

Les déperditions thermiques

A) Par les parois

Selon les Lutins, la différence entre les déperditions thermiques d'une habitation construite par un architecte incompetent avec des matériaux constitués uniquement de béton et de vitrage simple, eut-il le meilleur goût, et une habitation respectant les nouvelles normes environnementales pour les habitations neuves est considérable. La première peut entraîner une consommation annuelle de fioul voisine de 60 litres/m² (correspondant à 600 kWh par m² habitable) alors que les déperditions thermiques de la seconde comprenant une isolation particulièrement performante respectant la *réglementation thermique* RT 2012 entraînera une consommation annuelle limitée à 5 litres de fioul /m². La conception d'un immeuble neuf, respectant des normes environnementales aussi sévères est naturellement totalement différente de celle d'un immeuble ancien et est fonction de la conductivité des parois.

Matière	Conductivité λ des parois¹⁾ watt/m et °C ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Flux thermique traversant les parois Coefficient déperdition ζ watt/m ² °C
<i>Parois transparentes</i>		
Air	0,024	Voir formule $\zeta = \lambda / e$
Verre	0,023 (Voir page 428)	Vitrage simple e = 4mm 5,7
		Double vitrage 4x15x4 : 1 à 1,4 selon gaz (Argon)
Le vide	-	Théoriquement nul
<i>Parois opaques</i>		
Béton plein	2	10 (pour 20 cm d'épaisseur)
Béton cellulaire ²⁾	0,09	0,45 (pour 20 cm d'épaisseur)
Monomur brique ²⁾	0,12	Argile + laine de roche
Polystyrène	0,036 à 0,058 (selon type)	Valeur moyenne 0,88 (pour e = 5 cm)
Polyuréthane	0,035	Valeur moyenne 0,44 (pour 8 cm d'épaisseur)
Laine de verre	0,034 à 0,056 (selon type)	0,225 (pour 20 cm d'épaisseur)
Bois	0,2	0,225
PVC	0,17	
<i>Métal</i>		
Aluminium	230	Une rupture du pont thermique est indispensable avec les fenêtres coulissantes en aluminium
Cuivre	386	Extrêmement important
Acier	50	Très Important
Acier inoxydable	16	5000 watts/m ² et°C pour e = 3mm
<i>Isolants minces³⁾</i>		
sous vide	Panneaux isolants PIV	Environ 0,2 (Pour une épaisseur de 3 cm)
Multicouche	Isoline Xtrem	Environ 0,2

¹⁾ Sous-entendu pour 1m d'épaisseur et pour une unité de surface du système SI soit 1m². L'épaisseur de l'isolant est, on le remarque, déterminant en ce qui concerne ses capacités d'isolation. Il convient toutefois d'être prudent à ce sujet avec certains isolants dits « minces » tels par exemple l'Isoline ou le PIV (zone ombré) et même le verre en simple vitrage

²⁾ Les murs constitués de béton cellulaire ou de briques en argile + laine de roche (Wienerberger) ont des déperditions 4 fois inférieures au niveau requis par la RT 2012 et sont conçus pour traiter les ponts thermiques aux planchers dans le neuf (Voir **cas 3** page 145). Un mur en béton cellulaire de 20 cm d'épaisseur perd environ 20 fois moins d'énergie comparativement à un mur en béton banché conventionnel de la même épaisseur !

Les lutins thermiques et :

³⁾ Les isolants minces multicouches ou comprenant des cellules fermées avec du vide seraient aussi performants à épaisseur moindre que les isolants épais traditionnels. Un isolant mince multicouches tel que **l'Isoline Xtrem**, bien qu'ayant une épaisseur voisine de 1,5 cm peut avoir un R de 5,5 entraînant des déperditions inférieures à 20 cm de laine de verre ($1/5,5 = 0,18 \text{ watt/m}^2 \text{ et } ^\circ\text{C}$)

Il convient toutefois d'être prudent à ce sujet suite à cette **guerre entre les isolants minces et épais**

