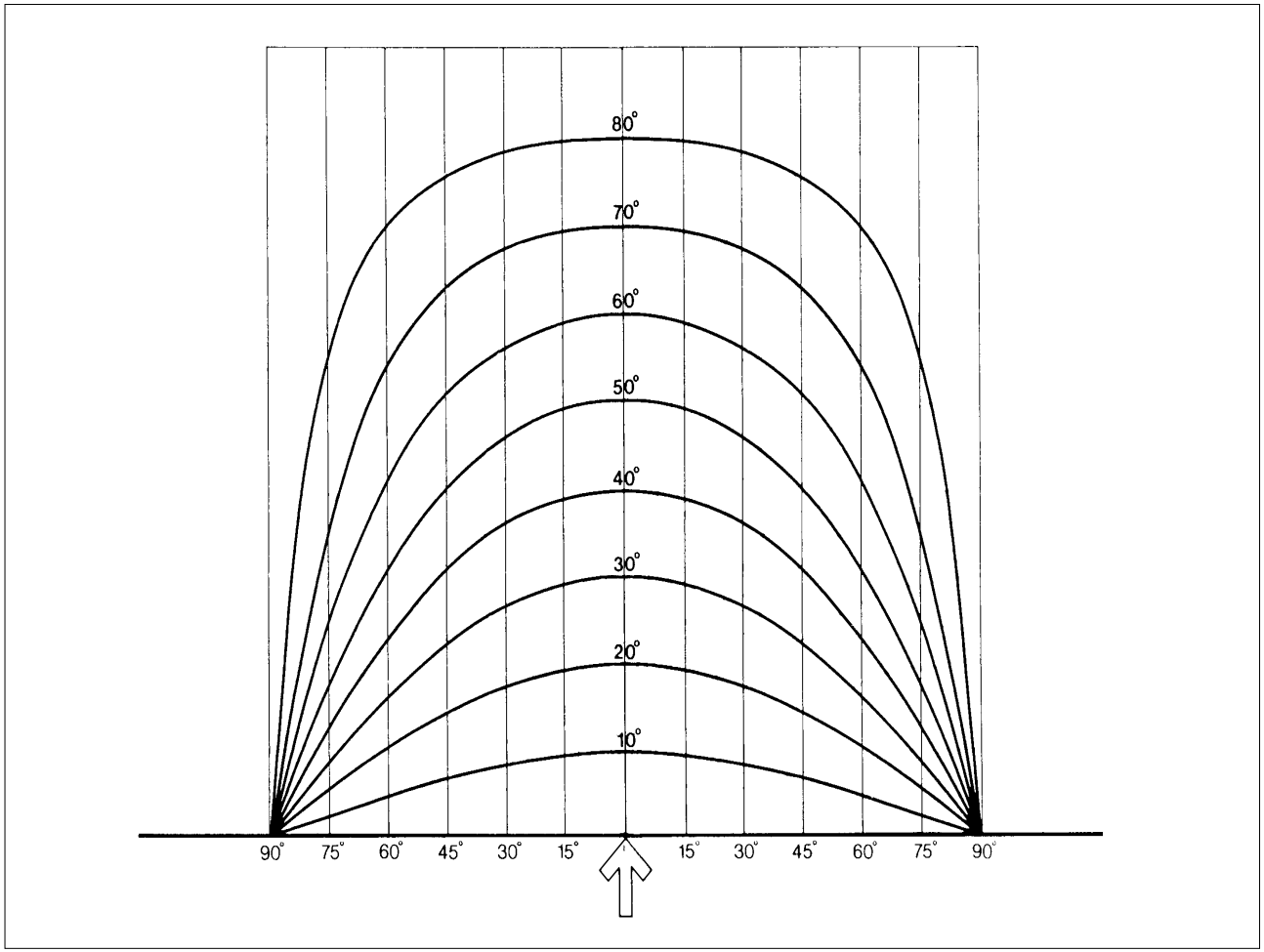
A2.7 Cadran solaire



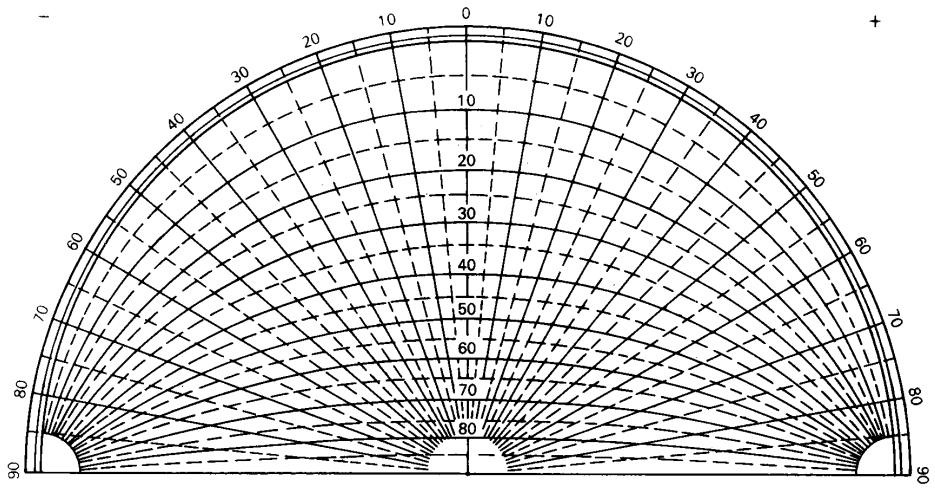
REF.: "Sunlighting", William M.C.Lam, VNR 1986

Repris de la Boîte à outils du cours PACER: Soleil et architecture – Guide pratique pour le projet

A2.8 Calculateur d'ombre en projection cylindrique



A2.9 Calculateur d'ombre en projection stéréographique



A2.10 Logiciel de calcul METEONORM'95

METEONORM est un procédé de calcul du rayonnement reçu par un plan d'orientation quelconque (azimut et inclinaison) en un site quelconque.

Il se compose d'un logiciel et d'un manuel.

Le logiciel peut, à partir de banques de données, fournies par l'Institut suisse de météorologie et d'autres institutions officielles étrangères, calculer pour une année moyenne les valeurs horaires de plusieurs données climatiques (tableau A2.10.1).

Ces valeurs sont calculées pour n'importe quelle commune de Suisse ou, en particulier si le site est éloigné du centre de la commune, tout autre lieu défini par ses coordonnées géographiques (latitude et longitude) ou topographiques (coordonnées X et Y) et son altitude.

Le manuel n'est pas uniquement le mode d'emploi du logiciel. Il décrit aussi de manières détaillées les sources de données, le climat suisse (pour l'ensoleillement et la température) ainsi que toutes les équations physiques régissant les diverses variables climatiques.

Le logiciel METEONORM permet la prise en compte des masques (horizon lointain et proche) pour le lieu dont on désire connaître l'ensoleillement. Il suffit d'introduire la hauteur des obstacles pour chaque azimut (figure A2.10.2). Le programme calcule ensuite pour chaque heure l'effet de cet horizon avant de fournir le rayonnement sur le plan désiré (figure A2.10.3).

METEONORM peut aussi produire des fichiers de données climatiques nécessaires pour les programmes de simulation HELIOS, DOE, SUNCODE, MATCH et PVSYST.

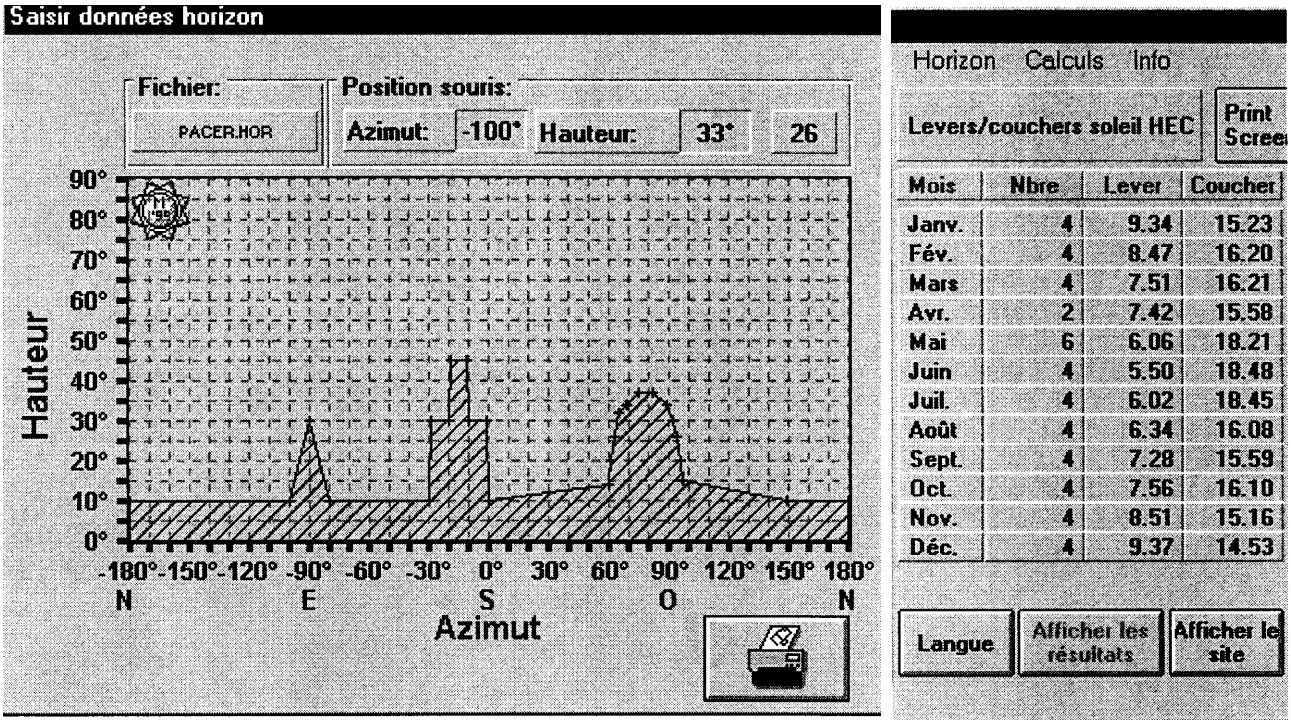
	Valeur mensuelle	Valeur horaire
Rayonnement:	x	x
global horizontal	x	x
diffus horizontal	x	x
direct normal	x	x
global plan quelconque	x	x
diffus plan quelconque	x	x
Nébulosité	x	x
Température de l'air	x	x
Humidité de l'air	x	x
Vitesse du vent	x	x
Direction du vent	–	–
Degrés-jours 20 / 12	x	–

