

Revue Economique et Sociale

BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ D'ÉTUDES ÉCONOMIQUES ET SOCIALES

ÉCHELLES ET ENJEUX DE LA VILLE

DOSSIER DIRIGÉ PAR YVETTE JAGGI, JEAN-BERNARD RACINE

ESSENTIEL DE LA FINANCE 2007

DOSSIER DIRIGÉ PAR MISHA NAGELMACHERS-VOINOV, NICOLAS DE SAUSSURE

QUALITÉS D'USAGE DES BÂTIMENTS ET CONTRAINTES ÉNERGÉTIQUES: SYNERGIE OU ANTAGONISME?

PROF. CLAUDE-ALAIN ROULET

*Ingénieur physicien EPUL, Dr ès sciences, Professeur titulaire EPFL
claude.roulet@apples.ch*

> Le bâtiment est (ou en tous cas devrait être) conçu et construit avant tout pour être confortable et sain. L'économie d'énergie n'est pas un but en soi, car si c'était le cas, le plus efficace serait de ne pas construire le bâtiment. Dans les bâtiments, on utilise de l'énergie pour améliorer le confort et la qualité de l'environnement intérieur (chauffage, eau chaude, refroidissement, éclairage, transports, cuisson, etc.). Mais est ce qu'une consommation accrue d'énergie améliore ces prestations? Ou, a contrario, les économies d'énergie doivent-elles se faire au détriment du confort et de la santé des occupants? La réponse, confirmée par des études au niveau européen, est qu'il est possible de concevoir et de construire des bâtiments sains, confortables et à basse consommation d'énergie. Cet article indique des voies pour atteindre cet objectif*.

LE RÔLE DU BÂTIMENT HABITÉ

QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR ET ARCHITECTURE

Il est utile de répéter que le rôle premier d'un bâtiment est de protéger ses occupants des rigueurs du climat extérieur, et d'assurer à ses habitants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La qualité architecturale participe, à notre avis, aux conditions de confort ou réciproquement, le confort offert par un bâtiment est un des aspects de son architecture.

La satisfaction des besoins de l'occupant est aussi importante que l'aspect esthétique du bâtiment, son intégration au site et sa solidité. Le bâtiment est parfois construit avec d'autres objectifs en tête, tels que:

- > prestige, image;
- > loyer modéré;
- > économie d'énergie;
- > spéculation;

mais l'occupant devrait avoir toujours la première priorité, car c'est pour lui que le bâtiment est construit, en définitive.

* Une partie de ces notes sont extraites du livre «*Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*» publié en 2004 aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes à Lausanne. (Roulet, 2004). Pour plus d'information sur cet ouvrage, voir <http://ppur.epfl.ch/livres/2-88074-547-0.html>

Nous allons voir qu'au moyen d'une planification intelligente et multidisciplinaire, il est parfaitement possible d'assurer à la fois une excellente qualité d'environnement intérieur donc une bonne valeur d'usage, une bonne qualité architecturale et une très faible consommation d'énergie.

ÉNERGIE ET BIEN ÊTRE

On consomme de l'énergie pour assurer un certain bien être dans les bâtiments, notamment pour chauffer, refroidir, éclairer, ventiler et fournir divers services tels que les transports, la communication, la production de biens, etc.. Lorsqu'on manque d'énergie, la situation à l'intérieur du bâtiment peut être inconfortable, voire malsaine. De nombreux exemples datant des années 80 ont montré que des mesures d'économies d'énergie prises sans discernement, et sans examen préalable des conséquences possibles peuvent rendre les bâtiments inconfortables, voire inhabitables. Certains en ont déduit que toute réduction de la consommation d'énergie d'un bâtiment implique une réduction de la qualité de l'environnement intérieur.

