



PROBLEMES D'HUMIDITE DANS LES BATIMENTS

CAUSES DES DEGRADATIONS. PONTS THERMIQUES. CLIMAT INTERIEUR

Données pour la conception et l'exécution des bâtiments
Conditions d'occupation des bâtiments

SOMMAIRE

Avant-propos	3		
1. Introduction	4		
2. Formation des moisissures	5		
3. Humidité des bâtiments	7		
3.1 Pénétration d'humidité dans les bâtiments	7		
3.2 Humidité de construction	7		
3.3 Condensation superficielle	8		
3.4 Hygroscopicité des matériaux	11		
3.5 Conclusions	12		
4. Le facteur de température τ comme critère de la qualité thermique des éléments de construction	14		
4.1 Taux d'humidité de l'air intérieur	14		
4.11 Sans formation de condensation superficielle	14		
4.12 Avec formation de condensation superficielle	17		
4.13 Résultats de mesures du climat intérieur	18		
4.2 Formation de condensation superficielle	18		
4.3 Facteur de température τ	19		
4.31 Définition du facteur de température τ	19		
4.32 Evolution de la température à travers des parois	19		
4.33 Calcul du facteur de température τ	21		
4.34 Utilisation du facteur de température τ	21		
4.35 Valeur pratique minimale du facteur de température τ pour des bâtiments	22		
4.35.1 Facteur de température τ pour des habitations	22		
4.35.2 Facteur de température τ pour d'autres bâtiments	24		
5. Conditions d'occupation des bâtiments	25		
5.1 Généralités	25		
5.2 Débit de ventilation	25		
5.3 Température intérieure θ_i	26		
6. Ponts thermiques	28		
6.1 Définition, types et limitation des ponts thermiques	28		
6.2 Résultats du calcul de différents ponts thermiques	31		
6.21 Terrasse en béton en encorbellement	32		
6.22 Balcon en béton en encorbellement	36		
6.23 Rive en béton de toiture plate	40		
6.24 Rive en béton de toiture inclinée	44		
6.25 Fondation sur terre-plein	48		
6.26 Fondation sur vide sanitaire	50		
7. Ventilation naturelle des bâtiments	52		
7.1 Considérations générales	52		
7.2 Différences de pression d'air sur les bâtiments	53		
7.21 Différences de pression d'air dues à l'action du vent	53		
7.21.1 Formule générale	53		
7.21.2 Vitesse du vent	53		
7.21.3 Différences de pression d'air prévisibles	59		
7.22 Différences de pression hydrostatique	62		
7.22.1 Local étanche à l'air avec une ouverture	62		
7.22.2 Local étanche à l'air avec une ouverture dans le bas et une ouverture dans le haut	63		
7.22.3 Conclusions et exemple	64		
7.23 Combinaison des différences de pression d'air	65		
7.24 Variation du taux de ventilation	66		
7.3 Etanchéité à l'air des bâtiments et débits d'infiltration d'air	67		
7.31 Etanchéité à l'air des bâtiments	67		
7.32 Mesure de l'étanchéité à l'air des bâtiments	67		
7.33 Exigences relatives à l'étanchéité à l'air des locaux ou des bâtiments	68		
7.4 Ventilation naturelle des bâtiments	68		
7.41 Enoncé du problème	68		
7.42 Ouverture des fenêtres	69		
7.43 Grilles de ventilation	69		
7.44 Gainés de ventilation verticales	70		
7.45 Combinaison de grilles et de gainés de ventilation	70		
7.46 Commentaire final	71		
8. Conclusions	72		
9. Conseils pour l'occupation des bâtiments	75		
Annexe — Elaboration des formules utilisées	77		
Bibliographie	83		
Résumé — Samenvatting — Summary — Zusammenfassung	84		

Comité technique Hygrothermie

Président : M. E. Goes

Membres : MM. O. Jonet, F. Louwers, H. Seghers, G. Timmermans, A. Ketels, J. Dupont, G. Bovijn, S. Driesen, R. Pycke, A. Henrion, M. Vivey, Prof. A. Dupagne, Prof. H. Hens, P. Outtelet, J. Nouwynck, P. Van Houtte, L. Vercruysse, H. Remacle, A. Delfosse, M. Van der Veken

Secrétariat : MM. J. Uyttenbroeck et G. Carpentier

Mai-Juin 1984

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

Etablissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947

Siège social : rue du Lombard 41, 1000 Bruxelles

Station expérimentale : avenue Pierre Holoffe 21, 1342 Limelette

Imprimerie PUVREZ s.a.
Avenue Fonsny 59, 1060 Bruxelles

Editeur responsable : A. Legros,
rue du Lombard 41, 1000 Bruxelles

AVANT-PROPOS

Depuis quelques années nous avons été submergés par toutes sortes de recommandations pour réduire autant que possible la consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments.

Ces recommandations visaient une meilleure isolation des murs, des planchers, de la toiture et des fenêtres ainsi qu'une meilleure étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment. Elles portaient également sur l'amélioration du rendement et de l'entretien des installations de chauffage et indiquaient généralement comment adopter un comportement économe en énergie (se contenter d'une température de confort plus basse, chauffer moins ou ne pas chauffer des locaux non utilisés, ventiler moins, etc.).

Un grand nombre de ces conseils ont certainement été suivis par beaucoup de gens. C'est du moins ce que nous pensons pouvoir déduire du nombre croissant de problèmes qui ont surgi au cours des derniers mois et qui sont très souvent la conséquence d'une application inconsidérée des mesures d'économie précitées ou d'une combinaison fautive de plusieurs d'entre elles.

En effet, le C.S.T.C. a souvent été confronté ces derniers temps à des plaintes et à des dégâts relatifs à une condensation excessive, voire même à la formation de moisissures en des endroits inattendus.

C'est pourquoi le Comité Technique Hygrothermie du C.S.T.C. a demandé, lors de sa séance du 26 novembre 1982, d'examiner de toute urgence le problème de l'humidité dans les bâtiments et d'y consacrer une Note d'information technique.

Les études qu'exigeait ce travail ont pu être réalisées dans le cadre de la mission de recherche confiée au C.S.T.C. par les Services de Programmation de la Politique scientifique.

Le texte de la présente Note d'information a été rédigé par J. Uyttenbroeck, chef de la division Physique du bâtiment et équipements, et G. Carpentier, ingénieur principal.

Sa publication résulte d'une décision prise par le Comité technique Hygrothermie lors de sa séance du 9 décembre 1983.

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, on observe fréquemment des dégâts dans les bâtiments suite au développement de moisissures. Il est frappant de constater que les moisissures se forment surtout au droit des angles des locaux (fig. I et II) et, dans un certain nombre de cas, également derrière des meubles. Les chambres à coucher, les salles de bains, les cuisines et les buanderies semblent être les locaux les plus vulnérables.

Dans la plupart des cas, on ne peut pas accepter la formation de moisissures parce que :

- elles altèrent l'aspect des locaux
- elles dégradent les finitions intérieures
- elles dégagent des odeurs désagréables
- elles peuvent avoir des conséquences néfastes pour la santé des occupants.

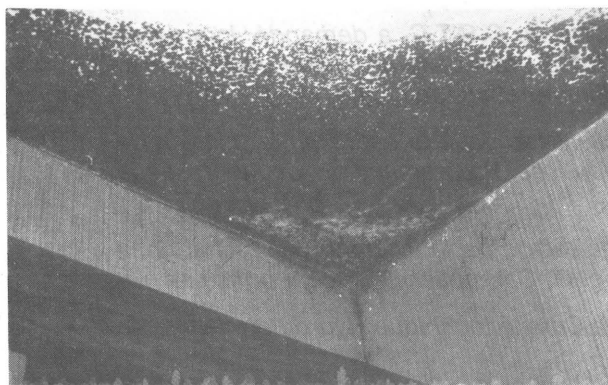


Fig. I.



Fig. II.

2. FORMATION DES MOISSURES

2.1 CAUSES DES MOISSURES

Des spores de moisissures, dont les dimensions sont généralement inférieures à 10 microns, sont normalement présentes dans l'air, au même titre que les bactéries. Leur concentration dans l'air extérieur est de l'ordre de 10^5 spores par m^3 d'air, bien qu'elle soit plus faible après une période de pluie ou pendant des périodes de grand froid, et plus élevée aux alentours des bois, des parcs, etc.

La concentration en spores de moisissures dans l'air intérieur est en général un peu moins forte que dans l'air extérieur.

Il existe normalement de nombreuses variétés de spores de moisissures, certaines apparaissent dans des proportions plus élevées que d'autres selon la saison. Selon leur type, les moisissures sont gris verdâtre, brun foncé ou noirâtre.

En se développant, les moisissures produisent d'autres spores, de sorte que leur prolifération peut être très rapide.

La formation de moisissures sur une surface ne se produit que dans des conditions favorables. Il faut notamment :

- une quantité d'oxygène suffisante
- des conditions de température adéquates. Bien que les moisissures puissent se développer à des températures comprises entre 0 et 60 °C, la température optimale pour un développement rapide se situe entre 5 et 25 °C. Il est important que les variations de température ne soient pas trop importantes
- un fond nourrissant approprié
- une humidité suffisante.

Les deux premières conditions ne posent pas de problèmes dans les bâtiments. En effet, de l'oxygène s'y trouve en suffisance et la température se situe la plupart du temps dans les limites les plus favorables. D'où l'importance des deux dernières conditions, fond nourrissant approprié et humidité suffisante.

2.2 FOND NOURRISSANT

Pour leur développement, les moisissures ont besoin de faibles quantités de matières organiques décomposables comme les sucres, les graisses et surtout la cellulose.

Même dans des habitations très propres, les traces de souillure sur les parois sont suffisamment nombreuses pour permettre le développement de moisissures.

Il va de soi que les endroits présentant une accumulation de salissures ou de poussières constituent des emplacements de prédilection pour le développement de moisissures.

Certaines sortes de papiers peints et surtout la colle cellulosique avec laquelle ils sont posés, ainsi que certains types de peintures semblent être à des degrés divers de bons fonds nourissants pour les moisissures.

2.3 PRESENCE D'HUMIDITE

L'organe reproducteur des moisissures contient environ 95 % d'eau. L'eau est une condition essentielle au développement des moisissures. Celles-ci puisent l'humidité nécessaire principalement dans le support sur lequel elles se développent.

Des variations importantes de la teneur en humidité ne donnent pas lieu, en général, à un développement de moisissures, c'est-à-dire que le développement de moisissures est rarement lié à la pénétration d'eau de pluie.

Si on désire comprendre quelque peu le problème du développement des moisissures dans les bâtiments, il est évident qu'on doit d'abord trouver une réponse à la question : comment les éléments des bâtiments peuvent-ils devenir humides ?

3. HUMIDITE DES BATIMENTS

3.1 PENETRATION D'HUMIDITE DANS LES BATIMENTS

Sept facteurs peuvent être à l'origine de l'humidité d'un bâtiment :

- le passage d'eau de pluie, par exemple par les pores des matériaux, par des microfissures, des fissures, des joints non étanches, etc.
- la succion d'eau contenue dans le sol
- l'absorption d'eau par les matériaux lors de la construction (humidité de construction)
- l'hygroscopicité, c'est-à-dire l'absorption de l'humidité contenue dans l'air
- la condensation superficielle
- la condensation interne
- des événements occasionnels comme une fuite dans une conduite d'eau ou dans une gouttière, un tuyau d'évacuation bouché, etc.

La plupart de ces facteurs sont suffisamment parlants par eux-mêmes.

Nous étudierons uniquement ici :

- l'humidité de construction
- la condensation superficielle
- l'hygroscopicité des matériaux.

3.2 HUMIDITE DE CONSTRUCTION

Par humidité de construction, on entend la quantité d'humidité présente dans un bâtiment après la fin des activités de construction.

L'humidité de construction est due à :

- l'eau absorbée par les matériaux de construction lors de leur entreposage chez le fabricant et sur chantier
- l'eau de gâchage nécessaire à la mise en œuvre des matériaux (mortier, béton, plafonnages, etc.)
- l'eau provenant de précipitations atmosphériques, absorbée par les matériaux pendant la phase de construction.

La rapidité avec laquelle cette humidité sera évacuée dépend :

- des quantités d'humidité absorbées (abondance des pluies lors de la phase de construction, importance du volume de matériaux mis en œuvre avec de grandes quantités d'eau comme par exemple le béton)
- des caractéristiques de séchage des matériaux mis en œuvre (par exemple, à épaisseur égale, le béton séchera beaucoup plus lentement qu'une maçonnerie en briques)
- de l'épaisseur de la couche de matériau; la vitesse de séchage est inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche
- des possibilités de séchage des structures (un parachèvement rapide des éléments au moyen de couches freinant la vapeur d'eau, la mise en peinture par exemple, ralentira fortement le séchage).

On estime à environ 3.000 à 5.000 l la quantité d'humidité de construction qui devra être évacuée après achèvement d'une habitation construite de manière traditionnelle.

Les résultats de mesures donnés ci-dessous démontrent que ni les quantités d'humidité de construction, ni les temps de séchage ne peuvent être sous-estimés :

- quantité d'humidité de construction dans la forme de pente en béton léger de toitures plates, au moment de la pose de la couverture : jusqu'à 150 l/m³
- quantité d'humidité de construction dans la forme de pente en béton de polystyrène de toitures plates, environ deux ans après l'achèvement de la toiture : 170 à 270 l/m³; le béton de pente était situé entre la couverture étanche du toit et une isolation résistant à la vapeur d'eau
- quantité d'humidité de construction dans des murs préfabriqués en béton ordinaire, environ deux ans après l'achèvement de l'habitation : 20 l/m³.

Les chiffres cités démontrent que les éléments de construction peuvent contenir d'importantes quantités d'humidité. Après l'achèvement du bâtiment, l'humidité de construction sèche plus ou moins rapidement. Il est d'ailleurs bien connu qu'au cours des premières années d'occupation d'un bâtiment neuf, la consommation d'énergie de chauffage est beaucoup plus importante qu'à une période ultérieure, lorsque le bâtiment est sec.

Il est clair en outre que l'humidité de construction peut être une source d'humidité suffisante pour le développement de moisissures.

On peut affirmer par conséquent que des mesures devraient être prises pour évacuer l'humidité de construction le plus vite possible.

Cela signifie entre autres que :

- des revêtements freinant la vapeur d'eau (par exemple des couches de peinture, du papier peint plastifié, etc.) ne peuvent pas être posés trop rapidement sur les parois
- au cours de la période suivant immédiatement sa mise en service, le bâtiment doit être suffisamment chauffé et convenablement ventilé.

3.3 CONDENSATION SUPERFICIELLE

L'air contient toujours une certaine quantité de vapeur d'eau.

La quantité maximale de vapeur d'eau (x_s) que l'air peut contenir, dépend de la température, en ce sens que plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'humidité.

On trouve dans le tableau 1 un certain nombre de données à ce sujet.

Lorsqu'à une température donnée l'air contient la quantité maximale d'humidité correspondant à cette température, on dit que l'air est saturé. L'humidité relative de l'air φ est égale à 100 %.

Si cet air contient moins de vapeur d'eau (par exemple x g/kg de sorte que $x < x_s$), on parle alors d'air humide (non saturé) et l'humidité relative de l'air φ est inférieure à 100 %.

L'humidité relative φ de l'air est définie par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{p}{p'} \times 100 = \frac{x (621 + x_s)}{x_s (621 + x)} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

avec p pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

p' pression de saturation de vapeur d'eau (Pa) en fonction de la température de l'air

x teneur en humidité de l'air (g/kg)

x_s teneur en humidité de saturation de l'air (g/kg) en fonction de la température de l'air

Tableau 1 — Pression de saturation de vapeur d'eau p' (Pa) et teneur maximale en vapeur d'eau x_s en g par kg d'air sec

θ (°C)	p' (Pa)	x_s (g/kg)	θ (°C)	p' (Pa)	x_s (g/kg)
- 20	103	0,63	10	1.228	7,63
- 19	114	0,70	11	1.313	8,15
- 18	125	0,77	12	1.403	8,75
- 17	137	0,85	13	1.498	9,35
- 16	150	0,93	14	1.599	9,97
- 15	165	1,01	15	1.706	10,6
- 14	180	1,11	16	1.818	11,4
- 13	198	1,22	17	1.938	12,1
- 12	217	1,34	18	2.065	12,9
- 11	237	1,46	19	2.197	13,8
- 10	260	1,60	20	2.340	14,7
- 9	284	1,75	21	2.487	15,6
- 8	310	1,91	22	2.645	16,6
- 7	338	2,08	23	2.810	17,7
- 6	368	2,27	24	2.985	18,8
- 5	401	2,47	25	3.169	20,0
- 4	437	2,69	26	3.362	21,4
- 3	476	2,94	27	3.565	22,6
- 2	517	3,19	28	3.781	24,0
- 1	562	3,47	29	4.006	25,6
0	611	3,78	30	4.244	27,2
1	657	4,07	31	4.491	28,8
2	705	4,37	32	4.754	30,6
3	759	4,70	33	5.029	32,5
4	813	5,03	34	5.318	34,4
5	872	5,40	35	5.622	36,6
6	935	5,79	36	5.940	38,8
7	1.002	6,21	37	6.274	41,1
8	1.073	6,65	38	6.624	43,5
9	1.148	7,13	39	6.991	46,0
			40	7.375	48,8

La figure III (p. 10) donne les courbes de même humidité relative φ de l'air en fonction de la teneur absolue en humidité de l'air x et de la température de l'air θ .

Exemple

Lorsque de l'air à une température de 20 °C ne contient que 8,8 g/kg de vapeur d'eau (fig. III, point A) au lieu de la quantité maximale de 14,7 g/kg (voir tableau 1), on a comme humidité relative de l'air

$$\varphi = \frac{8,8 (621 + 14,7)}{14,7 (621 + 8,8)} \times 100 = 60 \text{ (\%)}$$

On refroidit maintenant cet air à une température de 10 °C par exemple (en fermant en hiver le radiateur du local) sans en extraire l'humidité (c'est-à-dire que l'humidité de l'air reste égale à 8,80 g/kg).

Il ressort des chiffres du tableau 1 et du graphique de la figure III qu'à une température de 10 °C, l'air ne peut contenir au maximum que 7,63 g/kg d'humidité alors que la teneur en humidité initiale était de 8,80 g/kg. En refroidissant l'air de 20 à 10 °C, il y a donc eu $(8,80 - 7,63) = 1,17$ g de vapeur par kg d'air sec qui s'est condensé.

On a représenté ce refroidissement sur le graphique de la figure III. On a tracé une horizontale parallèle à l'abscisse à partir du point A (20 °C) jusqu'à l'ordonnée. Cette droite coupe la courbe $\varphi = 100 \text{ \%}$ (saturation de l'air) au point B (12 °C). Si la température continue à baisser jusqu'à 10 °C, une certaine quantité d'humidité va se condenser. A partir de ce moment, on suit la courbe $\varphi = 100 \text{ \%}$ jusqu'au point C (10 °C).

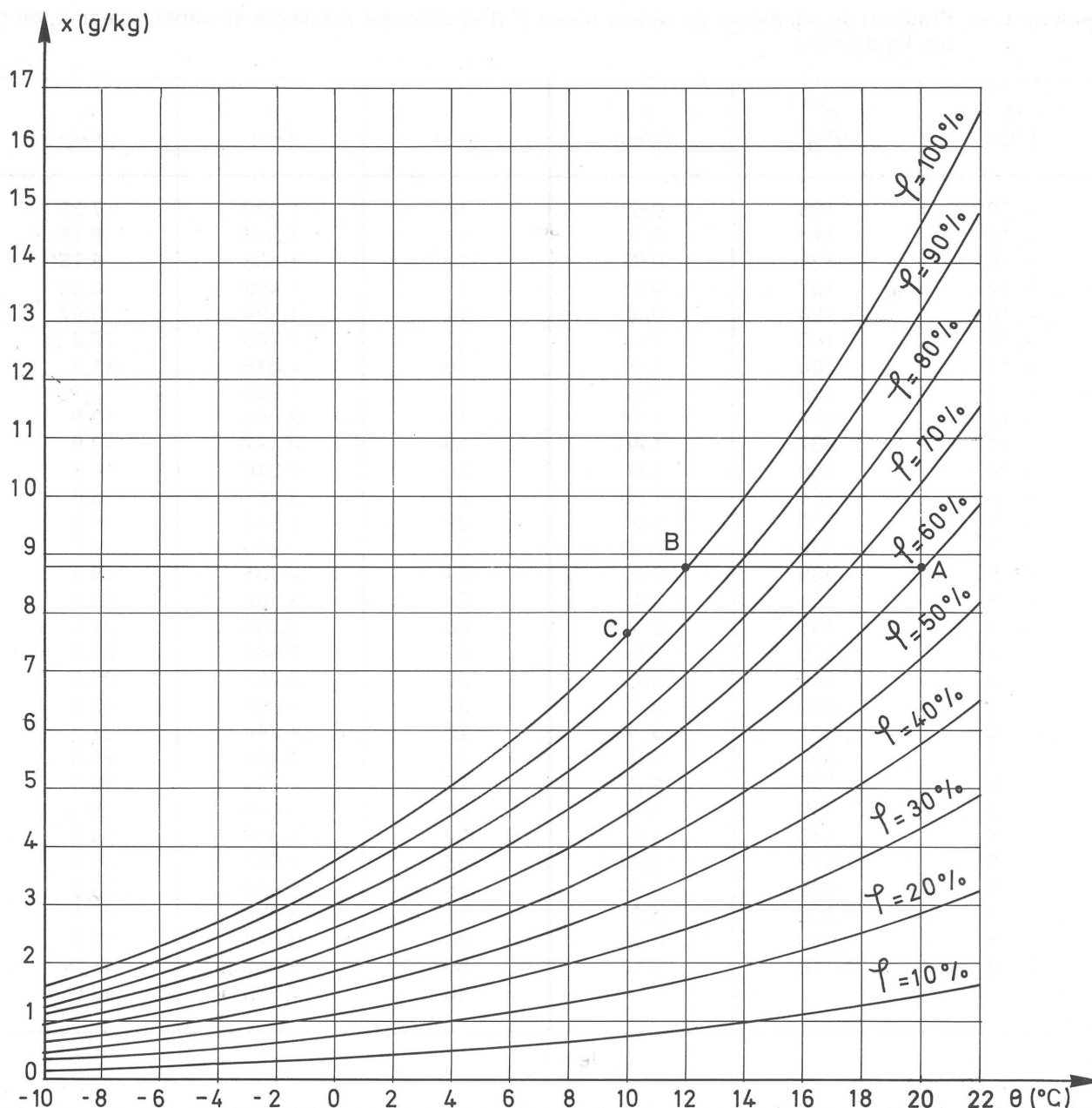


Fig. III — Humidité relative de l'air en fonction de la teneur absolue en humidité de l'air x et de la température de l'air θ .
 En abscisse, température de l'air θ (°C)
 En ordonnée, teneur absolue en humidité de l'air x (g/kg)

La température correspondant au point B est appelé point de rosée de l'air. Sa position initiale est située sur l'horizontale passant par le point B. Le point de rosée représente donc la température à laquelle l'air atteint la saturation en humidité.

On peut également déduire de la figure III qu'une même teneur en humidité x de l'air peut donner lieu à des taux d'humidité relative très différents suivant la température θ de l'air. En d'autres termes, pour une valeur déterminée de x , l'humidité relative de l'air peut être abaissée en augmentant la température de l'air (par exemple en chauffant) et inversement, elle peut être augmentée en diminuant la température.

Dans un local, l'air peut se refroidir fortement en frôlant simplement une paroi froide.

Par exemple, à une température extérieure $\theta_e = -7$ °C et à une température intérieure $\theta_i = 20$ °C, la face intérieure d'un double vitrage aura une température d'environ 10 °C. Si de l'air intérieur à une température $\theta_i = 20$ °C et avec une humidité relative de 60 % (8,80 g d'humidité par kg d'air sec) frôle le double vitrage, sa température va descendre à 10 °C et il ne pourra contenir que 7,63 g d'humidité par kg d'air sec. Le surplus d'humidité se déposera sur le vitrage et il y aura formation d'une condensation superficielle.

Le même phénomène peut évidemment se produire aussi sur des parois opaques froides.

Il faut cependant faire la distinction suivante :

- le verre est un matériau non poreux; si de la condensation se forme sur du verre, le condensat s'écoulera finalement lorsque le film d'eau sera suffisamment épais. Comme le verre est transparent, la condensation y est immédiatement visible
- la plupart des parois opaques sont composées de matériaux poreux (papier peint, plafonnages, briques, béton, etc.). Le condensat qui s'y dépose est absorbé et on ne voit pas d'humidité en surface, ce qui n'empêche pas le matériau de s'humidifier. Si une condensation superficielle se forme régulièrement sur une telle paroi, les matériaux dont elle est composée s'humidifieront de façon durable sur une certaine profondeur. Il peut y avoir ainsi suffisamment d'eau pour permettre le développement de moisissures.

Il faut préciser qu'une condensation superficielle momentanée ne pose généralement pas de problèmes et est même inévitable dans certains cas (cuisines, salles de bains, etc.) à condition que le condensat puisse sécher suffisamment vite. On doit cependant garder à l'esprit que le séchage d'un matériau, humidifié par de la condensation, dure beaucoup plus longtemps que le processus d'humidification de ce matériau (± 10 fois plus longtemps).

Il s'ensuit que, si on veut éviter la formation de condensation superficielle dans un local, on doit veiller à ce qu'il n'y ait en aucun point de celui-ci des éléments de construction dont la température superficielle est inférieure à celle du point de rosée de l'air du local.

En principe, il y a deux moyens de remédier à la condensation :

- augmenter la température superficielle de l'élément de construction. Cette condition peut être remplie par une isolation thermique suffisante combinée à un chauffage satisfaisant du local
- abaisser le point de rosée de l'air, c'est-à-dire diminuer la teneur en humidité x de l'air.

3.4 HYGROSCOPICITE DES MATERIAUX

Lorsqu'un matériau poreux se trouve dans un milieu humide, les parois des pores vont adsorber une certaine quantité d'humidité. La quantité d'humidité adsorbée dépendra uniquement de l'humidité relative de l'environnement.

Dans une ambiance froide avec une humidité relative élevée (par exemple $\varphi = 95 \%$ et $\Theta = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$), on trouve, à l'aide de la formule (1) (p. 8), $x = 3,59 \text{ g d'humidité par kg d'air sec}$.

Dans une ambiance avec une humidité relative $\varphi = 30 \%$ et une température élevée ($\Theta = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$), on trouve une teneur en vapeur d'eau $x = 7,92 \text{ g par kg d'air sec}$.

L'humidité hygroscopique d'un matériau poreux sera plus importante dans le premier cas que dans le second, malgré le fait que la teneur en vapeur d'eau dans l'ambiance chaude est beaucoup plus élevée que dans l'ambiance froide.

Par teneur en humidité hygroscopique d'un matériaux poreux, on entend la teneur en humidité de ce matériau en situation d'équilibre avec une humidité relative de l'air donnée. La teneur en humidité hygroscopique est la teneur en humidité minimale qui peut en pratique être présente dans un matériau poreux.

L'hygroscopicité d'un matériau est la conséquence de la diffusion dans le matériau de l'humidité présente dans l'air. Pour des humidités relatives peu élevées, l'humidité est adsorbée par les parois des pores des matériaux. Pour des humidités relatives plus élevées ($\varphi > 40 \%$), de la condensation se forme dans les pores très étroits des matériaux (condensation capillaire). Plus les pores des matériaux sont étroits, plus la formation de condensation sera rapide.

Comme le processus de la diffusion d'humidité est très lent, le taux d'humidité d'équilibre d'un matériau hygroscopique variera très lentement lors des fluctuations de l'humidité relative de l'air. Des pointes de courte durée de l'humidité relative de l'air (par exemple dans les cuisines, les salles de bains, etc.) ont donc peu d'influence sur le taux d'humidité d'équilibre des matériaux.

Il résulte de ce qui précède que les matériaux avec un pourcentage élevé de pores étroits (micropores) sont des matériaux fortement hygroscopiques.

Lorsque l'humidité relative de l'air est élevée, le taux d'humidité d'équilibre de ces matériaux est si élevé qu'il en résulte des conditions favorables au développement des moisissures.

Le tableau 2 (p. 12) donne le pourcentage moyen de micropores de quelques matériaux de construction (micropores : diamètre inférieur à $0,1 \text{ micromètre}$).

Nous remarquons que ce sont justement les matériaux traditionnels de parachèvement, notamment les plaques de plâtre, les plafonnages à base de chaux, le bois, le papier peint, etc., qui sont les plus hygroscopiques.