Tableau A2.10.1: Données climatiques fournies par METEONORM

Caractéristiques techniques:

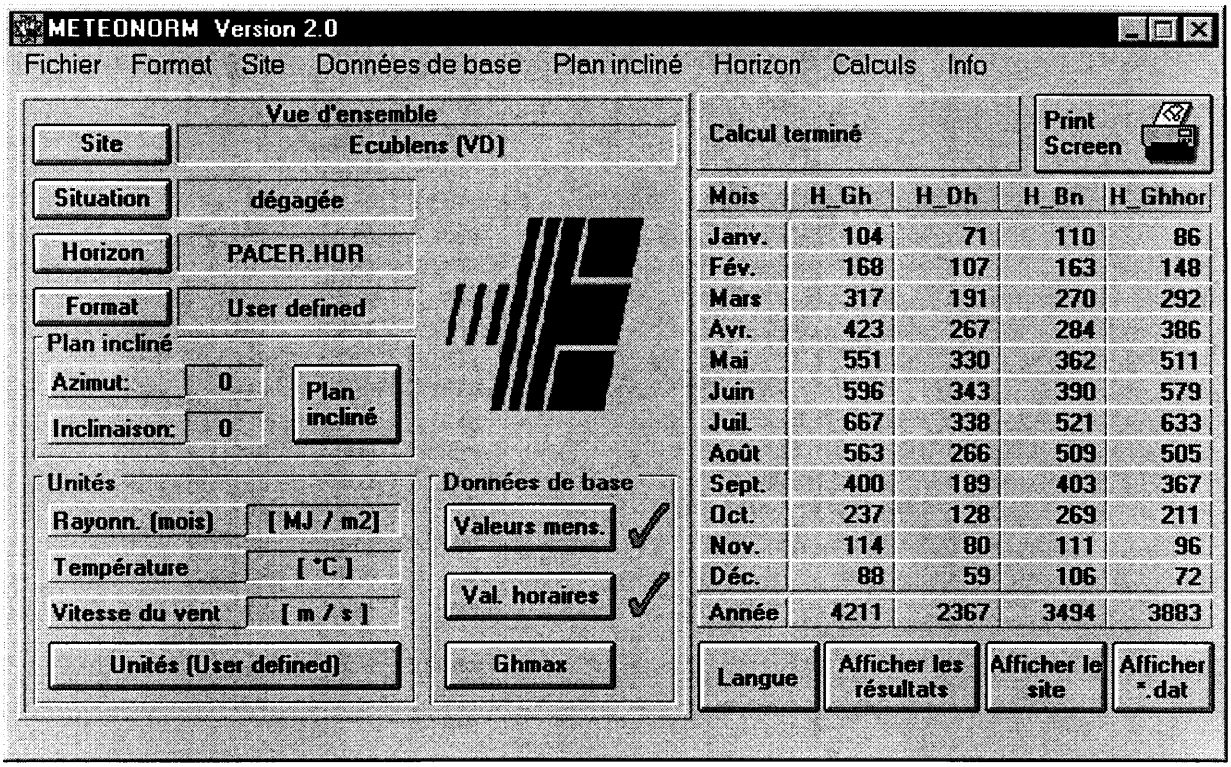
Ordinateur: PC 386 ou plus.
Disque dur: 10 Mo d'espace libre.
Système: Windows 3.1 ou plus.
Langue: français, allemand, italien, anglais

Adresse: Infoenergie, Case postale, 5201 Brugg



Mois	Nbre	Lever	Coucher
Janv.	4	9.34	15.23
Fév.	4	8.47	16.20
Mars	4	7.51	16.21
Avr.	2	7.42	15.58
Mai	6	6.06	18.21
Juin	4	5.50	18.48
Juil.	4	6.02	18.45
Août	4	6.34	16.08
Sept.	4	7.28	15.59
Oct.	4	7.56	16.10
Nov.	4	8.51	15.16
Déc.	4	9.37	14.53

Figure A2.10.2: Introduction des masques (azimut et hauteur) dans METEONORM et heure des levers et couchers de soleil correspondantes.



Mois	H_Gh	H_Dh	H_Bn	H_Ghhor
Janv.	104	71	110	86
Fév.	168	107	163	148
Mars	317	191	270	292
Avr.	423	267	284	386
Mai	551	330	362	511
Juin	596	343	390	579
Juil.	667	338	521	633
Août	563	266	509	505
Sept.	400	189	403	367
Oct.	237	128	269	211
Nov.	114	80	111	96
Déc.	88	59	106	72
Année	4211	2367	3494	3883

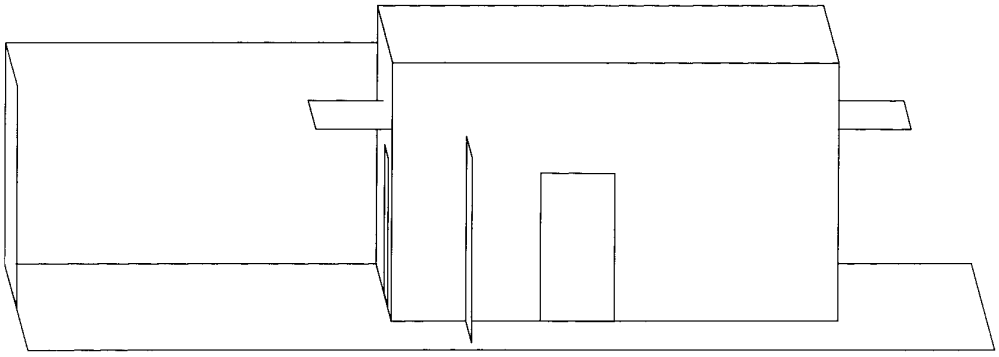
Figure A2.10.3: Calcul des rayonnements mensuels [MJ/m²] par METEONORM: H_Ghhor est le global horizontal compte tenu du masque de la figure A2.10.2, les colonnes précédentes sont calculées sans le masque (H_Gh = global horizontal, H_Dh = diffus horizontal, H_Bn = direct normal).

A2.11 Etude d'ensoleillement avec le logiciel AUTOCAD

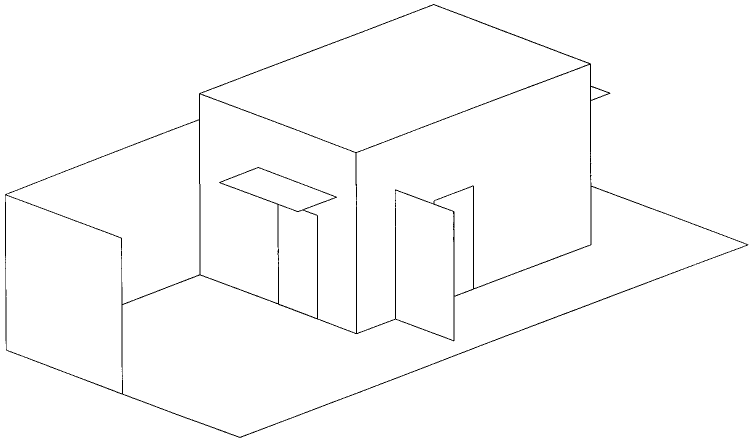
Le contrôle de l'ensoleillement peut être obtenu avec AUTOCAD.

En définissant comme point de vue la direction du soleil, on obtient une vue du bâtiment tel que le verrait le soleil. Tout ce qui est caché est donc à l'ombre.

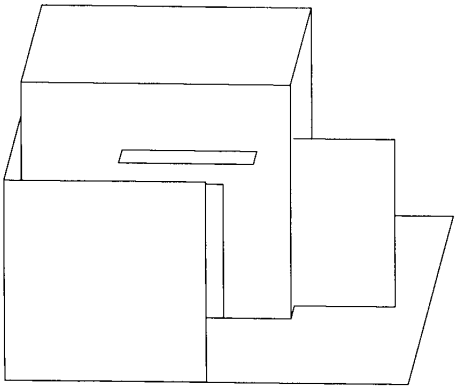
Le logiciel ARC+ permet d'obtenir les mêmes vues que AUTOCAD.