A contrario, est-ce qu'un bâtiment consommant beaucoup d'énergie est nécessairement plus confortable et plus sain qu'un autre consommant moins? Est-ce que les bâtiments des années 70, qui nécessitent deux, voire quatre fois plus d'énergie pour leur chauffage que les bâtiments construits actuellement sont plus confortables? La réponse, confirmée par des enquêtes scientifiques menées en Suisse et en Europe est non. De nombreux exemples montrent qu'une forte consommation d'énergie ne va pas forcément de pair avec un confort élevé. Au contraire, nous allons montrer que la plupart des bâtiments à forte consommation sont inconfortables, et de nombreux bâtiments à basse consommation offrent un environnement intérieur de très bonne qualité.

SITUATION ACTUELLE DANS DES BÂTIMENTS

L'information donnée ici résulte de deux enquêtes effectuées dans des immeubles résidentiels et administratifs, ces deux enquêtes utilisant des méthodes d'investigation, notamment des questionnaires, similaires (Blyussen et al., 2003; Blyussen et al., 1995a; Blyussen et al., 1995b).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE

L'indice de dépense d'énergie¹ des bâtiments inspectés varie de 50 à plus de 500 kWh/m². En principe, à isolation et aération égales, l'indice de dépense d'énergie pour le chauffage est proportionnel à la rigueur du climat, et devrait augmenter avec la température intérieure, mais en fait, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre la consommation d'énergie et la température intérieure ou le climat. La consommation d'énergie dépend donc plus de la manière dont sont construits et exploités les bâtiments que des climats extérieur ou intérieur.

CONFORT

Le confort est une sensation subjective. Le meilleur indicateur est donc l'évaluation des

¹ Consommation annuelle d'énergie du bâtiment rapportée à sa surface de plancher chauffé

occupants. Pour mesurer le confort perçu relativement à divers critères on a demandé aux occupants des bâtiments inspectés de noter, sur une échelle allant par exemple de 1 (tout à fait satisfaisant) à 7 (totalement insatisfaisant) leur impression concernant le confort thermique, la qualité de l'air, le bruit, l'éclairage naturel et artificiel, leur environnement, le contrôle qu'ils ont sur celui-ci, etc.

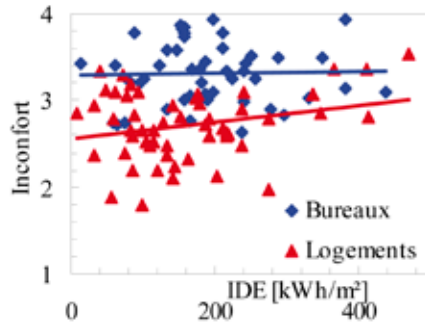


Figure 1: Chaque bâtiment évalué est représenté par un point dont son indice de dépense d'énergie en abscisse et l'inconfort global évalué par les occupants sur une échelle allant de 1 (confortable) à 7 (totalement inconfortable).

En principe, on dépense de l'énergie pour améliorer le climat intérieur et les conditions de travail. Comme le montre la Figure 1, les bureaux à haute consommation d'énergie ne sont pas plus confortables que les autres, et les logements à basse consommation sont en moyenne plus confortables que les autres.

LE SYNDROME DU BÂTIMENT MALSAIN (SBS) ET SON INDICE (BSI)

Dans les bâtiments dits «malsains» certains symptômes donnés dans le Tableau 1, qui ne peuvent pas être reliés à des causes précises, se retrouvent fréquemment. Les personnes qui développent le SBS voient généralement leurs symptômes disparaître lorsqu'elles quittent l'immeuble incriminé.

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

Tableau 1: Liste des symptômes du syndrome du bâtiment malsain.

Pour estimer l'impact du bâtiment sur la santé des occupants, on leur demande s'ils ressentent l'un ou l'autre de ces symptômes, et si ces symptômes disparaissent lorsque la personne quitte le bâtiment. Si c'est le cas, c'est à dire si le symptôme n'apparaît que lorsque la personne se trouve dans le bâtiment, il est réputé lié au bâtiment. L'indice des symptômes liés au bâtiment (BSI pour Building Symptom Index) est défini par le nombre moyen de symptômes liés au bâtiment par personne. Il prend donc une valeur allant de 0 à 11.