Pour déterminer la puissance instantanée traversant la paroi en watts la formule suivante s'applique :

$$P = S \zeta d\theta \text{ avec :}$$

S Surface de la paroi en m^2

ζ Coefficient ζ de déperdition de la paroi en $\text{watts/m}^2 \text{ et } ^\circ\text{C}$

$d\theta$ Différence de température de part et d'autre de la paroi $^\circ\text{C}$

On parle aussi, particulièrement pour les parois opaques, de résistance thermique

La résistance thermique **R** n'est autre que l'inverse de ζ

On a $R = 1/\zeta$ de la paroi et s'exprime en $\text{m}^2 \text{ et } ^\circ\text{C/watt}$

Si l'on met deux couches isolantes de résistance **R_1** et **R_2** l'une sur l'autre la résistance de l'ensemble est égale **$R_1 + R_2$** . Par exemple :

- Si l'on fait une isolation ITI et ITE avec des isolants ayant le même coefficient de déperdition ζ égale à 0,8 on a une résistance globale double $R = 1/0,8 + 1/0,8 = 2,5$ soit un nouveau coefficient de déperdition globale $\zeta = 1/R = 0,4 \text{ watt/m}^2 \text{ et } ^\circ\text{C}$ et l'on perd deux fois moins d'énergie.

Une mauvaise interprétation des deux coefficients λ et ζ entraîne parfois des erreurs dans le calcul des pertes thermiques dans les parois. Il est possible de trouver ζ connaissant λ on a en effet $\zeta = \lambda/e$ ou $R = e/\lambda$ e étant l'épaisseur de l'isolant.

- Exemple 1 20 cm de béton $\zeta_b = 2/0,2 = 10 \text{ watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Exemple 2 20 cm de laine de verre $\zeta_v = 0,045/0,2 = 0,225 \text{ watt/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Si l'on recouvre un mur en béton plein de 20 cm d'épaisseur d'une vêtue en laine de verre de la même épaisseur on perd environ 40 fois moins d'énergie.

- Exemple 3* 4 mm de verre $\zeta = 0,023/0,004 = 5,7 \text{ watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Exemple 4 5 cm de Polystyrène $\zeta_p = 0,04/0,05 = 0,8 \text{ watt/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

en d'autre terme le béton conventionnel est une passoire

- Exemple 5 40 cm de Béton cellulaire $\zeta_{bc} = 0,09/0,4 = 0,225 \text{ watt/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Exemple 6 3 cm de Panneau PIV $\zeta_{piv} = 0,005/0,03 = 0,17 \text{ watt/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Soit environ 10 fois moins qu'un double vitrage

- Exemple 7 1 cm d'aluminium $\zeta_b = 230/0,01 = 23000 \text{ watts/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

La grande conductibilité thermique des métaux et en particulier de l'aluminium présente des inconvénients pour les ouvertures vitrées mais est au contraire intéressante dans la mesure où elle permettra d'augmenter la température de l'eau à la source froide de la PAC aquathermique dans les futurs réseaux de tuyauteries d'alimentation en eau non potable.