15.1 9h00



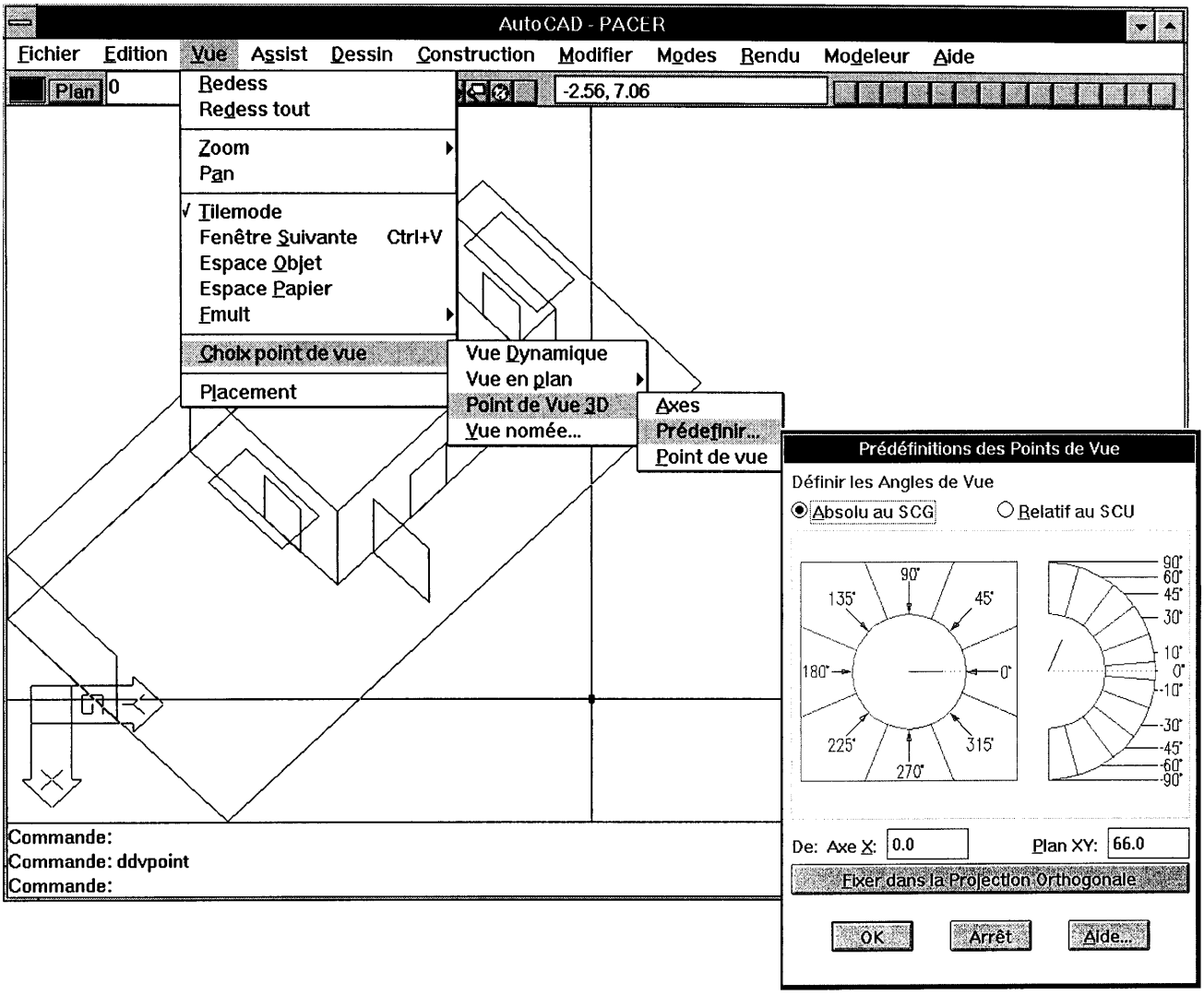
15.1 12h00



15.1 15h00

Marche à suivre

1) Faire une rotation de l'ensemble du bâtiment de sorte que l'axe X indique le nord.
2) Dans le menu:
   «Vue → Choix point de vue → Point de Vue 3D → Prédéfinir… → Prédéfinitions des points de Vue»
   définir les angles de vue en absolu par rapport au SCG:
   – de axe X = azimut,
   – plan XY = hauteur.

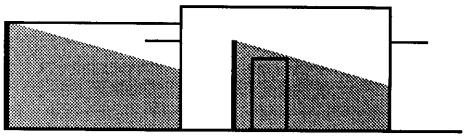


A2.12 Etude d'ensoleillement avec le logiciel ARCHICAD

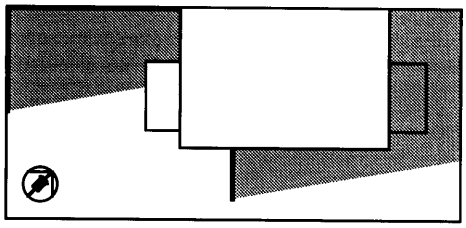
Le contrôle de l'ensoleillement peut être obtenu avec ARCHICAD par la projection des rayons solaires et la visualisation des ombres portées sur le modèle. Il y a donc lieu de choisir un ou plusieurs points de vue suivant l'azimut solaire et la zone que l'on désire contrôler.

On choisira des projections parallèles appropriées, par exemple «élévation» pour des études de façades, «vue de dessus» pour le contrôle des ombres portées au sol, ou encore «perspective cavalière» pour des contrôles d'ensemble.

EXEMPLE ETUDE ENSOLEILLEMENT
(élévation et vue de dessus)



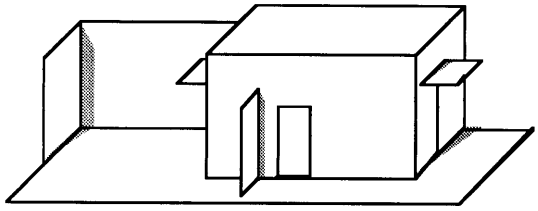
15.1 15h00



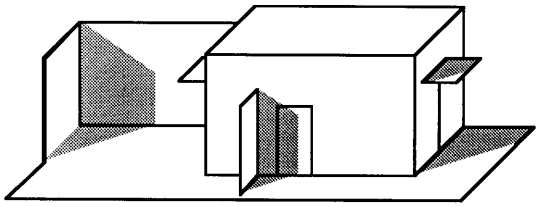
15.1 15h00

EXEMPLE ETUDE ENSOLEILLEMENT
(perspectives cavalières)

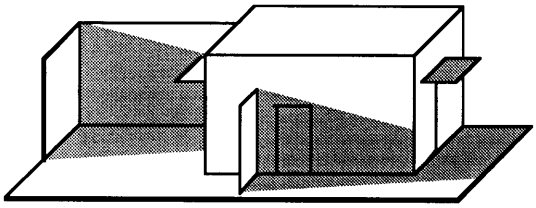
Façades Est et Nord



15.1 9h00

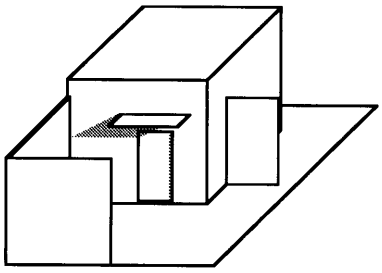


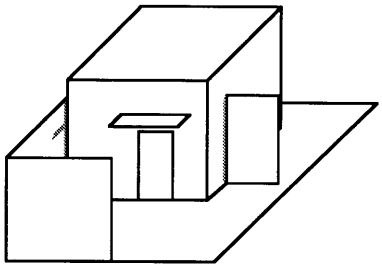
15.1 12h00

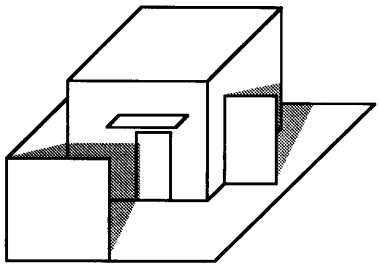


15.1 15h00

Façade Sud

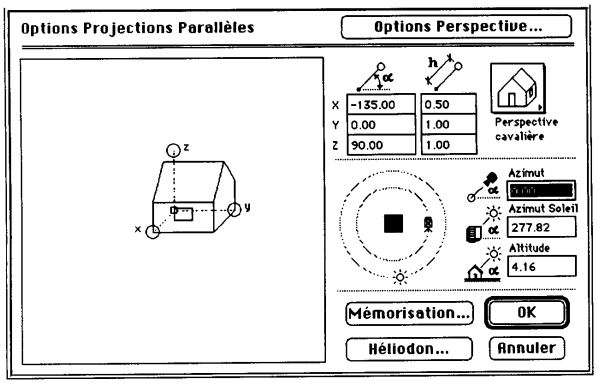






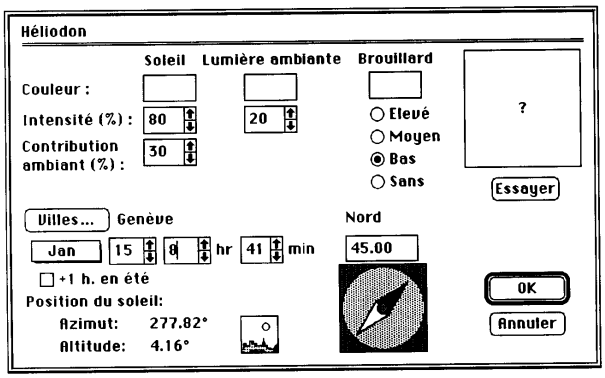
Marche à suivre

1.



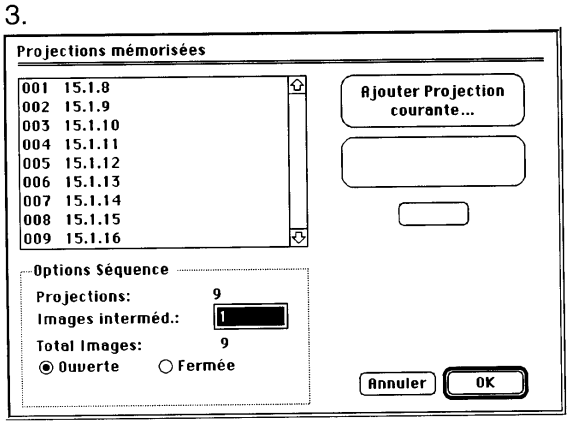
Choisir un point de vue approprié, permettant de visualiser les ombres portées sur la partie du projet étudié.

2.



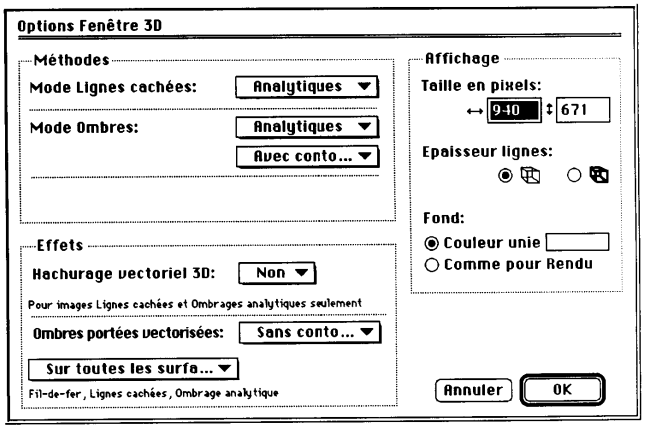
Orienter le Nord correctement par rapport au plan. Choisir le lieu et la date, ainsi que l'heure.

3.



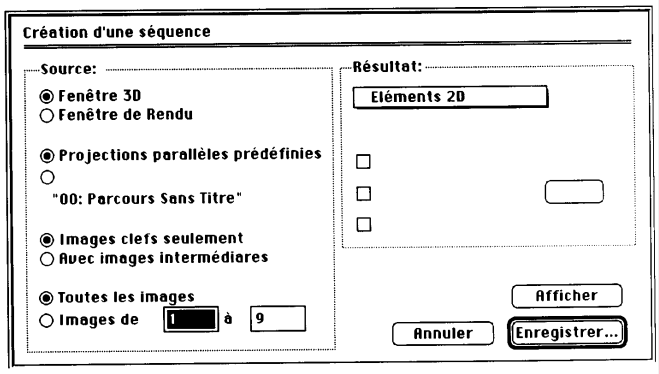
Pour chaque heure différente, mémoriser la vue.

4.