Le résultat obtenu dans les bâtiments examinés en Europe et illustré dans la Figure 2 est intéressant: il y a une corrélation significative positive entre l'indice de dépense d'énergie et le nombre de symptômes: en moyenne, les occupants se sentent mieux dans les bâtiments à basse consommation d'énergie que dans les autres.

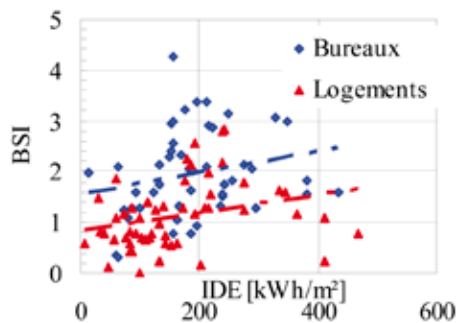


Figure 2: Corrélation entre la consommation d'énergie des bâtiments et leur BSI.

Ce résultat n'est en fait pas surprenant: on peut s'attendre à ce qu'un bâtiment mal conçu et médiocrement exploité soit moins sain et consomme plus d'énergie qu'un bâtiment bien conçu et exploité avec compétence.

LES «BONS» ET LES «MÉCHANTS»

Chaque bâtiment observé peut être caractérisé par le bien être des occupants (quantifié par son BSI) leur confort ressenti (quantifié par la note moyenne donnée par les occupants), et son indice de dépense d'énergie. Dans l'ensemble des bâtiments observés, nous avons sélectionné, dans chaque catégorie (bureaux et logements), 10 à 12 bâtiments parmi les meilleurs pour ces trois aspects et le même nombre parmi les moins bons.

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

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

Tableau 2: Caractéristiques des bâtiments sélectionnés comme «bons» et «mauvais»

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

Les différences significatives entre les «bons» et les «mauvais» bâtiments sont les suivantes:

- > Les bons bâtiments sont généralement plus récents que les autres. C'est du essentiellement au fait que les bâtiments à basse consommation d'énergie ont été construits après 1980.
- > Les occupants ont plus de place dans les bons bâtiments que dans les moins bons: la surface allouée est presque deux fois plus grande et le plafond est en moyenne 30 cm plus haut dans les bons bâtiments.
- > Le nombre de bâtiments dans lesquels on a pensé à optimiser l'éclairage naturel est plus grand dans les bons, et le nombre de ceux pour lesquels on n'a pas optimisé l'éclairage naturel est plus grand parmi les «mauvais»
- > Les rares bâtiments avec installation solaire de production d'eau chaude sont parmi les bons bâtiments.
- > Les installations de ventilation, lorsqu'elles sont présentes, sont généralement mieux conçues et mieux entretenues dans les bons bâtiments que dans les autres.
- > La majorité des bons bâtiments ont une ventilation naturelle, alors que la majorité de mauvais ont une ventilation mécanique. Il faut toutefois remarquer qu'on trouve des bâtiments à ventilation mécanique parmi les bons, et des bâtiments à ventilation naturelle parmi les mauvais.

Enfin, on a remarqué a posteriori que la plupart des bons bâtiments ont été conçus dans cette intention, en ce sens que le maître de l'ouvrage avait placé le bien être des occupants et la performance énergétique dans les priorités, alors que c'était le cas d'aucun des «mauvais» bâtiments.

COMMENT ASSURER LE CONFORT?

Pour assurer une bonne qualité de l'environnement intérieur, on peut appliquer des mesures passives et des mesures actives. Les mesures passives sont des mesures architecturales et constructives qui permettent d'atteindre naturellement le but poursuivi sans ou avec très peu, d'apport d'énergie. Les mesures actives ou technologiques permettent d'atteindre le but poursuivi par des actions mécaniques, en consommant de l'énergie pour compenser les défauts du bâtiment ou compléter les mesures passives.