Tableau 2

Matériau	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Pourcentage de micropores (% du volume de matériau) (m ³ /m ³)
Brique	1.950	0,8 - 1,1
Béton cellulaire	400	4 - 12
Plafonnage de chaux	1.800	4,7
Plaques de plâtre	800 - 1.400	10
Bois résineux	500	12 - 15

Si on désire limiter le taux d'humidité hygroscopique des matériaux, il faut veiller à limiter l'humidité relative de l'air intérieur ou du moins veiller à ce qu'elle ne reste pas élevée pendant un laps de temps trop long. En effet, si le taux d'humidité hygroscopique d'un matériau reste élevé pendant des périodes suffisamment longues, de telle sorte que des spores de moisissures puissent absorber l'humidité contenue dans ce matériau, le développement de moisissures est inévitable.

Des essais ont fait apparaître que le développement de moisissures se produisait :

- sur des objets en cuir et sur du fromage avec une humidité relative $\varphi \geq 76 \%$
- sur du bois et de la laine avec une humidité relative $\varphi \geq 85 \%$
- sur du coton et de la laine de verre avec une humidité relative $\varphi \geq 96 \%$.

Ces résultats expliquent pourquoi, dans certaines habitations avec en permanence une humidité relative élevée, des moisissures apparaissent par exemple sur des meubles, sur des vêtements, sur des chaussures, etc.

Il résulte de ce qui précède que :

- les caractéristiques hygroscopiques des matériaux
- l'humidité relative de l'air

sont déterminantes pour le taux d'humidité d'équilibre des matériaux.

On sait que, pour des raisons d'hygiène, on conseille de limiter l'humidité relative φ_i de l'air dans les habitations et les bureaux entre 30 % au minimum et 70 % au maximum. Il ressort de diverses études que la valeur d'humidité relative φ_i de l'air la plus intéressante se situe aux environs de 50 %.

Pour ces humidités relatives, le taux d'humidité d'équilibre de la plupart des matériaux hygroscopiques est suffisamment bas. Dans ce cas le taux d'humidité hygroscopique des matériaux ne donne généralement pas lieu à des problèmes.

3.5 CONCLUSIONS

1. Un taux d'humidité trop élevé dans des éléments de construction peut entraîner la formation de moisissures à la surface de ces éléments.

Dans la pratique, un taux d'humidité trop élevé des éléments de construction doit souvent être attribué à :

- un taux d'humidité de construction trop élevé
- une condensation superficielle fréquente sur les éléments
- un taux d'humidité hygroscopique trop élevé des éléments.

2. Le séchage de l'humidité de construction est normal

- si on n'exécute le parachèvement des parois au moyen de couches fortement résistantes à la diffusion de vapeur (peinture, papier peint plastifié, etc.) qu'après que les parois aient suffisamment séché
- si on chauffe et si on ventile convenablement.

3. En ce qui concerne la condensation superficielle, il faut veiller à ce que :

- la température superficielle des parois soit assez élevée en réalisant une isolation thermique suffisante combinée à un chauffage adéquat du local
- le point de rosée de l'air soit suffisamment bas, c'est-à-dire que le taux d'humidité x de l'air ne soit pas trop élevé.

4. En ce qui concerne le taux d'humidité hygroscopique, il faut veiller à ce que l'humidité relative de l'air ambiant ne reste pas trop élevée pendant de longues périodes. Il résulte de la relation (1) (p. 8) que cela équivaut à limiter le taux d'humidité x de l'air ambiant en fonction de la température du local.

Les conclusions formulées appellent les questions suivantes :

- dans quelle mesure faut-il isoler les parois des locaux ?
- dans quelle mesure faut-il chauffer les locaux occupés ?
- comment peut-on limiter le taux d'humidité x_i de l'air d'un local ?

Nous définissons dans le chapitre suivant une grandeur pratique (appelée facteur de température) qui permettra de tenir compte des nombreux paramètres en jeu.

4. LE FACTEUR DE TEMPERATURE τ COMME CRITERE DE LA QUALITE THERMIQUE DES ELEMENTS DE CONSTRUCTION

4.1 TAUX D'HUMIDITE DE L'AIR INTERIEUR

4.11 Sans formation de condensation superficielle

Si, dans un local avec une production d'humidité D (kg/h) et un volume de ventilation nV_L (m³/h), de la condensation ne se forme en aucun endroit, on peut poser en régime stationnaire que la quantité d'humidité évacuée avec l'air ventilé par unité de temps est égale à la somme de la quantité d'humidité apportée avec l'air ventilé par unité de temps et de la quantité de vapeur d'eau produite dans le local.

Le raisonnement suivi (voir Annexe, p. 77) conduit à la relation

$$x_i = \varphi_e x_{se} + 825 \frac{D}{nV_L} \quad (\text{g/kg}) \quad (2)$$

avec x_i teneur en humidité de l'air du local (g/kg)
 φ_e humidité relative de l'air extérieur
 x_{se} teneur en humidité de saturation de l'air extérieur (g/kg)
 $\frac{D}{nV_L}$ rapport entre la production d'humidité (kg/h) et le débit de ventilation dans le local (m³/h)

La relation (2) est représentée graphiquement à la figure IV. On a supposé que $\varphi_e = 0,90$ et on a admis pour Θ_e une variation de -10 à $+15$ °C par paliers de 5 °C.

La variation de x_i est très faible pour une modification de la température intérieure Θ_i entre 10 et 20 °C (voir Annexe, expression (a), p. 77) de sorte que les valeurs du graphique de la figure IV sont valables pour des températures intérieures entre 10 et 20 °C.

Remarques

1. La production d'humidité d'un adulte normal exerçant une activité très légère (tranquille, en position assise) correspond environ à $D = 50$ g/h (0,05 kg/h).
2. Pour des raisons physiologiques, il est absolument nécessaire de prévoir un débit de ventilation de 5 m³/h par personne (limitation du taux de CO₂ dans l'air). Toutefois, pour des raisons de confort (éviter les odeurs désagréables), on prescrit un débit de ventilation de 20 m³/h au minimum par personne.

Avec $D = 0,05$ kg/h et $nV_L = 5$ et 20 m³/h personne, on a respectivement

$$\frac{D}{nV_L} = \frac{0,05}{5} = 0,01 \text{ kg/m}^3 \quad \text{et} \quad \frac{D}{nV_L} = \frac{0,05}{20} = 0,0025 \text{ kg/m}^3$$

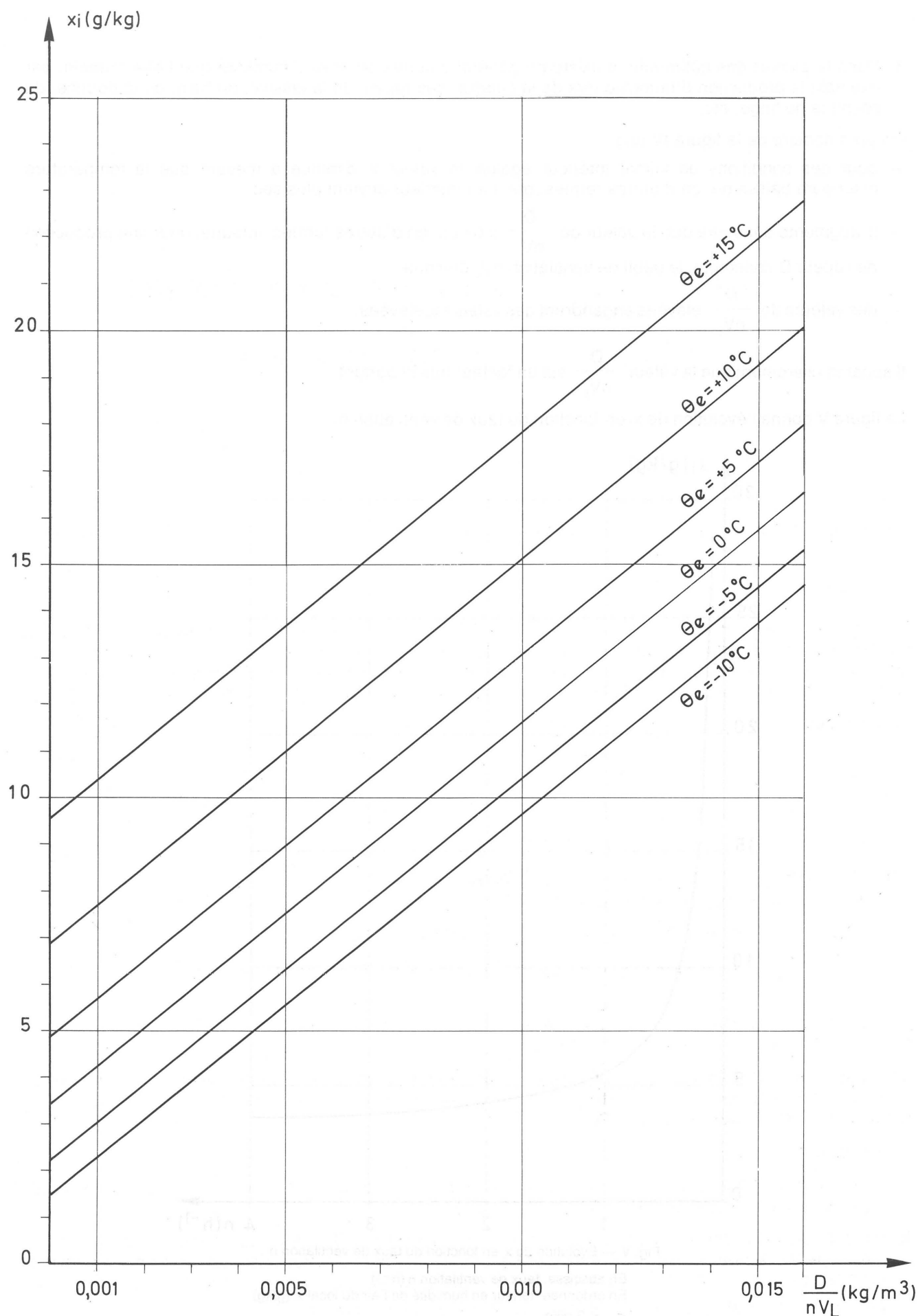


Fig. IV — Evolution de x_i en fonction de $\frac{D}{n V_L}$ et de θ_e ($\varphi_e = 90\%$, $\theta_i = 15^\circ\text{C}$).

En abscisse, rapport $\frac{D}{n V_L}$ (kg/m³) entre la production d'humidité (kg/h) et le débit de ventilation dans le local (m³/h)
 En ordonnée, teneur en humidité de l'air du local x_i (g/kg)

3. Dans la plupart des bâtiments, il existe en général d'autres sources d'humidité que l'être humain, par exemple la production d'humidité lors de la cuisson des repas, de la lessive, du bain, de la douche, du séchage du linge, etc.

On peut déduire de la figure IV que :

- pour des conditions de climat intérieur égales, la valeur x_i diminue à mesure que la température extérieure baisse ou, en d'autres termes, que l'air intérieur devient plus sec
- x_i augmente à mesure que la valeur de $\frac{D}{nV_L}$ croît ou, en d'autres termes, lorsque, pour une production de vapeur D constante, le débit de ventilation nV_L diminue
- des valeurs de $\frac{D}{nV_L}$ élevées engendrent des valeurs x_i élevées.

Il apparaît clairement que la valeur $\frac{D}{nV_L}$ est un facteur très important.

La figure V donne l'évolution de x_i en fonction du taux de ventilation n .

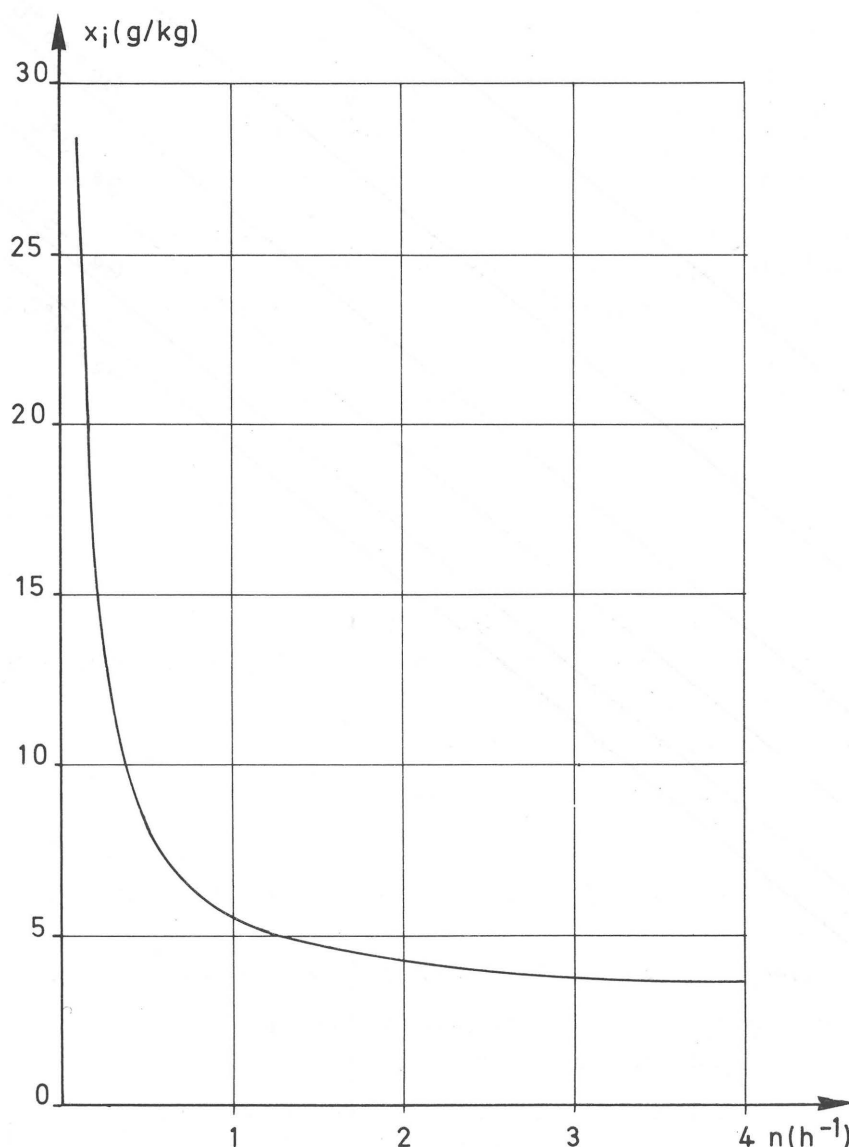


Fig. V — Evolution de x_i en fonction du taux de ventilation n .

En abscisse, taux de ventilation n (h^{-1})

En ordonnée, teneur en humidité de l'air du local x_i (g/kg)

$$x_e = 3 \text{ g/kg}$$

$$D = 0,1 \text{ kg/h}$$

$$V_L = 32,5 \text{ m}^3$$

$$x_i = x_e + \frac{2,538}{n}$$

Le graphique de la figure V montre que :

- des taux de ventilation très bas ont comme conséquence des teneurs en humidité très élevées de l'air intérieur
- dans des bâtiments très bien ventilés, une forte augmentation de la ventilation n'a pratiquement plus d'influence sur x_i , mais va cependant avoir comme conséquence une augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage de ces bâtiments.

4.12 Avec formation de condensation superficielle

De l'humidité est extraite de l'air du local par la formation de condensation.

Le taux d'humidité de l'air du local sera par conséquent plus bas que s'il n'y a pas de condensation superficielle. En supposant qu'on se trouve en régime stationnaire, l'équation hygrométrique du local comportera un terme supplémentaire, à savoir la quantité d'humidité qui se condense par unité de temps sur une surface déterminée A (m²) dans le local.

Le raisonnement suivi (voir Annexe, p. 77) conduit à la relation :

$$x_i = \frac{x_i^\circ + 10,48 x_{sA} \frac{\Sigma A}{nV_L}}{1 + 10,48 \frac{\Sigma A}{nV_L}} \quad (\text{g/kg}) \quad (3)$$

avec x_i° taux d'humidité de l'air intérieur (g/kg) dans le cas où il n'y a pas formation de condensation superficielle, calculé à l'aide de la relation (2) (p. 14)

x_{sA} taux d'humidité de saturation (g/kg) correspondant à la température superficielle θ_{oi} (°C) de la surface A

L'expression (3) peut être utilisée dans les conditions suivantes :

$$x_e \leq 7 \text{ g/kg}$$

$$2,5 \text{ g/kg} \leq x_{sA} < 12 \text{ g/kg}$$

$$10^\circ\text{C} \leq \theta_i \leq 20^\circ\text{C}$$

On procède comme suit :

- on détermine x_i° à l'aide de la relation (2) (p. 14) ou du graphique de la figure IV (p. 15)
- on détermine x_{sA} en fonction de la température superficielle de la paroi la plus froide du local
- si $x_i^\circ > x_{sA}$, il y a condensation superficielle
- on trouve la valeur finale de x_i à l'aide de la relation (3).

Exemple

Soit un local muni d'un vitrage de 2 m², $\theta_i = 12^\circ\text{C}$, $D = 0,05 \text{ kg/h}$ et $nV_L = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ($D/nV_L = 0,005 \text{ kg/m}^3$).

Les conditions extérieures sont $\theta_e = -10^\circ\text{C}$, $\varphi_e = 90\%$, $x_{se} = 1,60 \text{ g/kg}$ (voir fig. III, p. 10).

Admettons que le vitrage de 2 m² soit la surface la plus froide de la pièce.

La formule (2) (p. 14) ou la figure IV (p. 15) donne

$$x_i^\circ = 0,9 \times 1,60 + 825 \times 0,005 = 5,56 \quad (\text{g/kg})$$

La température superficielle du vitrage (surface la plus froide) est calculée à l'aide de la formule :

$$\theta_{oi} = \theta_{rs} - \frac{k}{h_i} (\theta_{rs} - \theta_e) \quad (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

avec θ_{rs} température de confort (°C)

k coefficient de transmission thermique du vitrage (W/m² K)

h_i coefficient d'échange thermique de surface entre le vitrage et l'ambiance intérieure (W/m² K)

Pour ces conditions climatiques, x_e est déjà élevé et l'air ventilé, peu ou pas chauffé à l'intérieur, n'a donc pratiquement pas d'action desséchante.

Enfin, notons également que pour des températures intérieures basses et des températures extérieures relativement élevées, les vitrages ne peuvent remplir le rôle d'éléments de sécurité que dans une faible mesure.

Par temps humide et pour une température pas trop élevée, il est dès lors nécessaire de ventiler suffisamment les locaux, éventuellement en combinaison avec du chauffage

5. avec une limite à 95 % des valeurs x_i moyennes hebdomadaires mesurées, on obtient des valeurs $\frac{D}{nV_L}$ remarquablement élevées.

Pour $\theta_e \leq 0^\circ\text{C}$ la valeur $\frac{D}{nV_L}$ moyenne hebdomadaire estimée varie de 0,0064 à 0,0082 kg/m³.

Si on ne tient compte que de la production de vapeur moyenne par personne ($D = 0,05$ kg/h personne), les valeurs $\frac{D}{nV_L}$ citées demandent des débits de ventilation de 6,1 à 7,8 m³/h personne. Pour des raisons d'hygiène, on considère un débit de ventilation de 10 m³/h personne comme la valeur minimale admissible pour des locaux occupés pendant de longues périodes.

Compte tenu des considérations énoncées ci-avant et des difficultés pratiques d'obtenir des valeurs τ suffisamment élevées en cas de ponts thermiques, on peut fixer la valeur minimale du facteur de température comme suit

$$\tau_{\min} = 0,70$$

Il appartient à l'auteur de projet de juger si des valeurs plus basses peuvent être admises localement en prenant toutefois les mesures nécessaires pour :

- éviter que l'humidité ne goutte (évacuation du condensat)
- empêcher la formation de moisissures (utilisation de matériaux sur lesquels la moisissure ne peut pas se développer).

A l'aide de la valeur minimale fixée pour τ , on peut déterminer la valeur k maximale des parois opaques.

On a :

$$\tau = \frac{R_{T\min} - R_i}{R_{T\min}} = \frac{R_{\min} + R_e}{R_i + R_{\min} + R_e} = 0,70$$

Avec $R_i = 0,2$ m² K/W (c'est-à-dire $h_i = 5$ W/m² K), on trouve :

$$R_{\min} = 0,424 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

Avec R_{\min} on peut calculer la valeur normative de $R_{T\min}$ et de k_{\max} .

On a :

$$R_{T\min} = R_i + R_{\min} + R_e = 0,125 + 0,424 + 0,043 = 0,592 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$k_{\max} = \frac{1}{R_{T\min}} = \frac{1}{0,592} = 1,69 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Lorsque la valeur k des parois extérieures (calculée selon le projet de norme NBN B 62-002) (*) ne dépasse pas 1,69 W/m² K, le facteur de température τ (calculé avec $h_i = 5$ W/m² K) sera au moins égal à 0,70 dans les angles des locaux situés du côté du mur extérieur.

4.35.2 Facteur de température τ pour d'autres bâtiments

Il appartient à l'auteur de projet de déterminer le facteur de température τ minimal qu'il utilisera pour établir son projet, en fonction des conditions de climat intérieur à réaliser.

On accordera une attention particulière aux bâtiments équipés d'une installation d'humidification de l'air et à ceux dans lesquels la production d'humidité est importante.

Dans chaque cas particulier, on peut déterminer avec la relation (12) (p. 20), la valeur τ minimale à obtenir.

(*) Voir Bibliographie n° 9.

5. CONDITIONS D'OCCUPATION DES BATIMENTS

5.1 GENERALITES

Les considérations énoncées ci-avant ont montré que la température intérieure, la production de vapeur et le débit de ventilation sont des paramètres importants pour la formation de condensation superficielle pouvant entraîner la formation de moisissures.

Si dans un bâtiment il est satisfait à la condition $\tau_{\min} \geq 0,70$ on peut se demander comment il est possible d'éviter la formation de condensation superficielle.

Dans le § 4.1 (p. 14) on a montré que x_i et donc aussi le point de rosée de l'air intérieur diminuent à mesure que le débit de ventilation nV_L (m^3/h) du local augmente.

Par ailleurs, on a également démontré que la température superficielle des parois d'un local augmente lorsque le local est chauffé à une température plus élevée.

Si on prend ces deux mesures, on réduit le risque de formation de condensation superficielle. Il est en outre évident que si on combine les deux mesures, on obtiendra le même résultat.

5.2 DEBIT DE VENTILATION

Lorsqu'on désire ne pas chauffer certains locaux habités (par exemple des chambres à coucher) pour des raisons d'économie d'énergie, il convient de prendre des mesures pour réduire le taux d'humidité de l'air de ces locaux si on veut éviter la formation de condensation et ses conséquences néfastes possibles.

On peut contrôler le débit de ventilation nécessaire en mesurant correctement l'humidité relative de l'air ambiant.

Le tableau 4 (p. 26) donne les valeurs de l'humidité relative $\varphi_{i \max}$ de l'air d'un local à partir desquelles il y a formation de condensation superficielle sur des parois opaques avec $\tau = 0,70$.

Pour les calculs, on a admis que :

- Θ_e variait de -10 à $+5$ °C par paliers de 5 °C
- Θ_i variait de 0 à $+15$ °C par paliers de 5 °C
- la température superficielle minimale était calculée avec la formule (7) (p. 19)
- x_{sA} et x_{si} étaient déterminés à l'aide du graphique de la figure III (p. 10) ou des données du tableau 1 (p. 9).

Tableau 4 — Valeurs de φ_i à partir desquelles il y a formation de condensation sur des parois avec $\tau = 0,70$

Θ_e (°C)	Θ_i (°C)	$\Theta_{oi\ min}$ (°C)	x_{sA} (g/kg)	x_{si} (g/kg)	$\varphi_{i\ max}$ (%)
- 10	0	- 3	2,94	3,78	77,88
	5	0,5	3,93	5,40	72,95
	10	4,0	5,03	7,63	66,20
	15	7,5	6,43	10,6	61,06
- 5	0	- 1,5	3,33	3,78	88,16
	5	2,0	4,37	5,40	81,05
	10	5,5	5,60	7,63	73,63
	15	9,0	7,13	10,60	67,63
0	5	3,5	4,87	5,40	90,26
	10	7,0	6,21	7,63	81,57
	15	10,5	7,89	10,60	74,75
+ 5	10	8,5	6,89	7,63	90,41
	15	12,0	8,75	10,60	82,79

Les valeurs les plus sévères du tableau 4 peuvent être exprimées par la formule

$$\varphi_i = 74 + 1,4 \Theta_e \quad (\%) \quad (14)$$

Si φ_i est limité à des valeurs inférieures à celle donnée par la formule (14), la formation de condensation sur des parois opaques avec $\tau = 0,70$ est impossible.

Il y a lieu de noter que la valeur moyenne hebdomadaire de φ_i doit être limitée à 80 % au maximum.

L'application de la formule (14) donne des débits de ventilation supérieurs à ceux obtenus avec une limite à 95 % des valeurs moyennes hebdomadaires x_i mesurées.

5.3 TEMPERATURE INTERIEURE Θ_i

Lorsqu'on veut limiter le débit de ventilation à la valeur minimale encore admissible du point de vue hygiénique, c'est-à-dire à la valeur maximale $\frac{D}{nV_L} = 0,005 \text{ kg/m}^3$, il est nécessaire d'atteindre une température de chauffage suffisante pour éviter la formation de condensation superficielle.

Il découle de l'expression (12) (p. 20) que :

$$\Theta_i > \frac{\Theta_d - (1 - \tau) \Theta_e}{\tau} \quad (^\circ\text{C}) \quad (15)$$

Les valeurs calculées avec l'expression (15) ont été portées en graphique sur la figure VII. On a également représenté sur le graphique la température moyenne dans les locaux non chauffés de maisons habitées.

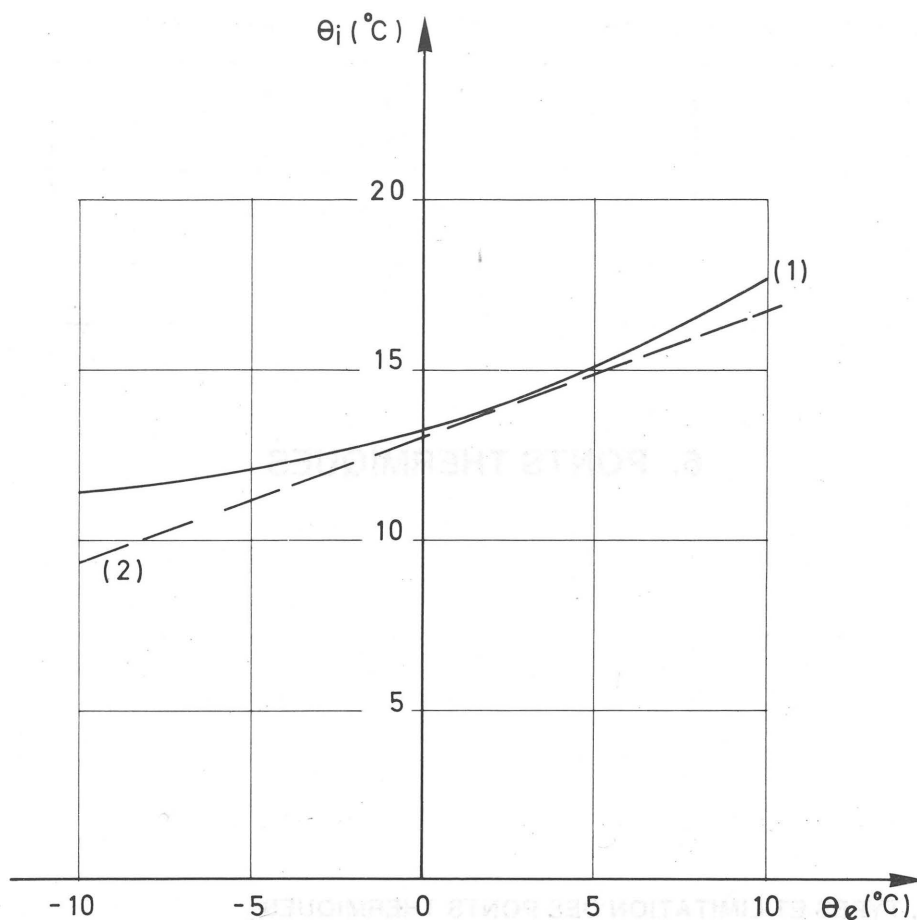


Fig. VII — Valeurs de θ_i à partir desquelles il y a formation de condensation sur les parois pour une valeur $\tau = 0,70$ (1) et température moyenne dans les locaux non chauffés de maisons habitées (2).

En abscisse, température extérieure θ_e (°C)

En ordonnée, température intérieure θ_i (°C)

$$\frac{D}{n V_L} = 0,005 \text{ kg/m}^3 - \frac{\Sigma A}{n V_L} = 0,075 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} - \varphi_e = 90 \%$$

6. PONTS THERMIQUES

6.1 DEFINITION, TYPES ET LIMITATION DES PONTS THERMIQUES

L'isolation des parois ou des éléments de parois plans ne pose généralement pas de problèmes. Aussi, peut-on facilement atteindre les valeurs minimales fixées pour le facteur de température τ . Des difficultés peuvent toutefois se présenter au droit des ponts thermiques situés dans ces éléments.