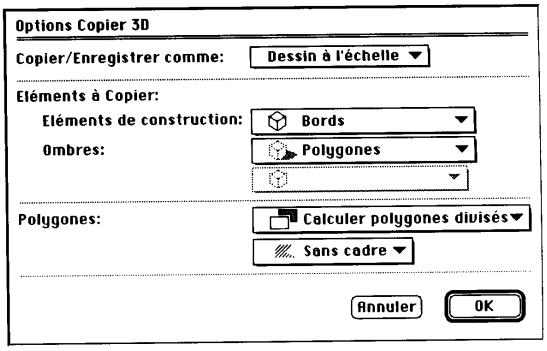
Choisir les options de calculs 3D avec «Image → Options Fenêtre 3D».

5.



Créer une séquence avec «Image → Créer Séquence...».

6.



Choisir les éléments à récupérer dans les images selon le dialogue ci-contre.

A4. Performances

A4.1 Logiciels de calculs selon les normes et recommandations 168
A4.2 Logiciel de calcul LESOSAI 4.0 170

A4.1 Logiciels de calculs selon les normes et recommandations

Logiciel (en janvier 92)	Calcule selon			Fournisseur
	SIA 180/1	SIA 380/1	Modèle d'ordonnance	
BAUPHYSIK-SOLAR	X	X		Marcel Rieben Informatik AG Funkstrasse 96 3084 Bern-Wabern
E-BILANZ		X		Wibeag Computersysteme für das Bauwesen St. Antonsgasse 4 6300 Zug
HEIZUNG	X			TCW AG Computersysteme für die Haustechnik Steinackerstrasse 10 8902 Urdorf
LESOSAI-X		X		EPFL LESO-PB Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment 1015 Lausanne
PLAWSCH	X			Plancal SA En Budron C7 1052 Le Mont-sur-Lausanne
THERMO	?			IAB Institut für Analytische Bauphysik Corrodistrasse 2 8400 Winterthur
WAERME	X	X		Arplage GmbH Schönburgstrasse 41 3013 Bern
WAESCHU	X			Wibeag Computersysteme für das Bauwesen St. Antonsgasse 4 6300 Zug

Logiciel (en mars 96)	Calcule selon			Fournisseur
	SIA 180/1	SIA 380/1	Modèle d'ordonnance	
ENERSYS 380 d+f		X		Enersys SA Case postale 897 2501 Bienne
PLANIX		X		Planungsbüro Bussien Schützenmattstrasse 20 4500 Solothurn
WIN-HT		X		AAA EDV Beratungs AG Laurenzenvorstadt 121 5000 Aarau
ENERGIA / SIA 380/1		X		Bulgarelli AG Software-Entwicklung Streulistrasse 28 8032 Zurich
DIAS	X	X		CUEPE Ch de Conches 4 1231 Conches-Genève
LESOSAI 4.0	X	X	X	LESO-PB EPFL 1015 Lausanne

Tableau A.4.1: Logiciels de calcul selon les recommandations en vigueur. Tous ces logiciels sont en français. Cette liste est régulièrement remise à jour par l'office fédéral de l'énergie.

A4.2 Logiciel de calcul LESOSAI 4.0

LESOSAI est un programme de calcul des bilans thermiques mensuels et annuel d'un bâtiment en tenant compte des gains provenant de divers éléments solaires. Il est aussi adapté aux maisons à très faibles besoins de chauffage.

Son utilisation a été rendue aussi simple et rapide que possible de façon qu'il soit utilisable dès l'avant-projet pour vérifier si le bilan thermique sera satisfaisant.

LESOSAI calcule des bâtiments monozones de construction mi-lourde à lourde (construction suisse traditionnelle). Le calcul selon prEN832 autorise aussi les constructions légères.

Plusieurs méthodes de calculs sont proposées. Mensuelles ou annuelles, elles sont basées sur un bilan thermique stationnaire. Les effets dynamiques des gains (internes et solaires), des systèmes de chauffage et de régulation, de la masse du bâtiment sont pris en compte par un facteur d'utilisation.

À l'exception de la SIA 180/1 (moyenne pondérée des coefficients de pertes thermiques), les bilans thermiques se composent tous des termes suivants:
- pertes brutes;
- gains internes et solaires, bruts;
- partie utile des gains;
- besoins en énergie de chauffage.

Divers éléments solaires sont reconnus:
- fenêtre;
- serre, véranda;
- collecteur-fenêtre;
- mur à isolation translucide;
- capteur solaire à eau (pour le chauffage).

Les résultats sont présentés sous plusieurs formes:
- graphique du bilan thermique (figure A4.2.1);
- tableau des valeurs mensuelles des différents termes du bilan;
- formulaires 1081 et 1083 correspondant aux recommandations SIA.

Modifier une donnée est très rapide. Ainsi il est facile d'évaluer, par exemple, l'effet sur le bilan thermique du remplacement des vitrages isolants par des vitrages à couches sélectives (infrarouge).

Méthodes de calcul des bilans thermiques:
- recommandation SIA 180/1 «Justification de la valeur moyenne de k de l'enveloppe des bâtiments», SIA, Zurich, 1988;
- recommandation SIA 380/1 « L'énergie dans le bâtiment», SIA, Zurich, 1988;
- utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment – Modèle d'ordonnance, OFEN, Berne, 1993;
- norme européenne prEN832 «Performance thermique des bâtiments – Calcul des besoins d'énergie de chauffage"», Comité européen de normalisation (CEN), Bruxelles, 1995;
- méthode «LESO», Guide solaire passif, LESO, EPFL, Lausanne, 1985.

Caractéristiques techniques:

Ordinateur:	PC 386 ou supérieur.
Mémoire:	min. 8 Mo.
Système:	Windows 3.11 ou supérieur.
Langue:	français, allemand.
Adresse:	LESO-PB, EPFL, 1015 Lausanne.

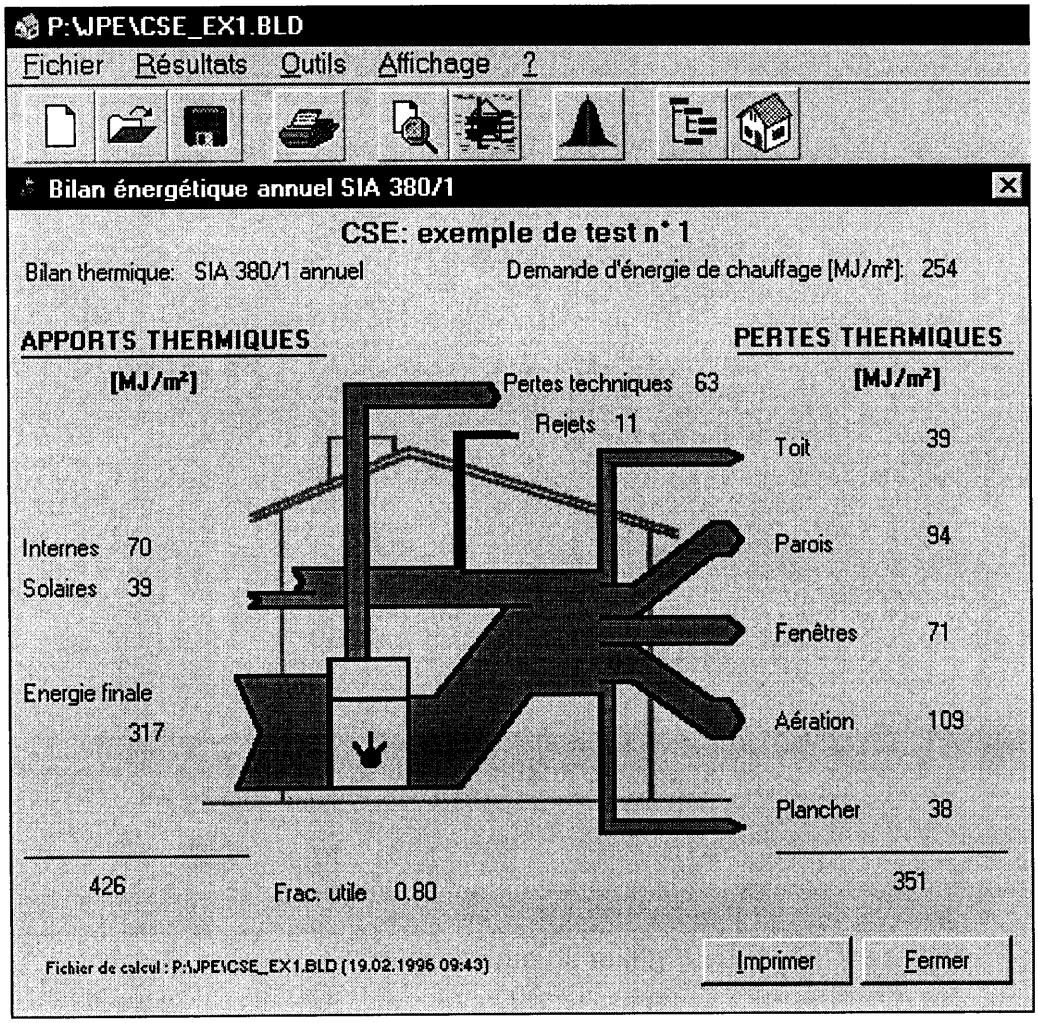


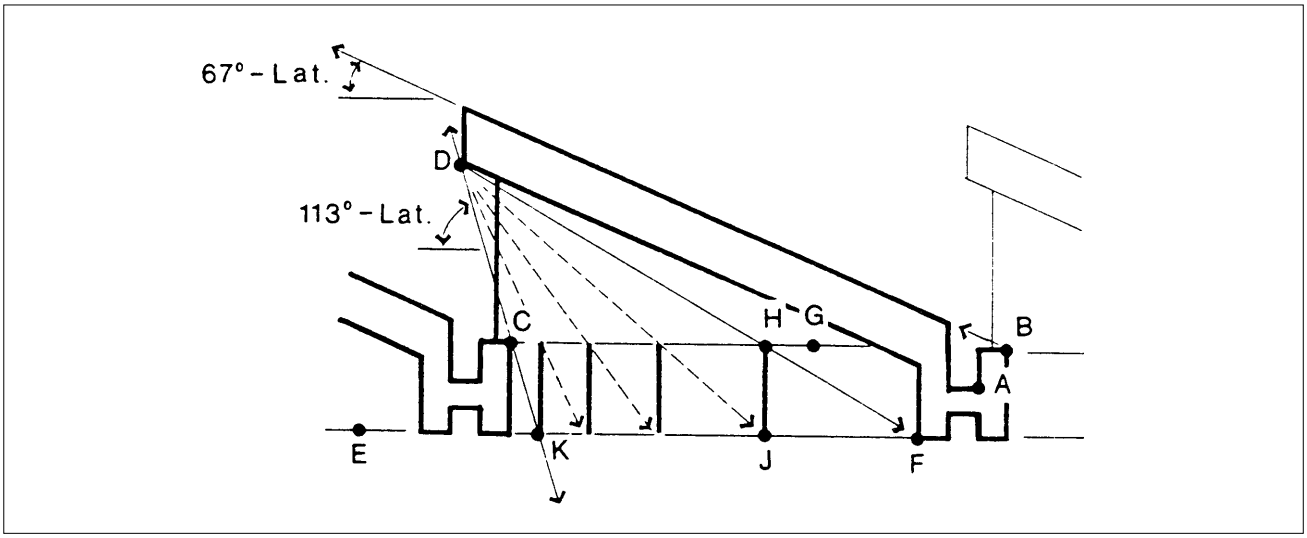
Figure A4.2.1: Bilan thermique – représentation graphique.

