

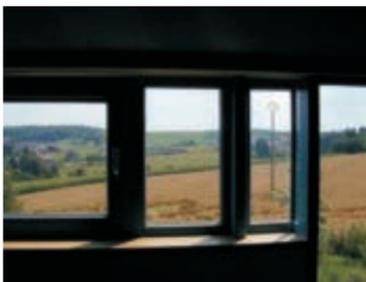


ce bulletin est publié par :
 FEBELCEM - Fédération de
 l'Industrie Cimentière Belge
 rue Volta, 6
 1050 Bruxelles
 tél. 02 645 52 11
 fax 02 640 06 70
 http://www.febelcem.be
 e-mail : info@felbelcem.be

auteurs :
 A. De Herde, A. Evrard
 Architecture et climat
 dessins et mise en page :
 J. Flémal, S. Rouche
 Architecture et climat



éditeur responsable :
 J. P. Jacobs
 dépôt légal :
 D/2005/0280/04



arch. Ph. Jaspard - photos S. Rouche

Bibliographie

1. Directive européenne 2002/91/CE décembre 2002
http://europa.eu.int
2. Décret sur la performance énergétique et le climat intérieur de bâtiments
Ministère de la Communauté flamande
Moniteur belge, 7 juillet 2004
www.energiesparen.be
3. Méthode be
Ministère de la Communauté française
Moniteur belge, 30 avril et 9 mai 1996
4. NBN B 62-002 – Calcul des coefficients de transmission thermique des parois des bâtiments
Bruxelles : IBN, 1987
5. NBN B 62-002/A1 – Calcul des coefficients de transmission thermique des parois des bâtiments
IBN, 2001
6. NBN B 63-003 – Calcul des déperditions calorifiques des bâtiments
IBN, 1986
7. NBN B 62-201– Détermination de la conductivité thermique ou de la perméance thermique des matériaux de construction - Généralités
IBN, 1978
8. NBN B 62-301 – Isolation thermique des bâtiments – Niveau d'isolation thermique globale
IBN, 1979
9. NBN EN 12524 – Matériaux et produits pour le bâtiment – Propriétés hygrométriques – Valeurs utiles tabulées
IBN, 2000
10. NBN D 50-001 – Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation
IBN, 1991
11. ABC du ciment et du béton
Bruxelles : FEBELCEM, 2003
12. ANINK D. ; MAK J.
Beton en milieu : Antwoord op de meest gestelde vragen 's Hertogenbosch : VNC (Vereniging Nederlandse Cementindustrie), 1996
13. Guide de l'architecture bioclimatique – Cours fondamental d'architecture bioclimatique
Programme Learnet de l'observatoire des énergies renouvelables
Chaumont (F), 1996
14. HUBERTY J.-M.
Memento ciments bétons
Bruxelles : FEBELCEM, 1995
15. DE HERDE A.
Le manuel du responsable énergie : L'utilisation rationnelle de l'énergie dans le tertiaire
Stavelot : Ministère de la Région wallonne, 1992
16. Guide à la conception bioclimatique
RD Energie, Architecture et Climat
SPPS Bruxelles, 1986
17. Les bétons de masse
Bulletin du ciment n°4
Bruxelles : FIC (FEBELCEM), 1981
18. Intérêt thermique de la masse
Bulletin du ciment n°8
Bruxelles : FIC (FEBELCEM), 1982

www.jaspard-architecture.be
 www.wollaert.be
 www.claisse-architecte.be
 www.climat.arch.ucl.ac.be

BÉTON ET UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE

Depuis les crises de l'énergie des années 70, la plupart des pays européens ont adopté des réglementations thermiques de plus en plus sévères. Cette tendance se renforce encore de jour en jour face à la dégradation de notre environnement (émission de gaz à effet de serre, épuisement des ressources...) et à une évolution de nos modes de vie qui nous fait passer toujours plus de temps à l'intérieur.

Depuis l'apparition du concept de Développement Durable, un ensemble de mesures ont donc été prises pour inciter les concepteurs, mais aussi les occupants, à opter pour une Utilisation Rationnelle de l'Energie (URE). L'architecture bioclimatique est née de ces considérations et une série de principes de conception y ont été associés afin de réduire les consommations et d'améliorer le confort de nos lieux de vie.

Le présent document s'appuie sur les différents principes bioclimatiques pour resituer, d'un point de vue énergétique, les avantages de l'utilisation du béton dans la construction. Il présente d'abord les caractéristiques principales de différents types de bétons, en parallèle à celles des matériaux de construction les plus courants, avant d'analyser, en regard de chaque principe bioclimatique, l'influence des caractéristiques du matériau sur la performance énergétique du bâtiment.

Un intérêt tout particulier est accordé à l'inertie thermique que confère l'utilisation du béton et sa place dans les réglementations thermiques belges. Les enjeux de la directive européenne du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments et les projets à l'étude au niveau régional pour un alignement avec celle-ci sont évoqués afin d'évaluer les tendances actuelles ainsi que les perspectives quant à l'utilisation du béton dans ce secteur.

DOSSIER
 CIMENT

35
 juin 2005

béton
 performances
 thermiques

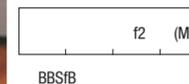


Table des matières

1. Des bétons lourds... aux bétons caverneux	2
Caractéristiques physiques principales	
Cycle de vie et énergie grise	
2. Principes de l'Architecture bioclimatique.....	4
L'approche bioclimatique	
Le bâtiment dans son climat	
Les paramètres de confort des occupants	
3. Stratégie du chaud en période hivernale	6
CAPTER – Valoriser les apports solaires	6
STOCKER – Exploiter l'inertie thermique du bâtiment	8
CONSERVER – Limiter les déperditions thermiques .	13
DISTRIBUER – Répartir la chaleur	17
4. Stratégie du froid en période estivale	18
PROTÉGER – Eriger des écrans	18
MINIMISER – Limiter les apports internes	19
DISSIPER – Eviter les surchauffes	19
5. Performances énergétiques globales	21
Directive européenne	21
Niveau de consommation d'énergie primaire	21
Besoins nets en énergie de chauffage	22
Profil de consommation et période de chauffe	23
6. Exemples construits	24
Démarche bioclimatique basique pour un habitat simple en milieu rural	24
Habitation en blocs de béton	25
Habitation en béton coulé en place	26
Rénovation d'une maison de maître et conciergerie.....	27

Tableau de valeurs utiles

	ρ [kg/m ³]	λ_{U_i} [W/mK]	λ_{U_e} [W/mK]	c [J/kgK]
Éléments pierreux sans joints				
Béton normal lourd armé	2400	1,7	2,2	1000
Béton normal lourd non armé	2200	1,3	1,7	1000
Béton léger	350-400	0,14	-	1000
	650-700	0,21	0,34	1000
	1100-1200	0,37	0,58	1000
Maçonnerie (certifiées)				
Terre cuite	1000	0,29	0,57	1000
	1500	0,46	0,91	1000
	2000	0,69	1,35	1000
Silico-calcaires	1000	0,34	0,74	1000
	1500	0,60	1,30	1000
	2000	1,18	2,58	1000
Blocs de béton	1600	0,97	1,26	1000
	2000	1,32	1,71	1000
	2400	1,90	2,47	1000
Briques de béton d'argile expansé	400	0,13	-	1000
	1000	0,35	0,46	1000
	1700	0,76	1,00	1000
Blocs de béton cellulaire	300	0,09	-	1000
	600	0,18	0,29	1000
	1000	0,29	0,47	1000
Enduit				
Mortier de ciment	1900	0,93	1,5	1000
Mortier de chaux	1600	0,70	1,2	1000
Plâtre	1300	0,52	-	1000
Matériaux isolants (certifiés)				
Laine minérale	≥ 20	0,041	-	1030
Polystyrène expansé	≥ 20	0,040	-	1450
Polystyrène extrudé	≥ 25	0,034	-	1450
Verre cellulaire	130-140	0,048	-	1000
Bois et dérivés				
Bois massif	≤600	0,13	0,15	1880
	>600	0,18	0,20	1880
Panneaux de particules	450-750	0,14	-	1880
Panneaux de fibres liées au ciment	1200	0,23	-	1470
Matériaux divers				
Panneaux en ciment renforcé par fibres	1400-1900	0,35	0,50	1000
Acier	7800	45	45	390
"Petit granit" (pierre bleue)	2700	2,91	3,49	1000
Verre	2500	1	1	750
Membrane bitumée	1100	0,23	0,23	1000
Air immobile	1	0,026	0,026	1000
Eau immobile	1000	0,58	0,58	4176
Neige poudreuse	100	0,05	0,05	2088
Glace	900	2,23	2,23	2088

1. Des bétons lourds... aux bétons caverneux

Caractéristiques physiques principales

Pour le concepteur, le choix des matériaux a une place fondamentale dans son processus de conception car chaque matériau possède ses spécificités propres qu'il faut apprendre à connaître et à exploiter au mieux. L'influence de ce choix a des répercussions non négligeables sur la performance énergétique globale du bâtiment.

Le tableau ci-contre reprend les caractéristiques principales de différents matériaux (NBN B 62-002/A1).

- *Masse volumique* ρ [kg/m³] :

Quotient de la masse par le volume.

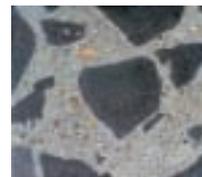
- *Valeur de calcul de la conductibilité thermique* λ_{U_j} [W/mK] :

La conductibilité thermique est la quantité de chaleur traversant, en régime permanent, le matériau, par unité de temps, par unité de surface et par unité de gradient de température dans le matériau. La « valeur de calcul » de la conductibilité thermique d'un matériau ou d'un produit dans les conditions intérieures (λ_{U_i}) ou extérieures (λ_{U_e}) est la valeur pouvant être considérée comme typique de l'utilisation de ce matériau ou de ce produit lors de sa mise en œuvre dans un élément de bâtiment.

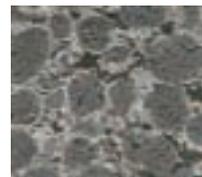
- *Chaleur massique* c [J/kgK] :

Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter une unité de masse du matériau et d'une unité de température.

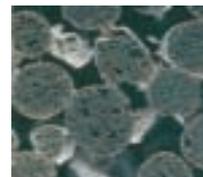
Ces caractéristiques sont données pour les matériaux les plus courants. En outre, des caractéristiques très diverses sont obtenues pour les bétons : des bétons normaux lourds aux bétons léger et très léger, où une partie des granulats ordinaires sont remplacés par des granulats plus légers, du type argile expansé. On considère, en plus des armatures éventuelles, que la confection des bétons normaux lourds est faite avec 70 à 80 % de sable et de granulats (alluvionnaires, sédimentaires, éruptifs ou recyclés), 15 à 20 % de ciment, 5 à 10 % d'eau, et quelques pour cents d'adjuvants ou d'additions (pourcentage en poids). Les illustrations ci-dessous présentent l'aspect d'une coupe dans différents types de bétons, notamment dans un béton « caverneux », duquel le sable est généralement exclu, ou sous dosé et qui a des propriétés de perméabilité particulières.



Béton « normal lourd »



Béton « léger »



Béton « caverneux »

Cycle de vie et énergie grise

En Belgique, l'usage du béton est très répandu, bien plus que tout autre matériau de construction. Nos centrales et usines de préfabrication en produisent annuellement près de 30 millions de tonnes (soit ~12,5.10⁶ [m³/an]). L'objet n'est pas ici d'évaluer la charge écologique que représente son utilisation aux différentes phases de son cycle de vie, mais bien de comptabiliser l'énergie consommée lors de celles-ci. Cette énergie est l'énergie grise, elle est associée à l'extraction et au traitement des composants, à la confection et au transport du béton, à l'opération de construction, à la phase d'utilisation et d'entretien, puis à la démolition (réutilisation ou élimination) d'une unité de matériau [source : FEBELCEM].

L'unité choisie ici est 1 m³ de béton normal lourd armé coulé in situ en Belgique.

Extraction et traitement des composants

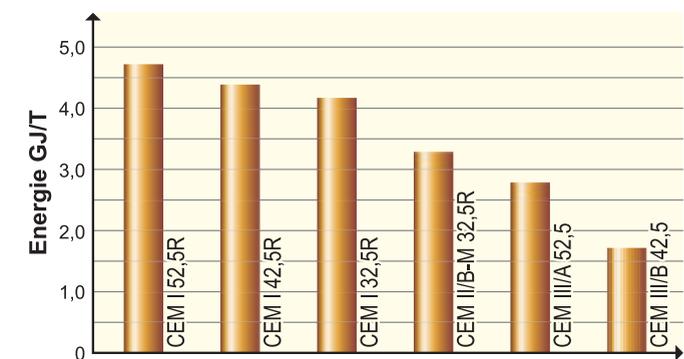
Ciment

La Belgique produit annuellement près de 7 millions de tonnes de ciment dont environ 5 millions sont destinées à être utilisées à l'intérieur des frontières. Ceci représente 3,5 % de la consommation totale de l'Union européenne. Les 2 millions restants sont exportés, en majorité vers les Pays-Bas, l'Allemagne et la France. Les cimenteries belges consomment chaque année 600 000 tonnes d'équivalent pétrole en combustible, ce qui équivaut approximativement à la demande annuelle d'une ville de 700 000 habitants. Le secteur cimentier belge met un point d'honneur à la réduction de ses consommations énergétiques.

La dépense énergétique se répartit de façon inégale entre les différents postes de la fabrication du ciment. Une température de 1450°C est nécessaire pour la transformation des matières premières introduites dans le four (la chaux - CaCO₃, la silice - SiO₂, l'alumine - Al₂O₃ et l'oxyde ferrique - Fe₂O₃). En pratique, il faut même atteindre une température de flamme de l'ordre de 2000°C ce qui représente la plus grande part de l'énergie consommée, soit 69 % du total. La préparation des minéraux et des combustibles n'utilise que 10 % du total de l'énergie et le processus de mouture après la cuisson, de l'ordre de 18 %.

L'industrie cimentière utilise des combustibles fossiles traditionnels tels que le charbon, le fioul et le gaz naturel. Les fours à ciment acceptent également des combustibles moins nobles, comme les schistes de terril, le coke de pétrole, les pneus, les huiles usagées... On y introduit aussi, mais en plus faible quantité du bois, des papiers, des résidus de broyage automobile, des matières plastiques, des fractions légères d'ordures, des déchets industriels, etc. Ainsi, une partie des sources énergétiques non renouvelables est substituée par des sous-produits ou des déchets. Un autre aspect important de l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie dans le secteur cimentier est l'intégration de matières secondaires (cendres volantes, laitier de haut fourneau...) dans la composition du ciment. Au cours des trente dernières années, le secteur a réduit ses consommations d'électricité et de combustible d'environ 30 %.

La figure suivante montre que le contenu énergétique du ciment varie selon le type de ciment et sa classe de résistance. Par exemple, la production d'une tonne de ciment portland (CEM I 42,5R) requiert 4,5 GJ d'énergie combustible et d'électricité. Donc, pour réaliser un m³ de béton contenant 350 kg de ce ciment, cela implique une dépense d'énergie de 1,58 GJ. Notons toutefois que la Belgique consomme globalement plus de CEM III que de CEM I : la moyenne belge de la dépense d'énergie par m³ de béton est donc inférieure à cette valeur.



Dépense énergétique pour la production des ciments

Sable et granulats

La fabrication du béton consomme annuellement 15 des 43 millions de tonnes de granulats produits en Belgique. Le secteur de la construction belge utilise 9 millions de tonnes de sable de sablière, de rivière ou de mer, sur les 16 millions produits annuellement en Belgique. Les consommations des engins utilisés pour l'extraction des graviers et des sables alluvionnaires ou marins dépendent du type de moteur de ces engins. Il faut draguer environ 1 m³ de matériau pour obtenir 1 tonne de sable ou de gravier. Dans le cas des différents traitements que doivent subir les granulats extraits de carrières sous forme de roche ou de la manutention des granulats recyclés, l'énergie utilisée est en général de l'énergie électrique. Si 1 m³ de béton nécessite approximativement 1800 kg d'agrégat et que l'énergie dépensée pour l'extraction, le traitement et le transport d'une tonne d'agrégat est de ±0,15 GJ/tonne, l'énergie grise de ceux-ci est alors de 0,27GJ pour la confection de la dite unité de 1 m³.

Armatures

L'acier utilisé pour la fabrication des armatures a un impact environnemental élevé. Il faut dépenser 22,5 GJ par tonne d'acier produit et 1 m³ de béton nécessite autour de 100kg d'armatures, soit 2,25GJ par m³ de béton. L'importance énergétique de ce poste pousse à optimiser les quantités d'acier, en choisissant du béton précontraint ou à hautes performances, ou en passant à des méthodes de dimensionnement plus précises.

Coffrage

Avec 0,5m³ de bois de coffrage par mètre cube de béton, et sachant que la production de 1m³ de bois demande approximativement 0,86GJ, la mise en œuvre de 1m³ de béton représente une dépense énergétique de 0,43GJ en coffrage.

Eau et autres composants

La quantité d'eau nécessaire à la confection de 1 m³ de béton est d'environ 200 litres. La quantité annuelle d'eau en Belgique, généralement de l'eau potabilisée, consommée pour la confection du béton, peut être estimée à 2 millions de m³. (NB: la consommation domestique d'eau potable en Belgique est d'environ 1,2 millions de m³ par jour).

En Belgique, les matières premières de base pour la production des adjuvants sont disponibles dans un état qui n'implique pas de fractionnement chimique. Les consommations d'énergie associées à leur production se limitent à celles des moteurs électriques utilisés pour leur mélange, à celles liées à leur transport, généralement en camions, et au pompage dans des réservoirs fixes. Remarquons cependant que le fait d'employer des adjuvants permet souvent de réduire l'énergie nécessaire au compactage du béton.

Les consommations citées sont faibles en comparaison des dépenses d'énergie totales pour la confection du dit m³ de béton. Elles peuvent être considérées comme négligeables.

Transport, confection et mise en œuvre

Il arrive fréquemment que le béton soit fabriqué dans une centrale avant d'être coulé sur le chantier. Outre le transport vers la centrale, les composants sont pesés et dosés automatiquement. Ils sont ensuite malaxés avec l'eau de gâchage.