Un pont thermique est une partie de construction dans laquelle soit la densité du flux de chaleur ϕ est sensiblement plus élevée que celle des éléments contigus, soit la température superficielle intérieure θ_{oi} est nettement inférieure à celle des éléments environnants, ce qui entraîne un risque accru de formation de condensation superficielle.

Si il y a formation régulière de condensation et si l'humidité condensée ne peut pas sécher suffisamment, on constate une pénétration d'humidité avec éventuellement formation de moisissures.

Selon leur nature, on distingue :

- les ponts thermiques concentrés
- les ponts thermiques linéaires.

Les ponts thermiques concentrés ont des dimensions perpendiculaires à la façade supérieures à leurs dimensions transversales. Il s'agit par exemple d'ancrages de consoles dans des poutres de rive, d'ancrages métalliques, etc.

Les ponts thermiques linéaires ont des dimensions nettement plus grandes dans un sens de la façade que dans l'autre, par exemple une colonne dans une façade, des rives de toitures, un plancher ou une terrasse en encorbellement, etc.

Pour les ponts thermiques linéaires, on fait encore une distinction entre :

- les ponts thermiques plans
- les ponts thermiques non plans.

Par ponts thermiques plans, on entend des éléments de construction dont la surface extérieure et la surface intérieure sont égales et parallèles.

Par ponts thermiques non plans, on entend des éléments de construction dont les surfaces intérieure et extérieure sont différentes, dont la forme est différente ou dont les surfaces ne sont pas parallèles.

La figure 1 donne des schémas de ponts thermiques plans et la figure 2 des schémas de ponts thermiques non plans.

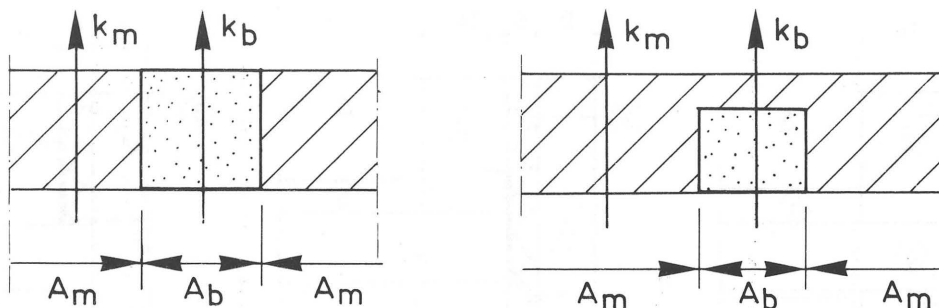


Fig. 1 — Types de ponts thermiques plans.

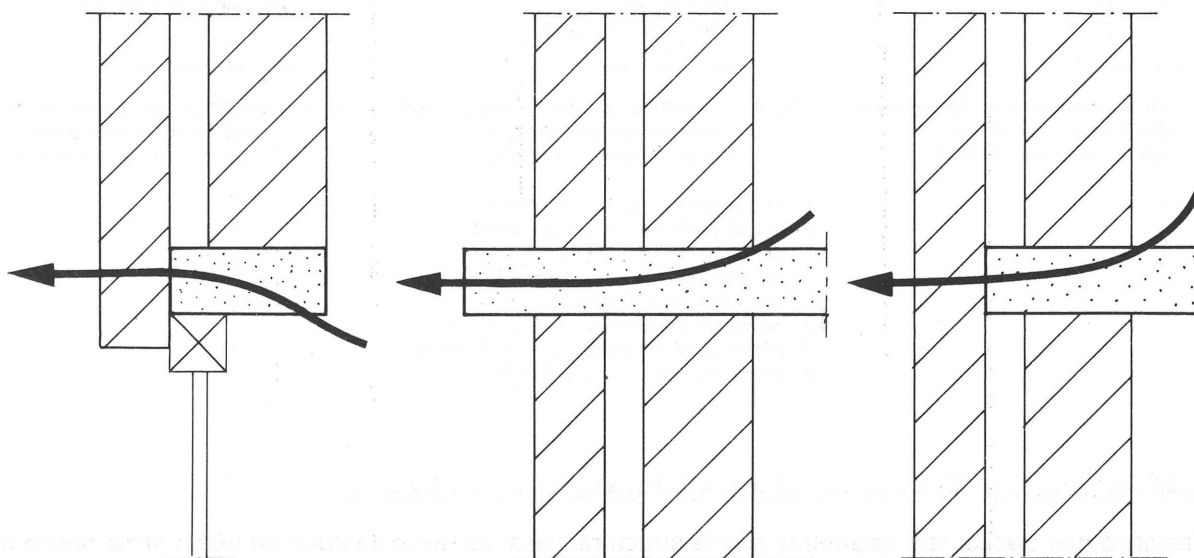


Fig. 2 — Types de ponts thermiques non plans.

La limitation des ponts thermiques est avant tout un problème de conception de la construction.

En principe on peut neutraliser les ponts thermiques de trois façons :

- en appliquant une isolation intérieure
- en appliquant une isolation extérieure
- en pratiquant des coupures thermiques.

Il faut toutefois considérer qu'une couche d'isolation attire les isothermes vers elle, ce qui peut dans le cas d'isolation intérieure engendrer des situations parfois assez critiques. On évitera dès lors autant que possible de placer une isolation intérieure, du moins dans les bâtiments neufs.

Lorsqu'on place une isolation extérieure, il convient d'envelopper complètement le pont thermique avec un matériau isolant. Si on ne l'enveloppe que partiellement, on aura le plus souvent un déplacement des surfaces froides, ce qui peut donner naissance à des situations critiques en d'autres endroits.

Si on applique la méthode des coupures thermiques, on doit prêter attention aux aspects constructifs du problème.

Le placement d'une isolation intérieure complémentaire contre un élément déjà pourvu d'une isolation extérieure ou d'une coupure thermique occasionne généralement une baisse de la valeur de τ .

Quelle que soit la solution choisie, la couche isolante doit en général présenter une résistance thermique supérieure à $0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ afin de satisfaire à l'exigence minimale $\tau = 0,70$.

A titre d'exemple, nous examinerons le cas de linteaux ou poutres de rive en béton :

- en contact direct avec la paroi extérieure d'un mur creux (fig. 3, p. 30)
- avec coupure thermique (fig. 4, p. 30)
- avec isolation intérieure (fig. 5, p. 30).

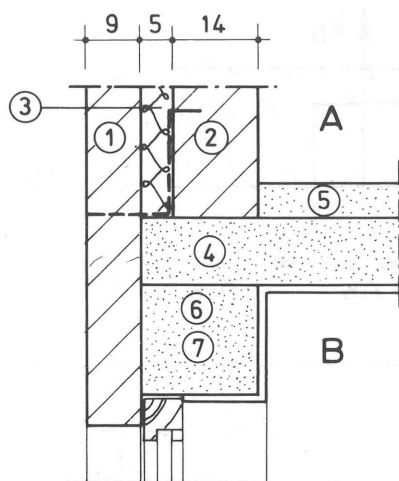


Fig. 3 — Linteau ou poutre de rive en béton sans coupure thermique.
Coupe au droit d'un châssis.

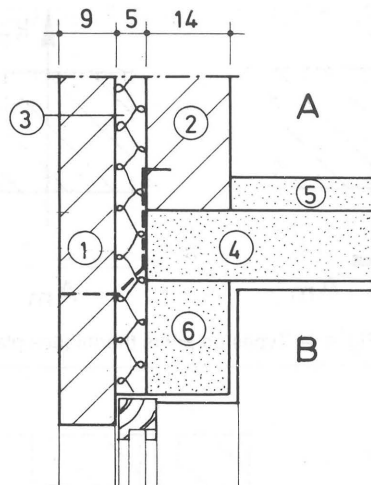


Fig. 4 — Linteau ou poutre de rive en béton avec coupure thermique.
Coupe au droit d'un châssis.

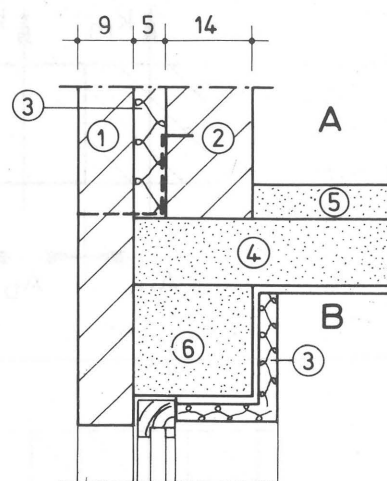


Fig. 5 — Linteau ou poutre de rive en béton avec isolation intérieure.
Coupe au droit d'un châssis.

1. brique pleine : $\lambda_e = 1,10 \text{ W/mK}$
2. brique perforée : $\lambda_i = 0,54 \text{ W/mK}$
3. matériau isolant : $\lambda_i = 0,04 \text{ W/mK}$
4. dalle creuse : $R = 0,11 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
5. chape : $\lambda = 0,37 \text{ W/mK}$
6. béton armé ordinaire : $\lambda_i = 2 \text{ W/mK}$
7. béton cellulaire armé : $\lambda_i = 0,26 \text{ W/mK}$
8. enduit intérieur : $\lambda_i = 0,7 \text{ W/mK}$

Les facteurs de température des cas étudiés sont donnés dans le tableau 5.

Les résultats des calculs font apparaître que la structure classique avec linteaux en béton armé donne des valeurs τ_B trop basses.

Tableau 5 — Facteurs de température τ des structures représentées sur les figures 3, 4 et 5

Matériau du linteau	Structure classique (fig. 3)		Structure avec coupure thermique (fig. 4)		Structure avec isolation intérieure (fig. 5)	
	sans isolation du creux	avec isolation du creux	sans isolation du creux	avec isolation du creux	sans isolation du creux	avec isolation du creux
Béton armé	$\tau_A = 0,73$ $\tau_B = 0,59$	$\tau_A = 0,35$ $\tau_B = 0,595$	$\tau_A = 0,73$ $\tau_B = 0,705$	$\tau_A = 0,885$ $\tau_B = 0,865$	$\tau_A = 0,72$ $\tau_B = 0,765$	$\tau_A = 0,835$ $\tau_B = 0,77$
Béton cellulaire armé	$\tau_A = 0,735$ $\tau_B = 0,735$	$\tau_A = 0,855$ $\tau_B = 0,74$	$\tau_A = 0,73$ $\tau_B = 0,725$		$\tau_A = 0,73$ $\tau_B = 0,815$	

6.2 RESULTATS DU CALCUL DE DIFFERENTS PONTS THERMIQUES

Etant donné la très grande variété de ponts thermiques rencontrés dans les bâtiments, tant au point de vue de leurs caractéristiques géométriques que des propriétés des matériaux, il n'est pas possible de fournir des données détaillées pour tous les cas pouvant se présenter.

Il nous paraît cependant utile d'étudier avec précision quelques ponts thermiques se présentant fréquemment pour :

- les terrasses en béton en encorbellement (figures et tableaux 6 et 7, p. 32 et 34)
- les balcons en béton en encorbellement (figures et tableaux 8 et 9, p. 36 et 38)
- les rives en béton de toitures plates (figures et tableaux 10 et 11, p. 40 et 42)
- les rives en béton de toitures inclinées (figures et tableaux 12 et 13, p. 44 et 46)
- les fondations sur terre-plein (figure et tableau 14, p. 48)
- les fondations sur vide sanitaire (figure et tableau 15, p. 50).

Les calculs ont été effectués à l'aide du programme KOBUR 82 « Computerprogramma ter bepaling van temperatuursverloop in en warmteverlies doorheen tweedimensionaal rechthoekig te beschrijven constructies of constructiedelen onder stationaire randvoorwaarden d.m.v. de differentiemethode » (*).

Ce programme ordinateur a été rédigé par P. Standaert (Katholieke Universiteit Leuven, Laboratorium voor Bouwfysica) sous la direction du Professeur H. Hens, dans le cadre du Programme National de Recherche et Développement dans le domaine de l'Energie.

Les cas de ponts thermiques étudiés sont donnés à titre d'exemple. Ils n'excluent évidemment pas le recours à d'autres solutions.

Dans tous les cas de ponts thermiques ayant fait l'objet de calculs, on a considéré :

- que la lame intérieure du mur creux a une résistance thermique $R = 0,350 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ (blocs creux de terre cuite de 14 cm d'épaisseur)
- que l'isolation du creux a une résistance thermique $R = 1,25 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ (par exemple 5 cm d'épaisseur d'un matériau avec $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$)
- que le vitrage utilisé a une résistance thermique $R = 0,312 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ ($k = 3,2 \text{ W/m}^2 \text{ K} = \text{double vitrage}$)
- que les châssis sont en bois, en PVC ou en métal avec coupure thermique
- que le béton armé a une valeur λ égale à 2 W/mK
- que l'enduit intérieur éventuel n'est pas pris en considération étant donné son peu d'influence
- que la chape a une valeur λ égale à $0,37 \text{ W/mK}$
- que le béton de pente des toitures plates a une valeur λ égale à $0,7 \text{ W/mK}$
- que la paroi extérieure du mur creux a une valeur λ égale à $1,10 \text{ W/mK}$ (maçonnerie humide).

Les calculs ont été effectués avec une valeur h_i uniforme de $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; cependant, pour déterminer la valeur k linéaire des ponts thermiques, on a utilisé une valeur h_i uniforme de $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

La valeur k_i d'un pont thermique est, par définition, la perte de chaleur à travers 1 m courant de pont thermique qui s'ajoute à la perte de chaleur calculée de façon unidimensionnelle pour une différence de température de 1 K entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure (**).

(*) Programme de calcul par ordinateur de l'évolution de la température et des pertes de chaleur à travers des constructions ou des parties de construction bidimensionnelles pouvant s'inscrire dans un plan orthogonal dans des conditions limites stationnaires au moyen de la méthode des différences.

(**) Voir le projet de norme NBN B 62-002 (bibliographie n° 9).

6.21 Terrasse en béton en encorbellement

1^{er} cas Pont thermique au droit d'une fenêtre ou d'une porte (fig. 6 et tableau 6)

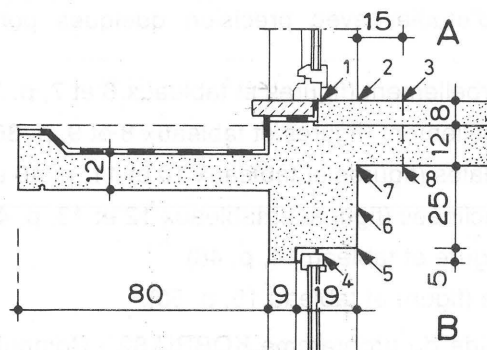


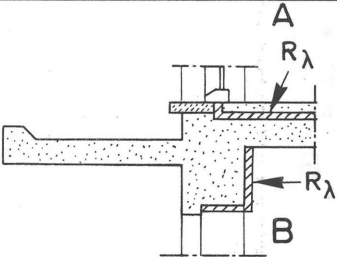
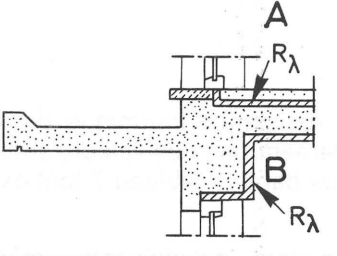
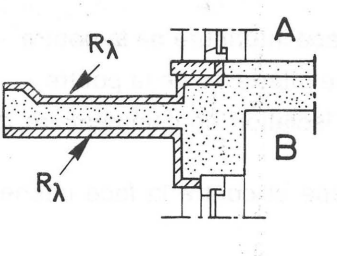
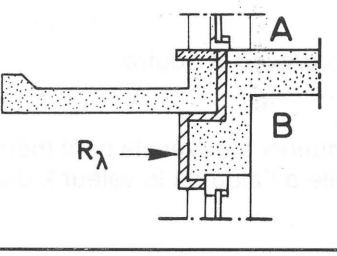
Fig. 6 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 points de calcul du facteur de température τ

Remarques préliminaires

1. Les corrections apportées au pont thermique pour lesquelles la résistance thermique de la couche isolante rapportée est inférieure à $0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ n'entraînent généralement pas des valeurs suffisamment élevées du facteur de température τ .
2. Les mesures d'isolation suivantes ne donnent pas de résultats satisfaisants, même avec $R_{\lambda} = 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$:
 - isolation sous la terrasse
 - isolation sous la chape
 - isolation sous la terrasse et sous la chape
 - isolation en dessous et au-dessus de la terrasse, avec isolation extérieure complète de la face avant de la poutre mais sans isolation sous le seuil.
3. Pour le calcul de k_i , on a considéré la poutre comme un élément de construction distinct. La valeur k de cet élément a été calculée pour la partie située sous la terrasse.
4. R_{λ} est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
5. Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 6

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} (m ² K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
1		0	0,725 en A = 0,149 en B = 0,576	$\tau_1 = 0,585$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,91$	$\tau_4 = 0,455$ $\tau_5 = 0,61$ $\tau_6 = 0,55$ $\tau_7 = 0,60$ $\tau_8 = 0,84$	une zone étroite contre la fenêtre en A et la surface intérieure entière de la poutre en B posent des problèmes
		1,0	1,382 en A = 0,374 en B = 1,009	$\tau_1 = 0,705$ $\tau_2 = 0,905$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,785$ $\tau_5 = 0,98$ $\tau_6 = 0,885$ $\tau_7 = 0,545$ $\tau_8 = 0,77$	une zone étroite contre le plafond en B pose encore des problèmes
2		0,5	0,991 en A = 0,480 en B = 0,511	$\tau_1 = 0,57$ $\tau_2 = 0,735$ $\tau_3 = 0,755$	$\tau_4 = 0,725$ $\tau_5 = 0,95$ $\tau_6 = 0,81$ $\tau_7 = 0,83$ $\tau_8 = 0,92$	une zone étroite contre la fenêtre en A pose des problèmes; ceux-ci sont accentués lorsqu'on augmente l'épaisseur de l'isolation
		1,0	1,084 en A = 0,658 en B = 0,426	$\tau_1 = 0,56$ $\tau_2 = 0,715$ $\tau_3 = 0,735$	$\tau_4 = 0,785$ $\tau_5 = 0,98$ $\tau_6 = 0,88$ $\tau_7 = 0,89$ $\tau_8 = 0,945$	
3		0,5	1,002 en A = 0,334 en B = 0,668	$\tau_1 = 0,70$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,945$	$\tau_4 = 0,655$ $\tau_5 = 0,755$ $\tau_6 = 0,72$ $\tau_7 = 0,75$ $\tau_8 = 0,90$	avec $R_{\lambda} = 0,5$ m ² K/W, une zone étroite contre la fenêtre en B pose encore des problèmes; une couche d'isolation complémentaire sous la chape entraîne une légère hausse de τ_A et une légère baisse de τ_B ; une zone étroite contre la fenêtre en B pose encore des problèmes
		1,0	0,986 en A = 0,343 en B = 0,643	$\tau_1 = 0,73$ $\tau_2 = 0,895$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,715$ $\tau_5 = 0,795$ $\tau_6 = 0,765$ $\tau_7 = 0,79$ $\tau_8 = 0,915$	
4		0,5	0,519 en A = 0,176 en B = 0,343	$\tau_1 = 0,73$ $\tau_2 = 0,90$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,685$ $\tau_5 = 0,78$ $\tau_6 = 0,765$ $\tau_7 = 0,805$ $\tau_8 = 0,925$	avec $R_{\lambda} = 0,5$ m ² K/W, une zone étroite contre la fenêtre en B pose encore des problèmes; une couche d'isolation supplémentaire sous la chape entraîne une légère baisse de τ_A et de τ_B
		1,0	0,503 en A = 0,172 en B = 0,331	$\tau_1 = 0,76$ $\tau_2 = 0,925$ $\tau_3 = 0,97$	$\tau_4 = 0,76$ $\tau_5 = 0,835$ $\tau_6 = 0,825$ $\tau_7 = 0,86$ $\tau_8 = 0,945$	

6.21 (suite) Terrasse en béton en encorbellement

2^e cas Pont thermique au droit d'une paroi pleine (fig. 7 et tableau 7)

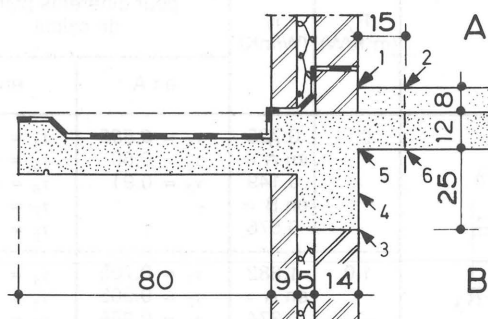


Fig. 7 — Cas type. Schéma de principe.

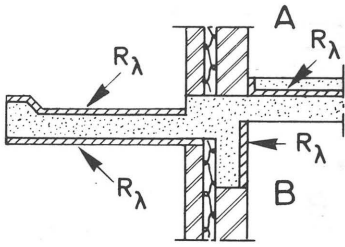
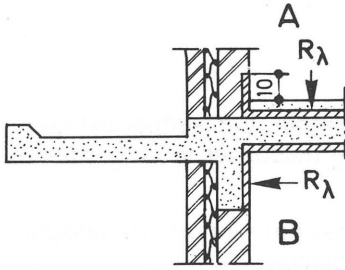
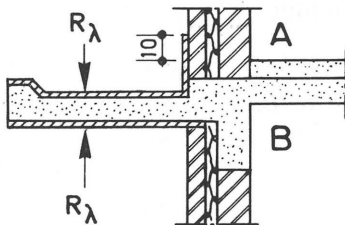
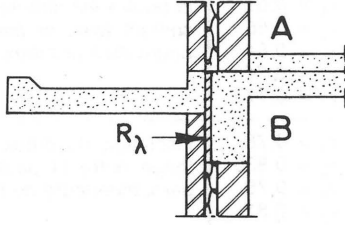
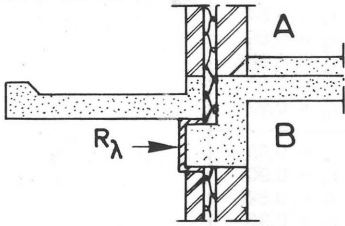
1, 2, 3, 4, 5, 6 points de calcul du facteur de température τ

Remarques préliminaires

- Les corrections apportées au pont thermique pour lesquelles la résistance thermique de la couche isolante rapportée est inférieure à $0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ n'entraînent généralement pas des valeurs suffisamment élevées du facteur de température τ . Les solutions 3 et 5 proposées dans le tableau 7 font exception à cette règle.
 - Les mesures d'isolation suivante ne donnent pas de résultats satisfaisants, même avec $R_{\lambda} = 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$:
 - isolation sous la terrasse, avec éventuellement isolation de la face intérieure de la poutre
 - isolation sous la chape, avec éventuellement isolation de la face intérieure de la poutre
 - isolation sous la terrasse et sous la chape, même avec une isolation complémentaire de la face intérieure de la poutre
 - isolation en dessous et au-dessus de la terrasse, sous la chape et contre la face intérieure de la poutre.
- Pour toutes les solutions précitées, des problèmes subsistent encore :
- soit au droit d'une partie de la surface intérieure de la poutre
 - soit au droit d'une partie du plafond située à proximité du raccord avec la poutre
 - soit au droit des deux zones précitées.
- Les valeurs de k_i du tableau 7 sont les pertes de chaleur supplémentaires à travers le pont thermique par rapport à la perte de chaleur déterminée de façon unidimensionnelle à l'aide de la valeur k du mur.
 - R_{λ} est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
 - Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 7

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
1		0	1,397 en A = 0,333 en B = 1,064	$\tau_1 = 0,785$ $\tau_2 = 0,91$	$\tau_3 = 0,61$ $\tau_4 = 0,55$ $\tau_5 = 0,60$ $\tau_6 = 0,83$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,947 en A = 0,258 en B = 0,689	$\tau_1 = 0,80$ $\tau_2 = 0,915$	$\tau_3 = 0,76$ $\tau_4 = 0,64$ $\tau_5 = 0,65$ $\tau_6 = 0,85$	l'isolation du creux se prolonge entre la poutre et la paroi extérieure du mur

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} (m²K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
2		0,5	0,672 en A = 0,195 en B = 0,477	$\tau_1 = 0,785$ $\tau_2 = 0,95$	$\tau_3 = 0,77$ $\tau_4 = 0,865$ $\tau_5 = 0,65$ $\tau_6 = 0,835$	l'angle plafond-poutre pose encore des problèmes
		1,0	0,622 en A = 0,188 en B = 0,434	$\tau_1 = 0,78$ $\tau_2 = 0,965$	$\tau_3 = 0,76$ $\tau_4 = 0,92$ $\tau_5 = 0,645$ $\tau_6 = 0,825$	
3		0,2	0,707 en A = 0,238 en B = 0,469	$\tau_1 = 0,82$ $\tau_2 = 0,92$	$\tau_3 = 0,74$ $\tau_4 = 0,755$ $\tau_5 = 0,725$ $\tau_6 = 0,895$	l'isolation de la plinthe est encastrée dans la paroi intérieure du mur creux et se prolonge 10 cm au-dessus de la chape
		0,5	0,572 en A = 0,202 en B = 0,370	$\tau_1 = 0,86$ $\tau_2 = 0,925$	$\tau_3 = 0,725$ $\tau_4 = 0,84$ $\tau_5 = 0,80$ $\tau_6 = 0,915$	
		1,0	0,457 en A = 0,167 en B = 0,290	$\tau_1 = 0,895$ $\tau_2 = 0,935$	$\tau_3 = 0,71$ $\tau_4 = 0,90$ $\tau_5 = 0,865$ $\tau_6 = 0,935$	
4		0,5	0,572 en A = 0,157 en B = 0,415	$\tau_1 = 0,84$ $\tau_2 = 0,945$	$\tau_3 = 0,78$ $\tau_4 = 0,72$ $\tau_5 = 0,73$ $\tau_6 = 0,90$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une légère hausse de τ_A et une légère baisse de τ_B
		1,0	0,472 en A = 0,141 en B = 0,331	$\tau_1 = 0,855$ $\tau_2 = 0,95$	$\tau_3 = 0,80$ $\tau_4 = 0,75$ $\tau_5 = 0,76$ $\tau_6 = 0,915$	
5		0,2	0,357 en A = 0,093 en B = 0,264	$\tau_1 = 0,865$ $\tau_2 = 0,96$	$\tau_3 = 0,82$ $\tau_4 = 0,785$ $\tau_5 = 0,795$ $\tau_6 = 0,925$	
		0,5	0,122 en A = 0,033 en B = 0,089	$\tau_1 = 0,895$ $\tau_2 = 0,97$	$\tau_3 = 0,86$ $\tau_4 = 0,845$ $\tau_5 = 0,86$ $\tau_6 = 0,95$	
		1,0	0,007 en A = 0,002 en B = 0,005	$\tau_1 = 0,91$ $\tau_2 = 0,975$	$\tau_3 = 0,88$ $\tau_4 = 0,875$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,96$	
		1,25	0	$\tau_1 = 0,915$ $\tau_2 = 0,94$	$\tau_3 = 0,885$ $\tau_4 = 0,88$ $\tau_5 = 0,895$ $\tau_6 = 0,955$	
6		0,5	0,472 en A = 0,110 en B = 0,362	$\tau_1 = 0,875$ $\tau_2 = 0,96$	$\tau_3 = 0,775$ $\tau_4 = 0,76$ $\tau_5 = 0,805$ $\tau_6 = 0,93$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une légère baisse de τ_A et de τ_B
		1,0	0,222 en A = 0,060 en B = 0,162	$\tau_1 = 0,90$ $\tau_2 = 0,97$	$\tau_3 = 0,83$ $\tau_4 = 0,82$ $\tau_5 = 0,855$ $\tau_6 = 0,95$	

6.22 Balcon en béton en encorbellement

1^{er} cas Pont thermique au droit d'une fenêtre ou d'une porte (fig. 8 et tableau 8)

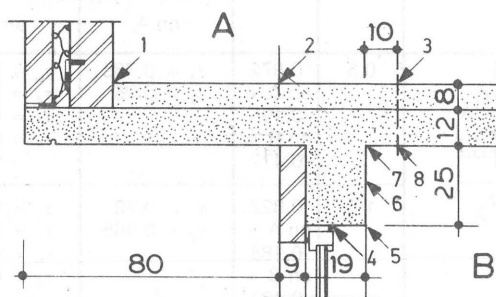


Fig. 8 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 points de calcul du facteur de température τ

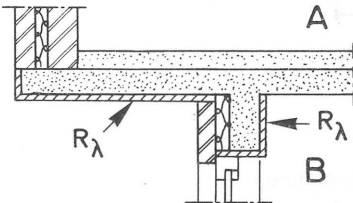
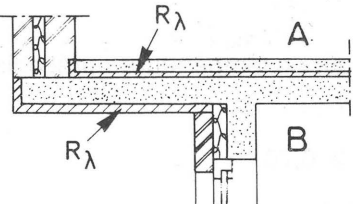
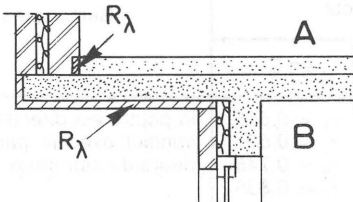
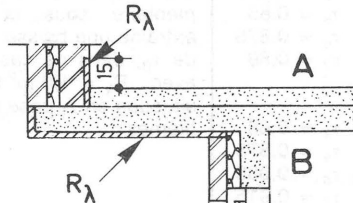
Remarques préliminaires