A5. Concept énergétique : principes

A5.1 Shed Sud – Tracé régulateur 174
A5.2 Logiciel de calcul DIAS 176
A5.3 Abaques eau chaude solaire 178
A5.4 Effet de cheminée 179
A5.5 Température d'un espace tampon 180
A5.6 Ventilation et vent : méthode 182

A5.1 Shed Sud – Tracé régulateur

Le procédé pour dessiner un shed ouvert au Sud et équipé de lames verticales diffusant la lumière et d'une avancée supérieure est le suivant:



1. Commencer au niveau du toit plat (A), positionner (B) en fonction d'une gouttière et de la structure.

2. Construire la ligne du toit à 67° – la latitude depuis (B).

3. Positionner le niveau (C) avec celui de (B) à la distance de l'ouverture.

4. Construire la ligne passant par (C) inclinée de 113° – la latitude.

5. Positionner (D) sur cette ligne en ménageant l'épaisseur nécessaire à la structure et à l'isolation.

6. Positionner le niveau bas des lames en (E), typiquement le niveau du plafond.

7. Positionner (F) au niveau (E) en ménageant un logement suffisant pour la structure.

8. Positionner le niveau du plan des lames en (G), typiquement le même niveau que (C).

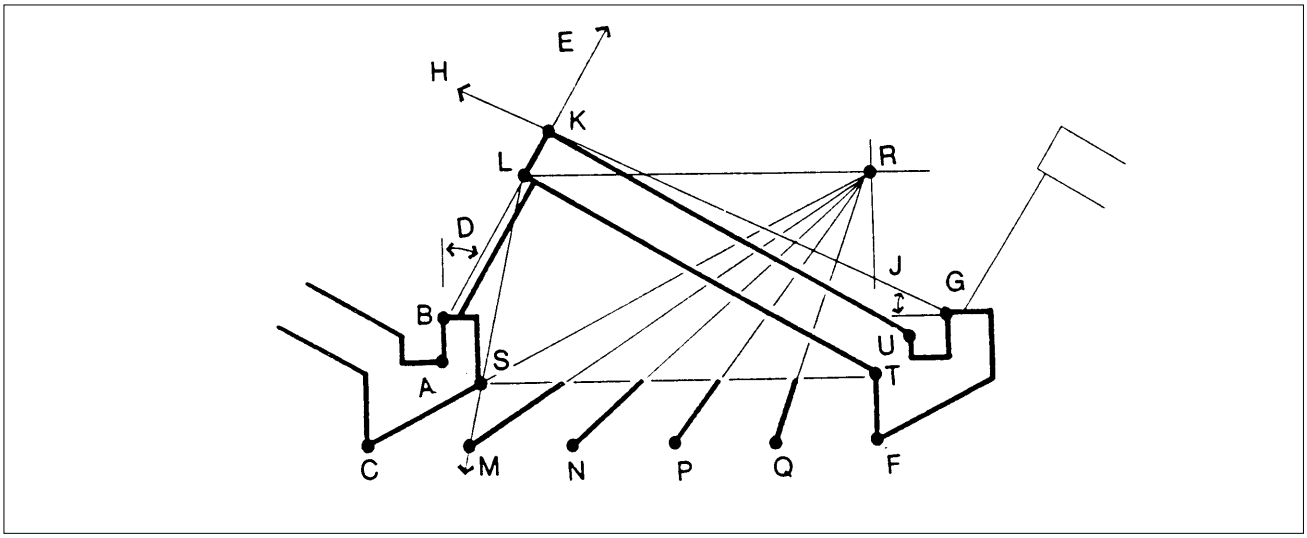
9. Construire la ligne de pénétration limite de soleil de (D) à (F).

10. Positionner le point haut de la première lame en (H) et son point bas en (J).

11. Construire la ligne limite suivante de (D) à (J) et répéter jusqu'à la dernière lame.

12. Idéalement, la ligne passant par (D) et (C) devrait juste toucher le point bas de la dernière lame en (K). On peut l'ajuster en repositionnant le niveau du plan (G) ou (E) et en répétant la procédure.

Le procédé pour dessiner un shed ouvert au Sud et équipé de lames à inclinaison variable diffusant la lumière est le suivant:



1. Commencer au niveau du toit plat (A), positionner (B) en fonction de la hauteur de la garde d'eau.

2. Positionner (C) relativement à (A) et (B) pour ménager une épaisseur suffisante pour la structure et l'isolation.

3. Construire la ligne (E) d'angle (D) = [67° - la latitude] depuis (B).

4. Positionner les niveaux de (F) et (G) correspondant à (C) et (B) à la distance de l'ouverture. La ligne (C-F) est le plan limite inférieur des lames.

5. Construire la ligne (H) d'angle (J) = [67° - la latitude], avec (K) à l'intersection des lignes (H) et (E).

6. Positionner (L) sur (E) en ménageant l'épaisseur nécessaire à la structure et à l'isolation.

7. Diviser la ligne entre (C) et (F) en parties égales (5 dans l'exemple).

8. Construire la ligne horizontale (L-R)

9. Positionner (R) à la verticale de (F).

10. Tracer les lames depuis (R) à (C), (M), (N), (P) et (Q) respectivement.

11. Dessiner la ligne limite entre (L) et (M).

12. Dessiner le niveau passant par (S) pour établir le niveau haut des lames.

13. Construire le plafond du shed de (L) à (T), et une ligne parallèle de (K) à (U) pour former le toit et la gouttière.

Traduit de:
F. Moore
Concepts and practice of architectural daylighting
Van Nostrand Reinhold Company,
New York 1985

A5.2 Logiciel de calcul DIAS

Le logiciel DIAS (Données Interactives d'Architecture Solaire) a été développé dans le but de mettre à disposition des professionnels du bâtiment un outil interactif qui facilite une approche globale de la thématique du soleil dans l'architecture.

DIAS propose:

- de visualiser et analyser un choix de bâtiments exemplaires utilisant l'énergie solaire passive;
- d'accéder à un dictionnaire qui présente les connaissances fondamentales;
- des outils de prédimensionnement et d'évaluation du comportement thermique des divers dispositifs solaires.

DIAS présente une quinzaine de bâtiments exemplaires, qui couvrent les types de bâtiments les plus courants (villas, immeubles, bureaux et écoles), pour expliquer tout le spectre de mesures et de dispositifs solaires qui contribuent à minimiser la consommation d'énergie.

Il s'agit de réalisations qui sont conçues dans le but de profiter au maximum de l'énergie solaire passive grâce à une superisolation, des vérandas, des façades double-peau, des atriums; etc. D'autres bâtiments démontrent comment un bâtiment solaire bien conçu peut devenir énergétiquement autonome presque à 100% à l'aide d'installations techniques simples et bien dimensionnées (préchauffage de l'air frais par récupération sur l'air vicié, chauffage par capteurs solaires et stockage saisonnier, etc.)

Une brève description fournit des renseignements généraux concernant architecte, maître de l'ouvrage, collaborateurs, entreprises, publications, lieu, adresse, région climatique, affectation et concept. Des photos et des dessins de plans, coupes et façades permettent de visiter le projet et de le situer dans le contexte environnant. La composition de l'enveloppe, des détails intéressants et le concept sont expliqués à l'aide de dessins, schémas et photos. Un bilan énergétique (basé sur la recommandation SIA 380/1) analyse chaque bâtiment et renseigne sur les besoins en chauffage, les gains solaires et le coefficient k moyen. Le projet peut finalement être étudié à l'aide de simulations 3D qui montrent les différences d'ensoleillement dans les quatre saisons.

L'architecte a ainsi la possibilité d'utiliser ces exemples comme source d'inspiration.

Le dictionnaire DIAS a été développé sur la base de la publication PACER « Soleil et architecture - guide pratique pour le projet ». Plus de cent pages, classées en six chapitres, facilitent une approche globale de la thématique du soleil dans l'architecture: types d'affectation, confort, volumétrie, typologie, implantation, ensoleillement, éclairage naturel, prédimensionnement de dispositifs solaires, matériaux, bilan énergétique, physique du bâtiment, effet de serre, chauffage, récupération, énergie grise, etc.

DIAS est équipé de six outils de prédimensionnement et d'évaluation du comportement thermique des divers dispositifs solaires:

- calcul du bilan thermique mensuel selon la recommandation SIA 380/1;
- calcul de l'indice de dépense énergétique de bâtiments existants à partir des consommations relevées;
- calcul du coefficient k en fonction des matériaux et de leur épaisseur;
- calcul d'ombrage (figures A5.2.1 et A5.2.2): prédimensionnement de balcons, vérandas, avant-toits par rapport à leur qualité de dispositif de protection solaire fixe;
- conversion d'unités;
- comparaison (bilan mensuel) de bâtiments exemples fournis avec DIAS, de variantes ou de projets définis par l'utilisateur.

Caractéristiques techniques:

Ordinateur:	PC 286 ou supérieur.
Mémoire:	min. 4 Mo.
Disque dur:	6 Mo pour l'installation minimale, 25 Mo pour l'installation complète.
Ecran:	VGA.
Carte vidéo:	1 Mo de mémoire graphique.
Souris:	obligatoire.
Système:	Windows 3.0 ou supérieur.
Langue:	français, allemand ou italien.