L'énergie utilisée pour le transport vers la centrale est un poste énergétique relativement important et varie selon la distance et le mode de transport. La distance moyenne pour rejoindre la centrale à béton par voie fluviale (0,00032GJ/t.km) est de 100km. Le pesage et le malaxage des matières premières ne requièrent par contre que peu d'énergie, soit 0,025GJ/tonne et donc 0,06GJ par m³ de béton. L'énergie dépensée à ce stade est donc de 0,137GJ par m³ de béton.

Une fois mélangé, le béton frais est envoyé en camion vers le chantier où il est coulé dans un coffrage et compacté par vibration. La distance moyenne considérée pour atteindre le chantier est de 50km (0,00172GJ/t.km) et l'énergie nécessaire au coulage et au compactage est négligée. La consommation est de 0,206GJ pour 1 m³ de béton.

Le cumul des consommations pour ce poste atteint une valeur approximative de 0,34GJ.

Phase d'utilisation et entretien

Les chapitres suivants montrent comment évaluer les déperditions thermiques et comment profiter de certains apports gratuits. Ces considérations énergétiques s'intègrent aux performances énergétiques globales d'un bâtiment et non à celles du matériau béton. L'énergie dépensée pour certaines opérations d'entretien du béton peut être négligée.

Démolition - réutilisation ou élimination

La quantité d'énergie nécessaire pour la démolition proprement dite (transport compris) est de ± 0,1GJ par m³ de béton. Pour séparer l'acier et trier les résidus, on l'estime à 0,06GJ/tonne, et le broyage et criblage en granulats consommeront encore 0,01 GJ/tonne. Il faudra donc 0,268GJ par m³ de béton pour le traitement des déchets en fin de vie.

Récapitulatif

Reprenons les postes les plus significatifs du point de vue de la consommation de l'énergie pour un cycle de vie complet de « 1 m³ de béton normal lourd armé coulé in situ en Belgique »:

Ciment	1,58 GJ
Sable et granulats	0,27 GJ
Armatures	2,25 GJ
Coffrage	0,43 GJ
Transport et mise en œuvre	0,34 GJ
Démolition et traitement des déchets	0,27 GJ
Total	5,14 GJ

Exemples comparatifs

Le tableau suivant reprend les valeurs indicatives de l'énergie grise de quelques matériaux, selon différentes sources:

	GJ/m ³	kg/m ³	GJ/tonne
<i>Béton en milieu, VNC, 1996/FEBELCEM :</i>			
Béton normal lourd armé	5,14	2400	2,14
Béton normal lourd non armé	2,89	2200	1,31
<i>EPFL, O. Joliet, 2003 :</i>			
Briques terre cuite pleine	4	1500	3
Bois massif	1	500	2
Bois lamellé collé	5,1	500	10,2
Acier	250-780	7800	32-100
Verre	35	2500	14
Aluminium	500	2700	184
<i>Graue Energie von Baustoffen, Büro für Umweltschutz, 1995:</i>			
Laine de roche	0,7	56	12,3
Laine de verre	5,9	128	46
Polyuréthane	3	30	100

Remarque

Considérons une habitation moyenne intégrant 60 m³ de béton. L'énergie grise contenue dans ce béton est donc d'environ 200 GJ, soit 56000kWh. En admettant que la maison atteigne une consommation de l'ordre de 15000kWh par an pour le chauffage, cette énergie grise correspond à un peu plus de trois ans et demi de consommation. Ce chiffre peut paraître élevé, mais dans le cas d'une durée de vie de 75 ans, il représente moins de 5%. Comparé à d'autres matériaux, le béton permet en outre souvent de réduire les coûts énergétiques à d'autres niveaux (entretien réduit, absence de systèmes de conditionnement d'air...).

2. Principes de l'Architecture bioclimatique

L'approche bioclimatique

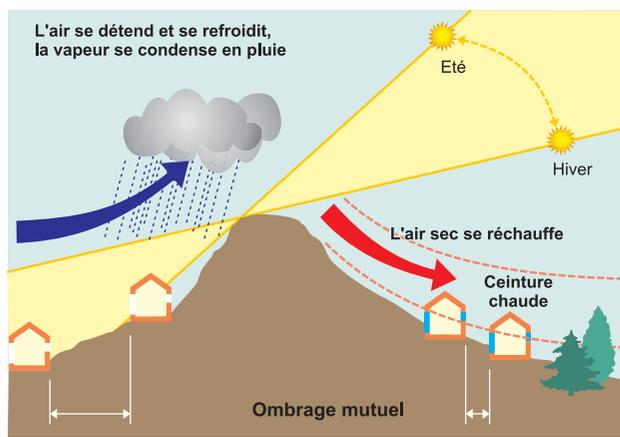
Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel il appartient. Le but de la conception, de la rénovation et de la construction d'un bâtiment est de réaliser ce microcosme en concordance optimale avec son environnement et de donner ainsi au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'architecte sur l'environnement. L'architecture ainsi définie inclut le climat et la dynamique qu'il implique: c'est l'architecture bioclimatique.

L'occupant est au centre des préoccupations: au-delà des questions d'économie d'énergie et de protection de l'environnement, l'objectif de l'architecture bioclimatique est d'essayer de répondre aux exigences de confort que l'on aborde ci-dessous. Remarquons que le comportement des occupants commande la "bonne marche" d'une habitation bioclimatique. Il importe que les habitants prennent conscience de l'importance de leur rôle et apprennent à vivre en symbiose avec leur environnement, au rythme des jours et des saisons.

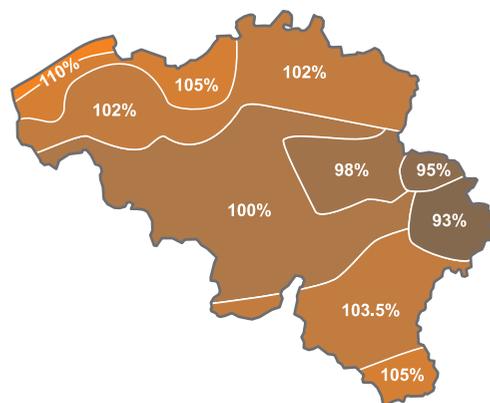
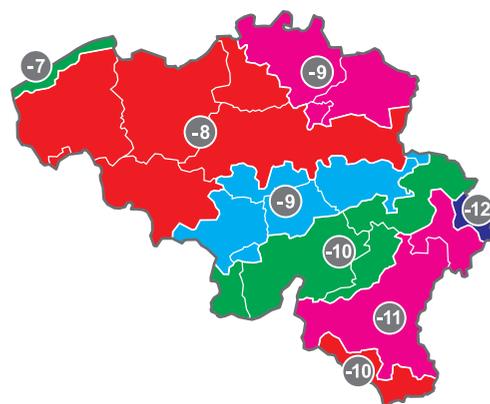
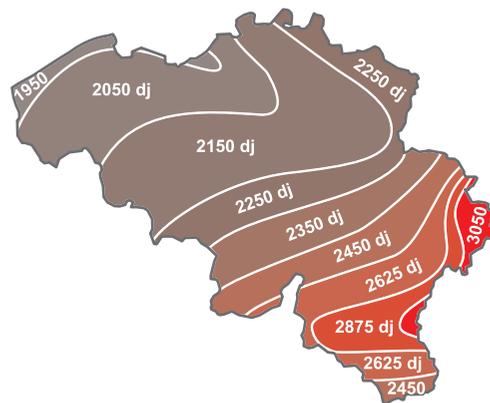
Nos climats n'offrent pas des conditions climatiques qui assurent le confort thermique toute l'année, et il est donc nécessaire de mettre en œuvre diverses stratégies adaptées aux différentes saisons. En hiver, il importe de profiter des apports solaires et de se protéger du froid, c'est la **stratégie du chaud**. En été, pour éviter les surchauffes, il faut se préserver du soleil et, parfois, ouvrir sa maison aux vents, c'est la **stratégie du froid**. Enfin, l'habitat bioclimatique s'accorde aux rythmes naturels en tirant le meilleur parti possible de la lumière naturelle, c'est la stratégie de l'éclairage naturel. Nous détaillerons ici les deux premières en cherchant à identifier comment le béton peut nous aider à les mettre en œuvre.

Le bâtiment dans son climat

Que ce soit en Belgique ou ailleurs, construire un bâtiment implique donc de bien s'informer sur la localisation et l'environnement proche du projet. Le climat belge, tempéré et humide, n'est pas uniforme sur le territoire, de plus, l'environnement proche du projet conditionne, de manière locale, la vitesse du vent autour de celui-ci (donc son taux d'infiltration) et le rayonnement solaire qui l'atteint hors de l'ombre projetée par les bâtiments voisins.



Influences de l'environnement proche



Le concepteur se réfère à un ensemble de cartes spécifiques, établies à partir des données météo de différentes stations. Elles lui donnent les valeurs moyennes qu'il devra interpréter selon les contraintes locales du projet:

- la *carte des degrés-jours* (dj) pour calculer les déperditions annuelles par transmission et par ventilation (les dj sont calculés en faisant la somme, pour chaque jour de l'année, de l'écart entre la température désirée à l'intérieur et la température moyenne à l'extérieur pendant cette journée);
- la *carte des températures extérieures de base* (cfr. NBN B 62-003) pour déterminer les températures froides et calculer la puissance des corps de chauffe;
- la *carte du rayonnement solaire* pour le calcul des gains solaires disponibles à cet endroit, exprimé en pourcentage de la valeur obtenue à Uccle.

Les paramètres de confort des occupants

Assurer le bien-être des occupants doit être au centre des préoccupations de tout concepteur. Le sentiment de confort vient de la satisfaction ressentie par chacun vis-à-vis de son environnement. Différents paramètres thermiques, acoustiques, visuels et respiratoires ont été définis pour favoriser cette sensation.

Confort thermique

L'équilibre dynamique établi par échanges thermiques entre le corps et son environnement dépend de plusieurs paramètres: le métabolisme de l'individu, et donc son activité; son habillement; la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air ambiant; et la température des parois.

A partir de nombreuses mises en situation le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD – *Predicted Percentage Dissatisfied*) ainsi que des zones de confort thermique en fonction de l'activité et de l'habillement ont pu être mis en évidence. Il en ressort que la température des parois t_{parois} [°C] a autant d'importance que la température de l'air t_{air} [°C] sur la sensation de confort. C'est pourquoi la moyenne de ces deux valeurs est prise comme température de référence: la température résultante sèche ou température de confort t_{rs} [°C]. La norme NBN B 62-003 (1986) donne des valeurs de références différentes selon le type de locaux et le type d'occupation de ceux-ci. Pour chaque local:

$$t_{rs} = (t_{\text{parois}} + t_{\text{air}}) / 2$$

De plus, un écart de température de plus de 3°C entre l'air et les parois provoque souvent l'inconfort. On constate aussi qu'il est préférable que l'humidité relative de l'air se situe entre 30 et 70% et que l'air en mouvement ne dépasse pas la vitesse de 0,2m/s.

Confort acoustique

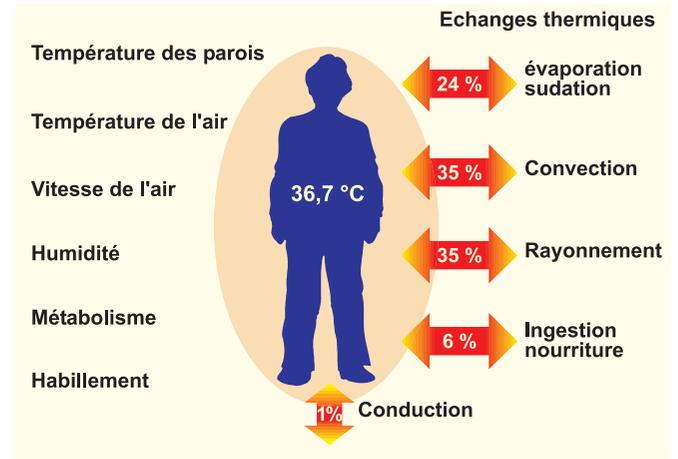
Du point de vue acoustique, le confort d'un local dépend essentiellement du *niveau sonore* et du *temps de réverbération* de celui-ci. S'ils sont étanches à l'air, les matériaux lourds, comme le béton, transmettent peu les bruits aériens car l'énergie acoustique est vite dissipée en leur sein. Malheureusement, leur grande rigidité favorise souvent la transmission des *bruits d'impacts* et il faut prévoir d'astucieuses «coupures acoustiques» pour s'en prémunir. De plus, l'état de surface conditionne l'*absorption acoustique* de la paroi. Plus la paroi est lisse et dure, plus elle réverbère le son. Afin de répondre aux exigences du confort acoustique, la conception des parois devra donc intégrer l'ensemble de ces phénomènes.

Confort visuel

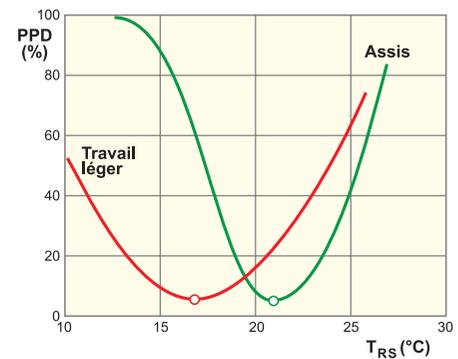
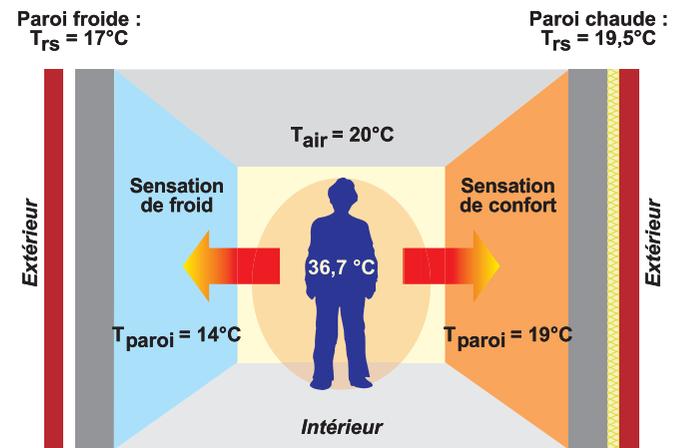
L'environnement visuel doit permettre de voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable. On doit pouvoir y exercer ses activités efficacement et avec le maximum de lumière naturelle.

Confort respiratoire

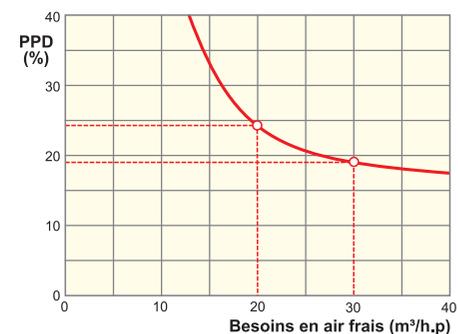
La qualité de l'air est importante pour les processus métaboliques et pour l'hygiène de chacun. Les maisons bien isolées sont souvent trop étanches: l'air ne s'y renouvelle pas suffisamment et il est fréquent de constater que la pollution intérieure de l'air (par ex. charge en CO₂, présence de radon...) est supérieure à la pollution extérieure. Aussi, la *ventilation* revêt-elle une importance croissante dans la problématique du confort et de l'hygiène des édifices. Le confort respiratoire est un facteur d'ambiance directement lié à la thermique de l'habitat, en effet, la purification de l'air implique son renouvellement par un processus de ventilation naturelle ou mécanique. Celle-ci constitue un élément de plus en plus important dans la consommation énergétique d'un bâtiment. L'utilisation du béton ne dégage pas de produits toxiques, elle est donc peu concernée par ce point.



Équilibre thermique entre le corps et son environnement

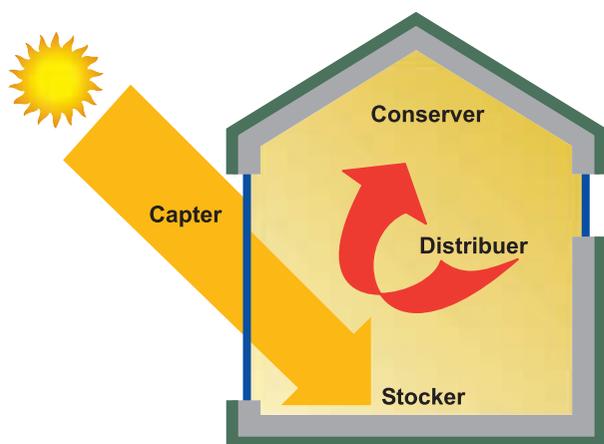


Importance de la température des parois



Importance de la ventilation

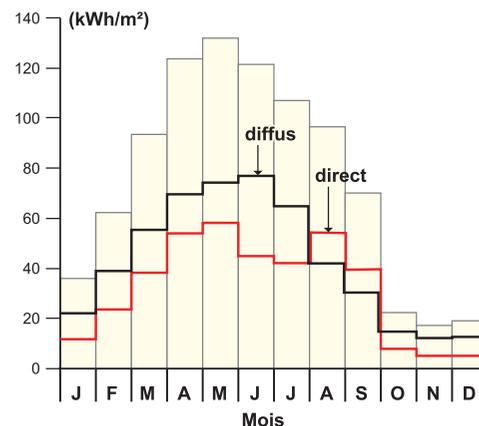
3. Stratégie du chaud en période hivernale



CAPTER

> valoriser les apports solaires

Capter la chaleur consiste à recueillir l'énergie solaire et à la transformer en chaleur. Le rayonnement solaire reçu par un bâtiment peut être direct ou diffus, mais, dans le nord de la France et en Belgique, la part de l'énergie solaire diffuse (environ 55%) est plus importante que la part du rayonnement direct, même au cours des mois d'été (influence de la nébulosité). La figure suivante représente l'énergie mensuelle reçue sur une surface horizontale à Bruxelles. On constate qu'à cet endroit, seuls les mois d'août et de septembre connaissent un ensoleillement direct plus important que l'ensoleillement diffus.



Énergie globale due à l'ensoleillement

Lorsque les rayons du soleil frappent un élément transparent, ils sont partiellement réfléchis ou absorbés, et partiellement transmis, alors que lorsqu'ils frappent une paroi opaque, une partie de l'énergie rayonnée est absorbée et le reste est réfléchi, mais il n'y a pas de transmission directe. Une part de l'énergie absorbée est alors diffusée de l'autre côté de la paroi, avec un certain déphasage, c'est l'objet du point suivant : «STOCKER».