Des mesures passives sont, par exemple

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

Des mesures actives sont, par exemple

- > *Le chauffage local ou central*, qui reste indispensable dans les climats froids pour assurer une température confortable en hiver.
- > *La ventilation mécanique*, qui supplée à la ventilation naturelle ou la complète dans les locaux de grande dimension ou à fort taux d'occupation.
- > *Le refroidissement artificiel* par plafonds froids ou conditionnement d'air, qui refroidit les locaux dans lesquels la charge thermique est trop élevée.
- > *La musique d'ambiance* qui neutralise le bruit.
- > *L'éclairage artificiel* qui reste indispensable pour voir la nuit!

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MESURES PASSIVES ET ACTIVES

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

Les mesures actives sont bien adaptées aux besoins, du moins quand elles sont bien conçues, construites et mises en service, car elles sont conçues pour cela. Ces mesures utilisent des méthodes de dimensionnement et de conception bien connues. Souples et relativement indépendantes des conditions météorologiques, elles permettent de corriger des erreurs de conception architecturale. Par contre, elles sont souvent chères, énergivores et peuvent tomber en panne. Dans ce cas, la situation peut être plus catastrophique que dans un bâtiment «passif». Enfin, et c'est le défaut d'une qualité, elles permettent les erreurs de conception architecturale....

On remarque que les avantages des uns correspondent aux inconvénients des autres, et que ces deux familles de mesures sont donc complémentaires. Les mesures passives étant préférables pour des raisons de prix et d'écologie, mais ne pouvant pas toujours garantir des conditions confortables, la stratégie à adopter consiste à :

- > aller aussi loin que raisonnablement possible avec les mesures passives,
- > pallier les insuffisances résiduelles par des installations actives dont les dimensions seront alors réduites.

CONFORT NATUREL

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

Dans la Figure 3, la bande représente la marge de température de confort, qui varie avec l'habillement, donc avec la saison. La courbe pleine représente la température extérieure. En pointillés, on représente l'évolution de la température dans d'un bâtiment bien conçu et en pointillé celle d'un bâtiment inadapté à son climat.

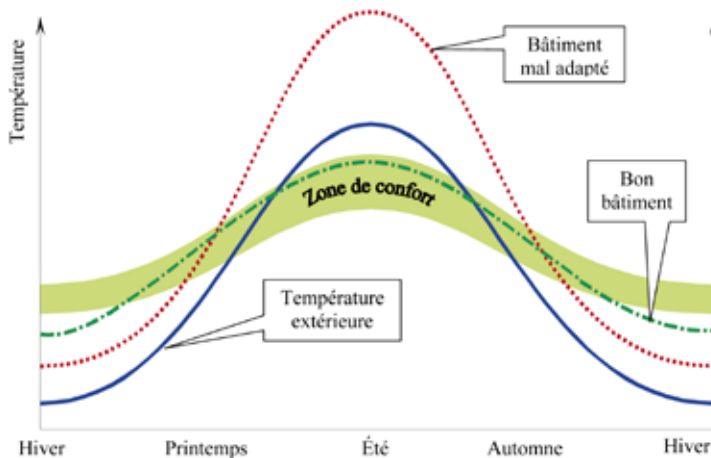


Figure 3: Évolution des températures dans des bâtiments au cours de l'année, en absence de chauffage ou de climatisation.

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

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

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

DEUX EXEMPLES DE MESURES PASSIVES

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

Chauffage solaire passif

Le chauffage solaire passif consiste à utiliser au mieux l'énergie du rayonnement solaire entrant dans le bâtiment. Les surfaces qui captent l'énergie solaire sont principalement les vitrages, mais aussi les parois et planchers intérieurs des surfaces ensoleillées, les parois situées derrière un revêtement transparent ou une isolation transparente, et même toute surface opaque exposée au soleil.

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

Pour utiliser au mieux le chauffage solaire passif, il convient de suivre les quelques directives simples énoncées ci-dessous.

- > Pour que les gains solaires, toujours limités, représentent une part importante des besoins, il faut limiter ces besoins au minimum par une *isolation thermique* soignée: fortes épaisseurs d'isolation et vitrages à hautes performances. L'utilisation de ces gains sera améliorée par une répartition adéquate, en plan et en coupe, des zones chauffées ou à activité diurne et des zones tampon: les premières au soleil, les secondes en retrait.