Adresse: Willi Weber, CUEPE, Ch. de Conches 4, 1231 Conches.

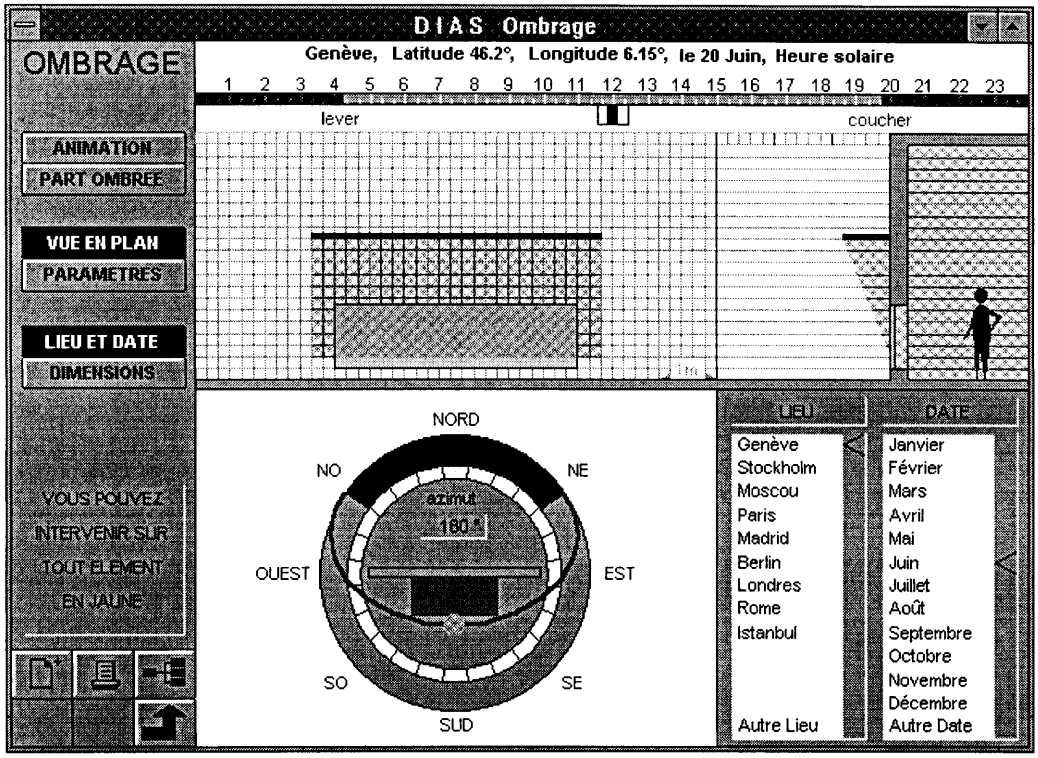


Figure A5.2.1: Détermination de l'ombre portée par un avant-toit à l'aide du logiciel DIAS.

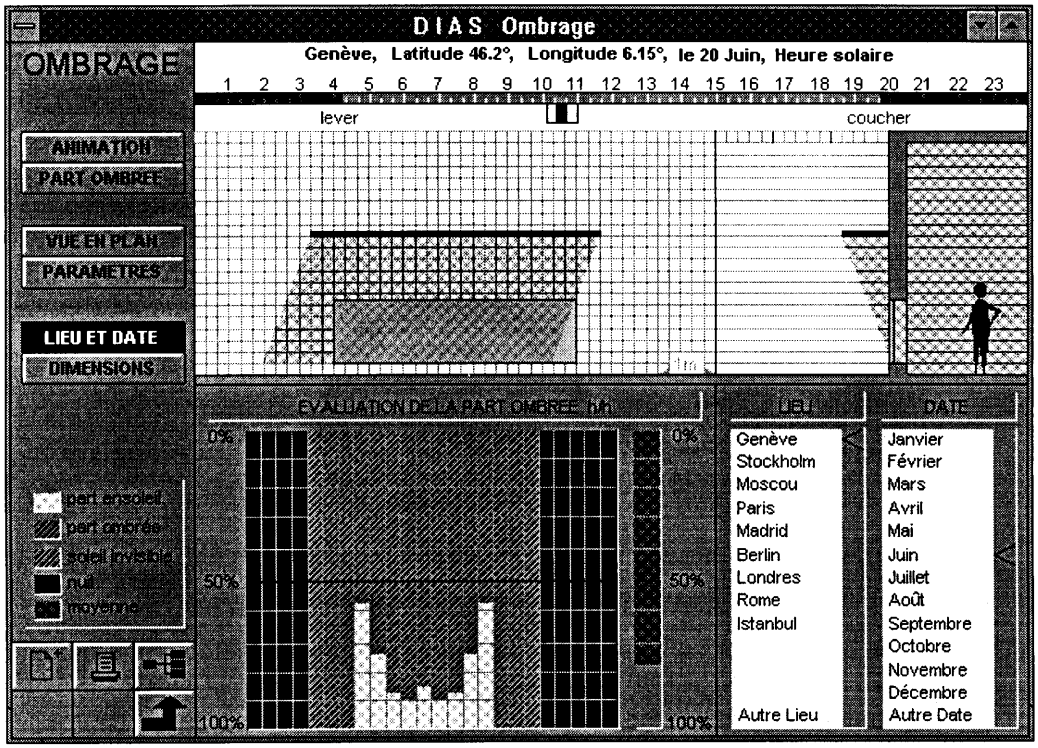
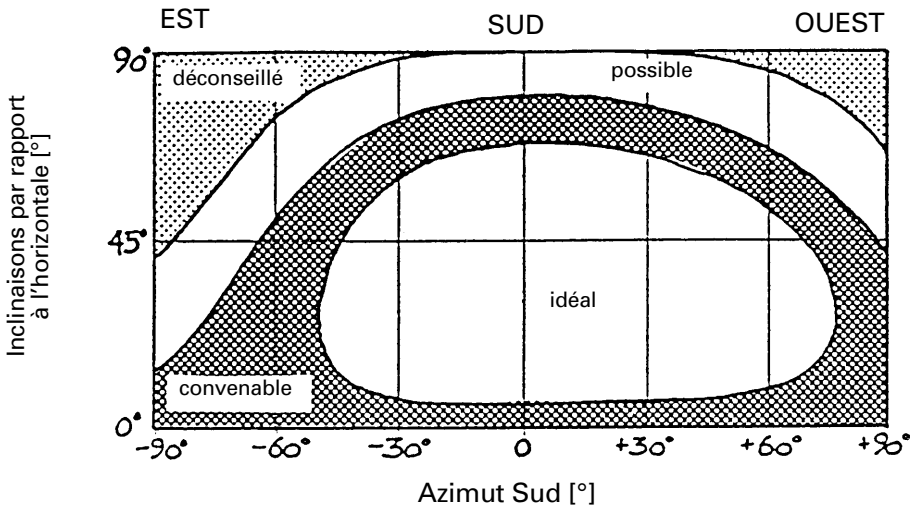


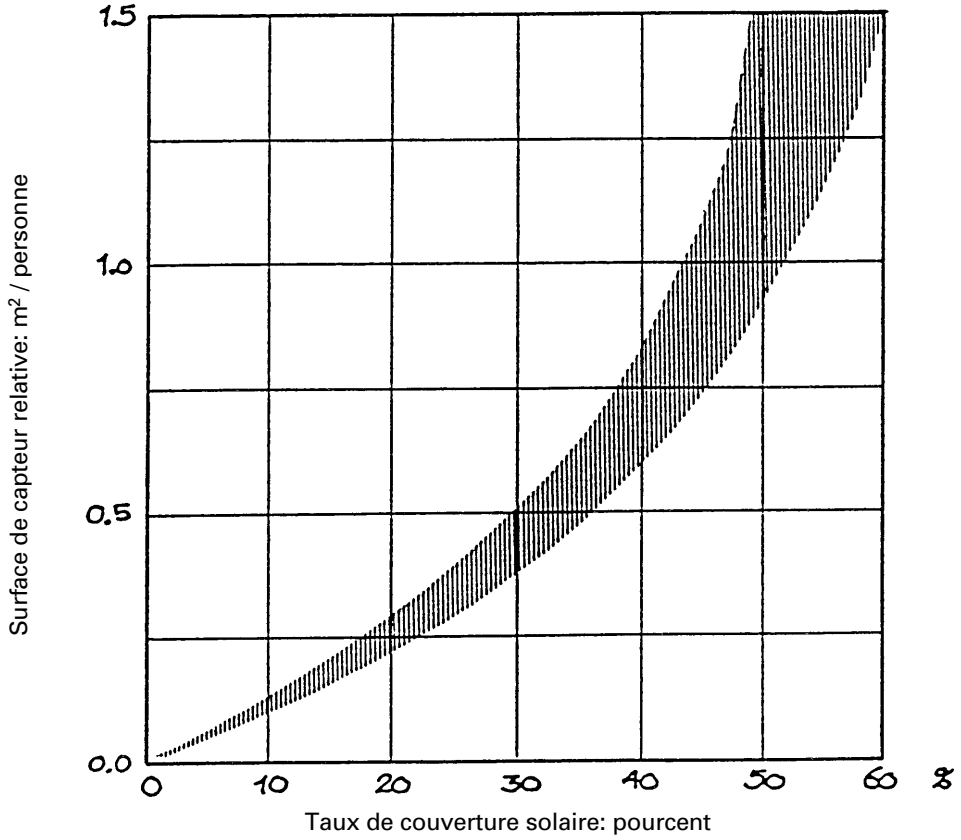
Figure A5.2.2: Fraction ombrée due à un avant-toit (DIAS).