Une partie du rayonnement qui a traversé un vitrage est piégée de l'autre côté, provoquant une augmentation de la température intérieure, c'est l'effet de serre. Qu'ils se fassent par transmission directe à travers des éléments transparents, ou après avoir été absorbés dans la masse des matériaux, les gains solaires sont fonction de l'angle d'incidence des rayons du soleil, de l'orientation et de l'inclinaison de la paroi, du vent et des propriétés du matériau transparent utilisé ou de la couleur et de l'aspect de surface, pour les matériaux opaques.

La quantification des gains solaires d'un bâtiment commence par la détermination de la part d'ensoleillement qui va effectivement l'atteindre. La hauteur de la ligne d'horizon est établie vue du terrain, car si elle est trop élevée, la durée d'ensoleillement des parois est fortement réduite. Ensuite, les gains de chaleur bruts de chacun des vitrages sont déterminés, après leur avoir assigné un facteur d'ombrage. Pour cela de nombreux tableaux sont disponibles et il existe, en Région wallonne, une marche à suivre précise pour intégrer ces apports solaires dans le calcul des besoins nets en énergie d'un bâtiment (voir «Besoins nets en énergie de chauffage»).

A titre d'exemple, la figure ci-après représente le flux solaire instantané traversant un double vitrage par une journée ensoleillée du mois de juillet, en fonction de l'orientation de la fenêtre, en Watts par m² de vitrage.

L'orientation la plus critique est l'ouest: l'énergie apportée par le rayonnement du soleil, bas sur l'horizon se cumule à la chaleur emmagasinée par le bâtiment durant la journée et le risque de surchauffe est plus grand. Pour un vitrage orienté au sud, les apports solaires sont plus importants en hiver car le soleil est plus bas sur l'horizon et ses rayons sont donc plus pénétrants. Tandis qu'en été, le phénomène inverse évite de renforcer le risque de surchauffe.

Pour les parois opaques, la fraction de rayonnement solaire incident absorbé est déterminée par l'intermédiaire du *coefficient d'absorption solaire* α [-], dont voici quelques valeurs de références :

Béton propre	0,55
Béton à moitié propre	0,70
Béton sale	0,80
Ardoise	0,89
Brique ordinaire, rouge	0,68

La couleur de la surface et la vitesse de l'air contre celle-ci ont une grande importance sur la manière dont le rayonnement solaire est absorbé. Pour s'en convaincre, les schémas suivants montrent l'évolution de la température sur la face externe d'une paroi en béton léger couverte d'un enduit au ciment, orientée au sud, par ciel serein, le 15 juin, en Belgique. Pour le schéma de gauche, les trois courbes correspondent à des coefficients d'absorption solaire α différents: 0,7 (rouge et brun); 0,45 (gris); 0,2 (blanc).

Dans le schéma de droite, les courbes montrent l'influence du vent sur la température de la surface. La température intérieure est fixée par hypothèse à 20°C.

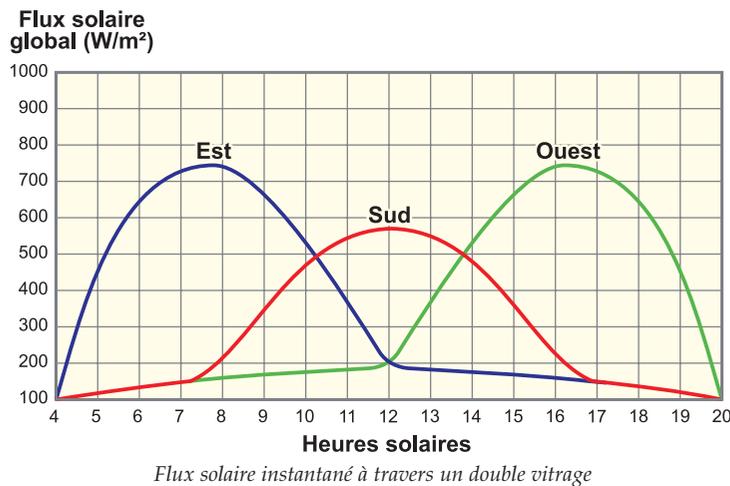
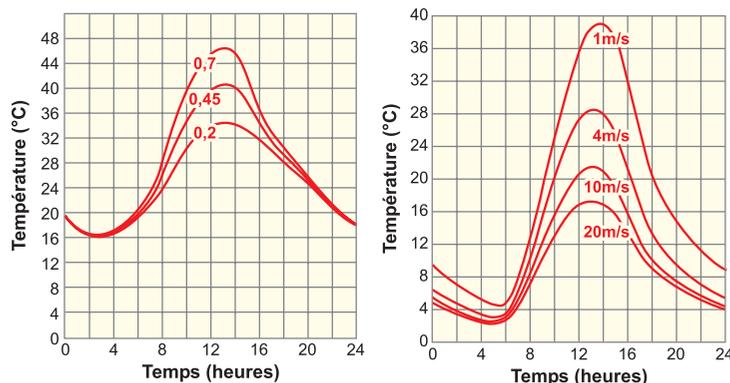


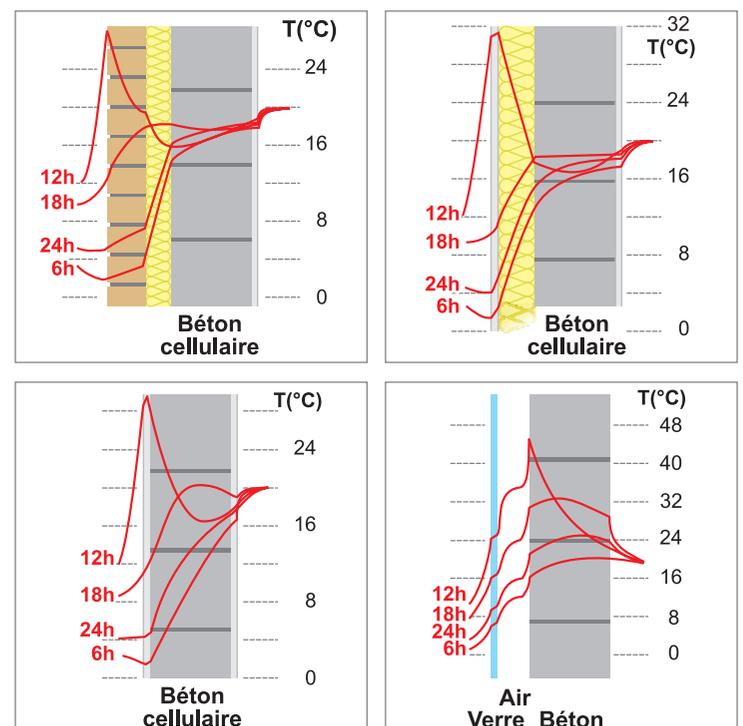
Schéma 1 : Différents coefficients d'absorption solaire
Schéma 2 : Influence du vent sur la température de surface



Hélas les gains solaires à travers les parois opaques isolantes ne sont pas valorisables. En effet, la présence d'un isolant empêche la masse intérieure de la paroi de participer aux variations thermiques dues au rayonnement solaire. Dans le chapitre suivant, «STOCKER», on reviendra sur le fait que l'enjeu principal de l'exploitation des effets de l'inertie est de «rendre accessible» la masse thermique aux échanges entre cette masse et l'ambiance intérieure.

Les schémas ci-dessous illustrent les variations de température dans différents types de parois orientées au sud, par ciel serein et sous un vent de 4m/s, le 15 mars en Belgique. La température intérieure est fixée à 20°C. Dans les deux premiers (double mur isolé, mur simple isolé), la température à l'intérieur des blocs varie très peu. Dans ces deux cas, les apports solaires n'influencent donc pas l'ambiance intérieure. Dans les deux suivants (mur simple en béton léger, mur derrière un vitrage) par contre, la température à l'intérieur des matériaux et à la surface évolue significativement, mais ces parois sont mal isolées.

Variation de température dans l'épaisseur de différents types de parois



STOCKER

> exploiter l'inertie thermique du bâtiment

Notions préliminaires

En régime variable, donc dynamique, la manière dont chaque matériau accumule et restitue de la chaleur dépend notamment de deux caractéristiques physiques liées à une combinaison de leur masse volumique ρ , de leur conductivité thermique λ et de leur chaleur massique c .

Diffusivité thermique

La vitesse avec laquelle la température d'un matériau évolue est lié au rapport de la conductivité thermique sur le produit des deux autres $\lambda/\rho.c$, défini comme étant la *diffusivité thermique* a [m^2/s]. Plus elle est grande, plus le matériau s'échauffe rapidement.

Effusivité thermique

Par contre, la quantité de chaleur qu'il faut fournir au matériau pour élever sa température dépend de la racine carrée du produit de ces trois caractéristiques ($\rho \cdot \lambda \cdot c$)^{1/2}, valeur que l'on nomme *Effusivité thermique* Eff [$J/m^2Ks^{1/2}$] ou encore coefficient de contact. Plus elle est grande, plus il faudra fournir de l'énergie au matériau pour parvenir à le réchauffer. Elle est aussi responsable de la sensation de chaud (Eff petit) ou de froid (Eff grand) au toucher.

Le tableau suivant reprend les valeurs de références du béton et de quelques matériaux courants. Pour la facilité, c'est la valeur de la conductivité thermique dans des conditions intérieures λ_{int} qui a été utilisée.

	ρ [kg/m ³]	a [10 ⁻⁷ m ² /s]	Eff [J/m ² Ks ^{1/2}]
Béton normal lourd armé	2400	7,08	2020
Béton normal lourd non armé	2200	5,91	1691
Blocs de béton	2000	5,9	1625
Briques de béton			
d'argile expansé	1000	3,5	592
Béton léger	700	3	383
Terre cuite	1500	3,07	831
Silico-calcaires	1500	3	949
Blocs de béton cellulaire	600	3	329
Laine minérale	30	13,27	36
Polystyrène extrudé	25	9,38	35
Verre cellulaire	130	3,69	79
Bois massif	500	1,38	350
Panneaux de fibres liées			
au ciment	1200	1,3	637
Acier	7800	148	11700
"Petit granit" (pierre bleue)	2700	10,78	2803
Verre	2500	5,33	1369
Air immobile	1	260	5
Eau immobile	1000	1,39	1556

Parois composées d'un seul matériau

Cas d'un choc thermique

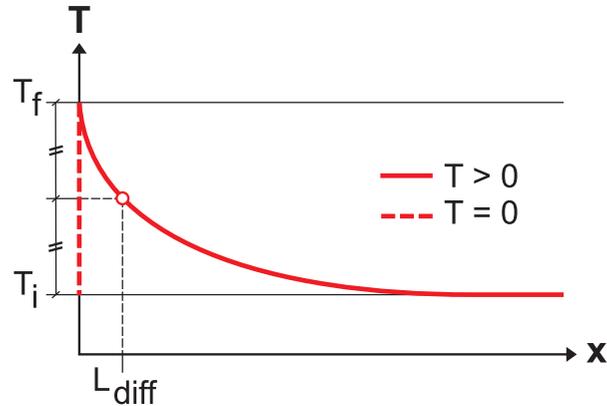
Lorsqu'une des faces d'une paroi est soumise à une variation brusque de température θ , passant d'une température T_i à T_f , la répartition de ce choc thermique dans l'épaisseur de la paroi dépend de la *longueur de diffusion* L_{diff} qui a la dimension d'une longueur [m]. Elle exprime la profondeur x à laquelle près de la moitié (48%) du saut initial de température q s'est propagée après un temps donné t . Elle vaut :

$$L_{diff} = (at)^{1/2}$$

La quantité totale de chaleur q [J/m^2] fournie à la paroi après un temps t peut de plus s'exprimer par l'équation suivante :

$$q = 2\theta \cdot (t/\pi)^{1/2} \cdot Eff$$

En outre, on constate que l'énergie nécessaire pour engendrer cette augmentation de température n'est pas proportionnelle au laps de temps considéré, mais à sa racine carrée.



Variation de température lors d'un choc thermique

Exemple

Soit une paroi très épaisse en béton normal lourd non armé séparant deux ambiances à $T_i = 20^\circ\text{C}$ dont l'une passe brusquement à une température de $T_f = 40^\circ\text{C}$ ($\theta = T_i - T_f = 20^\circ\text{C}$).

1 /Après 4 heures :

$$L_{\text{diff}} = (5,91 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 3600)^{1/2} = 9,2 \text{ cm}$$

La longueur de diffusion L_{diff} vaut 9,2 cm et la température à cette profondeur L_{diff} est alors de $T_i + (\theta/2) = 30^\circ\text{C}$ si la température de l'ambiance chaude reste à 40°C pendant tout le laps de temps écoulé.

$$q = 2 \cdot 20 \cdot [(4 \cdot 3600) / 3,14]^{1/2} \cdot 1691 = 4,58 \text{ MJ/m}^2$$

La quantité totale de chaleur q reçue par la paroi pendant ce laps de temps est de $q = 4,58 \text{ MJ/m}^2$.

Remarque : Le même calcul pour une paroi en bois massif donne une longueur de diffusion de 4,5 cm et une quantité de chaleur reçue de 0,9 MJ/m².

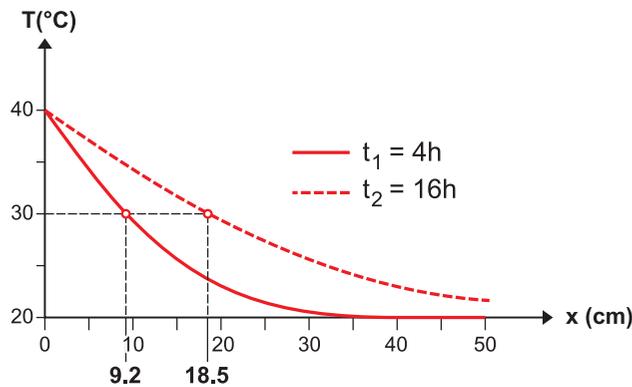
2 /Après 16 heures :

$$L_{\text{diff}} = (5,91 \cdot 10^{-7} \cdot 16 \cdot 3600)^{1/2} = 18,5 \text{ cm}$$

$$q = 2 \cdot 20 \cdot [(16 \cdot 3600) / 3,14]^{1/2} \cdot 1691 = 9,16 \text{ MJ/m}^2$$

La longueur de diffusion vaut 18,5 cm, soit le double de ce qu'elle valait après 4 heures d'exposition. C'est aussi le cas de la quantité totale de chaleur q à fournir à la paroi, qui vaut à ce moment $q = 9,16 \text{ MJ/m}^2$.

Remarque : La longueur de diffusion d'une paroi en bois massif est alors de 9 cm et la quantité de chaleur qu'elle a reçue pendant ce laps de temps est de 1,8 MJ/m².



Choc thermique dans un béton normal lourd

Cas d'un régime harmonique

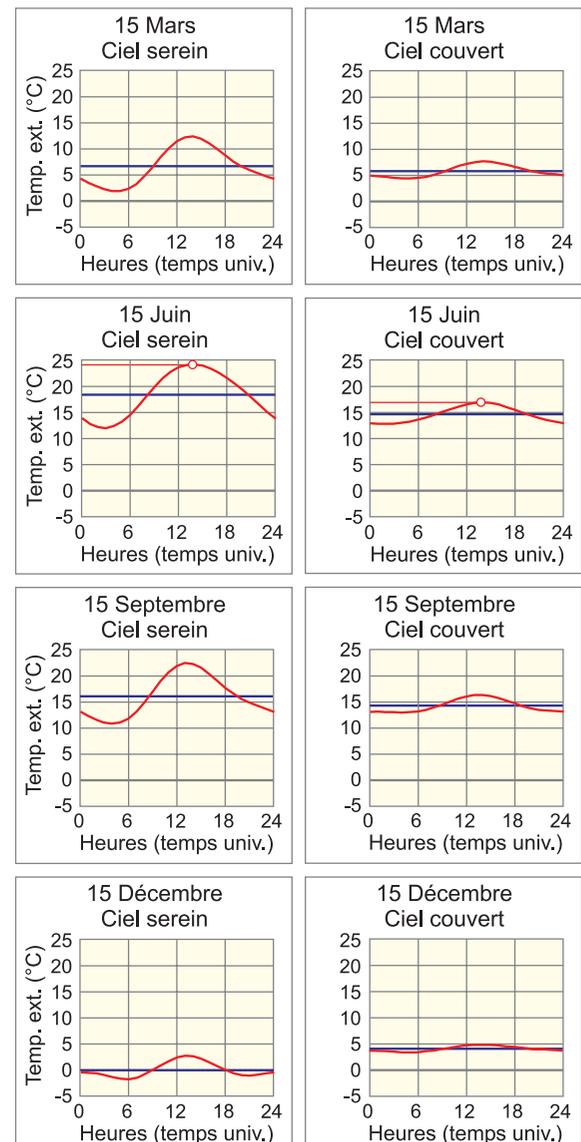
Températures extérieures

Le régime des températures extérieures est variable, son évolution est assimilable à une sinusoïde dont l'axe représente la température moyenne journalière. Cette dernière subit à son tour, à travers les saisons une évolution cyclique annuelle oscillant autour de la température moyenne annuelle. L'amplitude de la variation de la température extérieure est désignée par θ [$^\circ\text{C}$]. Elle est égale à l'écart de température entre les températures extrêmes et la valeur moyenne de l'air à l'extérieur.

La variation journalière de la température extérieure a une période T de 24 heures et la vitesse angulaire de cette ondulation, ou pulsation ω [rad/h] est exprimée par $\omega = 2\pi / T$, qui vaut dans ce cas $0,7 \cdot 10^{-5}$ cycle par seconde.

Les graphes ci-dessous donnent l'évolution journalière de la température extérieure moyenne par ciel serein et par ciel couvert, le 15 des mois de mars, juin, septembre et décembre, à Uccle.

Évolution journalière de la température



Profondeur de pénétration

Une longueur de diffusion a été définie dans le cas d'un choc thermique. Dans le cas d'un régime harmonique, il est utile de définir la *profondeur de pénétration* δ [m] telle que le rapport d'amplitude de l'onde amortie à cette profondeur sur celle de la face sollicitée est égal à $1/e$, soit 37% de l'amplitude de départ. L'amplitude de la variation de température θ_{init} de face extérieure de la paroi dépend de celle de l'air extérieur θ et des effets de convection, de rayonnement ou d'évaporation à la surface.