- On peut améliorer le pont thermique d'une manière relativement simple. L'essentiel est qu'il y ait une coupure thermique entre la paroi extérieure du mur creux sous le balcon et la face inférieure de ce dernier.
- Les valeurs k_i du tableau 8 sont les pertes de chaleur supplémentaires par rapport aux valeurs calculées de façon unidimensionnelle, dues à la présence de la poutre et du balcon.
Pour le calcul de k_i , on a considéré la dalle en encorbellement comme un élément de construction distinct avec sa valeur k propre.
On a estimé que la valeur k au droit de la poutre est égale à celle du mur.
- R_λ est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($m^2 K/W$).
- Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 8

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ ($m^2 K/W$)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
1		0	1,406 en A = 0,695 en B = 0,711	$\tau_1 = 0,585$ $\tau_2 = 0,67$ $\tau_3 = 0,89$	$\tau_4 = 0,52$ $\tau_5 = 0,66$ $\tau_6 = 0,64$ $\tau_7 = 0,74$ $\tau_8 = 0,775$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,756 en A = 0,437 en B = 0,319	$\tau_1 = 0,585$ $\tau_2 = 0,67$ $\tau_3 = 0,87$	$\tau_4 = 0,78$ $\tau_5 = 0,835$ $\tau_6 = 0,78$ $\tau_7 = 0,81$ $\tau_8 = 0,83$	l'isolation du creux se prolonge entre la poutre et la paroi extérieure du mur
2		0,2	0,181 en A = 0,090 en B = 0,090	$\tau_1 = 0,71$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,94$	$\tau_4 = 0,82$ $\tau_5 = 0,87$ $\tau_6 = 0,855$ $\tau_7 = 0,875$ $\tau_8 = 0,89$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une légère baisse de τ_A et de τ_B ; dans ce cas, avec $R_\lambda = 0,2 m^2 K/W$ la situation en τ_1 pose des problèmes
		0,5	0	$\tau_1 = 0,79$ $\tau_2 = 0,865$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,84$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,885$ $\tau_7 = 0,91$ $\tau_8 = 0,92$	
		1,0	0,004 en A = 0,001 en B = 0,003	$\tau_1 = 0,855$ $\tau_2 = 0,905$ $\tau_3 = 0,975$	$\tau_4 = 0,85$ $\tau_5 = 0,90$ $\tau_6 = 0,895$ $\tau_7 = 0,93$ $\tau_8 = 0,95$	

Tableau 8 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ (m ² K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
3		0,2	0,381 en A = 0,212 en B = 0,169	$\tau_1 = 0,66$ $\tau_2 = 0,79$ $\tau_3 = 0,935$	$\tau_4 = 0,83$ $\tau_5 = 0,955$ $\tau_6 = 0,905$ $\tau_7 = 0,865$ $\tau_8 = 0,88$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une légère baisse de τ_A et de τ_B ; dans ce cas, même avec $R_\lambda = 1,0$ m ² K/W la situation en τ_1 pose des problèmes
		0,5	0,333 en A = 0,181 en B = 0,152	$\tau_1 = 0,72$ $\tau_2 = 0,85$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,845$ $\tau_5 = 0,985$ $\tau_6 = 0,945$ $\tau_7 = 0,89$ $\tau_8 = 0,905$	
		1,0	0,354 en A = 0,173 en B = 0,181	$\tau_1 = 0,74$ $\tau_2 = 0,885$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,85$ $\tau_5 = 0,995$ $\tau_6 = 0,97$ $\tau_7 = 0,905$ $\tau_8 = 0,92$	
4		0,2	0,292 en A = 0,130 en B = 0,162	$\tau_1 = 0,755$ $\tau_2 = 0,835$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,815$ $\tau_5 = 0,865$ $\tau_6 = 0,84$ $\tau_7 = 0,86$ $\tau_8 = 0,88$	l'isolation de la plinthe est encastree dans la paroi intérieure du mur creux; une isolation intérieure complémentaire de la poutre n'apporte pas de changement pour τ_A et entraîne une légère hausse de τ_B
		0,5	0,154 en A = 0,053 en B = 0,101	$\tau_1 = 0,845$ $\tau_2 = 0,915$ $\tau_3 = 0,97$	$\tau_4 = 0,825$ $\tau_5 = 0,875$ $\tau_6 = 0,865$ $\tau_7 = 0,88$ $\tau_8 = 0,90$	
		1,0	0,120 en A = 0,029 en B = 0,091	$\tau_1 = 0,90$ $\tau_2 = 0,955$ $\tau_3 = 0,98$	$\tau_4 = 0,835$ $\tau_5 = 0,885$ $\tau_6 = 0,88$ $\tau_7 = 0,895$ $\tau_8 = 0,91$	
5		0,2	0,181 en A = 0,090 en B = 0,090	$\tau_1 = 0,72$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,945$	$\tau_4 = 0,82$ $\tau_5 = 0,87$ $\tau_6 = 0,855$ $\tau_7 = 0,875$ $\tau_8 = 0,945$	une isolation intérieure complémentaire de la poutre n'apporte pas de changement pour τ_A et entraîne une légère hausse de τ_B
		0,5	0,033 en A = 0,014 en B = 0,019	$\tau_1 = 0,80$ $\tau_2 = 0,865$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,835$ $\tau_5 = 0,895$ $\tau_6 = 0,885$ $\tau_7 = 0,91$ $\tau_8 = 0,96$	
		1,0	0	$\tau_1 = 0,86$ $\tau_2 = 0,905$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,85$ $\tau_5 = 0,90$ $\tau_6 = 0,895$ $\tau_7 = 0,93$ $\tau_8 = 0,94$	
6		0,2	0,156 en A = 0,076 en B = 0,080	$\tau_1 = 0,73$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,94$	$\tau_4 = 0,82$ $\tau_5 = 0,87$ $\tau_6 = 0,855$ $\tau_7 = 0,875$ $\tau_8 = 0,89$	l'isolation de la plinthe est encastree dans la paroi intérieure du mur creux; une isolation complémentaire sous la chape entraîne une légère hausse de τ_A et une légère baisse de τ_B
		0,5	0,033 en A = 0,014 en B = 0,019	$\tau_1 = 0,81$ $\tau_2 = 0,865$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,84$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,885$ $\tau_7 = 0,91$ $\tau_8 = 0,92$	
		1,0	0	$\tau_1 = 0,87$ $\tau_2 = 0,905$ $\tau_3 = 0,98$	$\tau_4 = 0,85$ $\tau_5 = 0,90$ $\tau_6 = 0,895$ $\tau_7 = 0,93$ $\tau_8 = 0,94$	

6.22 (suite) Balcon en béton en encorbellement

2^e cas Pont thermique au droit d'une paroi pleine (fig. 9 et tableau 9)

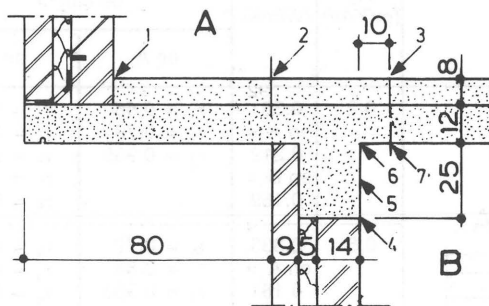


Fig. 9 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 points de calcul du facteur de température τ

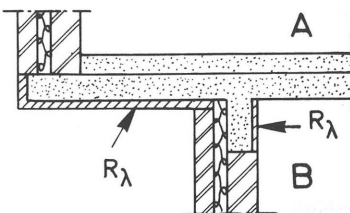
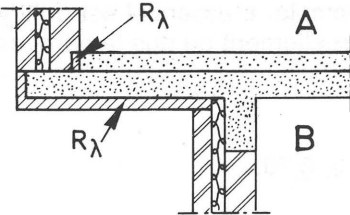
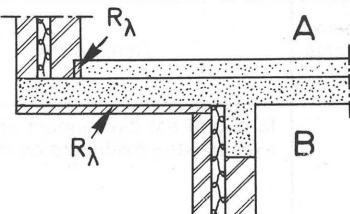
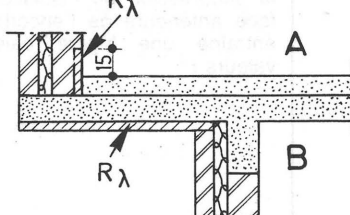
Remarques préliminaires

1. On peut améliorer le pont thermique d'une manière relativement simple. L'essentiel est qu'il y ait une coupure thermique entre la paroi extérieure du mur creux sous le balcon et la face inférieure de ce dernier.
2. En général, avec $R_\lambda = 0,2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, on ne peut pas atteindre le facteur de température τ préconisé.
3. R_λ est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
4. Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 9

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)	k_l (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
1		0	1,082 en A = 0,662 en B = 0,420	$\tau_1 = 0,59$ $\tau_2 = 0,67$ $\tau_3 = 0,89$	$\tau_4 = 0,655$ $\tau_5 = 0,62$ $\tau_6 = 0,745$ $\tau_7 = 0,835$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,506 en A = 0,353 en B = 0,153	$\tau_1 = 0,68$ $\tau_2 = 0,765$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,885$ $\tau_5 = 0,845$ $\tau_6 = 0,87$ $\tau_7 = 0,885$	l'isolation du creux se prolonge entre la poutre et la paroi extérieure du mur creux
2		0,2	0,207 en A = 0,144 en B = 0,063	$\tau_1 = 0,665$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,94$	$\tau_4 = 0,865$ $\tau_5 = 0,85$ $\tau_6 = 0,875$ $\tau_7 = 0,89$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une baisse de τ_A et de τ_B ; dans ce cas, même avec $R_\lambda = 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ la situation en τ_1 pose des problèmes
		0,5	0,184 en A = 0,124 en B = 0,060	$\tau_1 = 0,71$ $\tau_2 = 0,855$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,88$ $\tau_5 = 0,875$ $\tau_6 = 0,905$ $\tau_7 = 0,915$	
		1,0	0,205 en A = 0,140 en B = 0,065	$\tau_1 = 0,745$ $\tau_2 = 0,89$ $\tau_3 = 0,965$	$\tau_4 = 0,89$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,925$ $\tau_7 = 0,935$	

Tableau 9 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} (m ² K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul		Remarques
				en A	en B	
3		0,2	0,192 en A = 0,139 en B = 0,053	$\tau_1 = 0,665$ $\tau_2 = 0,79$ $\tau_3 = 0,935$	$\tau_4 = 0,87$ $\tau_5 = 0,90$ $\tau_6 = 0,87$ $\tau_7 = 0,885$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une baisse de τ_A et de τ_B ; dans ce cas, la situation en τ_1 pose des problèmes, même avec $R_{\lambda} = 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
		0,5	0,159 en A = 0,108 en B = 0,051	$\tau_1 = 0,71$ $\tau_2 = 0,85$ $\tau_3 = 0,955$	$\tau_4 = 0,885$ $\tau_5 = 0,95$ $\tau_6 = 0,895$ $\tau_7 = 0,91$	
		1,0	0,130 en A = 0,089 en B = 0,041	$\tau_1 = 0,745$ $\tau_2 = 0,885$ $\tau_3 = 0,965$	$\tau_4 = 0,89$ $\tau_5 = 0,97$ $\tau_6 = 0,915$ $\tau_7 = 0,92$	
4		0,2	0,207 en A = 0,144 en B = 0,063	$\tau_1 = 0,69$ $\tau_2 = 0,79$ $\tau_3 = 0,94$	$\tau_4 = 0,865$ $\tau_5 = 0,85$ $\tau_6 = 0,875$ $\tau_7 = 0,89$	l'isolation de la plinthe est encastrée dans la paroi intérieure du mur creux; une isolation complémentaire sous la chape entraîne une hausse de τ_A et une légère baisse de τ_B ; dans ce cas, l'exigence $\tau \geq 0,70$ est satisfaite, même avec $R_{\lambda} = 0,2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
		0,5	0,159 en A = 0,108 en B = 0,051	$\tau_1 = 0,74$ $\tau_2 = 0,85$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,88$ $\tau_5 = 0,875$ $\tau_6 = 0,905$ $\tau_7 = 0,915$	
		1,0	0,205 en A = 0,072 en B = 0,133	$\tau_1 = 0,775$ $\tau_2 = 0,89$ $\tau_3 = 0,97$	$\tau_4 = 0,89$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,925$ $\tau_7 = 0,97$	
5		0,2	0,207 en A = 0,139 en B = 0,068	$\tau_1 = 0,685$ $\tau_2 = 0,79$ $\tau_3 = 0,94$	$\tau_4 = 0,865$ $\tau_5 = 0,85$ $\tau_6 = 0,875$ $\tau_7 = 0,89$	une isolation complémentaire sous la chape entraîne une hausse de τ_A et de τ_B ; dans ce cas, l'exigence $\tau \geq 0,70$ est satisfaite, même avec $R_{\lambda} = 0,2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
		0,5	0,209 en A = 0,144 en B = 0,065	$\tau_1 = 0,725$ $\tau_2 = 0,85$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,88$ $\tau_5 = 0,875$ $\tau_6 = 0,905$ $\tau_7 = 0,92$	
		1,0	0,255 en A = 0,177 en B = 0,078	$\tau_1 = 0,755$ $\tau_2 = 0,885$ $\tau_3 = 0,97$	$\tau_4 = 0,89$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,92$ $\tau_7 = 0,93$	
6		0,2	0,192 en A = 0,134 en B = 0,058	$\tau_1 = 0,695$ $\tau_2 = 0,79$ $\tau_3 = 0,94$	$\tau_4 = 0,865$ $\tau_5 = 0,85$ $\tau_6 = 0,875$ $\tau_7 = 0,89$	
		0,5	0,159 en A = 0,108 en B = 0,051	$\tau_1 = 0,75$ $\tau_2 = 0,85$ $\tau_3 = 0,96$	$\tau_4 = 0,88$ $\tau_5 = 0,875$ $\tau_6 = 0,905$ $\tau_7 = 0,915$	
		1,0	0,170 en A = 0,113 en B = 0,057	$\tau_1 = 0,78$ $\tau_2 = 0,885$ $\tau_3 = 0,965$	$\tau_4 = 0,89$ $\tau_5 = 0,89$ $\tau_6 = 0,92$ $\tau_7 = 0,925$	

6.23 Rive en béton de toiture plate

1^{er} cas Pont thermique au droit d'une fenêtre ou d'une porte (fig. 10 et tableau 10)

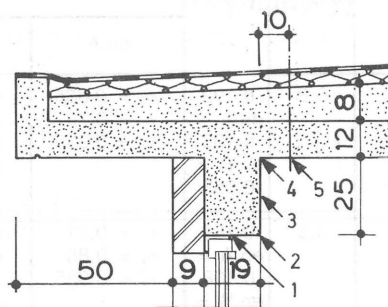


Fig. 10 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3, 4, 5 points de calcul du facteur de température τ

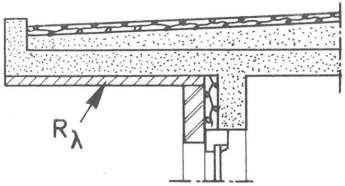
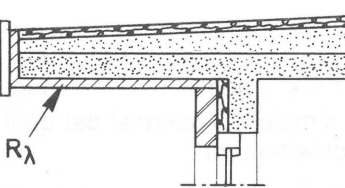
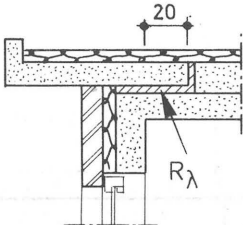
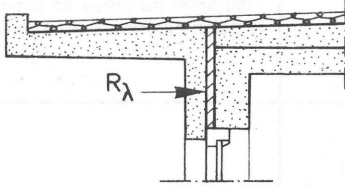
Remarques préliminaires

1. On peut améliorer le pont thermique d'une manière relativement simple. L'essentiel est qu'il y ait une coupure thermique entre la paroi extérieure du mur creux et l'encorbellement ou que la paroi extérieure du mur creux soit munie d'une isolation extérieure.
2. R_λ est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
3. Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 10

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
1		0	1,210	$\tau_1 = 0,49$ $\tau_2 = 0,655$ $\tau_3 = 0,59$ $\tau_4 = 0,615$ $\tau_5 = 0,65$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,660	$\tau_1 = 0,72$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,675$ $\tau_4 = 0,68$ $\tau_5 = 0,705$	l'isolation du creux se prolonge entre la poutre et la paroi extérieure du mur
2		0,2	0,810	$\tau_1 = 0,605$ $\tau_2 = 0,73$ $\tau_3 = 0,665$ $\tau_4 = 0,68$ $\tau_5 = 0,71$	la suppression de l'isolation sur la face antérieure de l'encorbellement entraîne une légère baisse des valeurs τ
		0,5	0,610	$\tau_1 = 0,665$ $\tau_2 = 0,77$ $\tau_3 = 0,71$ $\tau_4 = 0,72$ $\tau_5 = 0,74$	
		1,0	0,460	$\tau_1 = 0,71$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,74$ $\tau_4 = 0,745$ $\tau_5 = 0,765$	

Tableau 10 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ (m²K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
3		0,2	0,510	$\tau_1 = 0,745$ $\tau_2 = 0,815$ $\tau_3 = 0,715$ $\tau_4 = 0,715$ $\tau_5 = 0,735$	une isolation complémentaire de la face antérieure de l'encorbellement n'a pas d'influence sur τ
		0,5	0,460	$\tau_1 = 0,755$ $\tau_2 = 0,825$ $\tau_3 = 0,735$ $\tau_4 = 0,735$ $\tau_5 = 0,75$	
		1,0	0,410	$\tau_1 = 0,76$ $\tau_2 = 0,83$ $\tau_3 = 0,745$ $\tau_4 = 0,745$ $\tau_5 = 0,76$	
4		0,2	0,510	$\tau_1 = 0,745$ $\tau_2 = 0,815$ $\tau_3 = 0,715$ $\tau_4 = 0,72$ $\tau_5 = 0,735$	une isolation intérieure complémentaire de la poutre a un effet négatif sur τ_4 , même si $R_\lambda = 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
		0,5	0,435	$\tau_1 = 0,76$ $\tau_2 = 0,825$ $\tau_3 = 0,74$ $\tau_4 = 0,74$ $\tau_5 = 0,755$	
		1,0	0,410	$\tau_1 = 0,76$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,755$ $\tau_4 = 0,76$ $\tau_5 = 0,77$	
5		0,2	0,345	$\tau_1 = 0,745$ $\tau_2 = 0,805$ $\tau_3 = 0,775$ $\tau_4 = 0,75$ $\tau_5 = 0,78$	
		0,5	0,235	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,825$ $\tau_3 = 0,80$ $\tau_4 = 0,785$ $\tau_5 = 0,81$	
		1,0	0,110	$\tau_1 = 0,79$ $\tau_2 = 0,845$ $\tau_3 = 0,83$ $\tau_4 = 0,815$ $\tau_5 = 0,84$	
6		0,2	0,586	$\tau_1 = 0,63$ $\tau_2 = 0,73$ $\tau_3 = 0,695$ $\tau_4 = 0,675$ $\tau_5 = 0,745$	
		0,5	0,336	$\tau_1 = 0,72$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,77$ $\tau_4 = 0,75$ $\tau_5 = 0,795$	
		1,0	0,211	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,83$ $\tau_3 = 0,81$ $\tau_4 = 0,79$ $\tau_5 = 0,81$	

6.23 (suite) Rive en béton de toiture plate

2^e cas Pont thermique au droit d'une paroi pleine (fig. 11 et tableau 11)

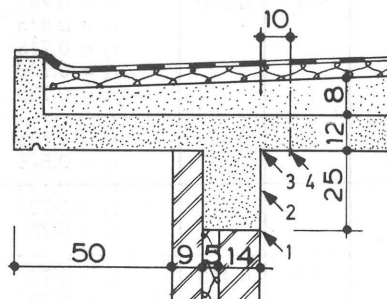


Fig. 11 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3, 4 points de calcul du facteur de température τ

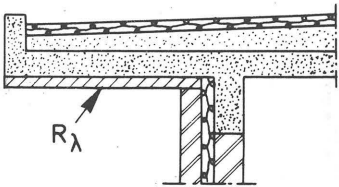
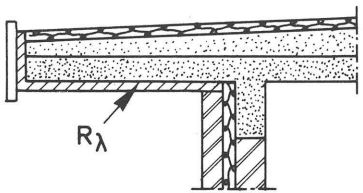
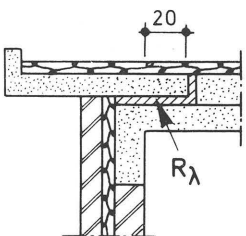
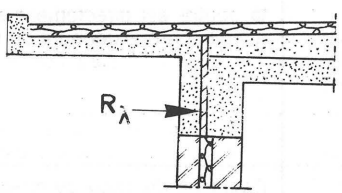
Remarques préliminaires

1. On peut améliorer le pont thermique d'une manière relativement simple. L'essentiel est qu'il y ait une coupure thermique entre la paroi extérieure du mur creux et l'encorbellement.
2. En général, la résistance thermique de l'isolation rapportée doit être supérieure à $0,2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ pour atteindre des valeurs τ suffisamment élevées.
3. R_λ est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
3. Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 11

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
1		0	0,895	$\tau_1 = 0,605$ $\tau_2 = 0,54$ $\tau_3 = 0,555$ $\tau_4 = 0,665$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,370	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,64$ $\tau_3 = 0,635$ $\tau_4 = 0,72$	l'isolation du creux se prolonge entre la paroi extérieure du mur et la poutre
2		0,2	0,58	$\tau_1 = 0,65$ $\tau_2 = 0,62$ $\tau_3 = 0,625$ $\tau_4 = 0,70$	
		0,5	0,47	$\tau_1 = 0,68$ $\tau_2 = 0,65$ $\tau_3 = 0,655$ $\tau_4 = 0,73$	
		1,0	0,38	$\tau_1 = 0,70$ $\tau_2 = 0,675$ $\tau_3 = 0,68$ $\tau_4 = 0,75$	

Tableau 11 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ (m²K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
3		0,2	0,27	$\tau_1 = 0,795$ $\tau_2 = 0,685$ $\tau_3 = 0,68$ $\tau_4 = 0,745$	une isolation complémentaire de la face antérieure de l'encorbellement n'a pas d'influence sur τ
		0,5	0,205	$\tau_1 = 0,80$ $\tau_2 = 0,705$ $\tau_3 = 0,70$ $\tau_4 = 0,755$	
		1,0	0,175	$\tau_1 = 0,805$ $\tau_2 = 0,715$ $\tau_3 = 0,71$ $\tau_4 = 0,76$	
4		0,2	0,255	$\tau_1 = 0,795$ $\tau_2 = 0,69$ $\tau_3 = 0,685$ $\tau_4 = 0,745$	
		0,5	0,180	$\tau_1 = 0,805$ $\tau_2 = 0,715$ $\tau_3 = 0,71$ $\tau_4 = 0,76$	
		1,0	0,130	$\tau_1 = 0,815$ $\tau_2 = 0,73$ $\tau_3 = 0,725$ $\tau_4 = 0,775$	
5		0,2	0,075	$\tau_1 = 0,795$ $\tau_2 = 0,75$ $\tau_3 = 0,735$ $\tau_4 = 0,775$	
		0,5	0	$\tau_1 = 0,82$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,775$ $\tau_4 = 0,805$	
		1,0	0	$\tau_1 = 0,835$ $\tau_2 = 0,82$ $\tau_3 = 0,80$ $\tau_4 = 0,83$	
6		0,2	0,276	$\tau_1 = 0,715$ $\tau_2 = 0,67$ $\tau_3 = 0,665$ $\tau_4 = 0,74$	
		0,5	0,061	$\tau_1 = 0,785$ $\tau_2 = 0,75$ $\tau_3 = 0,74$ $\tau_4 = 0,79$	
		1,0	0	$\tau_1 = 0,825$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,785$ $\tau_4 = 0,815$	

6.24 Rive en béton de toiture inclinée

1^{er} cas Pont thermique au droit d'une fenêtre ou d'une porte (fig. 12 et tableau 12)

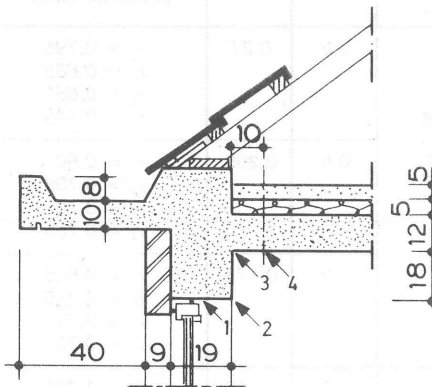


Fig. 12 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3, 4 points de calcul du facteur de température τ

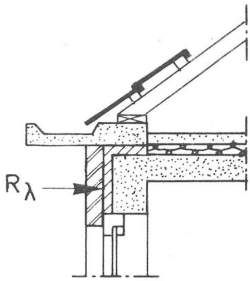
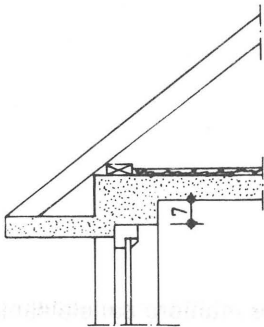
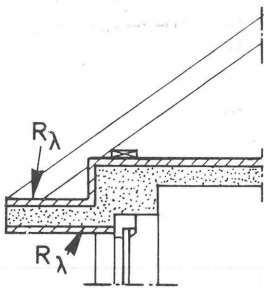
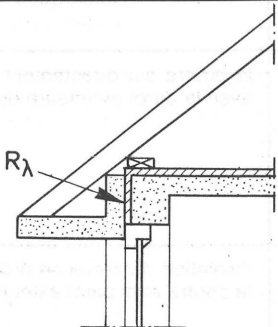
Remarques préliminaires

1. Seule une coupure thermique permet de limiter le pont thermique d'une manière satisfaisante.
2. En isolant complètement le pont thermique par l'extérieur au moyen d'une couche isolante dont $R_{\lambda} \geq 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, des problèmes subsistent dans une zone étroite située contre le châssis.
3. R_{λ} est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
4. Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 12

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
1		0	1,42	$\tau_1 = 0,44$ $\tau_2 = 0,585$ $\tau_3 = 0,485$ $\tau_4 = 0,615$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,97	$\tau_1 = 0,66$ $\tau_2 = 0,725$ $\tau_3 = 0,58$ $\tau_4 = 0,67$	l'isolation du creux se prolonge entre la poutre et la paroi extérieure du mur
2		0,5	0,51	$\tau_1 = 0,675$ $\tau_2 = 0,75$ $\tau_3 = 0,62$ $\tau_4 = 0,735$	une isolation complémentaire de la poutre par l'intérieur entraîne une hausse sensible de τ_1 mais une baisse de τ_3
		1,0	0,435	$\tau_1 = 0,70$ $\tau_2 = 0,775$ $\tau_3 = 0,69$ $\tau_4 = 0,75$	

Tableau 12 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} (m ² K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
3		0,2	0,417	$\tau_1 = 0,725$ $\tau_2 = 0,795$ $\tau_3 = 0,73$ $\tau_4 = 0,78$	
		0,5	0,292	$\tau_1 = 0,755$ $\tau_2 = 0,825$ $\tau_3 = 0,775$ $\tau_4 = 0,81$	
		1,0	0,242	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,835$ $\tau_3 = 0,795$ $\tau_4 = 0,82$	
4		0	1,12	$\tau_1 = 0,44$ $\tau_2 = 0,60$ $\tau_3 = 0,55$ $\tau_4 = 0,665$	
5		0,5	0,72	$\tau_1 = 0,58$ $\tau_2 = 0,70$ $\tau_3 = 0,665$ $\tau_4 = 0,74$	
		1,0	0,62	$\tau_1 = 0,63$ $\tau_2 = 0,735$ $\tau_3 = 0,705$ $\tau_4 = 0,77$	
6		0,2	0,545	$\tau_1 = 0,645$ $\tau_2 = 0,745$ $\tau_3 = 0,71$ $\tau_4 = 0,765$	
		0,5	0,395	$\tau_1 = 0,725$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,77$ $\tau_4 = 0,805$	
		1,0	0,32	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,83$ $\tau_3 = 0,80$ $\tau_4 = 0,815$	

6.24 (suite) Rive en béton de toiture inclinée

2^e cas Pont thermique au droit d'une paroi pleine (fig. 13 et tableau 13)

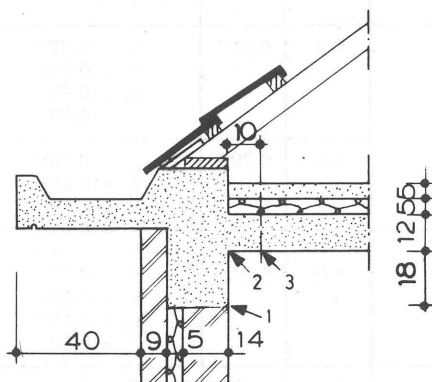


Fig. 13 — Cas type. Schéma de principe.