A5.3 Abaques eau chaude solaire

Orientations et inclinaisons recommandées:



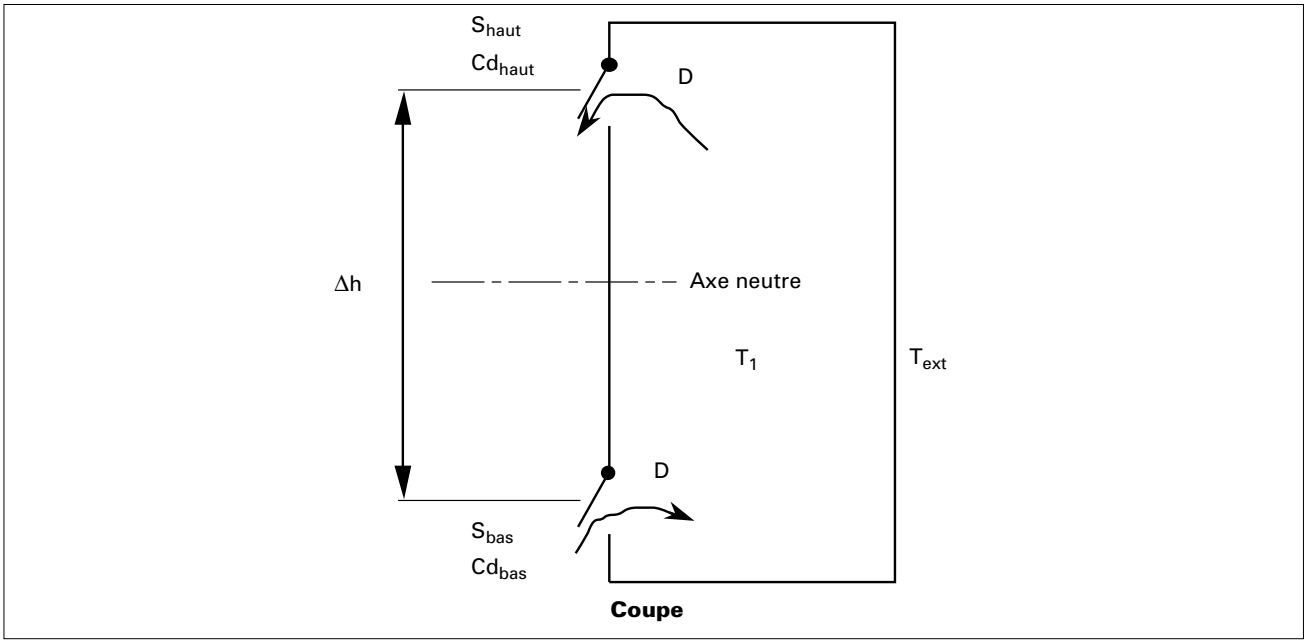
Estimation de la surface de captage



(valable pour une consommation d'eau chaude moyenne de 50l / personne par jour à 55°C et pour un climat type «plateau»)

d'après mesure SOFAS
Repris de la Boîte à outils du cours PACER: Soleil et architecture – Guide pratique pour le projet

A5.4 Effet de cheminée



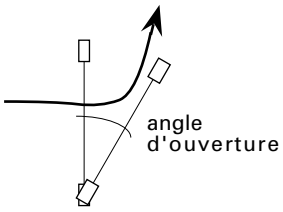
D	Débit d'air dû à la différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur (m^3/s)
g	Gravité = 9.81 (m/s^2)
Dh	Différence de hauteur entre l'axe des ouvrants (m)
S_{bas}	Surface des ouvrants bas (m^2)
Cd_{bas}	Coefficient de décharge des ouvrants bas (-)
S_{haut}	Surface des ouvrants hauts (m^2)
Cd_{haut}	Coefficient de décharge des ouvrants hauts (-)
T_{ext}	Température de l'air extérieur (°C)
T_1	Température de l'air intérieur (°C)

La surface S est celle de l'ouvrant et non pas des sections du passage de l'air

Cd = 0.60 pour une ouverture normale à la française (90°)

0.40 pour une imposte ouverte à 30°

0.25 pour une imposte ouverte à 15°



$$D = S_{bas} \times Cd_{bas} \times \sqrt{\frac{2 \times g \times \Delta h \times (T_1 - T_{ext})}{(273 + T_1) + (273 + T_{ext}) \times \left(\frac{S_{bas} \times Cd_{bas}}{S_{haut} \times Cd_{haut}}\right)^2}}$$

Equation simplifée pour des ouvrants de même taille

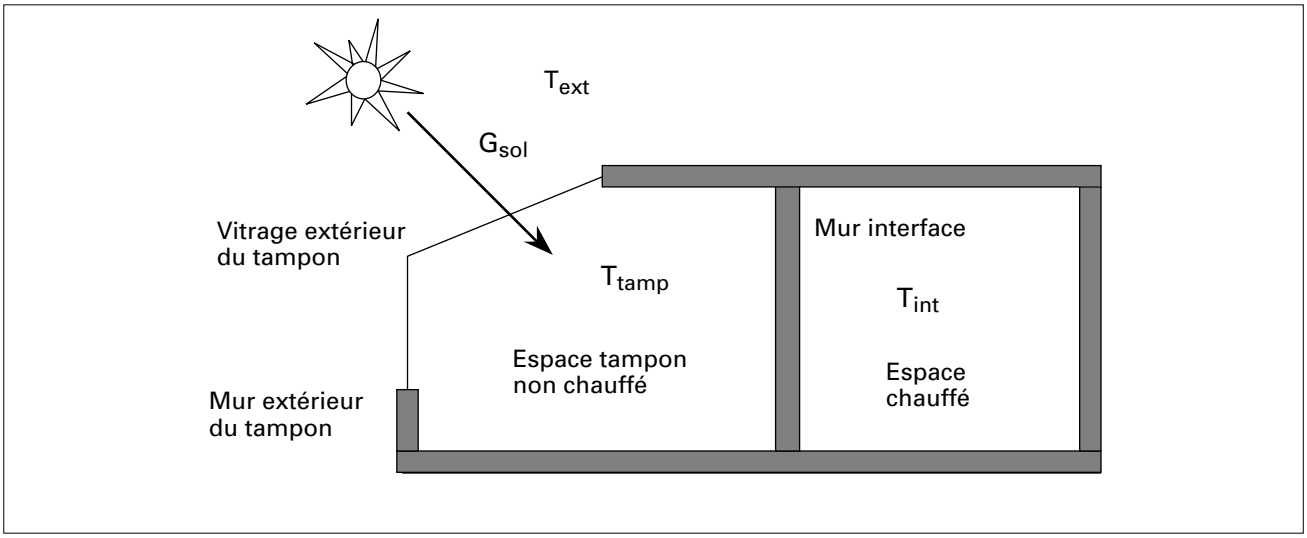
Si $S = S_{bas} = S_{haut}$ et $Cd = Cd_{bas} = Cd_{haut}$

$$D = S \times Cd \times \sqrt{\frac{g \times \Delta h (T_1 - T_{ext})}{(273 + T_{ext})}}$$

A5.5 Température d'un espace tampon

Il s'agit de trouver la température d'équilibre d'un espace tampon statique ou dynamique (voir 5.4). Pour simplifier le calcul, on admet que tout ce qui entre est égal à tout ce qui sort, c'est-à-dire qu'aucun phénomène de stockage n'a lieu dans la masse du tampon (murs, sols, etc.). Cette dernière hypothèse est conservatrice dans le sens que, si l'on veut estimer la température minimale en hiver d'un espace, on obtiendra une valeur inférieure à la valeur réelle. Inversement, si en été on désire connaître la température maximale d'une serre, le fait de négliger l'inertie de l'espace conduit à une surestimation de sa température résultante.

L'espace tampon peut être une serre ou un local sans fenêtre.



Soient

Une enveloppe extérieure de l'espace tampon dont les caractéristiques sont:

A_e Surface des murs extérieurs (m^2)
k_e Coefficient k moyen des murs extérieurs (W/m^2, K)
A_v Surface totale vitrée extérieure (y compris les huisseries) (m^2)
k_v Coefficient k moyen des vitrages extérieurs (y compris les huisseries) (W/m^2, K)
r Un facteur de réduction pour l'ombrage dû aux huisseries et aux ombres portées sur les vitrages (–)
g Transmission énergétique totale des vitrages (–)
Alpha Coefficient d'absorption moyen de l'espace tampon (-) (habituellement entre 0.6 et 0.8)
V_{tamp} Volume intérieur de l'espace tampon (m^3)
n_e Taux de renouvellement d'air du tampon vers l'extérieur (Vol/h)

Un mur interface entre l'espace tampon et l'espace chauffé dont les caractéristiques sont:

A_i Surface des murs interfaces (m^2)
k_i Coefficient k moyen des murs interfaces (W/m^2, K)
n_i Taux de renouvellement d'air du tampon vers l'espace chauffé (Vol/h)
c'est le nombre de renouvellements du volume de l'espace tampon qui est donné ici

Des conditions de température et de rayonnement qui sont:

T_{int} Température de l'espace chauffé (°)
T_{ext} Température extérieure (°)
T_{tamp} Température résultante de l'espace tampon (valeur recherchée) (°)
G_{sol} Rayonnement incident sur les vitrages extérieurs de l'espace tampon (W/m^2) (voir 2.3).

On calcule:

$Q_{tamp} = \Sigma A_v \times G_{sol} \times r \times g \times Alpha$ (W) énergie solaire absorbée par l'espace tampon

le bilan de l'espace tampon:

$C_1 = (\Sigma A_i \times k_i + n_i \times V_{tamp} \times 0.32) \times T_{int} + (\Sigma A_e \times k_e + \Sigma A_v \times k_v + n_e \times V_{tamp} \times 0.32) \times T_{ext} + Q_{tamp}$
$C_2 = \Sigma A_i \times k_i + n_i \times V_{tamp} \times 0.32 + \Sigma A_e \times k_e + \Sigma A_v \times k_v + n_e \times V_{tamp} \times 0.32$

et sa température résultante:

$$T_{tamp} = \frac{C_1}{C_2} \quad (°C)$$

Exemple

Soit une serre:	$A_i = 15\ m^2$	$k_i = 0.80\ W/m^2, K$	$n_i = 0.20$	$V_{tamp} = 30\ m^3$	
	$A_e = 9\ m^2$	$k_e = 0.50\ W/m^2, K$	$n_e = 0.40$		
	$A_v = 18\ m^2$	$k_v = 3.00\ W/m^2, K$	$g = 0.73$	$r = 0.8$	$Alpha = 0.8$
	$T_{int} = 20°$	$T_{ext} = -5°$	$G_{sol} = 300\ W/m^2$		

$Q_{tamp} = 18 \times 300 \times 0.8 \times 0.73 \times 0.8 = 2523$ (W)
$C_1 = (15 \times 0.80 + 0.20 \times 30 \times 0.32) \times 20 + (9 \times 0.50 + 18 \times 3.00 + 0.40 \times 30 \times 0.32) \times (-5) + 2523 = 2489.7$
$C_2 = 15 \times 0.80 + 0.20 \times 30 \times 0.32 + 9 \times 0.50 + 18 \times 3.00 + 0.40 \times 30 \times 0.32 = 76.3$

$$T_{tamp} = \frac{2489.7}{76.3} = 32.60\ (°C)$$ En réalité, la serre serait ventilée sur l'intérieur ou même l'extérieur.