Il en découle que :

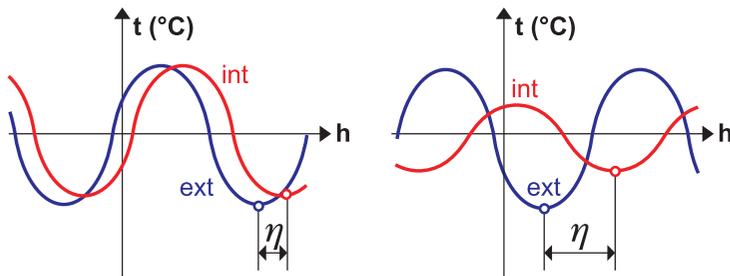
$$\delta = (2a / \omega)^{1/2} = (aT / \pi)^{1/2}$$

Déphasage et amortissement

On observe en effet, qu'en tout point de la paroi, et donc aussi sur la face opposée à la sollicitation, l'ondulation de départ est progressivement amortie - l'amplitude est réduite - et qu'elle est aussi déphasée - les extrema de la sinusoïde sont décalés dans le temps. Le *facteur d'amortissement de l'amplitude* ν [-], ainsi que le *déphasage temporel* η [h] à une profondeur x sont alors définis. Si x est choisi comme étant l'épaisseur de la paroi homogène, l'onde thermique résultante sur la face opposée à la sollicitation de la paroi homogène peut être caractérisée.

On peut écrire :

$$\eta = x \cdot \delta / 2a \quad \text{et} \quad \nu = 1 - \theta_{fin} / \theta_{init} = e^{-x/\delta}$$



Faible inertie thermique

Forte inertie thermique

Accumulation de chaleur

Si θ_{init} est l'amplitude de la variation de température sur la face sollicitée, la *capacité totale d'accumulation d'énergie* E_{tot} [J/m²] dans la paroi pendant une demi-période peut être exprimée par l'équation suivante :

$$E_{tot} = 2^{1/2} \cdot \rho \cdot c \cdot \theta_{init}$$

Du fait de l'amortissement progressif de l'amplitude de la sollicitation thermique qui traverse la paroi, toute l'épaisseur du mur ne participe pas effectivement au processus d'accumulation de chaleur en régime harmonique. On peut par exemple montrer que 90% de l'énergie-chaleur stockée est accumulée dans une épaisseur égale à 2,3 fois la profondeur de pénétration δ , définie par E_{δ} [J/m²].

On a donc :

$$E_{2,3\delta} = 0,9 \cdot E_{tot}$$

Exemples chiffrés

A/ Sur la face sollicitée :

Soit une paroi en béton normal lourd non armé sollicitée sur une de ses faces par une variation sinusoïdale de la température, d'amplitude $\theta_{init} = 5$ °C et de période $T = 24$ h. Une situation imaginaire où la température de la face sollicitée passe de $T_{i,min} = 15$ °C la nuit à $T_{i,max} = 25$ °C le jour est ainsi modélisée. La température moyenne du matériau est fixée pour l'exemple à 20 °C dans toute son épaisseur.

La profondeur de pénétration vaut :

$$\delta = [(5,91 \cdot 10^{-7} \cdot 16 \cdot 3600) / 3,14]^{1/2} = 12,8 \text{ cm}$$

B/ En $x = \delta$:

Le déphasage et l'amortissement valent :

$$\eta = 0,128^2 / 2 \cdot 5,91 \cdot 10^{-7} = 1370 \text{ s} = 3 \text{ h } 49'$$

et

$$\nu = e^{-1} = 37 \%$$

A cette profondeur $x = \delta$, l'amplitude de variation de la température est de $\theta_{fin} = \theta_{init} \cdot \nu = 1,8$ °C, passant de $T_{f,min} = 18,2$ °C, près de 4 heures (3 h 49') après que la température de la face sollicitée soit passée par son minimum (15°C), à $T_{f,max} = 21,8$ °C, 4 h après le maximum de la face extérieure (25 °C).

C/ Quel x pour un déphasage η de 12 heures ?

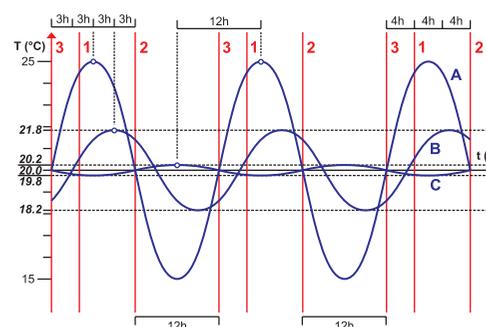
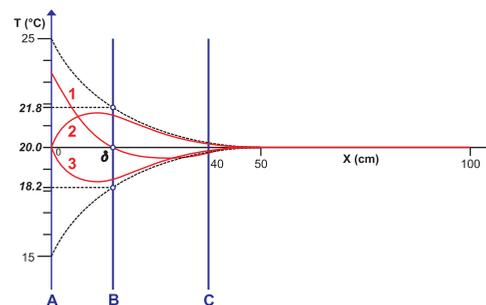
$$x = 2\eta \cdot (\pi a / T)^{1/2}$$

$$= 2 \cdot 12 \cdot 3600 \cdot [(3,14 \cdot 5,91 \cdot 10^{-7}) / (24 \cdot 3600)]^{1/2} = 40 \text{ cm}$$

Pour $\eta = 12$ h, on a $x = 40$ cm. Mais le facteur d'amortissement est alors de $\nu = 96$ %, et l'amplitude de variation de la température de $\theta_{fin} = 0,2$ °C, $T_{f,min} = 19,8$ °C et $T_{f,max} = 20,2$ °C.

Pour que la température minimale (19,8°C) sur la face opposée à la sollicitation soit atteinte en même temps qu'on atteint la température maximale sur la face sollicitée (25°C), c'est-à-dire pour un déphasage de 12 h, ce type de paroi doit avoir 40 cm d'épaisseur. Les variations de température de la face intérieure sont alors presque négligeables.

Les graphiques ci-dessous montrent la répartition des températures dans l'épaisseur du matériau (graph 1), ainsi que l'évolution des températures à différentes profondeurs (graph 2).



Évolution dynamique de la température lors d'une sollicitation thermique sinusoïdale

D/ Comparaison avec d'autres matériaux :

Dans les mêmes conditions que ci-dessus, le tableau de la page suivante reprend, pour différents matériaux, la profondeur de pénétration δ , ainsi que la capacité d'accumulation $E_{2,3,\delta}$ [MJ/m²] à une profondeur de $2,3 \cdot \delta$. A titre indicatif, on a rajouté la capacité d'accumulation E_{20} [MJ/m²] d'une paroi homogène de 20 cm. On remarque qu'un matériau lourd comme le béton accumule globalement plus de chaleur. En outre, l'épaisseur qui peut effectivement contribuer à l'accumulation de chaleur est aussi plus importante pour ces derniers.

	δ [cm]	$2,3 \cdot \delta$ [cm]	$E_{2,3,\delta}$ [MJ/m ²]	E_{20} [MJ/m ²]
Béton normal lourd armé	14	32,2	4,3	3,6
Béton normal lourd non armé	12,8	29,4	3,6	3,2
Blocs de béton	12,7	29,2	3,2	2,8
Briques de béton d'argile exp.	9,8	22,5	1,2	1,2
Béton léger	9,1	20,9	0,8	0,8
Terre cuite	9,2	21,2	1,8	1,8
Silico-calcaires	9,1	20,9	1,7	1,7
Blocs de béton cellulaire	9,1	20,9	0,7	0,7
Laine minérale	19,1	43,9	0,08	0,06
Polystyrène extrudé	16	36,8	0,07	0,06
Verre cellulaire	10,1	23,2	0,02	0,02
Bois massif	6,2	14,3	0,7	0,7
Panneaux fibres liées au ciment	6	13,8	1,3	1,4
Acier	63,8	146,7	24,7	7,4
"Petit granit" (pierre bleue)	17,2	39,6	5,9	4,5
Verre	12,1	27,8	2,9	2,1
Air immobile	8,5	19,6	0,001	0,001
Eau immobile	6,2	14,3	3,3	3,5

Parois multicouches

En toute rigueur, ce qui vient d'être dit n'est valable que pour une paroi semi-infinie (une face sollicitée et une épaisseur infinie) d'épaisseur homogène (composée d'un seul matériau). En effet, les cas réels sont fort complexes à modéliser en régime dynamique car l'influence de phénomènes que l'on a négligés ici peut prendre plus d'importance.

Cette complexité compromet souvent la prise en compte de l'inertie en pratique. On peut toutefois énoncer un principe général pour aborder le cas des parois multicouches. Comme observé dans le chapitre "CAPTER", une couche d'isolant au sein d'un mur empêche la masse du mur qui se trouve de l'autre côté de participer effectivement aux échanges dynamiques liés au stockage de la chaleur. Ainsi, pour exploiter les effets de l'inertie, le principe suivant est appliqué: **le concepteur doit «rendre accessible» la masse intérieure des parois du bâtiment afin que s'établissent des échanges entre cette masse et l'ambiance intérieure.** Comme illustré à travers les exemples précédents, les matériaux lourds, comme le béton, permettent d'accumuler globalement plus de chaleur. L'application de ce principe peut d'ailleurs être l'occasion d'exploiter les différentes opportunités architecturales qu'offre le béton apparent: brut de décoffrage, poli, mat, teinté, naturel ou ciré, lissé ou granuleux. Ce type de finition peut aussi avoir un intérêt économique puisque le coût d'une finition supplémentaire est épargné.

Remarquons toutefois, qu'on ne considère encore trop souvent que les régimes thermiques permanents et que l'effet de l'inertie par exemple n'apparaît dans les normes thermiques actuelles que dans le calcul des besoins nets en énergie (voir «*Besoins nets en énergie de chauffage*») et pour le calcul des puissances thermiques requises pour des locaux rarement ou périodiquement chauffés - NBN B 62-003/Annexe A de 1996 (voir ci-après). La nouvelle directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (voir «*Directive européenne*») demande de prendre en compte les conditions climatiques extérieures locales, ainsi que les exigences en matière de climat intérieur. Ainsi, le projet de décret, adopté par le Parlement flamand le 28 avril 2004 doit répondre à la directive en proposant une méthode complète basée sur calcul du niveau de la consommation d'énergie primaire E («*peil van energieverbruik*»).

Masse surfacique utile et classe d'inertie

Pour le calcul des besoins nets en énergie b_e qui seront abordés plus en détail dans la suite de ce document, cinq classes d'inertie ont été définies. Celles-ci influencent le rendement de récupération des apports gratuits (apports solaires et apports internes). Pour des constructions classiques (dites «traditionnelles»), la méthode de calcul du b_e préconise de choisir la classe I_3 pour les maisons et la classe I_5 pour les immeubles à appartements.

Dans les autres cas, cette classe d'inertie doit être justifiée par calcul. On calcule d'abord la masse surfacique réelle m_s [kg/m²] de toutes les parois limitant le volume protégé V et de toutes les parois contenues dans ce volume. Elle est obtenue en multipliant, pour chaque couche de matériaux, la masse volumique ρ par l'épaisseur e de la couche considérée. Ensuite on calcule la *masse surfacique utile* m_u [kg/m²], en ne considérant cette fois que la masse entre l'isolant et l'ambiance intérieure. Dans le cas d'une isolation répartie, la moitié de la masse surfacique totale est considérée et dans tous les cas, cette masse surfacique est limitée à 150 kg/m². La masse des vitrages est supposée nulle. Pour les parois intérieures au logement, la masse de la paroi est comptabilisée sans dépasser 300 kg/m². On définit alors la *masse conventionnelle de la paroi* M [kg/m²] par le produit de la surface de la paroi par la plus faible des deux valeurs m_s et m_u .

L'*indice d'inertie* I [kg/m²] du bâtiment est défini comme étant la somme des valeurs M pour l'ensemble des parois rapportée à la surface de plancher chauffé A_{ch} , soit $I = \sum M/A_{ch}$.

Ainsi, on détermine la classe d'inertie du bâtiment : I_1 pour $I < 60$; I_2 pour $60 < I \leq 150$; I_3 pour $150 < I \leq 400$, I_4 pour $I > 400$ et I_5 pour les immeubles à appartements.

Résistance thermique au réchauffage

Pour les locaux rarement ou périodiquement chauffés, l'annexe A de la norme NBN B 62-003 (1996), considère, comme la norme allemande DIN 4701 (1983), que les besoins thermiques Φ [W] d'un local sont la somme des *déperditions de base par transmission* Φ_j [W], des *déperditions de base par ventilation* Φ_v [W] et des besoins thermiques Φ_w [W] de toutes les parois du local, susceptibles d'accumuler de la chaleur (parois intérieures et extérieures, plancher, plafond). C'est le dernier facteur Φ_w qui nous intéresse ici, et la norme indique que

$$\Phi_w = \Sigma (A_w (\theta_i - \theta_0) / R_z)$$

où A_w est la superficie des parois [m²], θ_i la température résultante sèche intérieure souhaitée au terme de la période de réchauffage [°C], θ_0 la température intérieure régnant dans le local avant le réchauffage [°C] et enfin R_z , qui est la *résistance thermique moyenne au réchauffage* [m²K/W].

Cette résistance thermique moyenne au réchauffage est calculée d'après une formule semi-empirique :

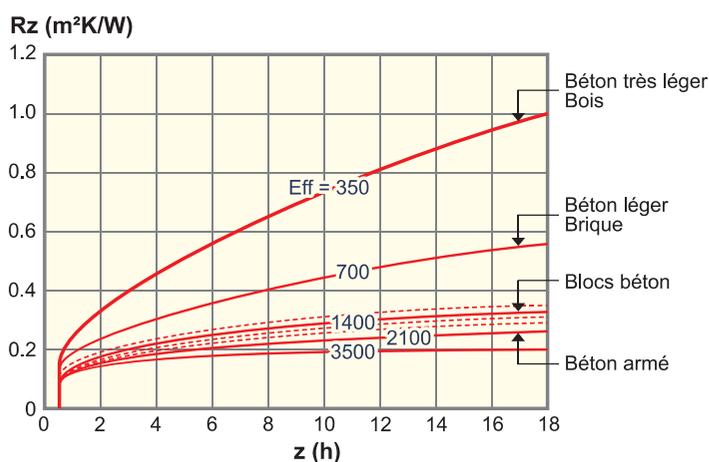
$$R_z = 0,13 + 67,7 \cdot (z - 0,5)^{1/2} / \text{Eff}$$

où z est la durée de réchauffage [h], les autres paramètres ayant déjà été définis.

Le graphique suivant montre que l'Effusivité Eff du matériau intervient à nouveau dans cette formule.

La température intérieure θ_0 , qui règne avant le redémarrage, peut être calculée, principalement à partir des déperditions thermiques du local, de l'inertie des parois et de la durée de refroidissement. Cette température est en général limitée à une valeur minimale (prévention au gel) par le système de chauffage. On peut considérer que θ_0 atteint cette valeur limite.

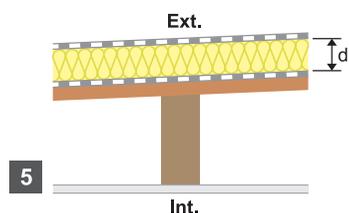
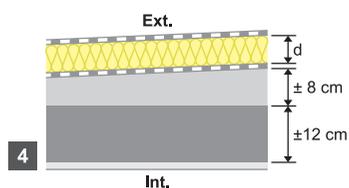
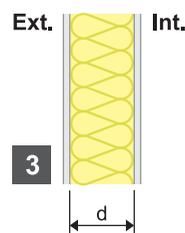
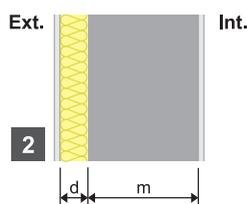
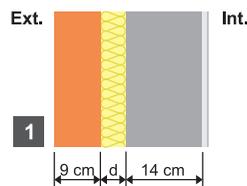
La formule présentée n'est toutefois valable que si la durée de réchauffage est limitée à 1, 3, 12 et 30 heures selon que l'épaisseur de la paroi est respectivement de 10, 20, 40 ou 60 cm. Toujours selon la NBN B 62-003, la puissance de chauffage à installer est déterminée à partir de la valeur la plus grande entre les besoins thermiques Φ , calculés par cette méthode, et les déperditions calorifiques normalisées Φ_n , calculées par la méthode présentée au point suivant. Des parois massives peuvent donc dans certains cas nécessiter une puissance de chauffage supérieure.



Détermination de la résistance thermique moyenne au réchauffage

Exemples de parois types

- 1 / Murs extérieurs creux, bloc creux de béton lourd → $m_u = 150 \text{ kg/m}^2$.
- 2 / Murs extérieurs massifs, bloc creux de béton lourd → $m_u = 150 \text{ kg/m}^2$.
- 3 / Murs à ossature en bois, isolant thermique entre multiplex, panneaux de particules de bois ou plaques de plâtre → $m_u = 37 \text{ kg/m}^2$.
- 4 / Toits plats, support en béton armé → $m_u = 150 \text{ kg/m}^2$.
- 5 / Toits plats, support en bois ou en matériaux dérivés du bois → $m_u = 150 \text{ kg/m}^2$.



CONSERVER

> limiter les déperditions thermiques

Coefficient de transmission thermique des parois

Lors de périodes froides, il s'agira de conserver toute chaleur disponible, qu'elle découle de l'ensoleillement, d'apports internes ou du système de chauffage. Dans les climats tempérés comme le nôtre, jusqu'aux deux tiers des déperditions thermiques du bâtiment peuvent se produire par conduction au droit de l'enveloppe.

En plus du choix d'une enveloppe isolée thermiquement, le concepteur est amené à concevoir un bâtiment le plus compact possible car les déperditions au travers des parois dépendent de la compacité du *volume protégé* V [m³]. Ce volume V est le volume de l'ensemble des locaux qui sont normalement destinés à être chauffés ou à être occupés et le *degré de compacité* ou facteur de forme du bâtiment est défini par le rapport V/A_T [m], où A_T [m²] est la *surface de déperdition*, surface par laquelle le volume protégé de la maison peut perdre de la chaleur. Plus le degré de compacité est élevé (bâtiment compact), moins les déperditions sont élevées pour un volume protégé donné. Pour aller plus loin, le concepteur peut aussi optimiser la répartition de la charge de chauffage en créant différentes zones dont l'orientation et l'ambiance thermique s'adaptent aux activités qui s'y déroulent.