- > Pour capter une quantité de chaleur appréciable en hiver, il faut de *grandes surfaces de captage*, orientées vers les directions les plus ensoleillées (du sud-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord). Les surfaces de captage sont avant tout les fenêtres et portes vitrées, mais aussi les vérandas et les parois opaques à isolation transparente.

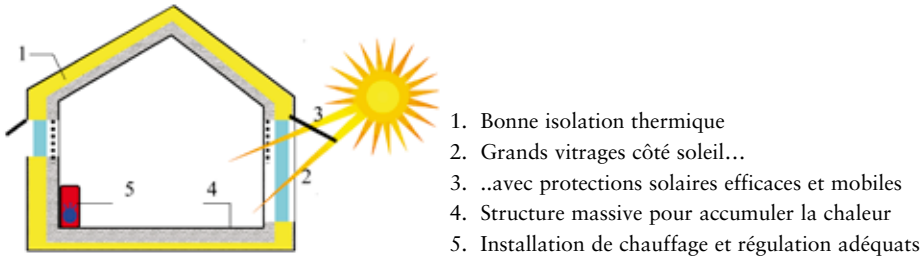


Figure 4: Principes du chauffage solaire passif

- > Lorsque la température extérieure est clémente et qu'il fait beau, ces surfaces apportent trop de gains. Il est donc indispensable de munir toutes les surfaces de captage de *protections solaires efficaces*, donc extérieures pour la protection d'été et mobile pour contrôler les gains et la lumière. Des protections solaires intérieures peuvent être utiles en hiver pour réduire l'éblouissement tout en profitant de la chaleur solaire.

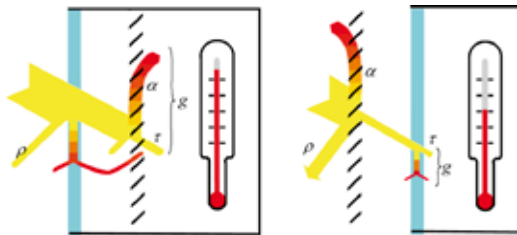


Figure 5: Les protections solaires efficaces sont à l'extérieur du bâtiment.

En effet, le rayonnement solaire chauffe la protection et cette chaleur doit être évacuée à l'extérieur en été.

- > Pour augmenter l'efficacité du chauffage solaire passif, il faut répartir sur la journée les gains reçus pendant quelques heures seulement. *L'inertie thermique du bâtiment doit donc être élevée*, pour limiter les surchauffes en période ensoleillée, et restituer la chaleur accumulée pendant la nuit. Le bâtiment est donc massif et l'isolation est posée à l'extérieur de la structure. Il faut aussi tenir compte en dessinant le plan, de la nécessité de répartir la chaleur dans toute la zone habitée: grouper les zones chaudes plutôt au sud, placer les zones plus fraîches (circulations, dépôts) au nord.

- > Enfin, le chauffage d'appoint ne doit fonctionner que quand il est nécessaire. Il doit réagir rapidement aussi bien lorsque le soleil disparaît que lorsqu'il apparaît. Il faut donc *une régulation thermique adéquate*, qui tienne compte des gains solaires et des caractéristiques du système de chauffage. C'est notamment le cas s'il y a un thermostat dans chaque pièce.

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

PROTECTION THERMIQUE D'ÉTÉ: REFROIDISSEMENT PASSIF

Principe du refroidissement passif

Le refroidissement passif consiste à mettre à profit tout phénomène abaissant la température intérieure et ne consommant pas d'énergie. Il permet d'assurer sous notre climat un excellent confort estival tout en évitant l'installation de coûteux systèmes de conditionnement d'air. En premier lieu, on cherche à réduire les gains de chaleur solaires et internes, en installant des protections solaires efficaces et en évitant d'utiliser des appareils à faible rendement. Dans la mesure où le climat le permet, on évacue l'excédent de chaleur en ventilant fortement. Cette technique d'usage général est applicable dans tout type de bâtiment (lourd ou léger), mais ne fonctionne que lorsque la température extérieure est plus basse que la température de confort.