Si la situation se passait de nuit, sans soleil ($G_{sol} = 0$), la température de l'espace tampon serait:

$Q_{tamp} = 0$
$C_1 = (15 \times 0.80 + 0.20 \times 30 \times 0.32) \times 20 + (9 \times 0.50 + 18 \times 3.00 + 0.40 \times 30 \times 0.32) \times (-5) + 0 = -33.3$
$C_2 = 15 \times 0.80 + 0.20 \times 30 \times 0.32 + 9 \times 0.50 + 18 \times 3.00 + 0.40 \times 30 \times 0.32 = 76.3$

$$T_{tamp} = \frac{-33.3}{76.3} = -0.44\ (°C)$$

Adapté de:
R. Sagelsdorff, T. Frank
Isolation thermique et maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, Elément 29
Industrie suisse de la terre cuite, Zürich 1993

M. Zimmerman
Handbuch der Passiven Sonnenenergienutzung
SIA D010 Zürich 1986

A5.6 Ventilation et vent : méthode

La conception de la ventilation naturelle par différence de pression due au vent est grandement facilitée par l'utilisation de diagrammes de flux d'air.

Ils sont basés sur les principes généraux et les règles énoncés ci-dessous et non pas sur des calculs précis :

– **Inertie** : L'air ayant une certaine masse lorsqu'il se déplace, il a tendance à conserver sa direction. Lorsqu'il est forcé de changer cette direction, le flux d'air suivra toujours des courbes et jamais des angles droits.

– **Conservation** : L'air pénétrant dans un bâtiment est toujours égal à l'air quittant un bâtiment. Les lignes représentant les flux d'air doivent donc être dessinées comme continues.

– **Hautes et basses pressions** : comme l'air frappe les façades au vent du bâtiment, il se contracte et crée une pression positive (+). Au même moment l'air est aspiré de la face sous le vent, créant ainsi une dépression (-).

Diagrammes de flux d'air

1. Déterminer la direction du vent dominant d'été (voir chapitre 2 Analyse du site).

2. Sur un calque superposé au plan du bâtiment et du site, dessiner une série de flèches parallèles à la direction du vent de part et d'autre du bâtiment, au vent et sous le vent. (figure A5.6.1). Ces flèches doivent être espacées de la largeur de la plus petite ouverture en façade.

3. Déterminer les zones à pression positive (+) et négatives (-) autour du bâtiment et les reporter sur le calque (figure A5.6.1).

4. Par un processus de tâtonnement, relier chaque flèche pénétrant dans le bâtiment au vent avec son équivalent à la sortie sous le vent. Les lignes ne doivent pas se croiser, s'interrompre ou effectuer de brusques changements de direction. Dans un bâtiment, les flux d'air vont des zones à pression positive vers les zones à pression négative (figure A5.6.2).

5. Lorsqu'un flux d'air se dirige verticalement jusqu'à un autre niveau, marquer le point où il quitte le plan par un cercle avec un point en son centre et le point d'arrivée par un cercle avec une croix en son centre (figure A5.6.2). Dessiner les mouvements verticaux dans une coupe du bâtiment (figure A5.6.3).

6. Les espaces qui ne sont pas traversés par une ligne (flux d'air) ne sont pas assez ventilés, déplacer les ouvertures, ajouter des lames, etc. pour changer l'allure des lignes de flux selon la nécessité.

7. Répéter les étapes 2 à 5 jusqu'à ce que les lignes de flux conviennent.

Cette méthode est basée sur le travail de Murray Milne UCLA, elle est citée par Norbert Lechner dans « Heating, Cooling, Lighting, Design Methods for Architects », John Wiley & Sons, New York 1991.

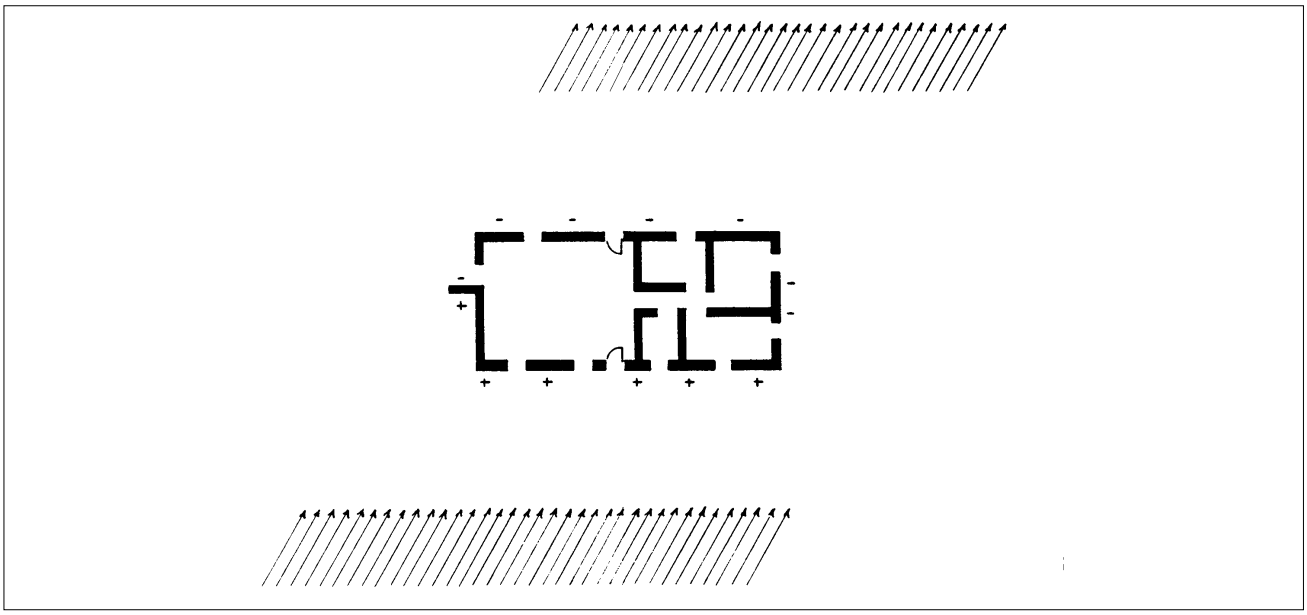


Figure A5.6.1: Position initiale pour dessiner un diagramme de flux d'air.

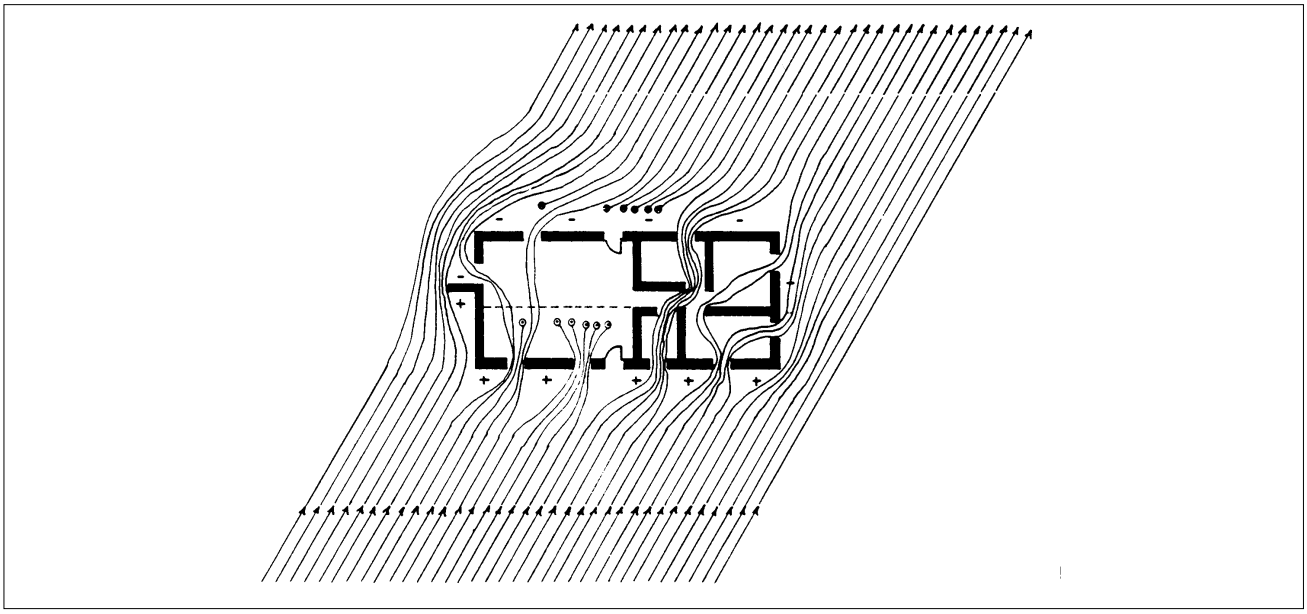


Figure A5.6.2: Un diagramme de flux d'air achevé.

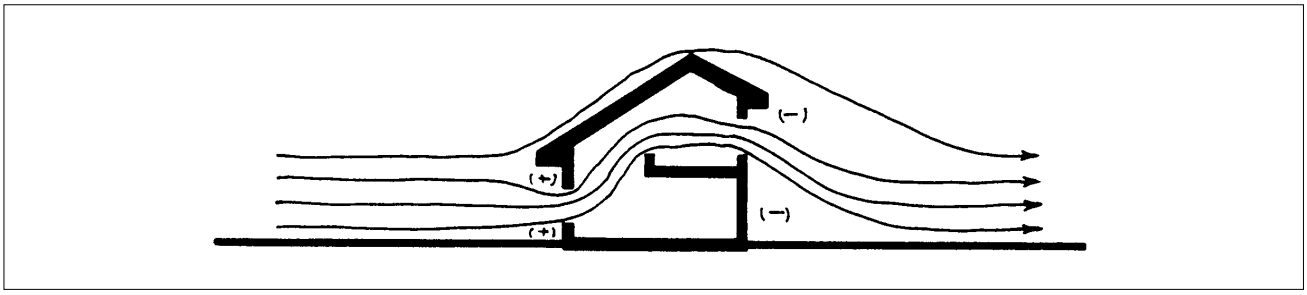


Figure A5.6.3: Les flux doivent aussi être étudiés en coupe.