D'un point de vue physique, un *flux de chaleur* q [W/m²] apparaît dans une paroi lorsque celle-ci sépare deux ambiances aux températures différentes. En régime stationnaire (flux constant), la résistance au passage de la chaleur de chaque couche de la paroi est proportionnelle à son *épaisseur* e [m] et à l'inverse du *coefficient de conductibilité thermique* λ [W/mK] du matériau qui la constitue. La *résistance thermique totale de la paroi* R_t [m²K/W] est la somme de la résistance de chaque couche et de la résistance superficielle des deux faces.

$$R_t = R_i + \sum e / \lambda + R_e$$

Le *coefficient de transmission thermique* d'une paroi U [W/m²K] est défini comme l'inverse de R_t , donc $U = 1 / R_t$.

On peut alors écrire

$$q = U \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

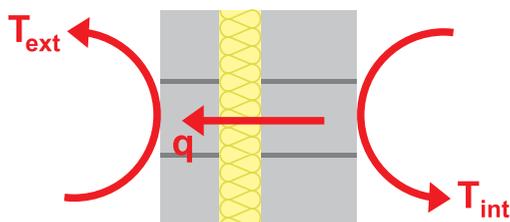
cfr la norme NBN B 62-002 (1987) et son annexe 1 (2001).

La législation des différentes régions en Belgique impose, selon le type de paroi, soit des valeurs maximales pour le coefficient de transmission thermique des parois, U_{max} [W/m²K], soit des valeurs minimales pour la résistance thermique de la paroi R_{min} [m²K/W]. A titre indicatif, reprenons certaines valeurs limites actuellement en vigueur dans les différentes régions (habitation seulement pour la Région flamande), pour les murs et les parois opaques verticales en contact avec :

- l'air extérieur ou un local non chauffé non à l'abri du gel: $U_{max} = 0,6$;
- le sol ou un local non chauffé à l'abri du gel: $U_{max} = 0,9$.

En Région flamande, la première de ces valeurs peut être dépassée, tout en restant inférieure à 1 [W/m²K], s'il est démontré que ce choix ne fera pas apparaître de la condensation.

Flux de chaleur en régime stationnaire dans une paroi homogène



Exemples

Paroi composée d'un seul matériau :

Imaginons une paroi composée d'un seul matériau séparant le volume protégé de l'air extérieur. Pour illustrer ce qui vient d'être dit, comparons, pour différents matériaux, l'épaisseur minimale e_{min} [cm] nécessaire pour atteindre $U = 0,6$ W/m²K.

$$R_t = R_i + e / \lambda + R_e = 1 / U \Rightarrow e_{min} = [(1 / 0,6) - 0,125 - 0,043] \cdot \lambda$$

	ρ [kg/m ³]	e_{min} [cm]
Béton normal lourd armé	2400	330
Béton normal lourd non armé	2200	255
Blocs de béton	2000	256
Briques de béton d'argile expansé	1000	69
Béton léger	700	51
Terre cuite	1500	136
Silico-calcaires	1500	195
Blocs de béton cellulaire	600	43
Bois massif	500	22
Laine minérale	30	6
Polystyrène extrudé	25	5
Verre cellulaire	130	7
Acier	7800	6744
« Petit granit » (pierre bleue)	2700	523
Air immobile	1	4
Eau immobile	1000	87

Mur extérieur creux :

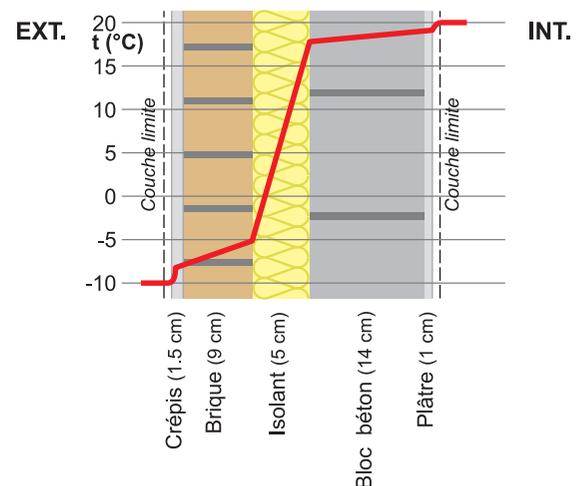
Le tableau précédent montre qu'il est difficile de satisfaire les exigences thermiques avec une paroi composée d'un seul matériau. Dans la pratique, une couche d'isolant sera placée lors du choix d'un matériau comme le béton. Calculons la résistance thermique d'un mur extérieur creux tel qu'illustré par la figure ci-dessous (épaisseur totale de 30,5 cm) :

$$R_t = 1 / 23 + 1,5 \cdot 10^{-2} / 1,2 + 9 \cdot 10^{-2} / 0,91 + 5 \cdot 10^{-2} / 0,034 + 14 \cdot 10^{-2} / 1,32 + 10^{-2} / 0,52 + 1 / 8 = 1,9 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Donc $U = 1 / R_t = 0,5$ W/m²K < U_{max}

La distribution de température $T(x)$ à travers les différentes couches qui composent la paroi est aussi déterminée.

Évolution de la température dans un mur extérieur creux



Condensation interne et ponts thermiques

Air humide et saturation

L'air ambiant ne peut absorber qu'une quantité limitée de vapeur d'eau. Quand cette quantité est atteinte, l'air est saturé, et toute vapeur d'eau supplémentaire *condense*. La quantité de vapeur d'eau que peut contenir l'air saturé diminue quand sa température diminue. Donc si l'air ambiant, qui contient une certaine quantité de vapeur, se refroidit au contact d'une surface froide ou en migrant à travers un matériau vers une ambiance plus froide (extérieur en hiver), il risque d'atteindre une température, la *température de rosée*, telle qu'il soit saturé alors qu'il contient toujours la même quantité de vapeur (la pression partielle de vapeur d'eau ayant atteint la pression de *saturation*). Si la température de l'air continue à chuter, une partie de la vapeur qu'il contient sera condensée. Le diagramme de l'air humide permet de visualiser et de chiffrer ces phénomènes.

Perméabilité à la vapeur d'eau

La plupart des matériaux sont poreux. Souvent, sans être manifestement poreux et perméables à l'eau, ils n'en restent pas moins perméables à la vapeur d'eau. Le flux de vapeur d'eau qui s'établit au sein du matériau dépend essentiellement de la pression de vapeur des ambiances qu'il sépare, en plus d'autres facteurs, comme la forme et les dimensions des pores,...

Porosité relative et porosité absolue.

A l'instar du coefficient de conductibilité thermique, on peut définir le *coefficient de conductibilité à la vapeur d'eau* λ_D qui s'exprime soit en [kg/msPa], soit en [mg/mhPa].

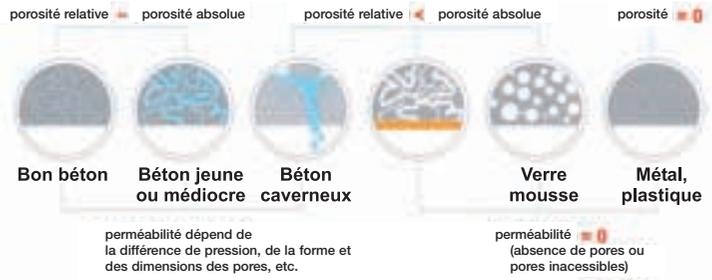
La norme NBN EN 12524 définit, à partir des définitions de l'ISO 7345 et de l'ISO 9346, le *coefficient de résistance à la vapeur d'eau* μ [-]. Celui-ci est établi à partir du rapport entre le λ_D de l'air et celui du matériau:

$$\mu = \lambda_{D, \text{air}} / \lambda_{D, \text{matériau}}$$

Une couche d'épaisseur e [m] d'un matériau de coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ présente la même résistance à la diffusion de la vapeur d'eau qu'une lame d'air d'épaisseur S_d [m]:

$$S_d = \mu \cdot e$$

Cette valeur est appelée *épaisseur équivalente*.



Porosité relative et porosité absolue

Condensation interne

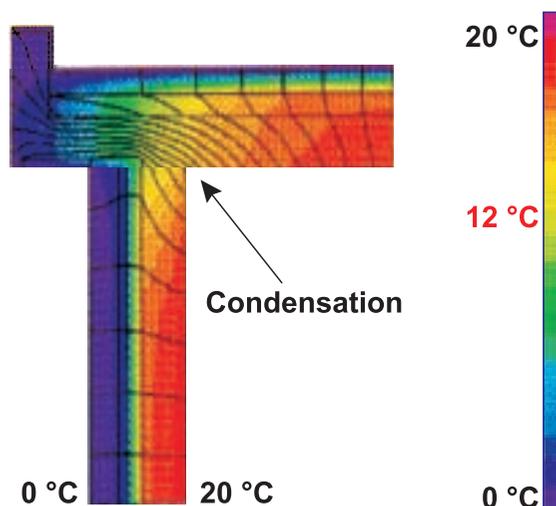
Comme exprimé dans le diagramme T(x), présenté dans l'exemple du mur creux au point précédent, la distribution des températures au sein de la paroi est telle que la chute de température dans l'isolant peut atteindre la température de rosée. Il y a donc un risque de condensation interne dans la paroi dans cette zone. Pour évaluer ce risque, le profil de distribution des pressions de vapeur effectives et celui des pressions de vapeur saturantes est établi à partir du diagramme de l'air humide et des facteurs de résistance à la vapeur d'eau m (ou S_d) des différents matériaux qui composent la paroi. En combinant l'évolution des températures avec celle des pressions de vapeur, le *modèle de Glaser* permet de localiser et de quantifier les condensations internes dans la paroi. Quand il y a un risque d'accumulation de condensation interne, il devient nécessaire d'appliquer un pare-vapeur (ou freine-vapeur) sur la face chaude afin de réguler la vapeur d'eau qui pénètre dans la paroi.

Facteur de résistance à la vapeur d'eau pour différents matériaux:

	ρ [kg/m³]	μ [-]
Béton normal lourd non armé	2200	70-150
Béton d'argile expansé	700-1200	10-30
Brique terre cuite	1500	6-10
Brique silico-calcaire	1500	10-25
Blocs de béton cellulaire	600	5-10
Laine minérale	30	1-2
Polystyrène expansé	30	50-100
Polystyrène extrudé	25	80-150
Verre cellulaire	130	(Étanche)
Bois massif	500	20-40
Panneau de particules	600	40-200
Acier	7800	(Étanche)
« Petit granit » (pierre bleue)	2700	20
Air immobile	1	1

Ponts thermiques

Les ponts thermiques sont des défauts dans la conception et/ou dans la réalisation de l'enveloppe isolante. Ils peuvent donc être évités par une conception et une mise en œuvre de qualité. Ils sont responsables de problèmes d'inconfort (température des parois), de consommations supplémentaires (déperditions), et dégradations éventuelles dans la construction (condensations, moisissures).



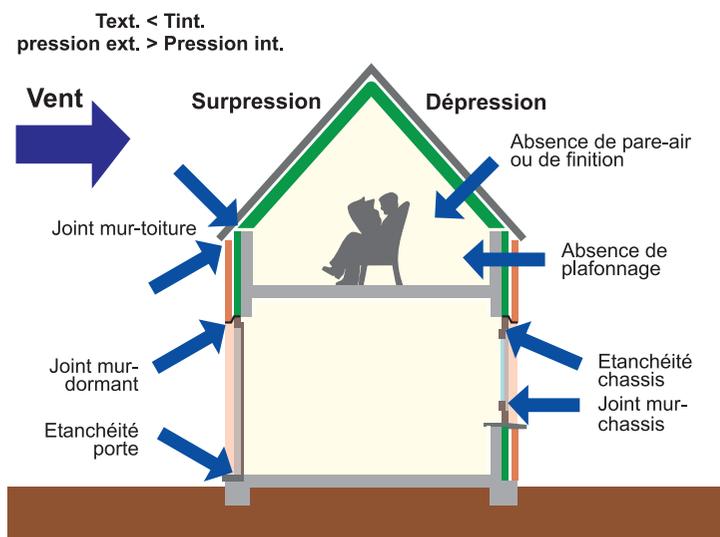
Exemple de pont thermique linéaire

La figure ci-dessus illustre un cas typique où le flux de chaleur au droit du raccord est particulièrement dense. Les pertes par transmission engendrées par ce pont thermique sont donc loin d'être négligeables. L'échelle des températures indique aussi que la température y est voisine de 12°C, qui est la température de rosée dans les conditions d'humidité ordinaires des logements. Il y aura donc condensation à cet endroit.

L'influence d'un pont thermique n'est généralement pas surfacique: il ne peut donc pas être calculé comme le coefficient U des parois. La déperdition thermique supplémentaire du pont thermique s'exprime, selon le cas, par un *coefficient de transmission* linéaire (U_l) ou ponctuel (U_p) obtenu par mesure ou par calcul. Une série de valeurs approximatives sont reprises dans la norme NBN B 62-002.

Les principaux détails de construction considérés comme étant le siège de ponts thermiques sont: **les linteaux au-dessus des fenêtres et des portes; les seuils de fenêtres; la fermeture du creux au droit des battées de portes et de fenêtres; planchers en contact avec la paroi extérieure d'un mur creux; les rives de toitures; les terrasses en porte-à-faux et les balcons; les colonnes ou poutres en bétons; les fondations...** De nombreux systèmes ou techniques existent pour s'en prémunir.

Remarquons qu'une mauvaise étanchéité à l'air de certains détails de construction peut provoquer le même type de désordre que les ponts thermiques cités. Le schéma ci-dessous montre les défauts d'étanchéité les plus courants



Défauts d'étanchéité et courants d'air

Calcul des déperditions - Niveau d'isolation

Calcul des déperditions normalisées

Ayant déterminé les coefficients de transmission U des différentes parois et des ponts thermiques éventuels, la norme NBN B 62-003 permet de calculer, local par local, les déperditions calorifiques de l'ensemble d'un bâtiment. En effet, elle fournit les températures extérieures de bases (voir «*Le bâtiment dans son climat*») et les températures intérieures (températures résultantes sèches) à utiliser comme références pour déterminer les *déperditions de base par transmission* Φ_t [W]. Elle permet ensuite de chiffrer les *déperditions de base par ventilation et infiltration* Φ_v [W], et donne, pour chacun des locaux, un facteur de majoration pour l'orientation, et un autre pour prendre en compte l'effet de certaines parois froides. Ainsi, on détermine les *déperditions calorifiques normalisées* Φ_n [W] des différents locaux et du bâtiment. Ces valeurs sont utilisées pour dimensionner la puissance des corps de chauffe (sauf dans le cas de locaux rarement ou périodiquement chauffés où les besoins thermiques peuvent être particulièrement élevés, cfr fin du chapitre "STOCKER").

Niveau d'isolation thermique global K

La norme NBN B 62-301 définit le *coefficient moyen de transmission thermique* k_s [W/m²K] d'un bâtiment. Il est calculé à partir des valeurs des coefficients de transmission U des différentes parois et celui des ponts thermiques éventuels. Ce coefficient moyen donne la quantité de chaleur perdue par transmission, par seconde et par mètre carré, pour une différence de température de 1 degré entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure, tout en tenant compte de l'effet des éventuels ponts thermiques (U_{ij} et U_{pj}) existant dans la surface de déperdition A_T . A chaque paroi, de coefficient de transmission thermique U_j et de surface A_j , est assigné un coefficient de pondération a_j selon le type de paroi et le type d'ambiances qu'elle sépare :

$$k_s = (\sum a_j U_j A_j + \sum U_{ij} j + \sum U_{pj}) / A_T$$

La norme NBN B 62-301 considère que le niveau d'isolation thermique d'un bâtiment peut être caractérisé par le couple de valeurs k_s et V/A (compacité volumique). Ces deux valeurs permettent de déterminer le *niveau d'isolation thermique global* K [-] du bâtiment.

En plus du respect du critère U_{max} sur le coefficient de transmission thermique des parois, les bâtiments doivent atteindre selon leur type et selon la région où ils se situent une valeur K inférieure à une valeur de référence imposée par la législation. Le projet de décret adopté par le Parlement flamand (avril 2004) répond à la nouvelle directive européenne et prévoit d'imposer, en 2006, pour tous les types de bâtiments, excepté les constructions industrielles, un niveau maximal K45. La législation en Région wallonne est actuellement moins contraignante puisque les limites sont les suivantes :

- pour les bâtiments neufs:
 - K55 pour les logements;
 - K65 pour les bureaux et écoles;
- pour les transformations avec changement d'affectation:
 - K65 pour les logements;
 - K70 pour bureaux et écoles.

Les transformations sans changement d'affectation n'ont par contre pas de valeur imposée pour le niveau d'isolation K.

Avant d'aborder la suite de ce document, il faut faire remarquer que pour l'évaluation des performances énergétiques du bâtiment, le niveau d'isolation thermique global K, ainsi déterminé, ne prend en compte ni les apports solaires, ni les apports internes, ni l'effet de l'inertie thermique du bâtiment, ni les pertes par ventilation ou infiltration, ni les consommations liées à la production d'eau chaude sanitaire... D'autres méthodes, comme la méthode b_e en Région wallonne ou le critère E100 du projet de décret adopté en Flandre, ont été mises au point pour quantifier la performance énergétique globale des bâtiments.

Exemple

Évolution du niveau K selon l'épaisseur d'isolant:

La figure ci-après compare, pour la maison expérimentale basse énergie Pléiade à Louvain-la-Neuve, arch. Ph. Jaspard, les niveaux d'isolation thermique globaux K atteints pour différentes épaisseurs d'isolants, en considérant une isolation de même épaisseur pour les murs, planchers et toitures. Tous les autres paramètres (vitrages, renouvellement d'air...) restent inchangés.

Au point 0, la maison n'est pas isolée et les consommations valent 100%. Les premiers centimètres d'isolant étant les plus utiles, la courbe fait apparaître la réduction immédiate et importante du niveau d'isolation K. Puis, la pente de la courbe se réduit car l'avantage à isoler demeure, mais il est moins rentable. Le gain en termes relatifs correspond à des gains de plus en plus réduits en termes absolus, alors que les coûts de construction augmentent. A ce niveau, il est alors plus intéressant d'agir sur l'efficacité de la ventilation ou d'autres paramètres énergétiques que sur l'isolation des parois.