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

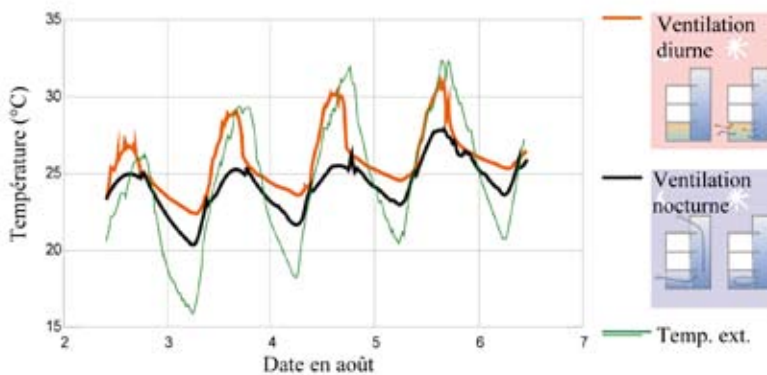


Figure 6: Température dans deux bureaux identiques. L'un est aéré pendant la journée, l'autre pendant la nuit.
La ligne fine est la température extérieure.

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

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

Le refroidissement passif par ventilation nocturne permet généralement d'atteindre des températures plus basses ou d'éliminer plus de chaleur que la ventilation diurne. La Figure 6 montre des enregistrements de température dans deux bureaux identiques; l'un étant aéré pendant la journée, l'autre pendant la nuit. Les deux bureaux sont munis de protections solaires efficaces. L'abaissement de la température maximale dépasse 4 degrés!

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

Règles de conception pour le refroidissement passif

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

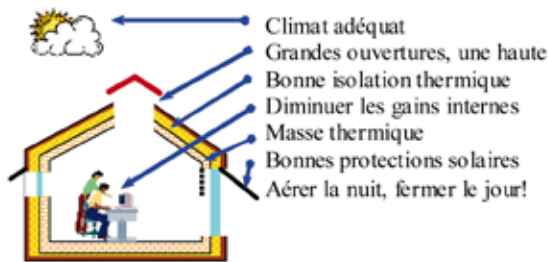


Figure 7: Conditions nécessaires pour un refroidissement passif efficace

Ces conditions sont les suivantes (Figure 7).

- > Climat: La température extérieure moyenne, sur 24 heures, ne doit être confortable et l'amplitude des variations de la température de l'air extérieur entre le jour et la nuit doit être importante (minimum 5 degrés). Le climat tropical ne convient donc pas, mais le climat continental européen d'été est idéal.

- > De grandes ouvertures de ventilation (fenêtres, portes) permettent une ventilation nocturne suffisante. Il faut une ouverture en position haute, car l'air chaud situé au-dessus de la plus haute ouverture ne pourra pas s'échapper. Ces ouvertures doivent être protégées des intempéries et offrir une sécurité suffisante pour rester ouvertes toute la nuit.
- > Une isolation suffisante doit être placée à l'extérieur. Il importe en effet que la masse intérieure de la paroi ne soit pas chauffée de l'extérieur.
- > Les gains de chaleur doivent être limités de manière à éviter la surchauffe et à ne pas dépasser la quantité de chaleur qu'il sera possible d'évacuer pendant la période de refroidissement suivante. Les protections solaires efficaces sont, encore une fois, indispensables. Les appareils à basse consommation d'énergie et l'éclairage naturel contrôlé contribuent aussi à réduire les gains de chaleur.
- > Pour des locaux occupés de jour, l'inertie thermique du local doit être grande. Elle est maximale si un matériau dense (béton, maçonnerie) d'au moins 10 cm d'épaisseur est apparent sur toutes les parois (plafond, plancher, murs). Pour des locaux qui ne sont occupés que la nuit, une faible inertie thermique peut être avantageuse, car elle permet un abaissement rapide de la température ambiante.