1, 2, 3 points de calcul du facteur de température τ

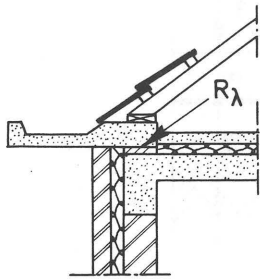
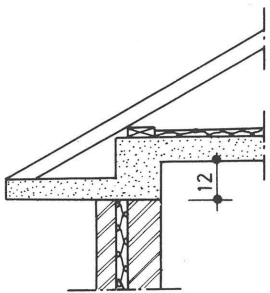
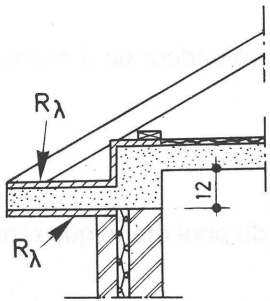
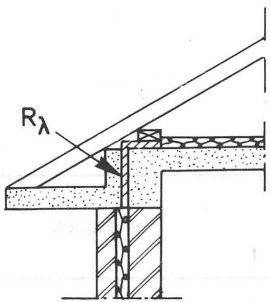
Remarques préliminaires

1. Seule une coupure thermique permet de limiter le pont thermique d'une manière satisfaisante.
2. R_{λ} est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2 \text{ K/W}$).
3. Les valeurs τ en italiques ne satisfont pas à l'exigence minimale $\tau \geq 0,70$.

Tableau 13

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} ($\text{m}^2 \text{ K/W}$)	k_l (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
1		0	0,931	$\tau_1 = 0,58$ $\tau_2 = 0,475$ $\tau_3 = 0,60$	la poutre est directement en contact avec la paroi extérieure du mur creux
		0	0,529	$\tau_1 = 0,72$ $\tau_2 = 0,57$ $\tau_3 = 0,665$	l'isolation du creux se prolonge entre la poutre et la paroi extérieure du mur
2		0,5	0,366	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,66$ $\tau_3 = 0,73$	une isolation complémentaire de la poutre par l'intérieur entraîne une légère hausse de τ_1 et une baisse notable de τ_2 et de τ_3
		1,0	0,191	$\tau_1 = 0,785$ $\tau_2 = 0,69$ $\tau_3 = 0,75$	

Tableau 13 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} (m ² K/W)	k_i (W/mK)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
3		0,2	0,105	$\tau_1 = 0,79$ $\tau_2 = 0,72$ $\tau_3 = 0,775$	
		0,5	0	$\tau_1 = 0,815$ $\tau_2 = 0,765$ $\tau_3 = 0,805$	
		1,0	0	$\tau_1 = 0,83$ $\tau_2 = 0,785$ $\tau_3 = 0,81$	
4		0	0	$\tau_1 = 0,58$ $\tau_2 = 0,525$ $\tau_3 = 0,65$	
5		0,5	0	$\tau_1 = 0,69$ $\tau_2 = 0,655$ $\tau_3 = 0,735$	une isolation complémentaire de la face antérieure de l'encorbellement entraîne une légère hausse des valeurs τ ; dans ce cas, avec $R_{\lambda} = 1,0$ m ² K/W toutes les valeurs τ dépassent 0,70
		1,0	0	$\tau_1 = 0,73$ $\tau_2 = 0,695$ $\tau_3 = 0,765$	
6		0,2	0	$\tau_1 = 0,725$ $\tau_2 = 0,695$ $\tau_3 = 0,71$	
		0,5	0	$\tau_1 = 0,79$ $\tau_2 = 0,76$ $\tau_3 = 0,805$	
		1,0	0	$\tau_1 = 0,825$ $\tau_2 = 0,80$ $\tau_3 = 0,82$	
		1,25	0	$\tau_1 = 0,835$ $\tau_2 = 0,81$ $\tau_3 = 0,835$	

6.25 Fondation sur terre plein. Pont thermique au droit d'une dalle de fondation (fig. 14 et tableau 14)

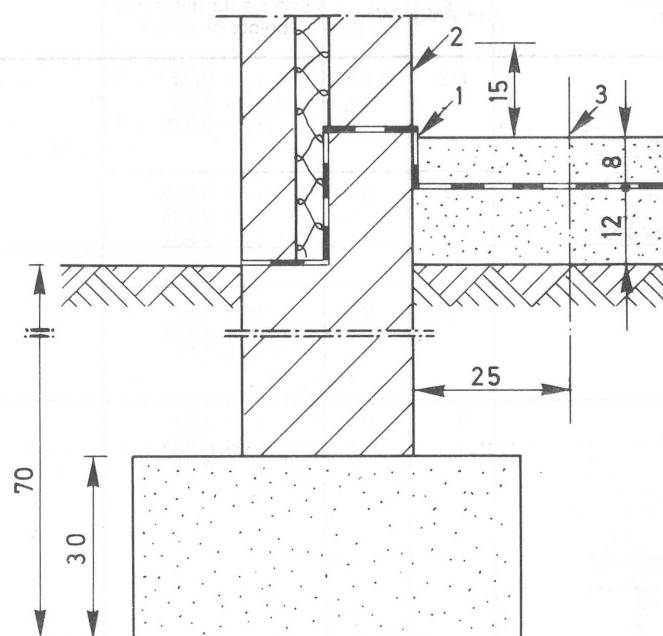


Fig. 14 — Cas type. Schéma de principe.
1, 2, 3 points de calcul du facteur de température τ

Hypothèses secondaires

1. On suppose que pour $\theta_e = 0^\circ\text{C}$ et $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, la température à une profondeur de 3 m sous le niveau du sol est constante et égale à 10°C .
2. La valeur λ du sol humide est égale à $1,1\text{ W/mK}$.

Remarques préliminaires

1. Sans aucune mesure particulière d'isolation le facteur de température τ du pont thermique représenté est supérieur à 0,70.
2. Le programme de calcul ne permet pas de déterminer la valeur k linéaire des ponts thermiques de fondations.
3. R_λ est la résistance thermique de l'isolation rapportée ($\text{m}^2\text{ K/W}$).

Tableau 14

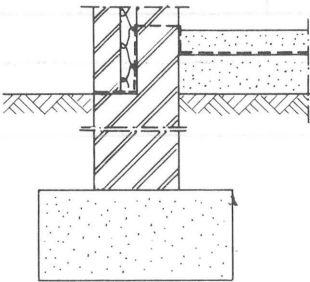
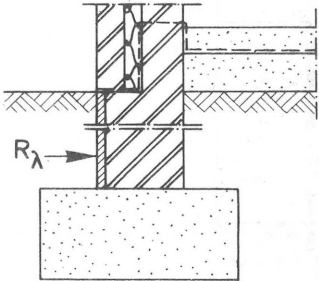
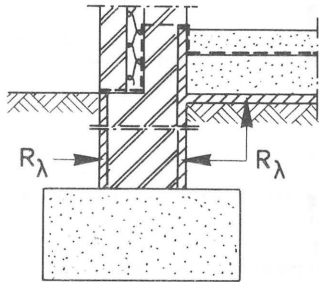
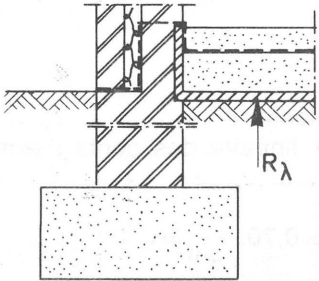
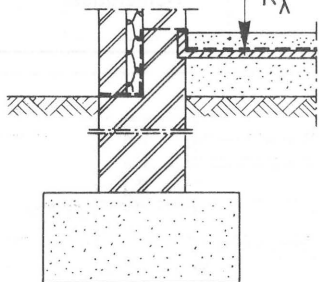
N°	Correction apportée à l'isolation	R_λ ($\text{m}^2\text{K/W}$)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
1		0	$\tau_1 = 0,765$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,805$	

Tableau 14 (suite)

N°	Correction apportée à l'isolation	R_{λ} (m ² K/W)	Facteur de température τ pour différents points de calcul	Remarques
2		0,2	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,81$	l'isolation du mur de fondation par l'extérieur n'entraîne pas de hausse sensible du facteur de température; une augmentation de R_{λ} reste également sans effet
		0,5	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,81$	
		1,0	$\tau_1 = 0,77$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,81$	
3		0,2	$\tau_1 = 0,795$ $\tau_2 = 0,875$ $\tau_3 = 0,84$	l'isolation de la plinthe est encastrée dans la paroi intérieure du mur creux
		0,5	$\tau_1 = 0,82$ $\tau_2 = 0,875$ $\tau_3 = 0,87$	
		1,0	$\tau_1 = 0,835$ $\tau_2 = 0,875$ $\tau_3 = 0,90$	
4		0,2	$\tau_1 = 0,79$ $\tau_2 = 0,875$ $\tau_3 = 0,83$	l'isolation verticale est encastrée dans la paroi intérieure du mur creux
		0,5	$\tau_1 = 0,815$ $\tau_2 = 0,875$ $\tau_3 = 0,865$	
		1,0	$\tau_1 = 0,83$ $\tau_2 = 0,875$ $\tau_3 = 0,895$	
5		0,2	$\tau_1 = 0,785$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,83$	l'isolation de la plinthe est encastrée dans la paroi intérieure du mur creux
		0,5	$\tau_1 = 0,805$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,87$	
		1,0	$\tau_1 = 0,815$ $\tau_2 = 0,87$ $\tau_3 = 0,905$	

7. VENTILATION NATURELLE DES BATIMENTS

7.1 CONSIDERATIONS GENERALES

La ventilation a pour but d'évacuer l'air intérieur vicié et de le remplacer par de l'air extérieur frais.

Par air vicié, on entend de l'air contenant une trop forte concentration en substances nuisibles à la santé des occupants (par exemple de la fumée de tabac, du CO_2 , etc.) ou en substances pouvant nuire au confort de l'habitat (par exemple de la vapeur d'eau, des odeurs, etc.).

On distingue essentiellement deux types de ventilation :

- la ventilation naturelle
- la ventilation mécanique.

Remarque : lorsque certains locaux d'un bâtiment sont équipés d'un ventilateur extracteur, comme une hotte d'aspiration dans une cuisine, on considère que le bâtiment est ventilé de façon naturelle. La fonction principale du ventilateur consiste alors à évacuer localement et pour une courte durée de la vapeur ou des odeurs, alors que dans le cas d'une ventilation mécanique, les ventilateurs assurent en permanence un apport suffisant d'air frais dans l'ensemble du bâtiment.

La plupart des bâtiments, surtout s'il s'agit d'habitations, sont ventilés de façon naturelle.

Dans ce qui suit, nous nous limitons à commenter brièvement les méthodes de ventilation naturelle. Pour les systèmes de ventilation mécanique, on se rapportera aux Notes d'Information technique 106 et 119 (*).

La ventilation naturelle des bâtiments est due à l'influence des différences de pression d'air entre l'ambiance extérieure et l'ambiance intérieure, ainsi qu'aux ouvertures de ventilation et aux fentes existant dans l'enveloppe du bâtiment.

Les différences de pression d'air sont provoquées par l'action du vent autour du bâtiment et par des différences de température entre l'ambiance extérieure et l'ambiance intérieure.

Le débit de ventilation est :

- proportionnel à la différence de pression d'air entre l'ambiance extérieure et l'ambiance intérieure en ce sens qu'il croît à mesure que la différence de pression d'air augmente
- est inversement proportionnel à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment.

(*) Voir Bibliographie n°s 17 et 18.

7.2 DIFFERENCES DE PRESSION D'AIR SUR LES BATIMENTS

7.21 Différences de pression d'air dues à l'action du vent

7.21.1 Formule générale

Les façades et les versants de toitures exposés au vent subissent une surpression tandis que les façades et les versants opposés à la direction du vent ainsi que les toitures plates subissent une dépression.

Par surpression et dépression, on entend la différence de pression d'air par rapport à la pression barométrique.

La différence de pression d'air entre deux façades est exprimée par la relation suivante :

$$\Delta_p = \frac{1}{2} K \rho v^2 \quad (\text{Pa}) \quad (16)$$

avec Δ_p différence de pression d'air (Pa)

K coefficient de pression d'air sans dimension

ρ masse volumique de l'air (kg/m^3) (pour les valeurs de ρ , voir tableau 23, p. 64)

v vitesse du vent (m/s)

Il résulte d'essais en soufflerie sur des modèles réduits de maisons réalisés au TNO (*), que le coefficient de pression d'air K maximal est de l'ordre de 0,61 (pour deux façades opposées).

Il est bien connu que le vent peut atteindre des vitesses de pointe très élevées. Comme ces vitesses sont en général de courte durée, elles ont moins d'importance pour l'étude de la ventilation. Pour le problème étudié ici, il est donc logique de ne tenir compte que des vitesses moyennes du vent.

7.21.2 Vitesse du vent

7.21.21 Variation de la vitesse du vent

Le vent est essentiellement un phénomène très variable, tant en ce qui concerne sa direction que sa vitesse.

La vitesse moyenne du vent, considérée pour des périodes de 2 heures, ne diffère pratiquement pas de la vitesse moyenne du vent considérée pour des périodes de 10 minutes.

La plupart des publications, entre autres celles de l'I.R.M. (**), mentionnent des vitesses moyennes valables pour des périodes de 10 minutes.

Dans des conditions atmosphériques données, la vitesse du vent croît à mesure que la hauteur au sol augmente. Plus la rugosité de la surface du sol est grande (constructions, boisement, etc.), plus le mouvement de l'air est freiné. La vitesse du vent décroît donc à mesure que la rugosité du sol augmente.

Selon la situation du terrain, on distingue par ordre croissant, trois classes de rugosité :

— classe de rugosité I : région côtière sur une distance de 2 km à partir de la digue

— classe de rugosité II : zone rurale avec bâtiments ou arbres isolés

— classe de rugosité III : zone urbaine, suburbaine, industrielle ou forestière.

Si on connaît la vitesse du vent à une hauteur déterminée au-dessus d'un terrain d'une classe de rugosité donnée, on peut calculer la vitesse du vent à une hauteur quelconque.

En météorologie, la vitesse du vent est mesurée à 10 m au-dessus d'un terrain de la classe de rugosité II.

On calcule alors la vitesse du vent à une hauteur quelconque à l'aide de la formule suivante :

$$v = v_{\text{réf}} (0,2 p) \ln \frac{z}{z_0} \quad (\text{m/s}) \quad (17)$$

avec $v_{\text{réf}}$ vitesse du vent (m/s) mesurée à une hauteur de 10 m du sol libre

z hauteur au sol (m)

p et z_0 paramètres dépendant de la rugosité de la surface du sol; les valeurs de ces paramètres sont données dans le tableau 16 (p. 54)

(*) Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, Nederland.

(**) Institut Royal Météorologique.

Tableau 16 — Valeurs de p et de z₀

Classes de rugosité de la surface du sol	p	z ₀
I	0,83	0,005
II	1,00	0,070
III	1,15	0,30

Exemple

Pour déterminer la vitesse du vent à une hauteur de 25 m du terrain où l'on effectue la mesure, on pose $z = 25$ m dans l'expression (17).

On a :

$$v = v_{\text{réf}} (0,2 \times 1,00) \ln \frac{25}{0,07} \text{ (m/s)}$$

Si $v_{\text{réf}}$ est égal à 5 m/s par exemple, on trouve pour une hauteur de 25 m, une vitesse du vent égale à 5,88 m/s.

7.21.22 Vitesses du vent mesurées

Le tableau 17 donne les vitesses moyennes du vent (enregistrées sur des périodes de 10') pour Middelkerke, Melsbroek, Florennes, Saint-Hubert et Kleine Brogel.

Tableau 17 — Vitesses moyennes du vent (m/s) enregistrées pour des périodes de 10' de 1963 à 1972

Champ d'aviation	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Middelkerke	5,7	6,0	6,5	5,8	5,2	5,2	4,8	5,1	5,0	5,3	6,3	6,1
Melsbroek	4,6	4,5	5,0	4,5	4,0	3,8	3,6	3,7	3,7	4,0	5,2	4,8
Florennes	3,8	4,0	4,1	3,9	3,4	3,2	3,0	3,0	3,0	3,2	4,0	3,9
Saint-Hubert	4,7	4,8	4,9	4,5	4,2	4,1	3,8	3,9	4,1	4,5	5,0	4,7
Kleine Brogel	3,4	3,4	3,8	3,3	3,0	2,9	2,7	2,7	2,7	2,9	3,5	3,4

Ces vitesses du vent ont été relevées de 1963 à 1972 à 10 m au-dessus de sol libre (champs d'aviation) sur des terrains de la classe de rugosité II (*).

Il est toutefois plus utile pour nos calculs, de connaître le nombre d'heures par mois durant lesquelles la vitesse moyenne du vent (enregistrée pour des périodes de 10') atteint une valeur déterminée, que les vitesses moyennes du vent données dans le tableau 17.

Le tableau 18 donne pour les mêmes stations que le tableau 17 le nombre d'heures par mois, par saison de chauffe et par an, durant lesquelles la vitesse du vent atteint une valeur déterminée. Les valeurs du tableau 18 ont été calculées sur la base des résultats déjà mentionnés (*).

Ces valeurs sont aussi données en pourcentages de la durée de la saison de chauffe et de l'année.

Les données propres à la saison de chauffe sont représentées graphiquement à la figure 16 (p. 56). La durée retenue pour la saison de chauffe va du 16 septembre au 15 mai (5.808 heures).

On constate sur le graphique de la figure 16 que les courbes 2 (Melsbroek) et 5 (Saint-Hubert) sont très rapprochées. Il en est d'ailleurs de même pour les courbes 3 (Kleine Brogel) et 4 (Florennes).

Si on ne tient pas compte des légères différences, les courbes 2 et 5 et les courbes 3 et 4 peuvent être remplacées respectivement par une courbe donnant leur valeur moyenne (fig. 17, p. 57).

(*) Voir Bibliographie n° 5.

Tableau 18 — Nombre d'heures par mois, par saison de chauffe et par an, durant lesquelles la vitesse moyenne du vent (enregistrée pour des périodes de 10') atteint une valeur déterminée. Pourcentages pour la saison de chauffe et pour l'année

Champ d'aviation	Vitesse du vent v (m/s)	Janvier (h)	Février (h)	Mars (h)	Avril (h)	Mai (h)	Juin (h)	Juillet (h)	Août (h)	Septembre (h)	Octobre (h)	Novembre (h)	Décembre (h)	Saison de chauffe		Année	
														(h)	(%)	(h)	(%)
Middelkerke	$v < 0,2$	5,21	4,03	3,72	5,04	9,67	11,52	11,90	9,67	10,80	9,67	6,48	7,44	51,67	0,89	95,15	1,08
	$0,3 \leq v \leq 1,5$	45,80	30,97	21,38	35,28	43,15	43,55	52,67	42,64	59,04	50,85	28,31	39,83	302,82	5,21	493,47	5,63
	$1,6 \leq v \leq 3,3$	128,09	104,16	93,00	115,92	153,26	151,20	173,35	148,80	167,76	154,75	99,36	120,53	973,85	16,77	1.610,18	18,38
	$3,4 \leq v \leq 5,4$	207,39	191,03	201,05	189,36	230,64	213,48	236,91	241,80	196,85	228,41	198,25	202,37	1.627,89	28,03	2.537,54	28,97
	$5,5 \leq v \leq 7,9$	234,36	214,37	249,24	248,40	218,74	213,84	204,04	216,50	184,32	194,18	217,44	210,55	1.766,54	30,41	2.605,98	29,75
	$8,0 \leq v \leq 10,7$	78,86	72,80	103,89	92,99	66,27	65,31	52,45	68,45	74,98	61,74	90,00	86,61	656,45	11,30	914,35	10,44
	$10,8 \leq v \leq 13,8$	30,79	45,18	57,33	28,80	22,02	20,57	11,87	15,58	25,24	34,36	52,55	60,26	332,54	5,73	404,55	4,62
	$13,9 \leq v$	13,50	9,46	14,39	4,21	0,25	0,53	0,81	0,56	1,01	10,04	27,61	16,41	96,24	1,66	98,78	1,13
Melsbroek	$v < 0,2$	20,09	19,49	15,62	16,56	26,78	20,88	25,30	26,78	45,36	34,22	18,0	17,86	177,48	3,06	286,94	3,28
	$0,3 \leq v \leq 1,5$	69,19	73,92	63,94	79,92	101,18	96,48	119,04	107,88	118,80	107,88	64,44	78,12	645,77	11,12	1.080,79	12,34
	$1,6 \leq v \leq 3,3$	168,81	155,23	147,31	159,12	186,0	216,72	241,06	228,41	213,94	186,00	144,14	163,68	1.321,26	22,75	2.210,42	25,23
	$3,4 \leq v \leq 5,4$	232,87	213,70	223,94	224,41	231,61	216,0	229,26	220,97	181,44	212,04	198,0	205,34	1.713,09	29,50	2.589,58	29,56
	$5,5 \leq v \leq 7,9$	197,45	149,18	197,90	175,68	166,15	151,20	114,17	145,08	125,14	161,75	190,94	193,29	1.409,16	24,26	1.967,93	22,46
	$8,0 \leq v \leq 10,7$	41,13	42,07	75,65	54,32	26,81	17,51	12,90	14,14	31,74	33,93	71,94	63,01	410,89	7,07	485,15	5,54
	$10,8 \leq v \leq 13,8$	12,71	16,13	15,92	9,43	5,21	1,21	1,75	0,74	3,33	8,03	26,78	19,72	112,90	1,94	120,96	1,38
	$13,9 \leq v$	1,75	2,28	3,72	0,56	0,26	0	0,52	0	0,25	0,15	5,76	2,98	17,45	0,30	18,23	0,21
Kleine Brogel	$v < 0,2$	18,6	14,78	10,56	15,12	16,37	20,15	29,02	28,97	46,75	28,99	15,82	25,29	160,46	2,76	270,42	3,09
	$0,3 \leq v \leq 1,5$	126,48	124,32	101,80	141,11	156,24	167,69	193,44	209,53	198,50	180,66	136,65	137,57	1.123,44	19,34	1.873,99	21,39
	$1,6 \leq v \leq 3,3$	263,38	232,51	239,79	253,18	289,42	286,45	309,59	273,59	258,92	264,68	234,47	247,63	2.005,14	34,52	3.153,61	36,00
	$3,4 \leq v \leq 5,4$	241,06	200,93	247,33	221,04	216,43	192,88	173,66	191,71	161,11	210,03	198,50	227,55	1.731,72	29,82	2.482,23	28,34
	$5,5 \leq v \leq 7,9$	85,94	88,66	128,27	83,99	64,73	52,54	36,55	39,90	53,72	55,91	115,00	92,28	708,23	12,20	897,49	10,24
	$8,0 \leq v \leq 10,7$	7,57	8,54	13,88	5,12	0,81	0,29	1,74	0,30	1,00	3,43	17,69	13,16	70,28	1,21	73,53	0,84
	$10,8 \leq v \leq 13,8$	0,97	2,26	2,37	0,44	0	0	0	0	0	0,30	1,87	0,52	8,73	0,15	8,73	0,10
	$13,9 \leq v$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Florennes	$v < 0,2$	17,35	10,21	11,16	10,80	17,11	21,79	21,12	24,55	23,04	20,83	10,80	18,60	119,55	2,06	207,36	2,37
	$0,3 \leq v \leq 1,5$	85,56	76,61	70,85	88,56	116,81	139,68	151,03	141,36	151,92	128,71	79,48	102,67	764,92	13,17	1.333,24	15,22
	$1,6 \leq v \leq 3,3$	241,8	207,77	234,01	220,32	273,51	266,40	290,40	311,92	287,40	280,49	233,41	221,72	1.915,56	32,98	3.069,15	35,04
	$3,4 \leq v \leq 5,4$	271,56	229,82	244,03	234,72	231,60	207,36	216,50	207,58	198,72	229,90	226,08	229,15	1.876,69	32,31	2.727,02	31,13
	$5,5 \leq v \leq 7,9$	114,58	129,70	149,55	150,98	100,44	81,55	61,66	58,03	58,13	76,63	144,72	152,34	996,16	17,15	1.278,31	14,59
	$8,0 \leq v \leq 10,7$	12,68	13,98	32,74	12,96	4,32	3,22	3,01	0,56	0,40	6,70	21,83	18,99	122,17	2,10	131,39	1,50
	$10,8 \leq v \leq 13,8$	0,47	3,78	1,66	1,43	0,21	0	0,28	0	0,39	0,37	3,30	0,53	11,84	0,21	12,42	0,14
	$13,9 \leq v$	0	0,13	0	0,23	0	0	0	0	0	0,37	0,38	0	1,11	0,02	1,11	0,01
Saint-Hubert	$v < 0,2$	6,70	6,05	5,21	5,76	8,93	9,36	8,18	6,70	16,56	9,67	10,08	10,42	66,49	1,14	103,62	1,18
	$0,3 \leq v \leq 1,5$	61,25	54,78	49,85	53,28	72,17	73,75	90,02	84,07	69,12	73,66	67,06	75,89	505,25	8,70	824,90	9,42
	$1,6 \leq v \leq 3,3$	158,47	118,44	143,59	144,00	178,56	175,99	215,02	199,21	180,72	155,50	141,84	144,34	1.182,94	20,37	1.955,68	22,33
	$3,4 \leq v \leq 5,4$	249,98	236,54	251,47	283,05	288,67	287,28	301,44	309,50	278,64	270,82	208,80	238,82	2.018,48	34,75	3.205,01	36,59
	$5,5 \leq v \leq 7,9$	215,02	206,30	247,01	209,52	174,10	160,56	117,55	135,41	157,68	201,62	210,24	220,22	1.673,01	28,81	2.255,23	25,74
	$8,0 \leq v \leq 10,7$	41,41	44,52	39,28	23,49	18,85	12,75	10,18	9,11	17,14	26,31	62,95	41,98	297,63	5,12	347,97	3,97
	$10,8 \leq v \leq 13,8$	10,64	4,20	7,59	0,90	2,47	0,31	1,61	0	0,14	6,11	17,59	10,84	59,14	1,02	62,40	0,71
	$13,9 \leq v$	0,53	1,17	0	0	0,25	0	0	0	0	0,31	1,44	1,49	5,06	0,09	5,19	0,06

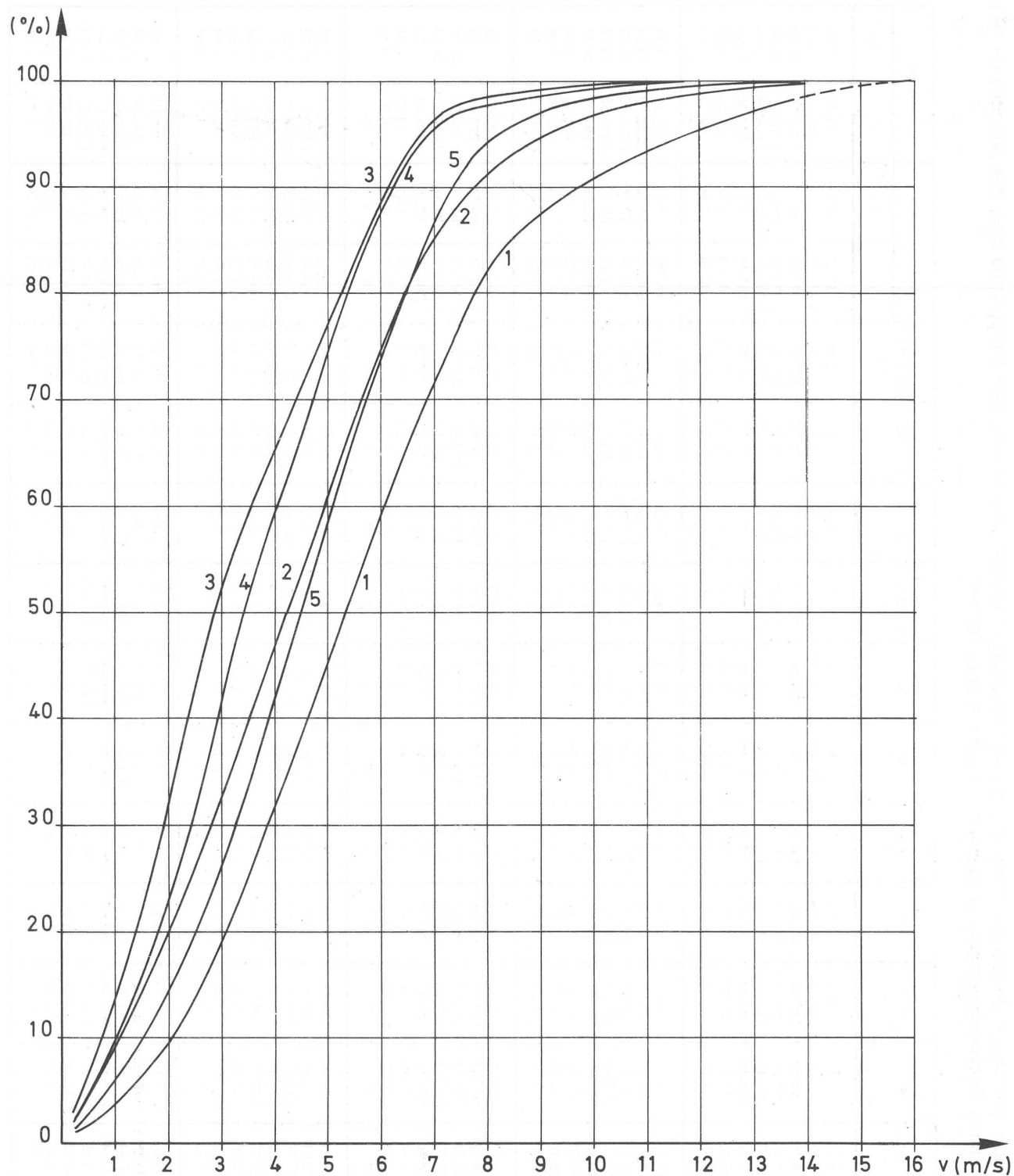


Fig. 16 — Pourcentage de la durée de la saison de chauffe durant lequel la vitesse du vent atteint une valeur inférieure à celle indiquée en abscisse.