Évolution du niveau K selon l'épaisseur de l'isolant

DISTRIBUER

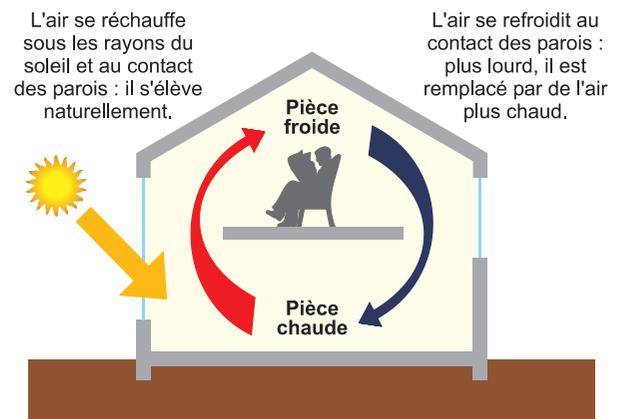
> répartir la chaleur

Qu'elle provienne de l'ensoleillement, d'apports internes ou du système de chauffage, distribuer la chaleur dans le bâtiment, tout en la régulant, consiste à la conduire dans les différents lieux de vie où elle est souhaitable. Outre le positionnement et le dimensionnement judicieux des corps de chauffe qui n'est pas l'objet de ce document, la répartition de la chaleur peut s'effectuer de manière naturelle ou par l'intermédiaire d'équipements particuliers. La partie «DISSIPER» revient à point, lorsqu'elle aborde le problème des surchauffes éventuelles.

Le premier phénomène naturel qui peut être identifié pour répartir la chaleur dans le bâtiment est associé à l'inertie des matériaux, au sein desquels la chaleur accumulée est diffusée (par conduction), puis réémise (par convection et rayonnement). Comme constaté précédemment, les matériaux lourds tel que le béton permettent alors de distribuer la chaleur dans le temps (déphasage) et dans l'espace (longueur de diffusion, profondeur de pénétration).

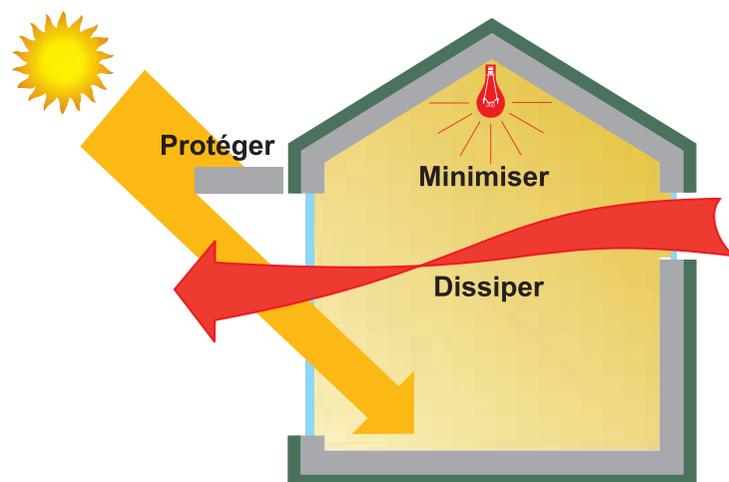
Il importe de plus d'exploiter les mouvements de l'air (horizontaux ou verticaux) provoqués par des gradients de pression (vent) ou par la *thermocirculation de l'air* qui entraîne l'air chaud vers le haut, créant un appel d'air plus frais qui vient le remplacer. Ce moyen puissant à la disposition des concepteurs et des occupants pour répartir la chaleur dans le bâtiment nécessite toutefois une bonne maîtrise des flux d'air à l'intérieur du bâtiment, notamment par une organisation spatiale ouverte et des ouvertures (haute et basse) judicieusement positionnées.

La norme NBN D 50-001 (1991) sur les dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitations donne, selon le type de local, le taux de renouvellement de l'air intérieur (apport d'air frais, évacuation des odeurs...) permettant de préserver la bonne santé des occupants. L'air neuf introduit doit être chauffé ou préchauffé en saison de chauffe (et éventuellement rafraîchi en été). Ceci implique une consommation énergétique non négligeable qui peut toutefois contribuer à la répartition de la chaleur dans le bâtiment. La ventilation peut être «naturelle», exploitant les phénomènes décrits ci-avant, ou être «forcée», et on parle alors de Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC).



Thermocirculation de l'air

4. Stratégie du froid en période estivale



PROTÉGER

> ériger des écrans

Pour diminuer le *risque de surchauffe*, il faut tout d'abord protéger le bâtiment, et particulièrement ses ouvertures, de *l'ensoleillement direct*. Comme on l'a vu pour limiter les déperditions thermiques, une bonne isolation contribue aussi à éviter la pénétration de chaleur.

Pour se protéger de l'ensoleillement direct, le principe est d'ériger des écrans extérieurs, qui mettent les surfaces vitrées à l'ombre. Ces protections peuvent être des *éléments architecturaux* liés au bâtiment ou faire partie de *l'environnement* de celui-ci. Les premiers peuvent être soit *permanents*, soit *fixes*, soit *mobiles*, et les autres correspondent à l'ombrage provoqué par de la végétation, des bâtiments voisins, ou simplement à une implantation ou un relief particulier.

Les protections permanentes (films collés contre le vitrage, vitrages spéciaux - réfléchissants et/ou absorbants...), ainsi que les écrans mobiles (stores vénitiens, enroulables, à lamelles...), dépassent le cadre de ce document.

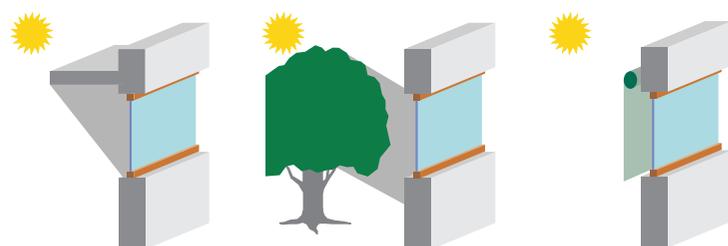
Les éléments fixes sont principalement des avancées horizontales au-dessus de la fenêtre ou des avancées verticales de part et d'autre de la fenêtre. Les deux paramètres les plus importants pour définir les protections solaires fixes sont leur position et leur taille. Il faut d'une part déterminer leur orientation, et d'autre part calculer pendant combien de temps et à quels moments de l'année, et même de la journée, ils constitueront un obstacle à l'ensoleillement (facteur d'ombrage). Les façades d'orientation proche du sud sont les plus faciles à protéger et, dans ce cas, ce type de protection permet même d'éliminer complètement le rayonnement direct estival sans pour autant porter une ombre indésirable en hiver. Par contre, aucune protection fixe, horizontale ou verticale, ne permet de résoudre le problème propre aux façades est et ouest, et dans ces situations, une protection mobile est nécessaire. Notons que dans le cas d'éléments fixes en béton, il faudra s'assurer qu'ils ne sont pas le siège de ponts thermiques.

L'ombrage naturel de la végétation doit de préférence être plus important en été qu'en hiver, afin de profiter des apports d'énergie solaire hivernaux. Il est donc conseillé d'opter pour des plantations à feuilles caduques, avec peu de branches, pour avoir un ombrage minimal en hiver, mais un feuillage dense, pour la raison inverse en été. Les protections végétales réalisées à l'aide de plantes grimpantes (vigne, chèvrefeuille, glycine) peuvent aussi être très efficaces et être aménagées sur les parois verticales pour réduire leur échauffement.

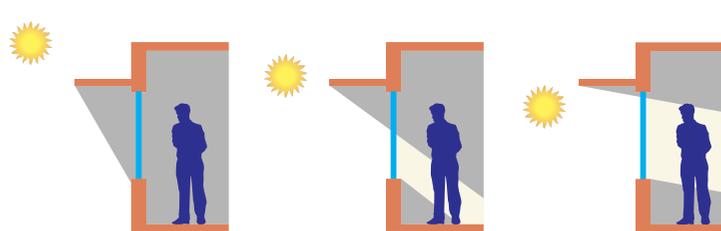
En été, l'ombrage apporté par les bâtiments voisins est rarement efficace et, en hiver, ceux-ci deviennent de réels obstacles à l'ensoleillement.

Le relief influence la répartition des températures (irradiation des pentes selon leur orientation et inclinaison), les possibilités d'ensoleillement ainsi que les phénomènes de nébulosité et de régime des vents. Les versants exposés au vent sont plus froids que ceux qui sont masqués et, si le relief protège certains sites, il en surexpose d'autres.

Écrans extérieurs fixes et mobiles



Écran fixe sur façade sud



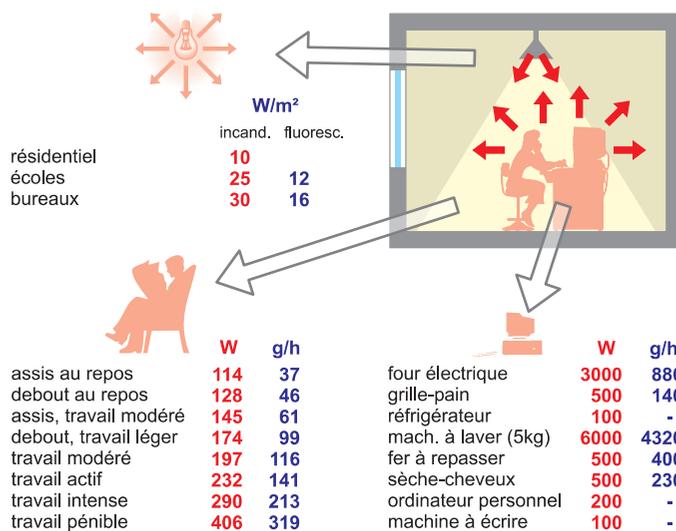
MINIMISER

> limiter les apports internes

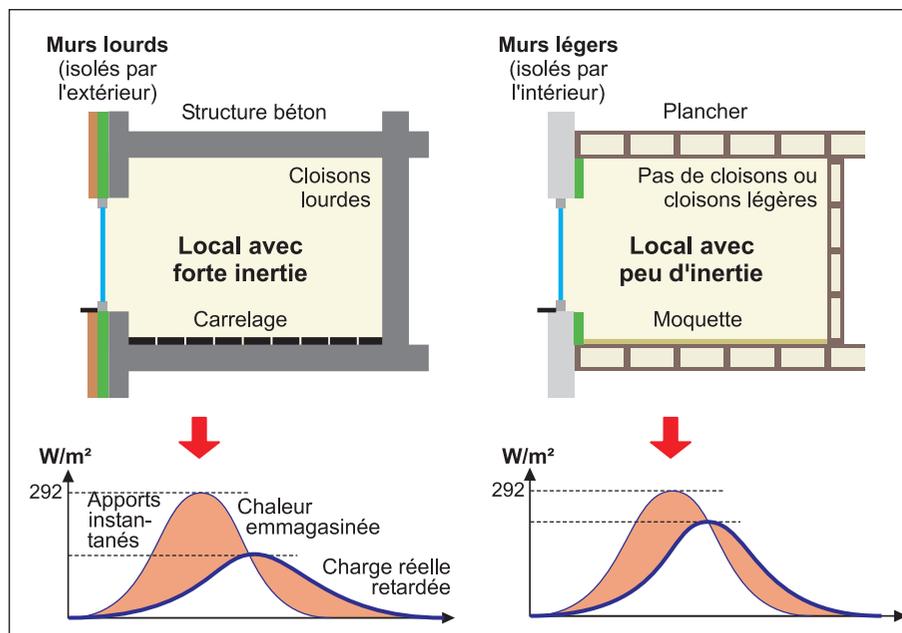
Minimiser les apports internes vise à limiter la surchauffe des locaux due aux occupants et aux équipements: l'éclairage artificiel, l'équipement électrique, la densité d'occupation des locaux, etc. Certains apports peuvent être facilement minimisés en favorisant, par exemple, l'éclairage naturel. Il est assez rare que ces gains de chaleur internes soient simultanés ou atteignent au même moment leur maximum. Il s'agit donc d'une source de chaleur diffuse dans le bâtiment. Par contre, leur superposition à d'autres sources de chaleur (chauffage en service, rayonnement solaire direct) peut conduire à une élévation excessive de la température et à une situation d'inconfort. Ce sera principalement le cas dans les bâtiments où la chaleur interne produite est importante (écoles, bureaux, etc.).

La figure ci-après rassemble quelques données relatives à la production de chaleur (chaleur sensible et chaleur latente) et d'humidité par les occupants ainsi que par les équipements. Les valeurs sont exprimées en Watt et en gramme d'eau par heure. Il convient de remarquer que les durées d'utilisation de ces équipements sont très variées. Les valeurs relatives à l'éclairage indiquent la charge d'éclairage moyenne en W/m^2 pour des lampes incandescentes et fluorescentes.

Production de chaleur et d'humidité par les occupants et les équipements



Effet de l'inertie thermique



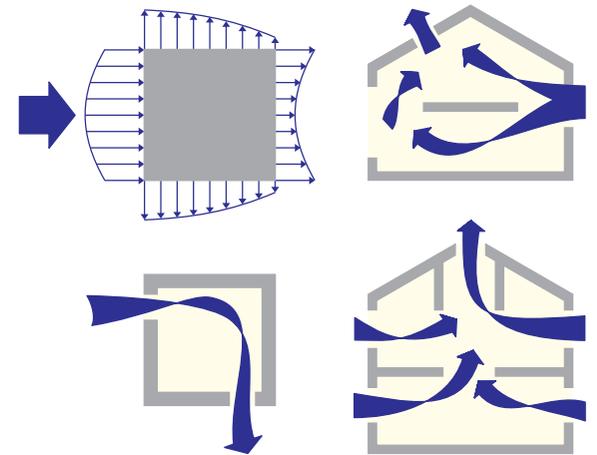
DISSIPER

> éviter les surchauffes

L'inertie thermique des matériaux d'un bâtiment permet de répartir dans le temps et dans l'espace la chaleur qu'ils accumulent. Ainsi, il est possible de réduire les surchauffes qui provoquent l'inconfort à l'intérieur du bâtiment. En effet, l'utilisation intelligente (voir Parois multicouches dans la partie «STOCKER») du béton ou d'autres matériaux lourds, retarde et atténue la contribution des apports solaires et des apports internes à l'élévation de la température ambiante. La figure ci-dessous montre, en comparant deux cas extrêmes que plus la masse thermique accessible est grande, plus le maximum d'apports réels dus au soleil sera faible et plus il sera retardé par rapport au flux instantané traversant le vitrage.

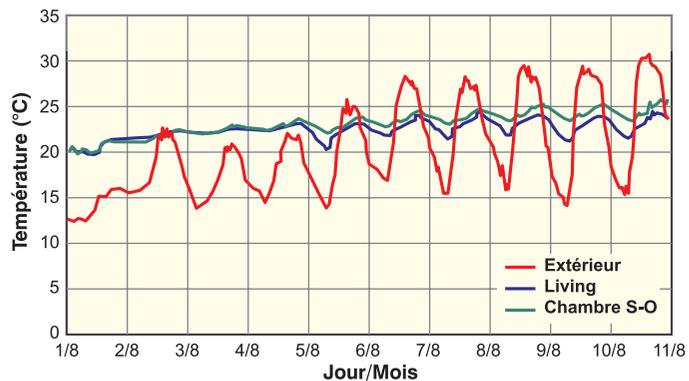
Cependant, à certaines époques de l'année, cette inertie n'est plus suffisante et la surchauffe éventuelle qui subsiste doit être dissipée grâce à la ventilation. Comme indiqué dans la partie «DISTRIBUER», celle-ci peut être naturelle ou forcée et permet de répartir la chaleur dans le bâtiment selon le type d'organisation spatiale et la position des ouvertures. Les systèmes de ventilation, ou de climatisation sont néanmoins parfois gros consommateurs d'énergie et on s'orientera, après évaluation des coûts-bénéfices, vers les systèmes les plus économes en énergie. Il s'agit souvent plus d'un véritable effort de conception que d'un simple choix technologique.

Remarquons que la ventilation nocturne est nettement plus efficace pour éviter les surchauffes que celle effectuée durant la journée car la température extérieure est plus faible la nuit. Grâce à une certaine inertie (accessible), en évitant de trop ventiler la journée et en prévoyant des protections solaires appropriées, cette ventilation nocturne permet d'obtenir des températures intérieures durant la journée plus basses qu'à l'extérieur.



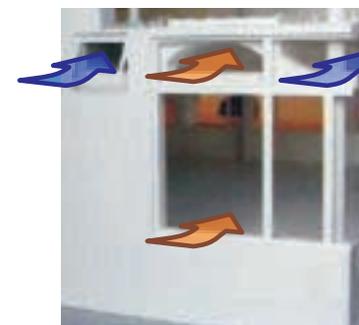
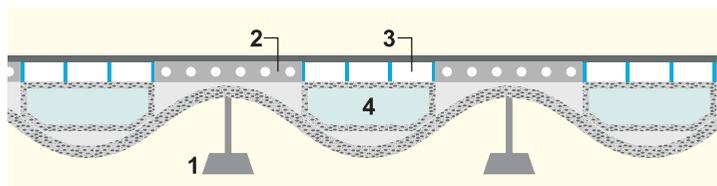
Dissipation des surchauffes par la ventilation

La figure ci-dessous illustre l'évolution des températures dans la maison expérimentale basse énergie Pléiade, à Louvain-la-Neuve, au cours des premiers jours de août 1997. Très ouverte au soleil, la maison risque de souffrir de surchauffes. Deux stratégies de protection ont été mises en place: protections solaires et ventilation nocturne, réalisée en laissant les fenêtres entrouvertes. La ventilation nocturne permet d'évacuer la chaleur accumulée durant la journée: la courbe bleue (températures à l'intérieur) augmente mais plus faiblement que la courbe rouge (températures extérieures).



Ventilation nocturne et rafraîchissement

Un autre exemple où une ventilation bien conçue permet d'éviter les surchauffes est celui du système mis en œuvre dans les dalles de plafond du bâtiment environnemental du *British Research Establishment* (BRE), au nord de Londres. La face inférieure des dalles en béton brut apparaît à la forme d'une sinusoïde pour augmenter la surface d'échange thermique entre le béton et l'air ambiant (voir schéma ci-dessous). Grâce à un ensemble de petites fenêtres hautes, commandées par une gestion centrale informatisée (à laquelle on peut déroger), l'air extérieur peut soit être introduit directement dans le local (1), soit circuler dans la partie creuse du plafond (4). Dans ce deuxième cas, l'air est amené au cœur du bâtiment après avoir été réchauffé (en hiver) ou refroidi (en été) par la gaine en béton qu'il traverse. L'effet d'inertie du matériau béton est alors directement mis à profit.