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

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

RÉSUMÉ

STRATÉGIE

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

Pour rendre un bâtiment confortable (ce qui est sa mission première), les mesures passives, visant à concevoir le bâtiment pour le rendre naturellement plus confortable, doivent être exploitées autant que possible avant de recourir aux mesures actives qui pallient les insuffisances résiduelles à l'aide d'installations techniques. De toute manière, le bâtiment devrait, lorsque les installations techniques sont déclenchées, être au moins aussi confortable ou pas plus inconfortable que l'extérieur. Les mesures passives sont en effet plus robustes, généralement mieux acceptées et souvent meilleur marché. Ce sont aussi les mesures que l'architecte contrôle le mieux. Suivant le climat, des installations techniques restent nécessaires pour rendre le climat intérieur confortable en toute saison, mais les mesures passives en réduisent fortement la taille et l'impact. Le choix des procédés et l'emplacement des installations sont aussi facilités si ces installations n'ont qu'un rôle complémentaire.

De l'énergie est utilisée dans les bâtiments pour améliorer le confort (chauffer, refroidir, ventiler, éclairer) et assurer diverses autres prestations (transports, communications, production, etc.). La consommation spécifique (par exemple l'indice de dépense d'énergie) varie fortement d'un bâtiment à l'autre, même à prestations équivalente, mais les bâtiments les plus énergétivores ne sont ni les plus sains, ni les plus confortables, et on trouve des bâtiments sains et jugés confortables parmi les plus bas consommateurs. D'autre part, la consommation d'énergie d'un bâtiment dépend essentiellement de caractéristiques propres au bâtiment: l'isolation thermique, le contrôle et l'efficacité de la ventilation, le rendement des installations de chauffage et de climatisation, l'éclairage naturel. Ces facteurs peuvent être améliorés sans nuire au bien être de l'occupant, et souvent en améliorant ce bien être. Il existe en fait de nombreuses mesures d'économie d'énergie qui apportent en même temps une amélioration de la qualité de l'environnement intérieur, ou en tous cas qui ne la péjorent pas. Citons par exemple:

- > L'isolation thermique, mesure principale d'économie d'énergie de chauffage et de climatisation, qui protège des rigueurs du climat extérieur, stabilise le climat intérieur, augmente la température de surface intérieure des parois extérieures en hiver, donc améliore le confort et réduit les risques de moisissures.
- > L'étanchéité à l'air et la pose d'ouvertures ad hoc qui permet de contrôler, donc d'assurer une aération convenable tout en évitant les courants d'air et le gaspillage d'énergie résultant d'une aération incontrôlée.
- > L'éclairage naturel, ne consommant que de l'énergie solaire directe, essentiel à la vie et au bien être, excellent pour le rendu des couleurs.
- > L'isolation acoustique, améliorant l'ambiance acoustique intérieure tout en apportant souvent une isolation thermique ou profitant de cette isolation thermique
- > La suppression de prestations inutiles telles que l'éclairage de locaux ou couloirs non occupés, la surchauffe ou le sur-refroidissement de locaux occupés, l'apport d'eau chaude là où elle n'est pas utilisée, etc. réduit la consommation d'énergie sans réduire, par définition, les prestations que le bâtiment offre à ses usagers.
- > Le dimensionnement correct des installations permet d'éviter le gaspillage d'énergie tout en assurant le confort souhaité. Il faut reconnaître que de nombreuses installations sont surdimensionnées, ce qui réduit le risque et simplifie les calculs de l'ingénieur. Cette situation toutefois augmente les déperditions de ces installations et en diminue le rendement énergétique.
- > L'usage de matériaux propres pour la construction et le mobilier améliore la qualité de l'air intérieur et permet de réduire le débit d'air de ventilation.
- > Une régulation intelligente maintient les prestations au niveau souhaité en utilisant au mieux les installations disponibles.
- > L'isolation des conduites d'eau chaude ou glacée réduit leurs pertes et évite que ces pertes chauffent ou refroidissent des locaux de manière incontrôlée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLUYSSSEN, P. M., C. COX, N. BOSCHI, M. MARONI, G. RAW, C.-A. ROULET, and F. FORADINI, 2003, European Project HOPE (Health Optimisation Protocol For Energy-Efficient Buildings): Healthy Buildings, p. 76-81.