En abscisse, vitesse du vent v (m/s)
 En ordonnée, durée de la saison de chauffe (%)
 courbe 1 Middelkerke
 courbe 2 Melsbroek
 courbe 3 Kleine Brogel
 courbe 4 Florennes
 courbe 5 Saint-Hubert

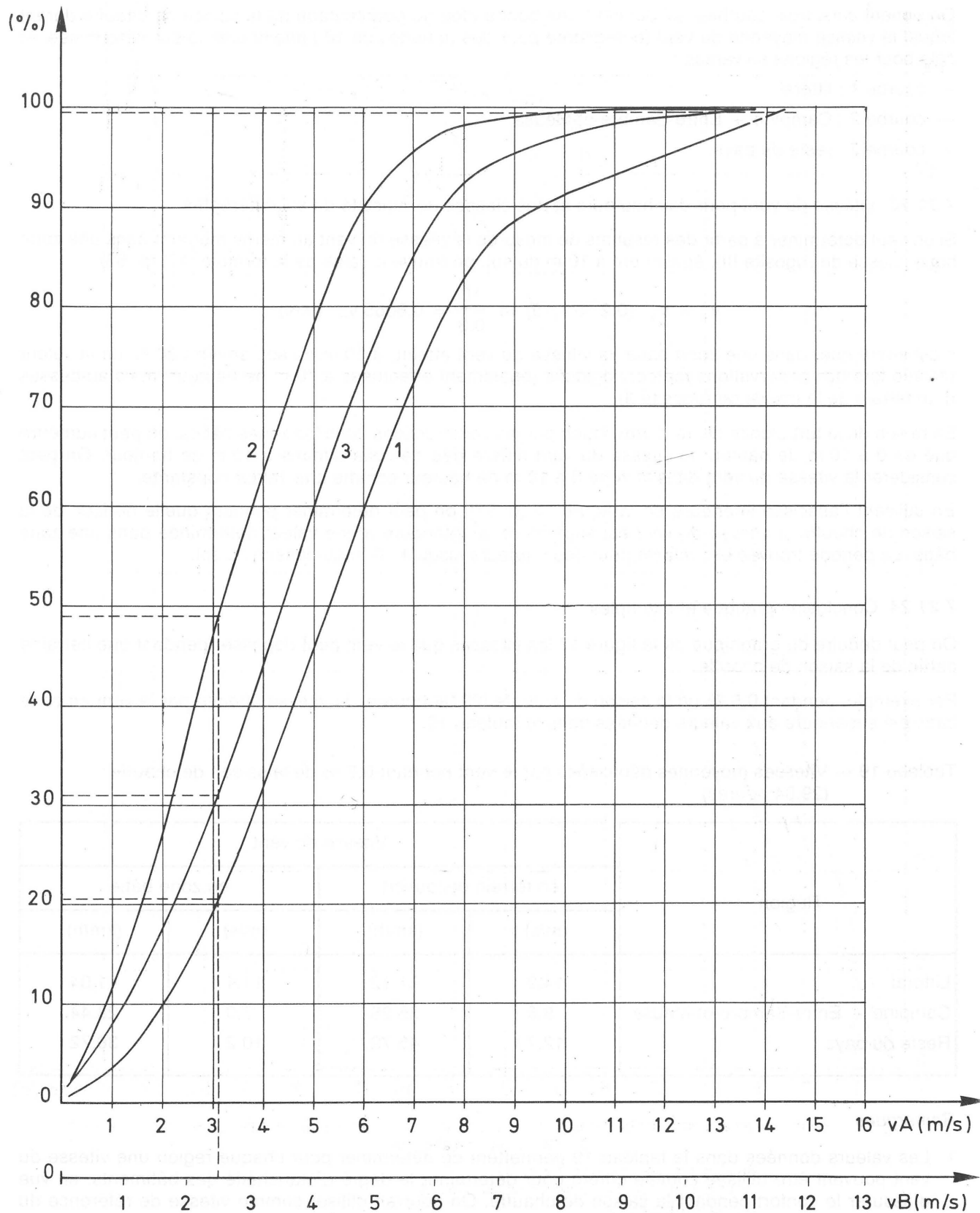


Fig. 17 — Pourcentage de la durée de la saison de chauffe durant lequel la vitesse du vent atteint une valeur inférieure à celle indiquée en abscisse.

En abscisse supérieure, vitesse du vent météorologique v_A (m/s)

En abscisse inférieure, vitesse du vent en zone bâtie v_B (m/s)

En ordonnée, durée de la saison de chauffe (%)

courbe 1 littoral

courbe 2 Campine + Entre-Sambre-et-Meuse

courbe 3 reste du pays

On obtient ainsi trois courbes qui donnent une bonne idée du pourcentage de la saison de chauffe durant lequel la vitesse moyenne du vent (enregistrée pour des périodes de 10') atteint une valeur déterminée, et cela pour les régions suivantes :

- courbe 1 : littoral
- courbe 2 : Campine + Entre-Sambre-et-Meuse
- courbe 3 : reste du pays.

7.21.23 Vitesse du vent pour des hauteurs et des classes de rugosité du sol différentes

Si on veut déterminer à partir des résultats de mesures la vitesse du vent au même moment dans une zone bâtie (classe de rugosité III), également à 10 m du sol, on trouve à l'aide de la formule (17) (p. 53) :

$$v_{III} = v_{réf} (0,2 \times 1,15) \ln \frac{10}{0,3} = 0,8065 v_{réf} \text{ (m/s)}$$

c'est-à-dire que, dans une zone bâtie, la vitesse du vent atteint, à 10 m du sol, environ 80 % de la valeur relevée lors des observations météorologiques (également effectuées à 10 m de hauteur, mais au-dessus d'un terrain de la classe de rugosité II).

En raison de la turbulence du vent provoquée par les constructions dans les zones bâties, on peut admettre que de 0 à 10 m de hauteur la vitesse du vent diffère peu de celle atteinte à 10 m de hauteur. On peut considérer la vitesse du vent dans la zone 0 à 10 m de hauteur comme une valeur constante.

En utilisant l'abscisse inférieure de la figure 17 (p. 57), on peut déterminer pendant quelle période de la saison de chauffe la vitesse du vent est supérieure ou inférieure à une valeur déterminée dans une zone bâtie. La période trouvée est valable pour des hauteurs jusqu'à 10 m au-dessus du sol.

7.21.24 Conclusion pratique et exemples

On peut déduire du graphique de la figure 17 les vitesses que le vent peut dépasser pendant une certaine partie de la saison de chauffe.

Par exemple, pendant 0,5 % de la saison de chauffe (29,04 heures), la vitesse atteinte par le vent en zone bâtie est supérieure aux valeurs données dans le tableau 19.

Tableau 19 — Vitesses moyennes dépassées par le vent pendant 0,5 % de la saison de chauffe (29,04 heures)

Région	Vitesse du vent			
	en terrain découvert		en zone bâtie	
	(m/s)	(km/h)	(m/s)	(km/h)
Littoral	14,2	51,12	11,4	41,04
Campine + Entre-Sambre-et-Meuse	9,8	35,28	7,9	28,44
Reste du pays	12,7	45,72	10,2	36,72

Remarques

1. Les valeurs données dans le tableau 19 permettent de déterminer pour chaque région une vitesse du vent pouvant être utilisée comme critère pour déterminer le degré d'étanchéité des bâtiments, en vue d'assurer le confort pendant la saison de chauffe. On pourrait utiliser comme vitesse de référence du vent, la vitesse du vent qui n'est dépassée que pendant 0,5 % de la saison de chauffe, c'est-à-dire pendant 29,04 heures. Avec cette vitesse de référence, on obtient approximativement les vitesses du vent données dans le tableau 20, pour des bâtiments de 10 m maximum de hauteur.
2. En ce qui concerne la consommation d'énergie, on pourrait utiliser la limite de 50 % des vitesses atteintes par le vent.

Exemple

On peut déduire du graphique de la figure 17 que dans une zone bâtie (jusqu'à 10 m de hauteur) une vitesse du vent de 2,5 m/s ne sera pas dépassée pour les pourcentages suivants de la saison de chauffe :

- littoral : 20,5 %
- Campine + Entre-Sambre-et-Meuse : 49 %
- reste du pays : 31 %.

Tableau 20 — Vitesses pouvant être dépassées par le vent pendant 0,5 % de la saison de chauffe

Région	Site	Vitesse du vent (m/s)
Littoral	non protégé	14,2
	protégé	11,4
Campine + Entre-Sambre-et-Meuse	non protégé	9,8
	protégé	7,9
Reste du pays	non protégé	12,7
	protégé	10,2

7.21.3 Différences de pression d'air prévisibles

7.21.31 Différence de pression d'air sur l'ensemble du bâtiment

A l'aide de la formule (16) (p. 53) et en tenant compte d'un coefficient de pression d'air $K = 0,61$ et des vitesses moyennes dépassées par le vent pendant seulement 0,5 % de la saison de chauffe (tableau 20), on trouve les différences de pression d'air sur l'ensemble d'un bâtiment en fonction de sa situation et de son exposition (tableau 21).

Tableau 21 — Différences de pression d'air (Pa) sur un bâtiment, dépassées seulement pendant 0,5 % de la saison de chauffe ($\Delta p = 1/2 \times 0,61 \rho v^2$)

Région	Site	Vitesse du vent (m/s)	Différence de pression d'air (Pa)
Littoral	non protégé	14,2	78,1
	protégé	11,4	50,3
Campine + Entre-Sambre-et-Meuse	non protégé	9,8	37,2
	protégé	7,9	24,2
Reste du pays	non protégé	12,7	62,5
	protégé	10,2	40,3

7.21.32 Différence de pression d'air sur une façade

Normalement, la différence de pression d'air totale sur un bâtiment est reprise :

- par deux façades avec ouvertures et joints
- par des résistances intérieures (portes, murs, couloirs, etc.).

Dans le cas le plus défavorable (pas de résistances intérieures ou toutes les portes intérieures ouvertes), la différence de pression d'air totale sur un bâtiment sera toujours reprise par deux façades.

Si ces deux façades ont la même étanchéité à l'air, chacune d'elle reprendra donc aussi la même différence de pression d'air (fig. 18).

Si, cependant, une des deux façades est nettement moins étanche que l'autre, la répartition des pressions d'air peut se faire autrement (fig. 19).

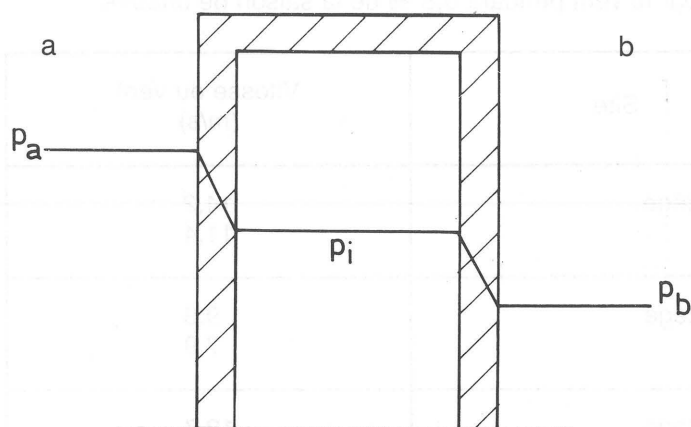


Fig. 18 — Les façades a et b ont la même étanchéité à l'air.

p_a pression d'air sur la façade a
 p_b pression d'air sur la façade b
 p_i pression d'air à l'intérieur du bâtiment

$$p_i = \frac{p_a + p_b}{2}$$

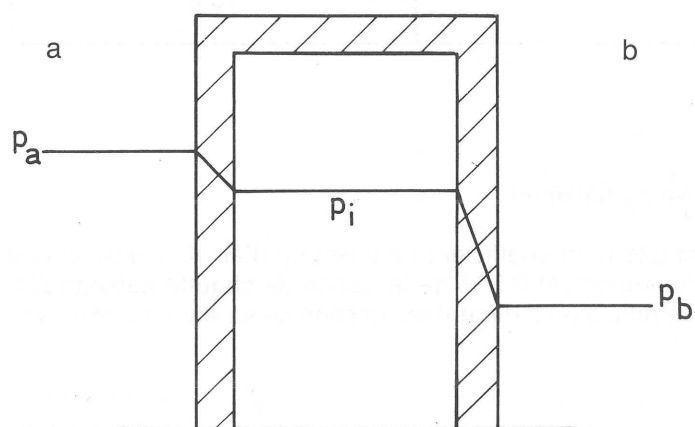


Fig. 19 — La façade a est nettement moins étanche à l'air que la façade b.

p_a pression d'air sur la façade a
 p_b pression d'air sur la façade b
 p_i pression d'air à l'intérieur du bâtiment

L'air pénètre plus facilement par la façade non étanche. La pression d'air p_i à l'intérieur du bâtiment augmente, réduisant ainsi l'infiltration d'air par la façade non étanche. La façade étanche est soumise alors à une différence de pression d'air plus importante ($p_i - p_b$).

On pourrait d'abord admettre que la différence de pression d'air prévisible sur une façade, dépassée seulement pendant 0,5 % de la saison de chauffe, est plus ou moins égale à la moitié des valeurs données dans le tableau 21 (p. 59).

Le tableau 22 donne ces nouvelles valeurs.

Tableau 22 — Différences de pression d'air (Pa) sur une façade, dépassées seulement pendant 0,5 % de la saison de chauffe

Région	Site	Différence de pression d'air (Pa)
Littoral	non protégé	39,05
	protégé	25,15
Campine + Entre-Sambre-et-Meuse	non protégé	18,60
	protégé	12,10
Reste du pays	non protégé	31,25
	protégé	20,15

Dans de nombreux cas cependant, on ne rencontrera pas cette situation idéale et une des deux façades pourra également être soumise à la différence de pression d'air totale.

C'est le cas, par exemple, lorsqu'un espace fermé communique directement avec l'air extérieur par des ouvertures verticales (feu ouvert, gaine de ventilation) au-dessus d'une toiture plate (fig. 20).

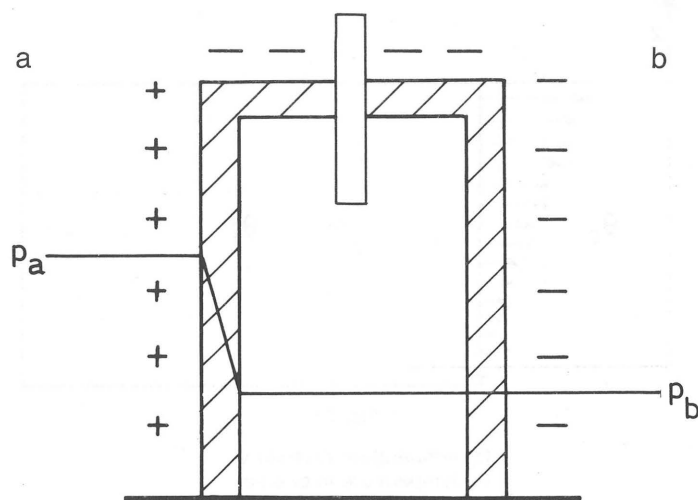


Fig. 20.

p_a pression d'air sur la façade a
 p_b pression d'air sur la façade b

Remarque

On pourrait donc d'abord adopter la thèse suivante.

Lorsqu'il s'agit d'éviter des courants d'air, des infiltrations d'eau ou des pertes d'énergie, on peut partir de l'hypothèse la plus défavorable selon laquelle la différence de pression d'air totale est reprise par une façade (valeurs du tableau 21, p. 59).

Par contre, lorsqu'il s'agit de considérer les possibilités de ventilation naturelle (pénétration d'air extérieur par des joints), on peut partir de l'hypothèse la plus défavorable selon laquelle chaque façade reprend la moitié de la différence de pression d'air totale (valeurs du tableau 22, p. 60).

Quoi qu'il en soit, si on accepte que la différence de pression d'air totale soit reprise par une façade, on trouve dans le tableau 21 que la différence de pression d'air sur une façade ne dépassera 78,1 Pa que pendant 0,5 % de la saison de chauffe, c'est-à-dire pendant 29,04 heures, même dans la zone la plus exposée (littoral non protégé).

Il est utile de préciser que pour les essais d'étanchéité des châssis et des façades décrits dans les STS 36, 52 et 52bis (*) la valeur de la différence de pression d'air appliquée est de 100 Pa et que les coefficients de perméabilité exigés pour cette différence de pression d'air doivent être inférieurs à 6, 3 ou 2 m³/hm 100 Pa.

Exemple : une fenêtre qui satisfait à l'exigence $a \leq 1$ m³/hm 100 Pa et dont la longueur des joints est de 8 m aura seulement un débit d'infiltration inférieur à 8 m³/h en zone littorale pendant moins de 29 heures, ceci en supposant que la différence de pression d'air totale est reprise par une façade.

(*) Voir Bibliographie n° 10 à 12.

7.22 Différences de pression hydrostatique

7.22.1 Local étanche à l'air avec une ouverture

Considérons un local complètement étanche à l'air à l'exception d'une ouverture au ras du sol, par laquelle le local communique avec l'ambiance extérieure (fig. 21).

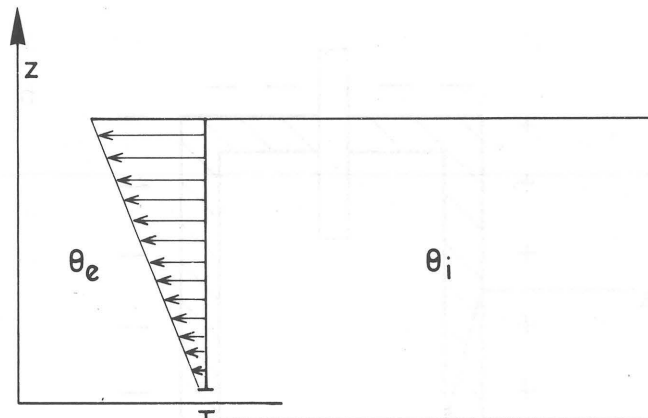


Fig. 21.

θ_e température extérieure

θ_i température intérieure

Triangle fléché : variation de $p_{iz} - p_{ez}$

avec p_{iz} pression d'air intérieure à la hauteur z

p_{ez} pression d'air extérieure à la hauteur z

Supposons que la température extérieure θ_e soit inférieure à la température intérieure θ_i du local.

A hauteur de l'ouverture (hauteur au sol $z = 0$), la pression d'air absolue à l'extérieur p_e est égale à la pression d'air absolue à l'intérieur p_i :

$$p_{e0} = p_{i0}$$

A une hauteur z (m) quelconque, la pression extérieure sera égale à :

$$p_{ez} = p_{e0} - z \rho_e g \quad (\text{Pa})$$

avec ρ_e masse volumique de l'air extérieur

g accélération terrestre ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

A la même hauteur z (m) quelconque, la pression intérieure sera égale à :

$$p_{iz} = p_{i0} - z \rho_i g \quad (\text{Pa})$$

La différence de pression entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure à une hauteur z quelconque est donc

$$\Delta p_z = p_{iz} - p_{ez} = (p_{i0} - z \rho_i g) - (p_{e0} - z \rho_e g) \quad (\text{Pa})$$

et, puisque $p_{i0} = p_{e0}$, on a :

$$\Delta p_z = z (\rho_e - \rho_i) g \quad (\text{Pa}) \quad (18)$$

On peut donc en déduire que :

1. lorsqu'un local est pourvu d'une ouverture dans le bas, il est en surpression par rapport à l'ambiance extérieure
2. cette surpression varie linéairement avec la hauteur suivant la formule (18). La variation de $p_{iz} - p_{ez}$ est représentée sur la figure 21 par le triangle dont le sommet est situé à la hauteur de l'ouverture du local
3. si on pratiquait une petite ouverture (joint ou fente) dans la partie supérieure du local, on constaterait que l'air chaud s'échappe du local par suite de la différence de pression.

Si on applique le même raisonnement pour un local étanche à l'air pourvu d'une ouverture dans sa partie supérieure, on remarque que :

- l'ensemble du local est en dépression par rapport à l'ambiance extérieure
- cette dépression varie linéairement en fonction de la hauteur sous l'ouverture

— si on pratiquait une petite ouverture dans le bas du local, de l'air froid s'introduirait à l'intérieur par cette ouverture sous l'effet de la dépression.

En conclusion, dans les deux cas où $\theta_i > \theta_e$, on constate que l'air froid de l'extérieur pénètre dans le local par des ouvertures situées dans le bas et que l'air chaud du local s'échappe par des ouvertures situées dans le haut.

7.22.2 Local étanche à l'air avec une ouverture dans le bas et une ouverture dans le haut

Le mouvement de l'air a été étudié dans ce qui précède.

Si les deux ouvertures du local ont la même résistance à l'écoulement de l'air, la répartition de la pression d'air se fait comme le montre le schéma de la figure 22, c'est-à-dire que la pression intérieure sera égale à la pression extérieure à la moitié exactement de la distance h entre les deux ouvertures.

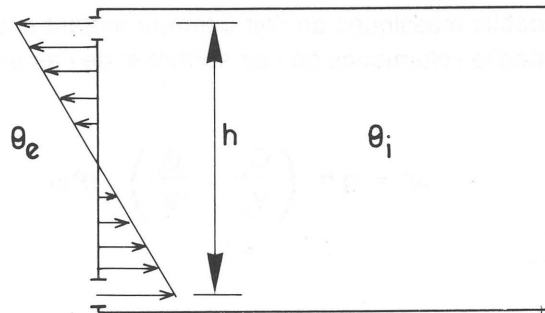


Fig. 22.

θ_e température extérieure
 θ_i température intérieure
 h distance entre les deux ouvertures

On a cependant :

$$\Delta p_{\text{en haut}} + \Delta p_{\text{en bas}} = h (\rho_e - \rho_i) g \quad (\text{Pa})$$

Si une des deux ouvertures présente une résistance nettement plus grande que l'autre à l'écoulement de l'air (par exemple si l'ouverture supérieure est beaucoup plus petite), la droite de pression sera décalée et le point où $p_i = p_e$ va également se déplacer vers la plus grande ouverture (fig. 23).

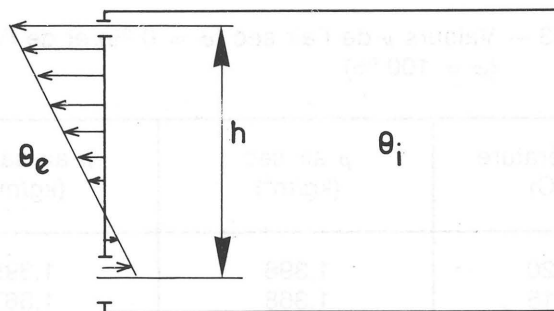


Fig. 23.

θ_e température extérieure
 θ_i température intérieure
 h distance entre les deux ouvertures

Cela est logique, car la même quantité d'air passera à travers les deux ouvertures et la différence de pression sera plus importante autour de l'ouverture présentant une grande résistance à l'écoulement de l'air qu'autour de celle présentant une faible résistance.

On a à nouveau :

$$\Delta p_{\text{en haut}} + \Delta p_{\text{en bas}} = h (\rho_e - \rho_i) g \quad (\text{Pa})$$

7.22.3 Conclusions et exemple

1. La force globale qui engendre l'écoulement de l'air dans le local, lorsque celui-ci a une température plus élevée que l'ambiance extérieure, est donnée par la formule :

$$\Delta p = h (\rho_e - \rho_i) g \quad (\text{Pa}) \quad (19)$$

2. Sous l'effet de cette force, de l'air froid pénétrera par les ouvertures et les fentes situées dans le bas du local et de l'air chaud s'échappera par les ouvertures et les fentes situées dans le haut du local.
3. Il découle de la formule (19) que la force qui engendre l'écoulement de l'air augmentera si la distance h entre les ouvertures supérieures et inférieures du local augmente et si la différence de température $\theta_i - \theta_e$ s'accroît.
4. On peut également écrire l'expression (19) comme suit :

$$\text{puisque } \rho_i = \frac{G_i}{V_i} \text{ et } \rho_e = \frac{G_e}{V_e}$$

avec G_i et G_e débits massiques de l'air intérieur sortant et de l'air extérieur entrant (kg/h)
 V_i et V_e débits volumiques de l'air sortant et de l'air entrant (m³/h)

on a :

$$\Delta p = g h \left(\frac{G_e}{V_e} - \frac{G_i}{V_i} \right) \quad (\text{Pa})$$

$$\text{et puisqu'en outre } V_i = \frac{V_e T_i}{T_e}$$

avec T_i température intérieure absolue
 T_e température extérieure absolue

on a :

$$\Delta p = g h \frac{G_e}{V_e} \left(\frac{T_i - T_e}{T_i} \right) \quad (\text{Pa})$$

ou

$$\Delta p = g h \rho_e \left(\frac{\theta_i - \theta_e}{273 + \theta_i} \right) \quad (\text{Pa}) \quad (20)$$

Le tableau 23 donne les valeurs ρ de l'air sec ($\varphi = 0 \%$) et de l'air saturé ($\varphi = 100 \%$).

Tableau 23 — Valeurs ρ de l'air sec ($\varphi = 0 \%$) et de l'air saturé ($\varphi = 100 \%$)

Température (°C)	ρ air sec (kg/m ³)	ρ air saturé (kg/m ³)
-20	1,396	1,395
-15	1,368	1,367
-10	1,342	1,341
-5	1,317	1,315
0	1,293	1,290
+5	1,270	1,266
+10	1,248	1,242
+15	1,226	1,218
+20	1,205	1,195
+25	1,185	1,171
+30	1,165	1,146
+35	1,146	1,121
+40	1,128	1,097
+45	1,110	1,070

Exemple

Calculons les différences de pression hydrostatique avec $\Theta_e = 0^\circ\text{C}$ et $\Theta_i = 15^\circ\text{C}$, pour les distances h suivantes entre les ouvertures d'entrée et de sortie de l'air :

$h = 1\text{ m}$ (fenêtre normale)

$h = 5\text{ m}$ (maison unifamiliale)

$h = 50\text{ m}$ (immeuble élevé).

En utilisant l'expression (20) on trouve les valeurs suivantes :

— pour $h = 1\text{ m}$, $\Delta p = 0,66\text{ Pa}$

— pour $h = 5\text{ m}$, $\Delta p = 3,29\text{ Pa}$

— pour $h = 50\text{ m}$, $\Delta p = 32,96\text{ Pa}$.

7.23 Combinaison des différences de pression d'air

Il est évident que l'influence du vent et des écarts de température entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure d'un local ou d'un bâtiment peuvent se produire simultanément.

Les différences de pression d'air réelles sont alors données par la somme de la différence de pression due à l'action du vent et de celle due aux effets des écarts de température.

Il découle de ce qui précède :

— que les différences de pression d'air sont en général relativement faibles (à titre comparatif, la pression atmosphérique est égale à 101.396 Pa)

— que l'action du vent engendre généralement une différence de pression d'air plus importante que les écarts de température, sauf dans le cas de bâtiments élevés. Une fois que le vent atteint une certaine vitesse, l'influence des écarts de température sur des constructions basses devient négligeable par rapport à l'influence du vent. Le vent étant cependant un facteur très instable, il arrive qu'il y ait de longues périodes sans vent ou pratiquement sans vent.

Dans des conditions hivernales toutefois, il existera évidemment une différence de température positive entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure et il y aura toujours un tirage thermique même si il n'y a pas de vent

— que la différence de pression d'air peut varier fortement selon :

- la situation du bâtiment
- sa protection contre l'action du vent
- sa hauteur
- les conditions climatiques extérieures.