Système de ventilation avec utilisation de l'inertie thermique du matériau béton

5. Performances énergétiques globales

Directive européenne

La directive 2002/91/CE du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments fait suite à une première directive, de 1993, qui «oblige les États membres à établir et à mettre en œuvre des programmes dans le domaine de l'efficacité énergétique pour le secteur des bâtiments», ainsi qu'à rendre compte des mesures prises. La première directive a eu des effets bénéfiques considérables qui commencent à se faire sentir, mais le potentiel d'économie d'énergie est encore vaste et il subsiste des différences considérables entre les États membres en ce qui concerne les résultats obtenus dans ce secteur.

L'objectif de la nouvelle directive est donc de promouvoir, dans l'ensemble de la Communauté, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments en précisant le cadre général de celle-ci. Elle demande de prendre en compte les conditions climatiques extérieures locales, ainsi que les exigences en matière de climat intérieur, en considérant le rapport coût-efficacité des mesures appliquées. En outre, elle fixe des exigences en ce qui concerne:

- a) le cadre général d'une méthode de calcul de la performance énergétique intégrée des bâtiments;
- b) l'application d'exigences minimales en matière de performance énergétique aux bâtiments neufs;
- c) l'application d'exigences minimales en matière de performance énergétique aux bâtiments existants de grande taille lorsque ces derniers font l'objet de travaux de rénovation importants;
- d) la certification de la performance énergétique des bâtiments, et enfin
- e) l'inspection régulière des chaudières et des systèmes de climatisation dans les bâtiments ainsi que l'évaluation de l'installation de chauffage lorsqu'elle comporte des chaudières de plus de 15 ans.

Cette directive doit être transposée dans la législation des états membres pour le 4 janvier 2006 au plus tard.

Niveau de consommation d'énergie primaire

Une réflexion est en cours en Belgique pour transposer cette directive aux législations en vigueur. Il s'agit de renforcer les niveaux d'isolation thermiques K, tant des logements que des bureaux ou des écoles. De plus, le projet de décret adopté par le Parlement flamand le 28 avril 2004 définit un critère «E100» se rapportant aux prestations énergétiques globales du bâtiment.

Pour y répondre, la consommation annuelle d'énergie primaire E_{prim} [MJ] doit être inférieure à un niveau de référence E_{ref} [MJ]. Le niveau de référence dans les habitations est par exemple donné par la formule suivante:

$$E_{\text{ref}} = a \cdot A_T + b \cdot V$$

où A_T [m²] est la *surface déperditive*, V [m³] le *volume protégé* et les coefficients a et b , des constantes adimensionnelles fixées par la législation.

L'estimation de consommation annuelle d'énergie primaire, quant à elle, est calculée par la somme, sur l'ensemble de l'année, de la consommation mensuelle d'énergie primaire pour le chauffage E_{heat} , de celle pour la préparation de l'eau chaude sanitaire E_{water} , de celle de certains auxiliaires (pompes, ventilateurs...) E_{aux} et de celle consommée pour le refroidissement E_{cool} , desquelles on déduit les apports des systèmes photovoltaïques E_{pv} , ainsi que l'énergie produite par cogénération E_{cogen} . Tous ces facteurs mensuels sont exprimés [MJ] et sont calculés par la méthode présentée en annexe de la législation.

$$E_{\text{prim}} = \sum (E_{\text{heat}} + E_{\text{water}} + E_{\text{aux}} + E_{\text{cool}} - E_{\text{pv}} - E_{\text{cogen}})$$

Le niveau de consommation d'énergie primaire "*peil van primair energieverbruik*" E [%], est défini par:

$$E = 100 \cdot E_{\text{prim}} / E_{\text{ref}}$$

La satisfaction au critère «E100» s'obtient avec $E \leq 100$.

Dans la méthode de calcul et le logiciel informatique qui lui sera associé l'inertie thermique d'une habitation apparaîtra de façon simplifiée au niveau du calcul des besoins nets en énergie de chauffage et pour le contrôle des conditions d'été. Sans rentrer dans le détail, selon que le bâtiment soit lourd, plutôt lourd, plutôt léger ou léger, un tableau permettra de déterminer la capacité thermique effective C [J/K] de chacun des secteurs énergétiques en fonction de leur volume respectif. Pour chaque secteur énergétique, le facteur d'utilisation η des apports gratuits mensuels en introduisant, si nécessaire, une constante de temps τ [s], calculée à partir de la capacité thermique effective.

Besoins nets en énergie de chauffage

Actuellement, il est déjà possible d'éviter de devoir répondre à l'exigence concernant le niveau d'isolation thermique K, par la satisfaction d'un autre critère, dans le cas de la construction de logements neufs en Région wallonne. En effet, le concepteur qui tente de valoriser certains outils de conception bioclimatiques présentés dans les points précédents (apports gratuits, inertie accessible...) peut aussi démontrer, en suivant la méthode b_e publiée au Moniteur Belge (1996) que les besoins nets en énergie de chauffage de son bâtiment, noté b_e [MJ/m².an] sont inférieurs à une valeur limite, notée $b_{e\max55}$ (ou b_{e450}) [MJ/m².an], qui dépend de la compacité du bâtiment.

Apports internes et température de non-chauffage

La première chose à calculer est la *température de non-chauffage* t_{NC} [°C]. C'est la température au-dessus de laquelle l'installation de chauffage ne doit plus fournir de chaleur, l'écart de température entre la *température de confort* t_{rs} et la température de non-chauffage t_{NC} étant comblé par la chaleur émise par le corps humain et par les autres apports internes. Pour la déterminer, il faut d'abord additionner les pertes de chaleur par ventilation V aux déperditions de l'enveloppe D et obtenir ainsi le *coefficient de déperdition* p_b [W/K]. La *surface de plancher chauffé* de l'ensemble des locaux qui peuvent être chauffés est notée A_{ch} [m²]. La température de non-chauffage se calcule comme

$$t_{NC} = 19 - 5,42 \cdot (A_{ch} / p_b)$$

Dans cette formule, la valeur 5,42 [W/m²] correspond aux gains d'énergie par m².

Classe d'inertie

Cette méthode associe aussi une classe d'inertie I à chaque bâtiment. Elle prévoit 5 classes différentes, notées de I₁ à I₅. Lorsqu'il s'agit d'une maison ou d'un immeuble à appartements de conception classique (dite «traditionnelle»), le calcul de l'indice d'inertie n'est pas indispensable, et on utilise la valeur I₃ pour les maisons et I₅ pour les immeubles à appartements. Dans les autres cas, la classe d'inertie doit être déterminée comme exposé dans le chapitre «STOCKER».

Apports solaires et rendement de récupération

La méthode décrit comment comptabiliser les apports solaires S par les fenêtres selon leur surface, leur orientation, leur inclinaison, leur facteur solaire, leur facteur d'ombrage... Ces calculs présentent peu de liens avec l'usage du béton, et nous ne les détaillerons donc pas. Remarquons que la méthode définit néanmoins un coefficient de récupération mensuel (par ciel serein) R_s , qui est l'élévation de température dans le bâtiment due aux apports solaires. Par simplification, le calcul est limité aux deux mois types (mars et décembre), puis une valeur mensuelle est extrapolée à partir des deux premières pour chacun des mois de l'année. Ensuite, la *température sans chauffage* t_{SC} est déterminée mois par mois à partir de la somme de la température moyenne extérieure t_{ex} [°C] du mois et du coefficient R_s , pondéré mois par mois par un facteur adimensionnel Γ :

$$t_{SC} = t_{ex} + R_s \cdot \Gamma$$

Le *rendement de récupération des apports solaires* η [%] est alors donné par une loi qui dépend de la classe d'inertie I du bâtiment et de la différence entre la température de non-chauffage et la température sans chauffage, soit $t_{NC} - t_{SC}$ [°C].

Degrés-jours équivalents et niveau b_e

Le nombre de degrés-jours équivalents d'un mois donné, est calculé par l'expression suivante:

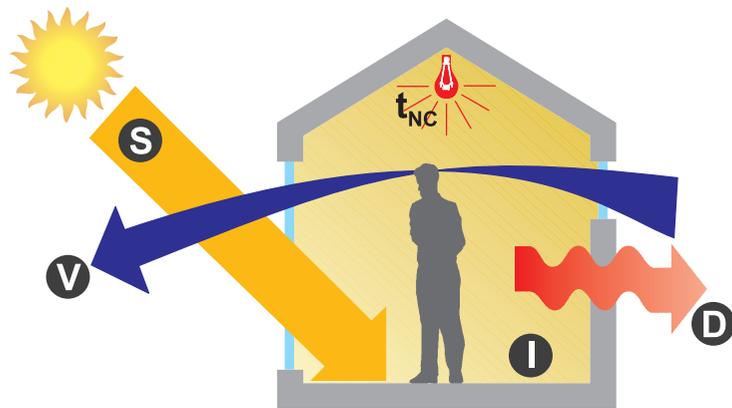
$$\text{deg } j^* = n \cdot [t_{NC} - t_{ex} - (\eta \cdot R_s \cdot \Gamma / 100)]$$

où n est le nombre de jours dans le mois en question (les autres paramètres étant définis au paragraphe précédent). Le nombre de degrés-jours équivalents de la saison de chauffe est obtenu en faisant la somme de ces valeurs sur l'année: $\Sigma \text{deg } j^*$.

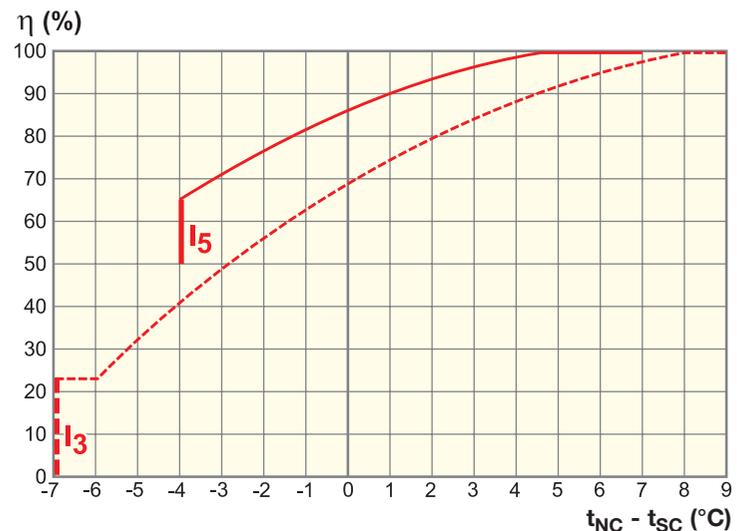
Les *besoins nets en énergie de chauffage* b_e [MJ/m².an] du bâtiment se calculent comme:

$$b_e = 0,0864 \cdot \Sigma \text{deg } j^* \cdot p_b / A_{ch}$$

En Région wallonne, pour éviter de devoir atteindre le niveau d'isolation thermique K imposé, le concepteur doit remplir un autre critère : la valeur b_e ne peut pas être supérieure à $b_{e\max55}$ (ou b_{e450}) [MJ/m².an] qui se calcule différemment selon la valeur du degré de compacité V/A_T . La valeur du $b_{e\max55}$ est 450 MJ/m².an lorsque le degré de compacité vaut 1 et elle est plus faible pour les bâtiments plus compacts.



Besoins en énergie de chauffage



Rendement de récupération des apports solaires

Profil de consommation et période de chauffe

Les profils annuels de la *consommation énergétique Q* et du nombre de jours de chauffe [JC] peuvent être comparés pour différents types de bâtiments: une maison de conception classique, une maison très isolée et une maison qui exploite les principes de l'architecture bioclimatique. Dans le schéma ci-contre apparaissent sur le même graphique les apports solaires (*courbe jaune, n°2*) cumulés aux apports internes (*courbe verte, n°1*). La surface orange (*n°4*) représente les besoins en énergie de chauffage. Une zone d'intersection (*n°3*) entre la courbe des apports solaires et la courbe de chauffage représente les apports solaires non utilisables (surchauffes...).

D'abord, il faut remarquer que la maison hyperisolée et la maison bioclimatique ont des consommations énergétiques globalement moins élevées. Ceci est obtenu par un niveau d'isolation garanti en tout point de l'enveloppe, en évitant soigneusement les ponts thermiques et en assurant une étanchéité à l'air suffisante.

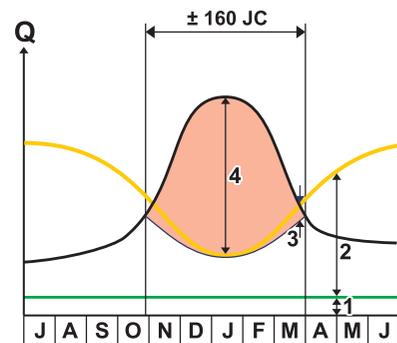
La maison bioclimatique a toutefois des pertes brutes plus élevées, mais elles sont compensées par des gains solaires supérieurs. On a vu que ces apports solaires pouvaient être valorisés par des choix judicieux (orientation, ouvertures...) et que l'inertie thermique du bâtiment pouvait influencer significativement le rendement de récupération de l'énergie solaire. L'utilisation rationnelle du béton peut être très intéressante dans ce cadre si l'inertie qu'il apporte est rendue « accessible » et si elle est combinée à une bonne isolation.

Notons encore que des gains solaires élevés permettent de raccourcir significativement la saison de chauffage. Les besoins en chauffage de la maison bioclimatique (surface orange) sont dès lors particulièrement faibles.

Soulevons brièvement une problématique liée au chauffage intermittent qui peut être perçue comme paradoxale. On a vu que les déperditions sont proportionnelles à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur, de plus, les besoins en chauffage sont directement liés à celles-ci. L'avantage du chauffage intermittent est de profiter des périodes où la température intérieure peut être réduite (selon l'occupation, les activités...), ce qui diminue logiquement la consommation, puisque les déperditions sont alors plus faibles. Une forte inertie, combinée à une forte isolation, conduit à une réduction plus lente de la température intérieure lors de la coupure du chauffage, et l'avantage du chauffage intermittent est donc moins marqué.

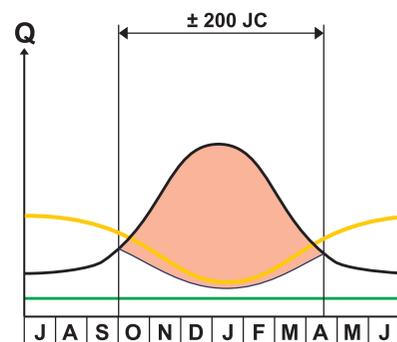
Pour conclure, si les méthodes pour déterminer les coefficients de transmission thermique U des parois et les niveaux d'isolation thermique K des bâtiments sont les mêmes sur l'ensemble de la Belgique, les valeurs maximales acceptées diffèrent pourtant d'une région à l'autre. Il semble pourtant qu'une uniformisation s'appuyant sur le projet de décret adopté le 28 avril 2004 par le Parlement flamand est en train de prendre forme. Ainsi, le niveau K45 devra sans doute être garanti pour les habitations neuves sur l'ensemble du territoire, ce qui ne sera possible qu'avec une isolation poussée des bâtiments. Un usage intelligent du béton dans la construction, tel qu'il renforce effectivement l'inertie thermique du bâtiment, peut contribuer indirectement à l'effort des concepteurs d'améliorer la performance énergétique des bâtiments en réduisant la période de chauffe et en limitant leur consommation énergétique.

Les principes développés dans ce document doivent permettre aux concepteurs ou aux futurs candidats bâtisseurs, soucieux d'une Utilisation Rationnelle de l'Énergie, de mieux comprendre les répercussions de certains choix qu'ils auront à faire, afin de les guider dans une utilisation du béton plus performante d'un point de vue énergétique dans leur projet de construction.

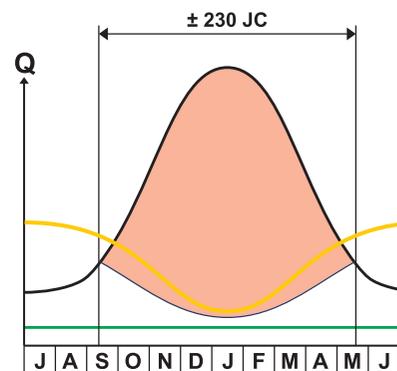


Maison bioclimatique

- 1 : apports internes
- 2 : apports solaires
- 3 : Gains de chaleur non exploitables
- 4 : Besoins de chauffage



Maison très isolée



Maison classique

6. Exemples construits

> Démarche bioclimatique basique pour un habitat simple en milieu rural

Le site est en pente douce vers le sud. Il a été choisi pour son ensoleillement et pour le fait qu'une haute haie au nord le protège du vent. Pour implanter les constructions, il a fallu articuler leur rapport à la rue (en contrebas), à l'exposition et au paysage. Les masses bâties, l'habitation et le garage, sont minimalistes et découlent de la volumétrie traditionnelle.

Trois faces du bâtiment principal sont réalisées en parpaings en béton apparent, et la dernière, entièrement ouverte au soleil, est une façade légère de verre et de bois.

A l'intérieur, s'établit une séparation spatiale nette entre les espaces de vie, au sud, et les services, au nord. Cette démarche bioclimatique qui a guidé la conception depuis les premières esquisses a permis d'atteindre une forte adéquation entre isolation et inertie thermique. La maçonnerie intérieure des murs de ceinture est disponible pour les échanges thermiques avec l'ambiance. De plus, les deux voiles de béton coulés en place qui limitent l'escalier, et les planchers en béton, offrent un complément d'inertie appréciable pour assurer un confort interne tout au long de l'année.