BLUYSSSEN, P. M., E. DE OLIVEIRA FERNANDES, P. O. FANGER, L. GROES, G. CLAUSEN, C.-A. ROULET, C.-A. BERNHARD, and O. VALBJORN, 1995a, European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption in Office Buildings. Final report of Contract Jou2-CT92-022., Delft (NL), TNO Bouw.,

BLUYSSSEN, P. M., E. DE OLIVEIRA FERNANDES, L. GROES, G. CLAUSEN, P.-O. FANGER, O. VALBJORN, C.-A. BERNHARD, and C.-A. ROULET, 1995b, European Audit Study in 56 Office Buildings: Conclusions and Recommendations: Healthy Buildings '95, p. 287-292.

BUCKLEY, M., S. BURTON, A. CROMPTON, and J. DOGGART, eds., 1991, Architectures solaires en Europe, v. EUR 12 738 FR: Luxembourg, Commission des Communautés Européennes, 150 p.

CHATELET, A., P. FERNANDEZ, and P. LAVIGNE, 1998, Architecture climatique, v. 2: Aix-en-Provence, Edisud, 160 p.

GANZ, C., A. MULLER, A. FAIST, J.-B. GAY, N. KOHLER, C.-A. ROULET, and J.-L. SCARTEZZINI, 1990, Le Soleil - Chaleur et lumière dans le bâtiment., v. Documentation SIA D 056: Zürich, SIA.

ROULET, C.-A., 2004, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments: Lausanne, PPUR, 368 p.

ROULET, C.-A., F. FORADINI, C. COX, M. MARONI, and E. D. O. FERNANDES, 2005, Creating healthy and energy-efficient buildings: lessons learned from the HOPE project Indoor Air, p. Paper 1.6 44.

OUVRAGES À LIRE POUR PLUS D'INFORMATION

BUCKLEY, M., S. BURTON, A. CROMPTON, and J. DOGGART, eds., 1991, Architectures solaires en Europe, ref. EUR 12 738 FR.; Commission des Communautés Européennes, Luxembourg, 150 p.

CHATELET, A., P. FERNANDEZ, and P. LAVIGNE, 1998, *Architecture climatique*, Edisud, Aix-en-Provence, 160 p.

ROULET, C.-A., 2004, *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments.*, PPUR, Lausanne, 368 p.

DÉOUX, S., and P. DÉOUX, 2002, 2004, *Le guide de l'habitat sain.*, Ed. Medieco Andorra la Vella - Andorre, 537 p.

Questions - Perspectives

La check-list qui suit est un support à la décision. Elle vous offre la possibilité de faire un « tour de contrôle » de votre situation et de mettre à profit les éléments abordés dans l'article ci-dessus.

Les affirmations suivantes sont-elles correctes?

- > Toutes les mesures de réduction de la consommation d'énergie détériorent le bien-être et le confort de l'occupant.
- > Un bâtiment conçu pour avoir une faible consommation d'énergie sera aussi plus confortable et plus sain.
- > Le syndrome du bâtiment malsain est plus fréquent dans les bâtiments à basse consommation d'énergie.
- > La climatisation est indispensable en Suisse pour assurer le confort d'été dans les habitations

- > Les besoins en chauffage d'un bâtiment bien conçu sont assurés pour moitié par l'énergie solaire.
- > Il est possible d'améliorer le confort d'été sans climatiser
- > Il ne faut pas trop isoler car c'est malsain.
- > La ventilation naturelle ne peut pas être contrôlée, donc ne peut pas garantir une bonne qualité d'air.
- > Un bâtiment à basse consommation d'énergie est beaucoup plus cher qu'un bâtiment qui remplit juste les conditions d'obtention du permis de construire.
- > L'éclairage naturel chauffe plus que l'éclairage artificiel, et demande donc plus de climatisation.