Comme nous l'avons dit précédemment, le débit de ventilation est proportionnel aux différences de pression et inversement proportionnel à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment.

Le débit de ventilation V (m^3/h) peut être écrit comme la somme de deux termes :

$$V = V_v + V_{\text{inf}} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (21)$$

avec V_v volume d'air (m^3/h) pénétrant dans le bâtiment par les ouvertures de ventilation prévues

V_{inf} volume d'air (m^3/h) s'infiltrant dans le bâtiment par des interstices dans l'enveloppe du bâtiment, c'est-à-dire par des joints non étanches, des fentes, des fissures, etc.

Par définition, le taux de ventilation n (h^{-1}) réalisé est donné par

$$n = \frac{V}{V_L} = \frac{V_v + V_{\text{inf}}}{V_L} = n_v + n_{\text{inf}}$$

avec V_L volume d'air du local ou du bâtiment considéré

On détermine V_v et V_{inf} en tenant compte de la température intérieure du bâtiment.

En effet,

$$V_i = V_e \frac{T_i}{T_e}$$

avec V_i débit de ventilation V à la température intérieure absolue T_i (K)

V_e débit de ventilation V à la température extérieure absolue T_e (K)

Si on représente le taux de ventilation n en fonction de la vitesse du vent v (m/s) et avec un écart de température $\Delta\theta$ entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure comme paramètre, on obtient le plus souvent un diagramme comme celui représenté à la figure 24.

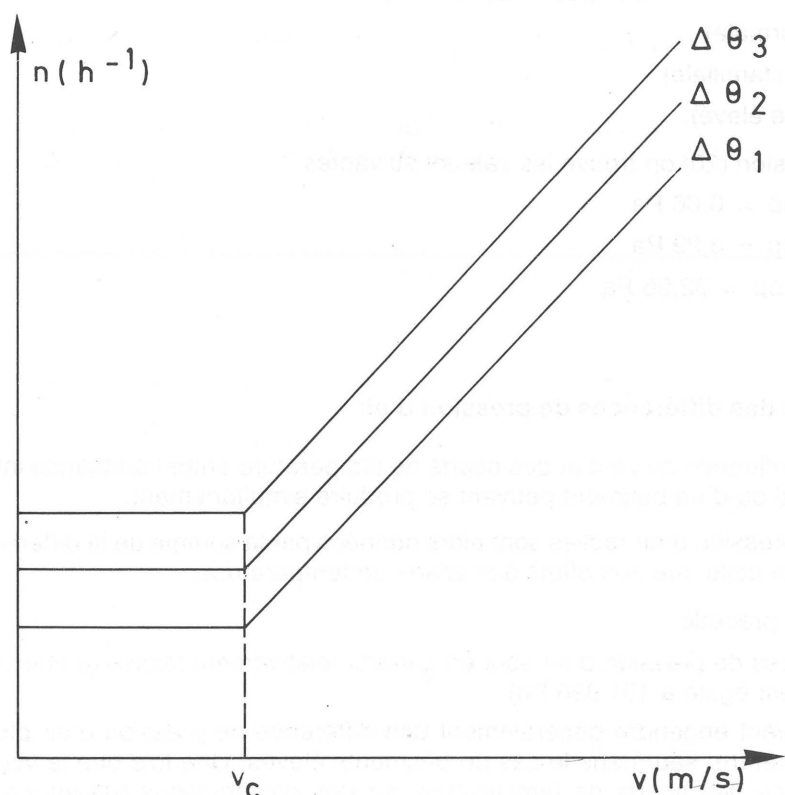


Fig. 24 — Taux de ventilation n en fonction de la vitesse du vent v et de la différence de température $\Delta\theta$ entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure.

En abscisse, vitesse du vent v (m/s)

En ordonnée, taux de ventilation n (h^{-1})

v_c vitesse du vent à partir de laquelle l'action du vent est importante pour la ventilation des bâtiments

$$\Delta\theta_3 > \Delta\theta_2 > \Delta\theta_1$$

Il résulte de résultats d'essais dans des bâtiments que le vent n'est important pour la ventilation des bâtiments qu'à partir d'une vitesse minimale v_c déterminée. En dessous de cette vitesse, c'est surtout le tirage thermique qui est important.

Selon l'étanchéité du bâtiment et les possibilités de ventilation existantes, la valeur de v_c se situe entre 1 et 2,5 m/s.

L'inclinaison des droites représentées sur le graphique de la figure 24, dépend de l'étanchéité à l'air du bâtiment. Plus celui-ci est étanche, plus l'inclinaison des droites sera faible.

7.24 Variation du taux de ventilation

Le graphique de la figure 24 montre que le taux de ventilation peut varier considérablement en fonction de la vitesse du vent et de l'écart de température entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure.

On a montré précédemment qu'un débit de ventilation trop faible peut avoir des conséquences néfastes sur la santé des occupants et être à l'origine de dégâts dans les bâtiments.

Si on augmente le débit de ventilation pendant la saison de chauffe, on augmente aussi les pertes de chaleur du bâtiment et donc par conséquent les frais de chauffage.

Il est dès lors important de poser des exigences telles que :

- dans des conditions normales de climat extérieur, chaque occupant dispose d'un débit de ventilation suffisant sans qu'il y ait dégradation du bâtiment. Cela suppose la présence de dispositifs de ventilation réglables
- dans des conditions exceptionnelles de climat extérieur, le débit de ventilation n'augmente pas exagérément, de façon à ce que les frais de chauffage restent dans des limites acceptables. Cela suppose une étanchéité à l'air suffisante du bâtiment.

7.3 ETANCHEITE A L'AIR DES BATIMENTS ET DEBITS D'INFILTRATION D'AIR

7.31 Etanchéité à l'air des bâtiments

Si les bâtiments étaient parfaitement étanches à l'air, des différences de pression d'air, même très élevées, ne donneraient pas lieu à des infiltrations.

En réalité, les bâtiments ne sont pas étanches à l'air. Ils comportent le plus souvent des ouvertures qu'on ne peut pas obturer parfaitement (feux ouverts, buse d'évacuation des hottes d'aspiration, joints ou fentes autour des portes et des fenêtres).

Il faut tenir compte en outre des voies d'amenée ou d'évacuation de l'air souvent fortuites ou ignorées (fissures, fentes entre plancher ou plafond et murs, ouvertures autour des canalisations de chauffage central ou d'électricité) et, dans quelques cas, il faut même tenir compte du fait que certains matériaux sont loin d'être étanches à l'air.

Le débit d'infiltration d'air dû à des défauts de l'étanchéité contribue évidemment à la ventilation du bâtiment. Ce débit n'est cependant pas contrôlable et, selon les conditions climatiques, il peut déjà suffire ou même être trop important pour couvrir les besoins de ventilation.

Ces dernières années, on a réussi à améliorer sensiblement l'étanchéité à l'air des bâtiments, notamment :

- en réduisant le nombre de fenêtres ouvrantes, ce qui permet de limiter la longueur des joints
- en insérant des bandes d'étanchéité dans les joints de fenêtres, etc.

Il est à noter cependant que ce ne sont pas seulement les joints de fenêtres qui sont responsables des infiltrations d'air, mais également les joints et les fissures dans les parois opaques. Des essais ont montré qu'une maçonnerie recouverte d'un enduit est bien plus étanche qu'une maçonnerie sans enduit. Le manque d'étanchéité d'un bâtiment est d'ailleurs d'autant plus important que les éléments de construction mis en œuvre sont plus petits et donc que le nombre de joints est plus élevé.

7.32 Mesure de l'étanchéité à l'air des bâtiments

On détermine l'étanchéité à l'air ou la résistance à l'infiltration d'air en mesurant le volume d'air s'infiltrant à travers l'élément considéré ou à travers l'enveloppe du bâtiment pour une différence de pression bien définie.

L'étanchéité à l'air des éléments de construction (par exemple fenêtres, portes, etc.) peut être mesurée en laboratoire ou in situ.

Pour mesurer l'étanchéité à l'air des locaux ou des bâtiments dans leur ensemble, deux méthodes sont possibles :

- la méthode de surpression et de dépression
- la méthode du gaz traceur.

7.32.1 Méthode de surpression et de dépression

Cette méthode consiste à créer par des moyens mécaniques une différence de pression entre le milieu intérieur et le milieu extérieur dans un local ou dans un bâtiment.

Pendant l'essai, on mesure le débit d'air nécessaire pour maintenir la surpression ou la dépression à un niveau constant.

On effectue les mesures pour plusieurs différences de pression.

Les résultats sont reportés sur un graphique débit d'air/différence de pression et permettent de calculer l'ouverture de fuite d'air équivalente du local ou du bâtiment. Le débit d'infiltration d'air réel est proportionnel à la grandeur de cette ouverture de fuite mais les mesures ne permettent pas de connaître directement le débit d'infiltration d'air.

La méthode est en effet assez artificielle. Il n'arrive jamais en réalité qu'un bâtiment entier soit en surpression ou en dépression par rapport au milieu extérieur.

Toutefois, sur la base de l'ouverture de fuite d'air équivalente déduite des mesures pour le local ou pour le bâtiment, et compte tenu :

- de la situation du bâtiment (rugosité du terrain, protection contre le vent)
- des conditions climatiques (vitesse du vent, différence de température intérieur/extérieur)

il est possible d'évaluer le débit d'infiltration d'air dans les conditions de mesures ainsi que dans d'autres conditions climatiques.

7.32.2 Méthode du gaz traceur

Cette méthode consiste à injecter une quantité d'un gaz déterminé dans le local ou le bâtiment à tester et à la répartir de façon homogène.

Au cours de l'essai, on mesure pendant un certain temps la baisse de concentration du gaz injecté dans l'air.

La baisse de concentration mesurée permet de calculer le débit d'infiltration d'air réel.

Le résultat obtenu ne fournit toutefois des données sur le débit d'infiltration d'air que pour les conditions climatiques (vitesse et direction du vent, température) régnant au cours de la période de mesure.

7.33 Exigences relatives à l'étanchéité à l'air des locaux ou des bâtiments

L'infiltration d'air, c'est-à-dire le débit de ventilation non contrôlable, peut être à l'origine :

- d'une ventilation momentanément trop élevée des locaux ou des bâtiments, entraînant un accroissement de la consommation d'énergie et donc des frais de chauffage
- de courants d'air désagréables dus à une infiltration d'air très concentrée
- d'une pénétration d'eau de ruissellement, provoquant des problèmes secondaires d'humidité.

De toute évidence, on a donc avantage à limiter le débit d'infiltration d'air ou, en d'autres termes, à soigner l'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment.

On pourrait, par exemple, exiger pour l'étanchéité à l'air des locaux ou des bâtiments que le débit d'infiltration (non voulu) ne dépasse pas 0,5 volume à l'heure, c'est-à-dire $n_{\text{inf}} \leq 0,5 \text{ h}^{-1}$, pendant 99,5 % de la saison de chauffe, en tenant compte des différences de pression résultant du vent et des écarts de température et en considérant que tous les orifices et baies ouvrants (fenêtres, portes, ouvertures de ventilation, etc.) sont normalement fermés.

Dans ces conditions, et en tenant compte de la protection du bâtiment et de vitesses de vent inférieures à une valeur donnée pendant 99,5 % de la saison de chauffe (voir tableau 20, p. 59), on pourrait déterminer, selon la région d'implantation du bâtiment, une ouverture de fuite d'air équivalente maximale admissible.

7.4 VENTILATION NATURELLE DES BATIMENTS

7.41 Enoncé du problème

L'amélioration de l'étanchéité à l'air des locaux ou des bâtiments entraîne une diminution du débit d'infiltration d'air. Etant donné que le débit d'infiltration d'air contribue à la ventilation des bâtiments, il est normal que ce débit soit trop bas, c'est-à-dire inférieur à 10 m³/h personne, pendant de longues périodes si on ne prévoit pas de système de ventilation supplémentaire. On peut donc se demander ce que les occupants de ces bâtiments peuvent faire pour satisfaire aux besoins minimum de ventilation.

Il est à noter que les besoins de ventilation des locaux ou des bâtiments peuvent varier considérablement dans le temps selon :

- la présence ou non de personnes
- le nombre de personnes présentes
- l'activité exercée dans le local considéré (cuisson, lessive, etc.).

Etant donné aussi que les conditions climatiques extérieures sont variables, il est évident qu'on ne peut espérer disposer d'une quantité suffisante d'air frais que si dans chaque local existent des systèmes réglables de ventilation.

Les systèmes de ventilation réglables doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- permettre une régulation du débit d'air en fonction du climat extérieur et des besoins de ventilation
- ne pas provoquer de courants d'air
- ne pas provoquer d'infiltrations d'eau
- garantir la sécurité contre le vol
- ne pas engendrer de nuisance acoustique excessive.

En général, les systèmes de ventilation réglables sont constitués par :

- des fenêtres ouvrantes
- des grilles de ventilation, avec ou sans dispositif de tirage mécanique
- des gaines de ventilation verticales, avec ou sans dispositif de tirage mécanique
- la combinaison de grilles et de gaines de ventilation.

7.42 Ouverture des fenêtres

C'est la méthode de ventilation la plus simple qu'on applique dans la plupart des habitations.

Elle présente cependant des inconvénients importants :

- la ventilation n'est assurée que lorsque la fenêtre est ouverte
- l'ouverture des fenêtres produit généralement des débits de ventilation élevés, surtout lorsqu'il s'agit de grandes fenêtres comme dans la plupart des habitations modernes. En principe, il suffit donc d'ouvrir régulièrement les fenêtres pendant un court laps de temps pour aérer le local ou le bâtiment (ventilation périodique). Un débit de ventilation élevé provoque un refroidissement rapide en hiver et engendre rapidement une gêne due aux courants d'air
- l'ouverture des fenêtres des bâtiments situés dans un environnement bruyant occasionne une gêne acoustique
- de grandes fenêtres ouvertes n'offrent pas de sécurité contre le vol.

Pour les raisons précitées mais aussi par souci d'économie d'énergie, les fenêtres restent souvent fermées pendant l'hiver, même si elles constituent la seule possibilité de ventilation. Celle-ci est alors assurée uniquement par les infiltrations d'air à travers des joints de fenêtres non étanches et d'autres orifices du bâtiment.

Si les fenêtres ne sont pas ouvertes régulièrement, une condensation superficielle est inévitable en hiver dans les locaux occupés et modérément chauffés (chambres à coucher par exemple). En outre, les possibilités de séchage de l'humidité condensée sont très restreintes lorsque ces locaux sont inoccupés.

7.43 Grilles de ventilation

Pour obtenir une ventilation permanente, on peut envisager d'équiper chaque local d'une grille de ventilation, placée par exemple dans la menuiserie ou dans une paroi opaque.

Il faut cependant songer que :

- pendant les périodes où le tirage thermique est le facteur prépondérant (c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas ou peu de vent), un tel système de ventilation ne donne satisfaction que si chaque local est pourvu de deux grilles, l'une au niveau du plancher et l'autre sous le plafond (fig. 25, p. 70). Lorsque les écarts de température entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure sont faibles, ce système est peu efficace
- pendant les périodes où l'action du vent est le facteur prépondérant, toutes les grilles de ventilation situées dans la façade perpendiculaire à la direction du vent (façade en surpression) fonctionnent comme des ouvertures d'entrée d'air tandis que les grilles de ventilation situées dans la façade en dépression fonctionnent comme des ouvertures de sortie d'air (fig. 26, p. 70).

Sous l'effet du vent, l'air est chassé des locaux situés du côté de la façade en surpression vers ceux situés du côté de la façade en dépression, pour s'échapper du bâtiment par les grilles de ventilation de ces locaux.

De l'air humide chaud peut ainsi s'introduire dans des locaux non chauffés et y occasionner la formation de condensation superficielle

- l'ouverture des grilles de ventilation dans des bâtiments situés dans un environnement bruyant peut être source de nuisances acoustiques supplémentaires.

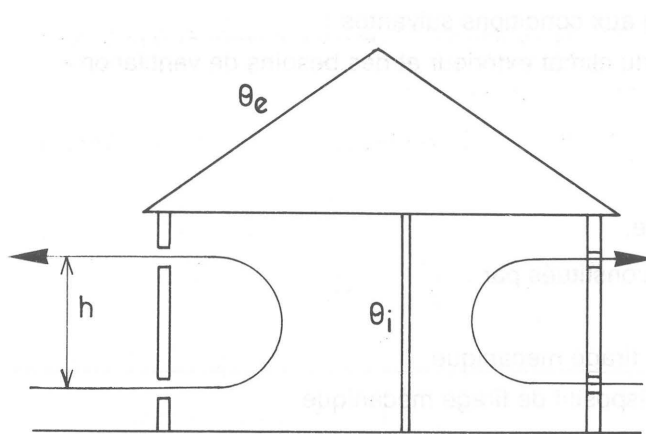


Fig. 25 — Ventilation par tirage thermique.

θ_e température extérieure

θ_i température intérieure

h distance entre les deux grilles de ventilation

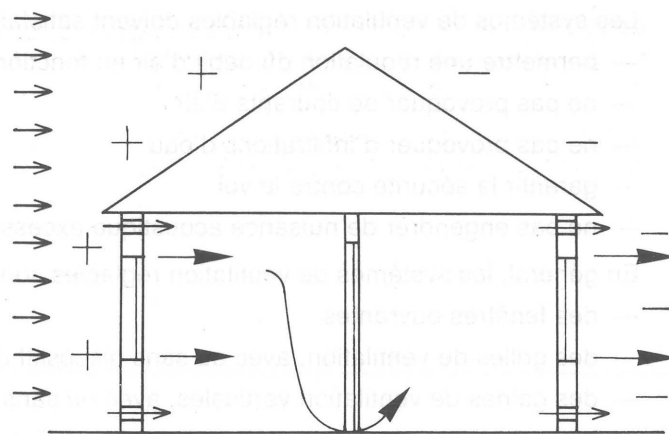


Fig. 26 — Ventilation due à l'action du vent.

Il apparaît donc que le système avec grilles de ventilation :

- n'est pas suffisamment efficace pendant certaines périodes
- peut avoir des effets secondaires défavorables.

7.44 Gaines de ventilation verticales

Une autre possibilité de ventilation consiste à équiper les locaux de gaines verticales débouchant sur le toit.

L'air est aspiré du local sous l'effet aussi bien du tirage thermique que du vent. On notera toutefois que la quantité d'air extraite ne peut pas dépasser la quantité d'air qui pénètre dans la pièce. Cela suppose que chaque local soit doté d'une grille de ventilation supplémentaire.

On comprend donc que le placement d'une gaine de ventilation verticale dans chaque local est une solution peu pratique.

7.45 Combinaison de grilles et de gaines de ventilation

Il est possible d'atténuer les inconvénients des systèmes de ventilation décrits ci-dessus en combinant de manière judicieuse des grilles de ventilation et des gaines de ventilation verticales.

On respectera les principes suivants :

- des grilles de ventilation d'amenée d'air ou des petits châssis tombants seront placés dans les locaux de séjour et les chambres à coucher
- des gaines de ventilation d'évacuation d'air seront placées dans les cuisines, les salles de bains et les W.-C.
- une circulation d'air doit pouvoir se faire vers les cuisines, les salles de bains et les W.-C.

Les grilles de ventilation d'amenée d'air peuvent être incorporées dans la menuiserie ou dans une paroi pleine. Elles sont placées et conçues de manière à ne pas provoquer de courants d'air, en utilisant par exemple des déflecteurs pour diriger le flux d'air vers le plafond.

L'emploi de gaines de ventilation verticales débouchant au-dessus du toit permet de créer dans le bâtiment des zones de dépression favorisant la circulation interne de l'air. Ces gaines seront placées en premier lieu dans les locaux où la production d'humidité ou l'émanation d'odeurs demandent une bonne ventilation, c'est-à-dire dans les cuisines, les salles de bains, les W.-C., etc. Ces locaux ne peuvent pas être pourvus d'ouvertures de ventilation en façade.

Les gaines de ventilation (évacuation d'air) doivent répondre aux conditions suivantes :

- être munies d'une grille directement sous le plafond du local dans lequel elles aboutissent
- aboutir au-dessus du toit à une hauteur suffisante pour éviter le refoulement.

Les grilles et les gaines de ventilation doivent avoir des dimensions suffisantes. Des essais et des études sont encore en cours à ce sujet. De prime abord, on peut établir que l'ouverture minimale libre des grilles et gaines de ventilation doit être de l'ordre de 100 cm² par local.

Les ouvertures de ventilation situées en façade et les gaines de ventilation verticales doivent être pourvues de grilles réglables, afin de pouvoir réguler le débit de ventilation en fonction des conditions de climat extérieur (vent fort par exemple) ou des besoins en air frais (personnes présentes).

Selon le paramètre prédominant (tirage thermique ou action du vent), la ventilation de l'habitation s'établit comme le représentent les figures 27 et 28.

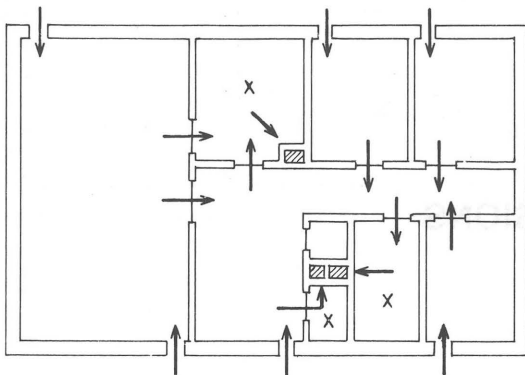


Fig. 27 — Ventilation par tirage thermique.

x locaux en dépression

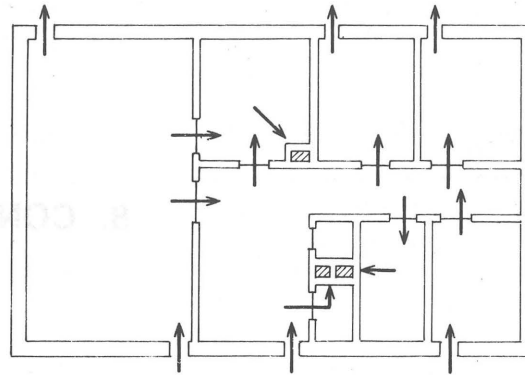


Fig. 28 — Ventilation due à l'action du vent.

Remarque

Il peut être utile de pourvoir les gaines de ventilation verticales d'un extracteur mécanique pour permettre d'activer la ventilation à certains moments (par exemple lorsqu'il n'y a pas de vent et que la température extérieure est relativement élevée, lorsqu'il y a temporairement une forte production d'humidité, etc.).

7.46 Commentaire final

Il résulte des essais précités effectués par le TNO (*) et des mesures réalisées par le C.S.T.C. :

- qu'avec des portes intérieures fermées, certains locaux ont un taux de ventilation plus élevé que la moyenne du bâtiment, et que d'autres locaux ont un taux de ventilation inférieur à la moyenne
- que les ouvertures de ventilation en position ouverte (fenêtres ou grilles) situées dans des façades en dépression, engendrent des débits de ventilation plus bas que les mêmes ouvertures situées dans des façades en surpression
- que, même dans le cas de bâtiments présentant une mauvaise étanchéité à l'air, les chambres à coucher situées du côté des façades en dépression ont un débit de ventilation insuffisant.

Ces constatations font apparaître que les chambres à coucher sont des locaux vulnérables sur le plan de la ventilation. C'est probablement pour cette raison qu'on déplore très souvent la formation de moisissures dans les chambres à coucher. Les petits châssis tombants ou les grilles de ventilation de ces locaux doivent être ouverts durant la période d'occupation, même si le bâtiment est insuffisamment étanche à l'air.

(*) Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, Nederland.

8. CONCLUSIONS

1. Les dégâts dans les bâtiments dus à l'apparition de moisissures sont devenus assez fréquents ces dernières années.

L'air contient normalement des spores de moisissures, qui ne se développent que si les conditions sont favorables, c'est-à-dire principalement lorsqu'il y a une humidité suffisante.

2. Dans beaucoup de cas la présence d'humidité dans les bâtiments est due :
 - à l'humidité de construction pendant les premières années suivant l'édification du bâtiment
 - à l'adsorption hygroscopique de l'humidité de l'air par les matériaux de construction, les finitions, le mobilier, etc.
 - à la condensation superficielle sur les parois opaques.
3. Pour que l'humidité de construction puisse sécher le plus rapidement possible, il faut :
 - ventiler convenablement le bâtiment et chauffer les locaux raisonnablement en période hivernale
 - ne pas empêcher le séchage des éléments de construction par une exécution trop rapprochée des travaux de finition avec des matériaux freinant la vapeur d'eau.
4. On peut maintenir le taux d'humidité hygroscopique des matériaux de construction et du mobilier dans des limites non dommageables en limitant l'humidité relative de l'air ambiant. Pour cela, il faut ventiler les locaux correctement et si nécessaire les chauffer suffisamment.

5. Pour éviter la formation de condensation superficielle, il est nécessaire de maintenir la température superficielle des parois à un niveau suffisamment élevé et de limiter en même temps la teneur en humidité de l'air intérieur.

On peut élever la température superficielle en isolant convenablement toutes les parois extérieures et en assurant un chauffage suffisant.

Une bonne ventilation permet de réduire le taux d'humidité de l'air intérieur.

Il est à noter cependant que la formation de condensation superficielle passagère est inévitable dans certains locaux (cuisines, salles de bains, etc.), même lorsque les parois sont très bien isolées. Si de la condensation se forme, on prendra le plus rapidement possible les mesures nécessaires pour faire sécher l'humidité condensée (par exemple en assurant une meilleure ventilation après le bain, pendant la préparation des repas, etc.).

6. Les éléments de construction opaques doivent être isolés de manière à atteindre un facteur de température de 0,70 au minimum. Pour les parois pleines, cette exigence conduit à une valeur k maximale de $1,69 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. On rencontrera des difficultés pour obtenir un facteur de température suffisamment élevé principalement au droit des ponts thermiques.

En règle générale, il faut éviter les ponts thermiques en pratiquant des coupures thermiques. Si cette solution s'avère difficile à appliquer en raison de la complexité du pont thermique, une étude spéciale s'impose. Les résultats des calculs donnés dans cette Note peuvent être une aide pour cette étude.

7. Les résultats de mesures effectuées dans des habitations ventilées naturellement permettent de conclure que la limite de 95 % des débits de ventilation réalisés dans la pratique est inférieure à $10 \text{ m}^3/\text{h}$ personne.

Il faut remarquer :

- qu'une ventilation trop faible peut être nuisible à la santé puisque les substances nocives produites par les occupants eux-mêmes sont insuffisamment évacuées
- qu'un débit de ventilation de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ personne ne garantit certainement pas une ambiance confortable (exemple d'odeurs) dans un local.

8. Même si les parois sont très bien isolées, on ne peut obtenir des températures superficielles suffisantes dans des locaux occupés que si la température ambiante y est assez élevée.

Si, néanmoins, on désire ne pas chauffer certains locaux occupés (des chambres à coucher par exemple) en période hivernale froide et sèche, la formation de condensation superficielle ne pourra être évitée qu'en augmentant le débit de ventilation. On peut vérifier si la ventilation est suffisante en contrôlant l'humidité relative de l'air du local.

Durant les périodes où la température extérieure n'est pas trop basse et où le taux d'humidité de l'air extérieur est élevé (temps pluvieux ou brumeux), il est recommandé de ne pas adopter une température intérieure trop basse mais de chauffer et de ventiler suffisamment.

9. Une mauvaise étanchéité de l'enveloppe du bâtiment peut occasionner d'importantes infiltrations d'air. On pourrait par exemple exiger pour l'étanchéité à l'air des locaux ou des bâtiments que le débit d'infiltration d'air ne dépasse pas 0,5 volume à l'heure pendant 99,5 % de la saison de chauffe, en tenant compte des différences de pression dues au vent et des écarts de température, et en considérant que tous les orifices et baies ouvrants sont fermés.

Selon la longueur des joints des fenêtres et des portes, il semble qu'une telle condition n'aura pas comme conséquence dans la plupart des cas, des exigences très sévères pour l'étanchéité des fenêtres et des portes.

On voit en effet dans le tableau 21 (p. 59) que la différence de pression maximale sur une façade sera inférieure à $\approx 63 \text{ Pa}$ dans la plus grande partie du pays et pendant 99,5 % de la saison de chauffe.

Considérons un local relativement petit de $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2,80 \text{ m}$, c'est-à-dire d'un volume de $25,20 \text{ m}^3$ avec une fenêtre plutôt grande, d'une longueur de joints totale de 8 m .