Situation : Falaën (province de Namur)

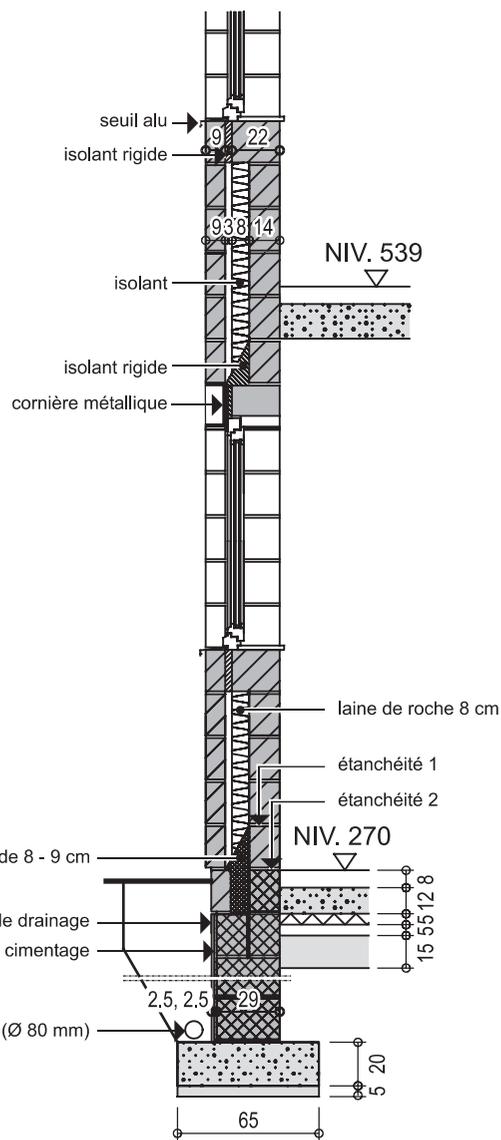
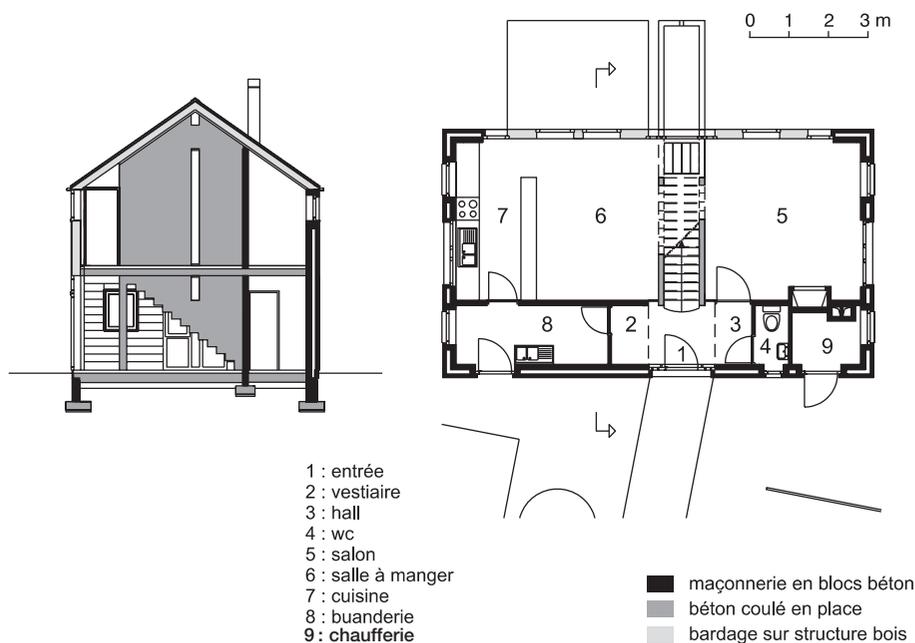
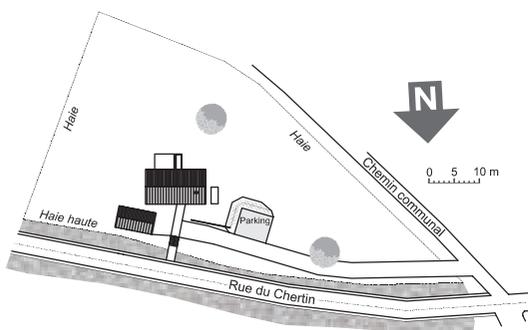
Année de réalisation : 2002

Architecte : SPRL ATELIER D'ARCHITECTURE PHILIPPE JASPARD - DINANT -

Ph. Jaspard - D. Deschambre - Ch. Capart - architectes associés

Collaboratrice : A.-S. Denis

Photos : Sylvie Rouche



> Habitation en blocs de béton

Le concept de ce logement, conçu par l'architecte Gie Wollaert, a été défini par sa situation sur un terrain accidenté.

Les pièces de vie, au même niveau que l'entrée, ont été étendues par une terrasse aménagée au dessus du garage.

A l'arrière de la maison, la terrasse offre une vue plongeante sur le jardin, celui-ci étant de plein-pied avec le niveau des caves.

Le principal désir des maîtres de l'ouvrage était d'avoir un sentiment d'espace prononcé. Pour ce faire, l'étage principal consiste en un unique espace intégrant des zones de vie, les escaliers et la salle à manger. Il n'y a que la chambre des parents et la cuisine (partiellement) qui soient cloisonnées.

L'ensemble du bâtiment est construit en blocs de béton, de couleur anthracite pour le garage et blanc pour le reste des murs extérieurs. Au-dessus de la terrasse, orientée sud-ouest, un mur translucide jette une lumière naturelle abondante sur le petit bureau.

Un vide fait le lien entre l'étage supérieur et une mezzanine où s'installe un petit bureau, un espace TV et un passage conduisant à la chambre et à la salle de bain du fils du maître de l'ouvrage.

Le bâtiment est construit en blocs de béton de couleur anthracite pour le garage et gris clair pour le reste.

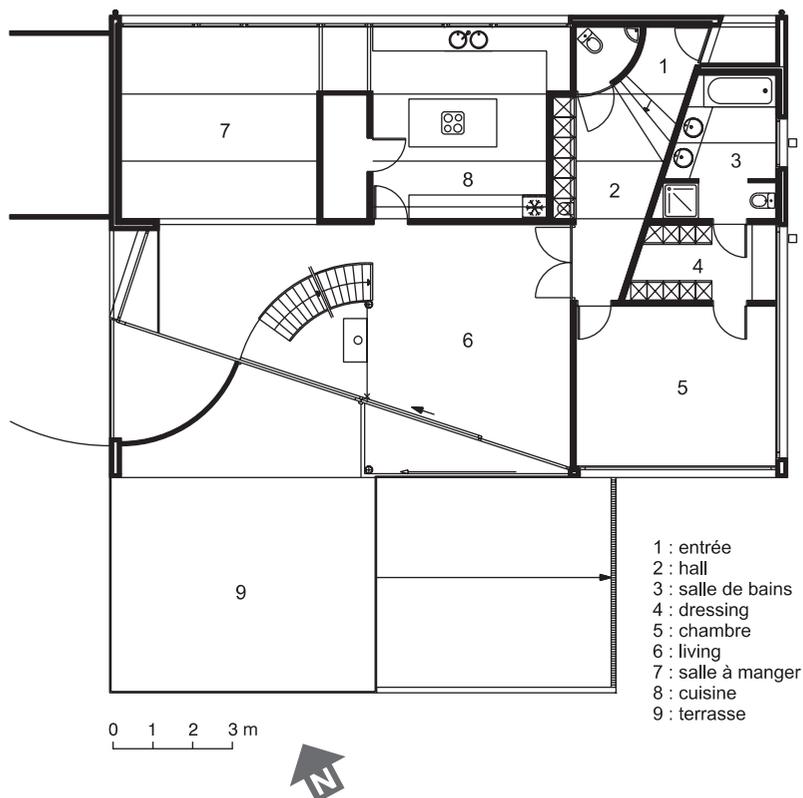
Au sein d'une conception épurée, mais solide, l'arrête de la mezzanine forme un méandre qui serpente à travers le volume. A l'arrière de la maison, ce mouvement se prolonge dans le mur de brique de verre.

Situation : Lennik (province de Brabant flamand)

Année de réalisation : 1999

Architecte : Gie Wollaert

Photographe : Jan Dirkx



> Habitation en béton coulé en place

Situé dans un lotissement banal, le terrain présente un dénivelé d'un niveau et surplombe la rue. La maison développe 300 m² répartis sur trois niveaux.

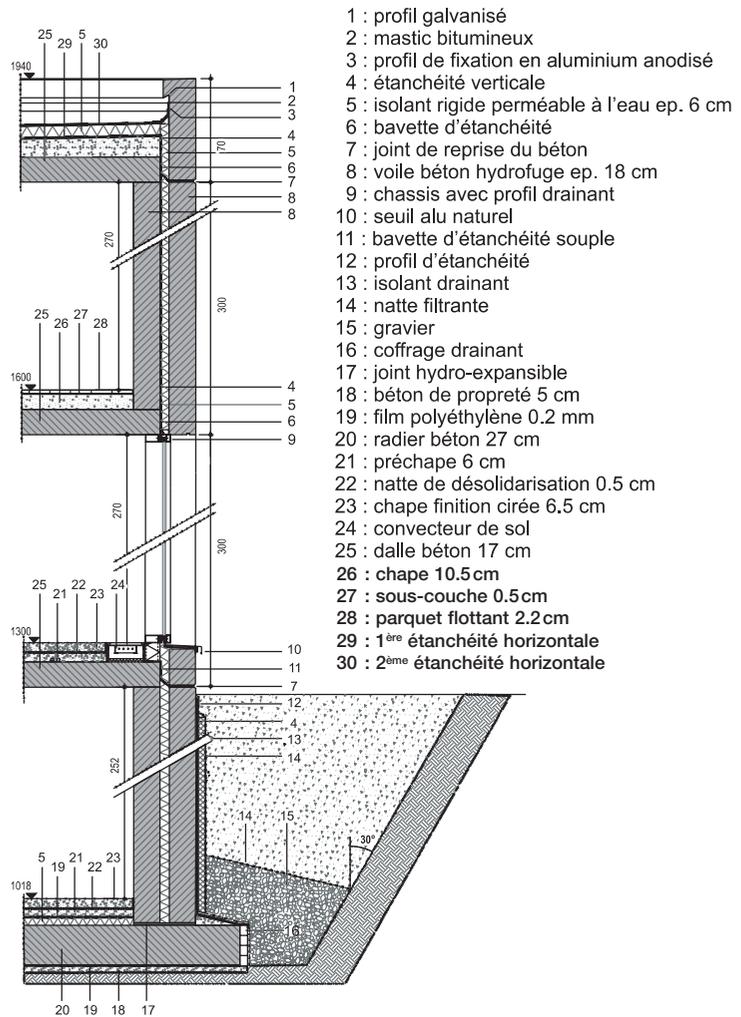
L'unique ouverture du rez-de-chaussée indique à la fois l'entrée couverte et le car-port. Le premier niveau s'ouvre totalement sur le jardin et capte la lumière nord. Une longue fenêtre en façade avant préserve l'intimité des pièces de vie, tout en cadrant l'horizon sur la cime des arbres. Le second niveau abrite les chambres et ne s'ouvre que sur les façades latérales. Un bloc technique au centre du volume contient tous les services.

Le bâtiment s'appuie sur un radier général de fondations de 30 cm bloqué par un drain coffrant périphérique et relié à l'égouttage. L'enveloppe extérieure est composée de deux voiles en béton hydrofuge de 18 cm d'épaisseur chacun coulé sur place avec des coffrages modulaires préfabriqués.

Le béton reste apparent à l'extérieur et à l'intérieur pour mieux exploiter l'inertie thermique des matériaux. La technique du coffrage standard a également été utilisée pour couler les dalles et les plafonds qui restent eux aussi en béton apparent. Les faces contre terre sont protégées par un isolant et une natte drainante. La coulisse de 6 cm entre les deux voiles est entièrement isolée avec interposition d'une membrane d'étanchéité du côté intérieur.

La toiture est construite sur le principe de la toiture plate avec pare-vapeur, isolant en 8 cm d'épaisseur et étanchéité bicouche.

Le bloc technique est constitué de parois de plâtre et de maçonnerie.



Situation : Rhode-Saint-Génèse

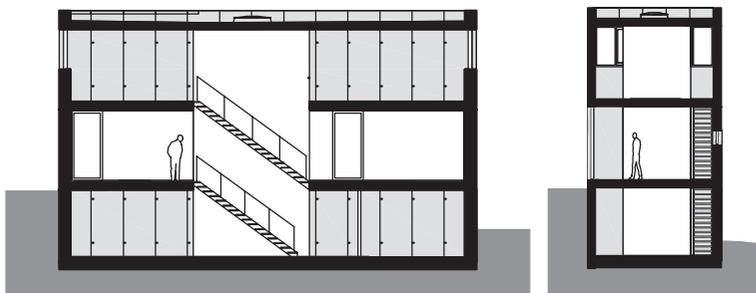
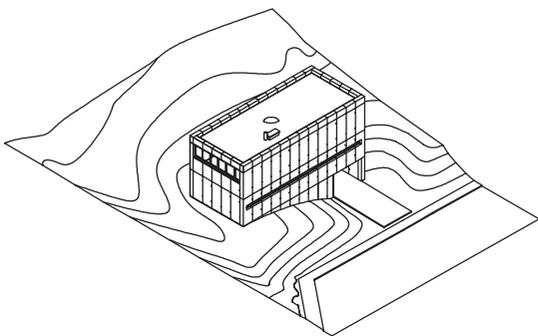
Année de réalisation : 1997

Architecte : JOEL CLAISSE ARCHITECTURES

Photographe : Serge Brison

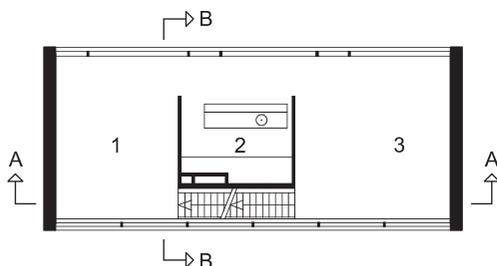
Prix Eighth World Triennial of Architecture (1997)

Prix Belgium Architectural Award (1999)



AA

BB



1 : salle à manger
 2 : cuisine
 3 : séjour

0 1 2 3 m



> Rénovation d'une maison de maître + conciergerie

A l'intérieur de l'habitation, l'esprit initial est respecté ; la qualité des volumes d'origine est conservée ; les niveaux finis et les hauteurs sous plafonds sont maintenus et les moulures préservées. L'intention contemporaine se marque par le grand monolithe vertical planté parallèlement aux murs mitoyens. Il unifie les différents niveaux de l'entresol au deuxième étage. Celui-ci abrite un ascenseur et des locaux techniques, tout en offrant un élément d'une certaine inertie pour tempérer les variations de température intérieure. La verticalité est accentuée par les fentes créées au sol sur toute la longueur de la boîte.

A l'arrière, les annexes en demi-niveaux sont démolies. La façade est entièrement recomposée par un voile de béton lisse beige qui s'élève verticalement depuis la nouvelle cour minérale.

De larges baies s'y inscrivent et laissent pénétrer profondément la lumière dans l'habitation créant ainsi un dialogue entre l'intérieur de l'habitation et la cour minérale qui mène à la conciergerie complètement reconstruite. La conciergerie est conçue dans le même esprit et sa nouvelle façade répond à celle de l'habitation principale.

La cour entre les deux bâtiments est entièrement retravaillée. Les niveaux sont remaniés de manière à apporter un maximum de lumière à l'arrière de l'entresol et à lier de manière souple l'habitation avec le volume de la conciergerie. Le grand voile sur lequel s'articulent les marches extérieures unifie l'espace et reprend la grande terrasse en dalles de verre.

L'utilisation du minéral – la cour et les marches sont dallées – met en évidence la présence du végétal mis en scène sur la façade de la conciergerie. Ces plantations à feuillage persistant permettent de réduire les risques de surchauffe dans la conciergerie.

Les nouvelles interventions architecturales mettent en tension toutes les parties d'origine qui sont entièrement restaurées (façade et pièces avant, escaliers).

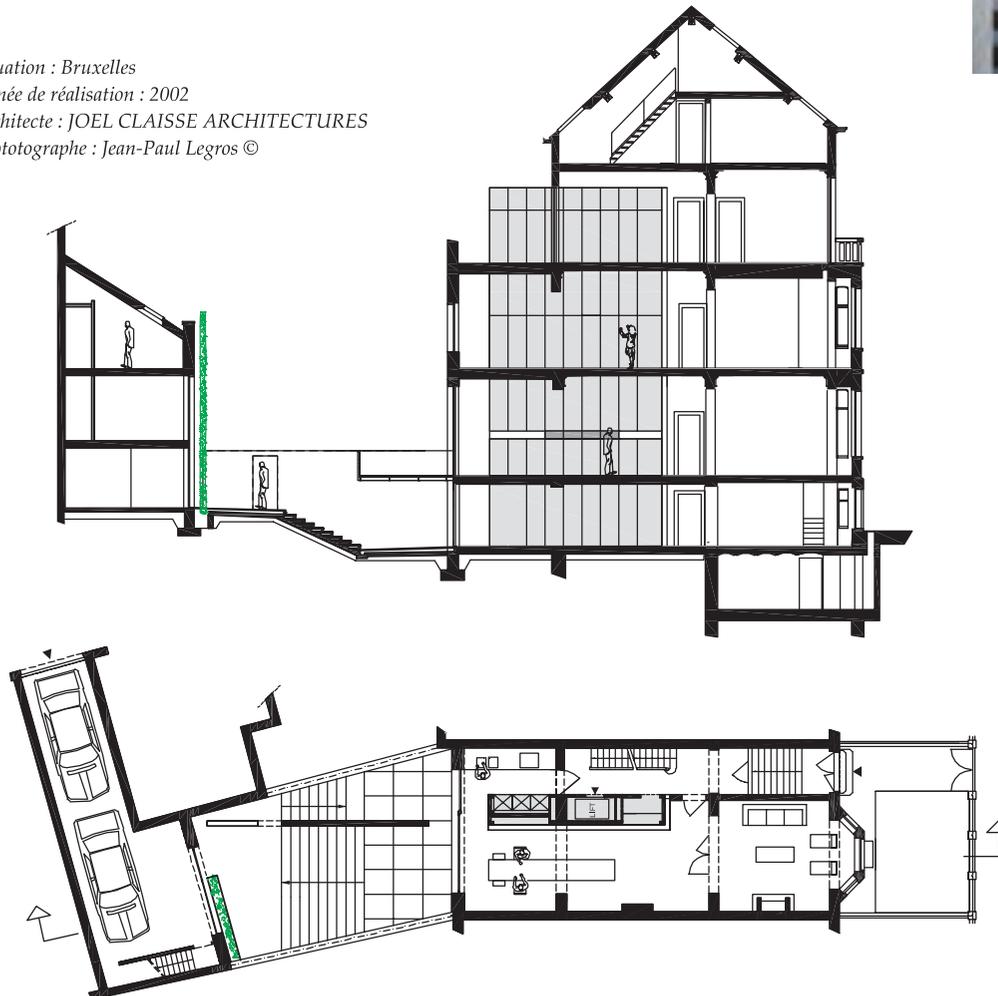


Situation : Bruxelles

Année de réalisation : 2002

Architecte : JOEL CLAISSE ARCHITECTURES

Photographe : Jean-Paul Legros ©



0 5 m