Dans les conditions les plus défavorables, c'est-à-dire

- vent pratiquement perpendiculaire à la façade
- calcul effectué avec la vitesse du vent qui est dépassée pendant seulement 0,5 % de la saison de chauffe
- façade opposée à la direction du vent et toutes les cloisons intérieures avec une très mauvaise étanchéité

le débit d'air d'infiltration dans le local sera donné par :

$$V_{\text{inf}} = 8 \times a \left(\frac{\Delta p}{100} \right)^{2/3} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (22)$$

$$V_{\text{inf}} = 8 \times a \left(\frac{63}{100} \right)^{2/3} \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

ou

$$V_{\text{inf}} = 5,88 \times a \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

Si les fenêtres ont un coefficient de perméabilité a respectivement égal à 6, 3 ou 2 m³/hm 100 Pa, on a les débits d'infiltration suivants :

- pour $a = 6$ m³/hm 100 Pa, $V_{inf} = 35,28$ m³/h
- pour $a = 3$ m³/hm 100 Pa, $V_{inf} = 17,64$ m³/h
- pour $a = 2$ m³/hm 100 Pa, $V_{inf} = 11,76$ m³/h.

Ces valeurs ne seront atteintes que pendant 0,5 % de la saison de chauffe pour un bâtiment situé dans la région centrale de Belgique dans un environnement non protégé, et cela uniquement dans les locaux situés du côté de la façade sur laquelle le vent souffle directement.

Pour le local considéré dans notre exemple (25,20 m³), on trouve les taux de ventilation suivants :

- pour $a = 6$ m³/hm 100 Pa, $n = 1,4$
- pour $a = 3$ m³/hm 100 Pa, $n = 0,7$
- pour $a = 1$ m³/hm 100 Pa, $n = 0,47$.

Il faut cependant observer que pour ces taux de ventilation, le volume d'air qui s'infiltré dans le bâtiment sert à ventiler non seulement le local considéré mais également les locaux situés du côté de la façade opposée.

On doit donc encore diviser les taux de ventilation trouvés par 2 environ pour pouvoir les appliquer au bâtiment entier.

On peut donc tirer comme conclusion générale qu'exiger une étanchéité supérieure à $a = 6$ m³/hm 100 Pa pour des portes et des fenêtres n'est pas justifié, du point de vue confort et économie d'énergie, pour des bâtiments sans ventilation mécanique, de hauteur normale.

10. Dans des bâtiments ventilés naturellement, on ne pourra atteindre un débit de ventilation suffisant pendant la plus grande partie de la saison de chauffe qu'en recourant aux moyens de ventilation existants, comme par exemple l'ouverture des fenêtres, des grilles ou des gaines de ventilation. Toutes ces techniques de ventilation s'avèrent toutefois présenter un certain nombre d'inconvénients.

Il semble bien que le meilleur moyen de ventiler un bâtiment soit de combiner grilles et gaines de ventilation. Les gaines seront placées dans les locaux avec production de vapeur abondante ou dégagement d'odeurs (salles de bains, cuisines, W.-C.) et les grilles dans les autres locaux.

La section minimale préconisée pour les grilles et les gaines de ventilation est de 100 cm².

Les grilles doivent pouvoir se fermer de façon à ce que l'exigence $n < 0,5$ h⁻¹ puisse encore être satisfaite en cas de vent violent.

Toutefois, s'il apparaît que les fermetures réglables des grilles peuvent être difficilement rendues suffisamment étanches et que, par conséquent, il n'est plus satisfait à l'exigence $n < 0,5$ h⁻¹, il est évident que poser, pour certains éléments de construction, des exigences d'étanchéité très sévères qui rendent nécessaires le placement de grilles de ventilation, ne se justifie pas économiquement, puisque l'utilisation de ces grilles réduirait à néant l'exigence d'étanchéité posée pour ces éléments.

Il serait beaucoup plus logique d'abaisser le niveau des exigences posées pour ces éléments de façon à réduire l'utilité des grilles et des gaines de ventilation, afin d'aboutir à un ensemble d'exigences cohérent.

9. CONSEILS POUR L'OCCUPATION DES BATIMENTS

On a considéré dans cette Note le « comportement d'occupation » d'un bâtiment, c'est-à-dire la production de vapeur, les températures et les débits de ventilation réalisés, comme une donnée stationnaire.

En réalité, le « comportement d'occupation » n'est pas une donnée stationnaire, mais une donnée dynamique.

Le « comportement d'occupation » dynamique peut avoir une influence aussi bien positive que négative sur l'apparition des dégâts suite aux moisissures dues à la condensation superficielle ou à un taux d'humidité hygroscopique trop élevé des matériaux. Cela signifie que si le comportement d'occupation dynamique permet d'éviter des problèmes, il peut tout aussi bien les favoriser. Nous illustrons ceci à l'aide de quelques exemples.

9.1 DIFFUSION DE VAPEUR DANS L'HABITATION

Si des occupants ont contracté la mauvaise habitude de laisser la vapeur, produite dans des endroits bien précis (cuisine, salle de bains, buanderie), se propager dans le bâtiment et pénétrer, par exemple, dans des locaux non chauffés, il est évident que l'humidité relative va augmenter dans ces locaux avec pour conséquence :

- un taux d'humidité hygroscopique plus élevé des matériaux
- la formation éventuelle de condensation superficielle sur les parois ou sur certaines parties de celles-ci dans les locaux non chauffés.

On peut donner les exemples suivants :

- ouverture de la porte de la cuisine pendant la cuisson des repas ou immédiatement après celle-ci
- ouverture de la porte de la salle de bains après avoir pris un bain.

Il convient de prendre des mesures afin d'empêcher la diffusion de la vapeur dans l'habitation, c'est-à-dire que la vapeur doit être évacuée du local où elle est produite, directement vers l'extérieur, par exemple :

- en ouvrant les fenêtres de la cuisine pendant la cuisson des repas, en ouvrant celles de la salle de bains après un bain et en tenant fermées les portes intérieures de ces locaux, à moins d'être pratiquement sûr qu'en ouvrant la porte de la salle de bains, il n'entrera que de l'air (par exemple, s'il y a une gaine de ventilation qui, par l'effet de succion, produit un mouvement d'air dans un seul sens)
- en faisant fonctionner un ventilateur permettant d'augmenter le débit de ventilation (par exemple une hotte dans une cuisine).

9.2 VENTILATION PERIODIQUE

Un déséquilibre momentané entre la température et le débit de ventilation dans un local en fonction de la production d'humidité dans ce local, avec pour conséquence une humidité relative trop élevée et éventuellement la formation de condensation superficielle favorisant l'apparition de moisissures, peut être évité par une ventilation temporairement plus importante (par exemple en ouvrant complètement les fenêtres = ventilation périodique), ce qui permet d'évacuer rapidement le surplus d'humidité et de faire sécher la condensation superficielle qui pourrait s'être formée.

Dans les chambres à coucher, par exemple où le rapport température/ventilation est trop bas durant la période d'occupation, on peut empêcher les problèmes d'humidité en ventilant abondamment pendant la journée. Dans ce cas, les fenêtres devraient rester ouvertes pendant 2 heures au moins afin de permettre à l'humidité condensée de sécher.

9.3 CONSEILS

1. Il y a lieu d'éviter autant que possible la diffusion de vapeur dans l'habitation, surtout dans des locaux non chauffés. A cette fin, il est utile de laisser les portes fermées dans les locaux où la production de vapeur est importante (par exemple les portes des cuisines pendant ou après la cuisson des repas, les portes des salles de bains pendant ou après un bain ou une douche). De même, il est préférable de fermer les portes des locaux non chauffés.
2. La vapeur produite sera évacuée aussi rapidement que possible vers l'extérieur, par exemple en faisant fonctionner la hotte dans la cuisine pendant la cuisson des repas, en améliorant la ventilation dans la salle de bains après un bain ou une douche.
3. La formation passagère de condensation superficielle dans les cuisines pendant la cuisson des repas et dans les salles de bains pendant un bain ou une douche est inévitable. On veillera toutefois à ce que l'humidité condensée puisse sécher ensuite le plus rapidement possible. A cet effet, il est nécessaire d'intensifier momentanément la ventilation dans ces locaux.
4. Les machines à sécher le linge produisent de grandes quantités de vapeur. Celle-ci doit être évacuée directement de l'appareil vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un conduit adéquat.
5. Lorsqu'on fait sécher du linge à l'intérieur, on veillera à ce que l'eau d'évaporation soit évacuée le plus vite possible. Une ventilation convenable du local de séchage est absolument nécessaire.
6. On emploiera les grilles de ventilation prévues, surtout dans les chambres à coucher. Elles peuvent être réglées en fonction des besoins. Elles ne seront fermées qu'en cas de vent violent.
7. On ne calfeutrer pas les joints de fenêtres à l'intérieur avec des bandes adhésives. Des mesures ne s'imposent vraiment que si on est régulièrement gêné par des courants d'air. Il est absurde de prétendre que le vacillement de la flamme d'une bougie placée devant les joints d'une fenêtre lorsqu'il y a du vent, est une preuve de la mauvaise qualité du châssis.
8. Il est souhaitable de ne pas abaisser la température en dessous de 10 °C dans des locaux occupés, surtout par temps humide et pas très froid.
9. La formation d'une légère condensation superficielle sur des doubles vitrages (bord des vitres) n'a rien d'exceptionnel. Cependant, si cette condensation est abondante, cela signifie que les conditions d'occupation sont inadaptées. La mesure qui s'impose en premier lieu est d'améliorer la ventilation du local.
10. Lorsqu'on désire ne pas chauffer certains locaux occupés, il est nécessaire de ventiler ces locaux convenablement. On peut vérifier si la ventilation est suffisante en contrôlant l'humidité relative de l'air du local.

ELABORATION DES FORMULES UTILISEES

1. LOI GENERALE DES GAZ

Selon la loi générale des gaz, les gaz parfaits répondent à la formule

$$pV = GRT \quad (a)$$

avec p pression absolue du gaz (Pa)

V volume du gaz (m^3)

G masse du gaz (kg)

R constante du gaz (J/kgK)

T température absolue (K)

Un mélange gazeux répond à la formule

$$p_t = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (b)$$

avec p_t pression totale du mélange gazeux (Pa)

p_1, p_2, \dots, p_n pression partielle de chaque composant (Pa)

2. RELATION PRESSION DE VAPEUR/TAUX D'HUMIDITE DE L'AIR

Considérons un volume V (m^3) d'air humide à la température T .

L'air humide se compose d'air sec et de vapeur d'eau.

Suivant (b), la formule de l'air humide est exprimée par

$$p_a = p_L + p \quad (c)$$

avec p_a pression atmosphérique (Pa)

p_L pression de l'air sec (Pa)

p pression de la vapeur d'eau (Pa)

Par approximation, on peut considérer que l'air sec et la vapeur d'eau se comportent comme des gaz parfaits.

Il découle alors de (a) que :

$$p_L = \frac{G_L R_L T}{V} \quad (\text{pour l'air sec}) \quad (c_1)$$

$$p = \frac{G_D R_D T}{V} \quad (\text{pour la vapeur d'eau}) \quad (c_2)$$

et, après substitution en (c), que :

$$p_a = \frac{G_L R_L T}{V} + \frac{G_D R_D T}{V}$$

ou

$$\frac{p_a V}{G_L T R_D} = \frac{R_L}{R_D} + \frac{G_D}{G_L}$$

La relation $\frac{G_D}{G_L} = x$ définit la teneur en humidité x de l'air, exprimée en kg de vapeur d'eau par kg d'air sec.

L'expression précédente devient alors :

$$\frac{p_a V}{G_L T R_D} = \frac{R_L}{R_D} + x$$

$$\text{Avec } G_L = \frac{p_L V}{T R_L} = \frac{(p_a - p) V}{T R_L}$$

on trouve finalement :

$$x = \frac{R_L}{R_D} \frac{p}{p_a - p} \quad (\text{kg/kg}) \quad (d)$$

$$\begin{aligned} \text{Avec } R_L &= 287,1 \text{ J/kg K} \\ R_D &= 462 \text{ J/kg K} \end{aligned}$$

on a :

$$\frac{R_L}{R_D} = \frac{287,1}{462} = 0,621$$

Dans la littérature scientifique, les valeurs de x , au lieu d'être exprimées en kg/kg, sont généralement exprimées en g de vapeur d'eau par kg d'air sec.

L'expression (d) s'écrit alors :

$$x = \frac{621 p}{p_a - p} \quad (\text{g/kg}) \quad (e)$$

3. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

L'humidité relative de l'air φ est définie par :

$$\varphi = \frac{p}{p'} \times 100 \quad (\%) \quad (f)$$

Il découle de (e) que :

$$p = \frac{x p_a}{x + 621} \quad (f_1) \quad \text{et} \quad p' = \frac{x_s p_a}{x_s + 621} \quad (f_2)$$

avec p' pression de vapeur de saturation
 x_s taux de vapeur d'eau de saturation

Compte tenu de ces expressions, (f) devient :

$$\varphi = \frac{x (x_s + 621)}{x_s (x + 621)} \times 100 \quad (\%) \quad (g)$$

d'où

$$x = \frac{621 \varphi x_s}{621 + x_s (1 - \varphi)} \quad (\text{g/kg}) \quad (h)$$

Dans le texte de la Note, l'expression (g) porte le numéro (1) (p. 8).

4. TAUX D'HUMIDITE DE L'AIR INTERIEUR

4.1 Cas sans formation de condensation superficielle

Considérons un local avec une production de vapeur D (kg/h).

L'air extérieur amené par la ventilation apporte G_{Le} (kg/h) d'air sec et G_{De} (kg/h) de vapeur. En outre, G_{Li} (kg/h) d'air intérieur sec et G_{Di} (kg/h) de vapeur d'eau sont évacués vers l'extérieur.

Dans des conditions stationnaires, on a :

$$G_{Le} + G_{De} + D = G_{Li} + G_{Di} \quad (\text{kg/h}) \quad (i)$$

Dans des conditions stationnaires, on a aussi :

$$G_{Le} = G_{Li}$$

de sorte que la relation précédente devient :

$$G_{De} + D = G_{Di} \quad (\text{kg/h})$$

ou

$$\frac{G_{De}}{G_{Le}} + \frac{D}{G_{Le}} = \frac{G_{Di}}{G_{Li}}$$

Suivant la définition du taux de vapeur d'eau x , on a :

$$\frac{G_{De}}{G_{Le}} = x_e \quad \text{et} \quad \frac{G_{Di}}{G_{Li}} = x_i$$

de sorte que l'expression (i) devient :

$$x_e + \frac{D}{G_{Le}} = x_i \quad (\text{kg/kg}) \quad (j)$$

Il découle

— de (a) (p. 77) que :

$$G_{Le} = \frac{p_{Le} V_e}{T_e R_L} = \frac{(p_a - p_e) V_e}{T_e R_L}$$

— de (d) (p. 78) que :

$$p_e = \frac{x_e p_a}{x_e + \frac{R_L}{R_D}}$$

et suivant les lois des gaz, il s'avère que :

$$\frac{V_e}{T_e} = \frac{V_i}{T_i}$$

d'où

$$V_e = \frac{V_i T_e}{T_i}$$

Par substitution de ces expressions en (j), on trouve :

$$x_i = x_e + \frac{D R_D T_i}{V_i p_a} \left(x_e + \frac{R_L}{R_D} \right) \quad (\text{kg/kg}) \quad (k)$$

Dans cette relation, V_i représente le débit de ventilation du local considéré, c'est-à-dire le nombre de m^3 d'air intérieur évacué par heure.

On a donc :

$$V_i = nV_L$$

avec n taux de ventilation (h^{-1})

V_L volume de la pièce (m^3)

En outre, on a :

$$T_i = 273 + \theta_i \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\frac{p_a}{R_D} = \frac{101.396}{462} = 219,47 \text{ (Pa K kg/J)}$$

$$\frac{R_L}{R_D} = 0,621$$

Par substitution de ces valeurs en (k), on trouve :

$$x_i = x_e + \frac{(273 + \theta_i)}{219,47} \frac{D}{nV_L} (x_e + 0,621) \text{ (kg/kg)}$$

et, avec x_i et x_e exprimés en g/kg au lieu de kg/kg, on a :

$$x_i = x_e + \frac{(273 + \theta_i)}{219,47} \frac{D}{nV_L} (x_e + 621) \text{ (g/kg)} \quad (l)$$

En remplaçant x_e par l'expression (h), on trouve :

$$x_i = \frac{621 \varphi_e x_{se}}{621 + x_{se} (1 - \varphi_e)} + \frac{(273 + \theta_i) (621 + x_{se}) 621}{219,47 [621 + x_{se} (1 - \varphi_e)]} \frac{D}{nV_L}$$

En admettant que $621 + x_{se} (1 - \varphi_e) \approx 621$

l'expression précédente devient :

$$x_i = \varphi_e x_{se} + \frac{(273 + \theta_i) (621 + x_{se})}{219,47} \frac{D}{nV_L} \quad (m)$$

Dans la pratique, θ_i et x_{se} varient généralement entre les valeurs suivantes :

$$10^\circ\text{C} \leq \theta_i \leq 20^\circ\text{C}$$

$$1,6 \text{ g/kg} \leq x_{se} \leq 14,7 \text{ g/kg}$$

Avec ces valeurs, $\frac{(273 + \theta_i) (621 + x_{se})}{219,47}$ varie de 802,82 à 848,68

Etant donné l'incertitude du facteur $\frac{D}{nV_L}$ on peut admettre pour $\frac{(273 + \theta_i) (621 + x_{se})}{219,47}$ une valeur moyenne de 825

L'expression (m) devient alors

$$x_i = \varphi_e x_{se} + 825 \frac{D}{nV_L} \text{ (g/kg)} \quad (n)$$

Dans le texte de la Note, l'expression (n) porte le numéro (2) (p. 14).

4.2 Cas avec formation de condensation superficielle

Une certaine quantité d'humidité est extraite de l'air par condensation.

L'expression (i) (p. 79) doit donc être formulée comme suit :

$$G_{Le} + G_{De} + D - K = G_{Li} + G_{Di}$$

avec K quantité d'humidité condensée (kg/h)

Puisque dans des conditions stationnaires $G_{Le} = G_{Li}$, on a :

$$\frac{G_{De}}{G_{Le}} + \frac{D}{G_{Le}} - \frac{K}{G_{Le}} = \frac{G_{Di}}{G_{Li}}$$

ou

$$x_e + \frac{D}{G_{Le}} - \frac{K}{G_{Le}} = x_i \quad (\text{kg/kg})$$

L'équation est identique à l'équation (i) moins la valeur $\frac{K}{G_{Le}}$

Par conséquent, le résultat devient :

$$x_i = x_e + \frac{D R_D T_i}{n V_L p_a} \left(x_e + \frac{R_L}{R_D} \right) - \frac{K}{G_{Le}} \quad (\text{kg/kg}) \quad (p)$$

$$\text{Avec } K = 3.600 \Sigma A \beta_i (p_i - p'_{sA}) = 3.600 p_a \frac{R_L}{R_D} \Sigma A \beta_i \left[\frac{x_i - x_{sA}}{\left(x_i + \frac{R_L}{R_D} \right) \left(x_{sA} + \frac{R_L}{R_D} \right)} \right] \quad (\text{kg/h})$$

où ΣA surface des parois sur lesquelles se produit la condensation

β_i coefficient de transmission de la vapeur d'eau à la surface A ($\beta_i = 22.10^{-9} \text{ s/m}$)

p'_{sA} et x_{sA} pression de vapeur de saturation et taux d'humidité de saturation correspondant à la surface de condensation

$$\text{et avec } G_{Le} = \frac{p_a n V_L}{T_i R_D \left(x_e + \frac{R_L}{R_D} \right)} \quad (\text{voir p. 79, § 4.1})$$

l'expression (p) devient :

$$x_i = x_e + \frac{D R_D T_i}{n V_L p_a} \left(x_e + \frac{R_L}{R_D} \right) - \frac{3.600 R_L T_i \Sigma A \beta_i}{n V_L} \left[\frac{(x_i - x_{sA}) \left(x_e + \frac{R_L}{R_D} \right)}{\left(x_i + \frac{R_L}{R_D} \right) \left(x_{sA} + \frac{R_L}{R_D} \right)} \right] \quad (\text{kg/kg})$$

ou

avec x_e , x_i et x_{sA} exprimés en g/kg

$$\frac{R_L}{R_D} = 0,621$$

$$T_i = (273 + \theta_i)$$

$$R_L = 287,1 \text{ J/kg K}$$

$$\beta_i \text{ coefficient de transmission de la vapeur d'eau à la surface A} = 22.10^{-9} \text{ s/m}$$

l'expression (p) devient :

$$x_i = x_e + \frac{(273 + \theta_i)}{219,47} \frac{D}{n V_L} (x_e + 621) - \frac{22,738 (273 + \theta_i) \Sigma A}{n V_L} \left[\frac{(x_i - x_{sA}) (x_e + 621)}{(x_i + 621) (x_{sA} + 621)} \right] \quad (\text{g/kg}) \quad (q)$$

Après avoir résolu l'équation (q) vers x_i et en admettant que $x_i^2 \approx x_i x_e$
on a :

$$x_i = \frac{x_e + \frac{273 + \theta_i}{219,47} \frac{D}{nV_L} (x_e + 621) + \frac{22,738 (273 + \theta_i)}{621} \frac{\Sigma A}{nV_L} \frac{x_{sA} (x_e + 621)}{x_{sA} + 621}}{1 + \frac{(273 + \theta_i) (x_e + 621)}{621} \left[\frac{22,738}{x_{sA} + 621} \frac{\Sigma A}{nV_L} - \frac{D}{219,47 nV_L} \right]} \quad (\text{g/kg}) \quad (r)$$

Dans cette expression, le terme

$$x_e + \frac{273 + \theta_i}{219,47} \frac{D}{nV_L} (x_e + 621) = x_i^0$$

représente le taux d'humidité de l'air lorsqu'il n'y a pas formation de condensation superficielle.

Le terme $\frac{D}{219,47 nV_L}$ est négligeable dans de nombreux cas de sorte que (r) peut être exprimé comme

suit :

$$x_i = \frac{x_i^0 + 0,0366 (273 + \theta_i) \frac{x_{sA} (x_e + 621)}{x_{sA} + 621} \frac{\Sigma A}{nV_L}}{1 + 0,0366 (273 + \theta_i) \frac{x_e + 621}{x_{sA} + 621} \frac{\Sigma A}{nV_L}} \quad (\text{g/kg}) \quad (s)$$

On pose :

$$\frac{0,0366 (273 + \theta_i) (x_e + 621)}{x_{sA} + 621} = a$$

L'expression (s) devient alors :

$$x_i = \frac{x_i^0 + a x_{sA} \frac{\Sigma A}{nV_L}}{1 + a \frac{\Sigma A}{nV_L}} \quad (\text{g/kg}) \quad (t)$$

Dans des conditions hivernales, $x_e \leq 7 \text{ g/kg}$ et x_{sA} et θ_i varient entre les limites suivantes :

$$2,5 \text{ g/kg} \leq x_{sA} \leq 12,0 \text{ g/kg}$$

$$10 \text{ °C} \leq \theta_i \leq 20 \text{ °C}$$

Compte tenu de ces valeurs, a varie de 10,32 à 10,64 ou $a_{\text{moyen}} = 10,48$

On peut alors écrire l'expression (t) comme suit :

$$x_i = \frac{x_i^0 + 10,48 \frac{\Sigma A}{nV_L}}{1 + 10,48 \frac{\Sigma A}{nV_L}} \quad (\text{g/kg}) \quad (u)$$

Dans le texte de cette Note, l'expression (u) porte le numéro (3) (p. 17).

Bibliographie

1. Bangerter, H.
Verhütung von Feuchtigkeitsschäden an Wand-Innenecken. Zürich, Installation, n° 6, juin 1981.
2. Brétry, J., Sacré, C. et Simiu, E.
Mean wind profiles and change of terrain roughness. New York, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Structural Division, vol. 104, n° ST 10, octobre 1978.
3. ...
Control of lichens, moulds and similar growths. Garston (Watford), B.R.E. Digest, n° 139, 2^e édition, 1977.
4. de Gids, W.F.
Natural ventilation and energy consumption of dwellings. Delft, IMG-TNO, Report C 482, juillet 1981.
5. Dogniaux, R.
Recueil de données climatologiques exigentiellles pour le calcul des gains solaires dans l'habitat et l'estimation de la consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments. Bruxelles, Institut Royal Météorologique, 1978.
6. Grimstud, D.T., Sonderegger, R.C. et Sherman, M.H.
Infiltration measurements in audit and retrofit programmes. Elsinore (Denemarken), International Energy Agency, Energy Audit Workshop.
7. Hadley, J.
Energy conservation and indoor air quality. Atlanta, ASHRAE Journal, n° 3, mars 1981.
8. Hens, H.
Bouwfysica. Warmte en vocht. Praktische problemen en toepassingen. Leuven, Uitgeverij ACCO, 1982.
9. Institut Belge de Normalisation
Projet NBN B 62-002 Calcul des coefficients de transmission thermique des parois. Bruxelles, IBN.
10. Institut National du Logement
STS 36 Menuiserie métallique. Fenêtres, façades légères et huisseries. Bruxelles, INL, 1971.
11. Institut National du Logement
STS 57 Menuiseries extérieures en bois. Fenêtres, porte-fenêtres et façades légères. Bruxelles, INL, 1973.
12. Institut National du Logement
STS 52 Addendum 51.12 Menuiserie extérieure en PVC. Fenêtres, porte-fenêtres et façades légères. Bruxelles, INL, 1981.
13. ...
Mould growth in buildings. Proceedings of a joint BRE/Paint Research Association Seminar held on 11 and 12 June 1980. Aylesbury (Buckinghamshire), B.R.E., Princes Risborough Laboratory, avril 1981.
14. Sanders, C.H.
Condensation and its treatment. Ascot (Berkshire), Building Technology and Management, vol. 18, n° 11, décembre 1980.
15. Standaert, P.
Koudebruggen. Nationaal R en D programma op het gebied van de energie, Luik E/VI/2. Technisch eindrapport 4.2. Leuven, K.U.L., Laboratorium voor Bouwfysica, avril 1983.
16. Uyttenbroeck, J. et Carpentier, G.
Evolutie van het waterdampgehalte van de lucht en van de dampdruk in gebouwen. Bruxelles, W.T.C.B., document interne.
17. ...
Ventilation mécanique contrôlée. Code de bonne pratique, 1^{re} partie. Extraction de l'air dans les logements collectifs. Bruxelles, C.S.T.C., Note d'information technique, n° 106, mars 1975.
18. ...
Ventilation mécanique contrôlée. Code de bonne pratique. 2^e partie. Extraction et insufflation de l'air dans les logements individuels et collectifs. Bruxelles, C.S.T.C., Note d'information technique, n° 119, juin 1978.

RESUME

N.I.T. 153 Problèmes d'humidité dans les bâtiments. Causes des dégradations. Ponts thermiques. Climat intérieur. Données pour la conception et l'exécution des bâtiments. Conditions d'occupation des locaux

Formation des moisissures. Facteurs à l'origine de l'humidité des bâtiments.

Le facteur de température τ .

Conditions d'occupation des bâtiments.

Ponts thermiques (définition et types, dix exemples de calcul).

Ventilation naturelle des bâtiments. Etanchéité à l'air des bâtiments et débits d'infiltration d'air.

Conseils pour l'occupation des bâtiments.

En annexe, élaboration des formules utilisées.

SAMENVATTING

T.V. 153 Vochthuishouding in gebouwen. Schadeoorzaken. Koudebruggen. Binnenklimaat. Gegevens voor ontwerp en uitvoering van gebouwen. Woonvoorwaarden van gebouwen

Ontstaan van schimmel. Factoren die aan de oorsprong van vocht in gebouwen liggen.

De temperatuurfactor τ .

Woonvoorwaarden van gebouwen.

Koudebruggen (definitie en typen, tien rekenvoorbeelden).

Natuurlijke ventilatie van gebouwen. Luchtdichtheid van gebouwen en luchtinfiltratiedebieten.

Raadgevingen voor de bewoning van gebouwen.

In bijlage, uitwerking van de gebruikte formules.

SUMMARY

T.I.N. 153 Humidity problems in buildings. Causes of deterioration. Thermal bridges. Internal climate. Data for the design and execution of buildings. Occupation conditions in rooms.

Mould formation. Factors causing dampness in buildings.

The temperature factor, τ .

Occupation conditions in buildings.

Thermal bridges (definition and types, 10 calculation examples).

Natural ventilation in buildings : airtightness of buildings and air infiltration rates.

Advice for building occupation.

Appendix : presentation of the formulae used.

ZUSAMMENFASSUNG

N.I.T. 153 Feuchtigkeitsprobleme in Gebäuden. Schadensursachen. Kältebrücken. Innenklima. Angaben für den Entwurf und die Ausführung von Gebäuden. Wohnungsbedingungen von Zimmern

Pilzbildung. Entstehen von Feuchtigkeit in Gebäuden.

Der Temperaturfaktor τ .

Wohnungsbedingungen von Gebäuden.

Kältebrücken (Definition und Typen, zehn Berechnungsbeispiele).

Natürliche Lüftung von Gebäuden. Luftdichtigkeit von Gebäuden und Luftinfiltrationsdebit.

Empfehlungen für die Bewohnung von Gebäuden.

In Anlage, Ausarbeitung der benutzten Formeln.