B) Par les vitrages

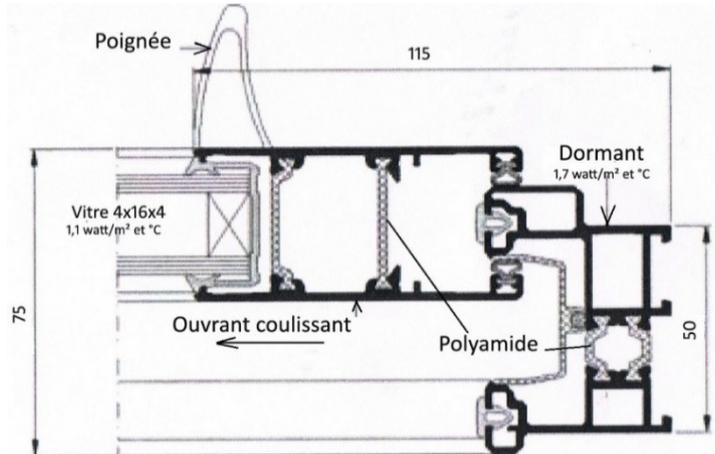
- Double vitrage 4/16/4 avec air

Couches		épaisseur e	λ	ζ	R
	Unités	mm	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	watt/m ² °C	m ² °C/ watt
	Matériaux		formules	$\zeta = \lambda/e$	$R = 1/\zeta$
1	verre	4	0,023	5,75	0,174
2	air	16	0,024	1,5	0,666
3	verre	4	0,023	5,75	0,174
	Total	24 mm	-	0,986	Σ 1,014

*La théorie utilisée dans ce tableau est basée sur la conduction des isolants épais utilisant le coefficient λ exprimé en watt/m.K. Elle permet de définir le flux thermique traversant un simple vitrage de 4 mm d'épaisseur ou celui d'un double vitrage 4/16/4 avec une précision acceptable. La recherche est par contre en retard et doit se remettre en cause afin de définir les méthodes de calculs permettant d'évaluer le flux thermique dans le cas des isolants minces réfléchissants multicouches. Compte tenu de leurs avantages pratiques, à savoir une moindre épaisseur que l'isolant épais mono produit pour des qualités d'isolation comparable voire supérieures sous certains aspects il serait dommage que le législateur thermique condamne leur introduction sur le marché pour cette raison. Pour avancer dans ce domaine la notion de conduction qui sert de base à la théorie des isolants épais doit être étendue à la convection, à la réflexion et même à l'humidité qui affecte trop souvent les performances des isolants épais.

Il peut aussi se reporter au lien suivant pour d'autre configuration incluant les triples vitrages ou des verres plus épais pour le niveau sonore

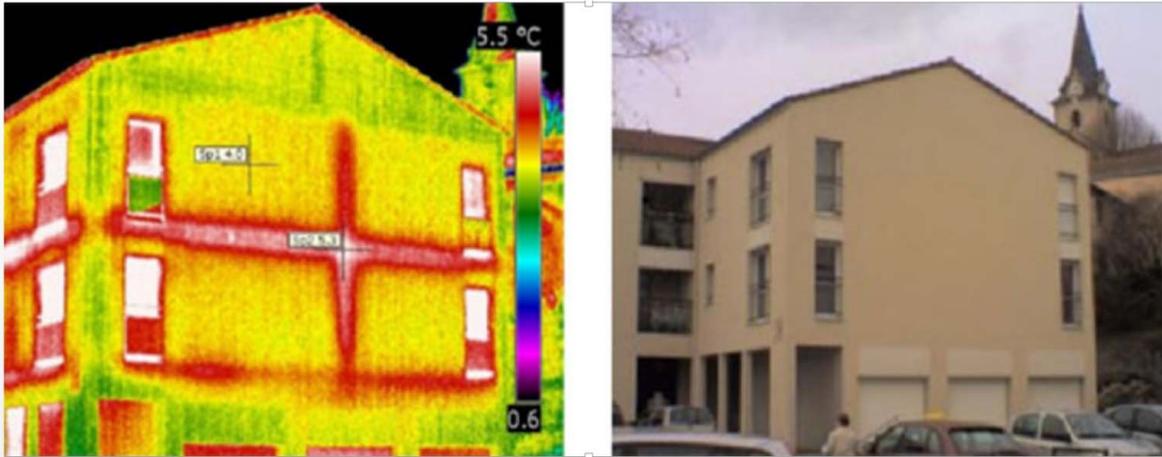
Exemple de fenêtre coulissante en aluminium (Pièces noirs) : Les pièces hachurées sont en polyamide ou en PVC insérées dans le dormant et l'ouvrant de la fenêtre. L'absence de rupture de pont thermique constitué par ces pièces hachurées augmente considérablement les déperditions thermiques. Même avec ces protections la valeur de U_g du dormant est proche de 1,7 watt/m² et °C contre 1,1 watt/m² et °C pour la vitre double vitrage avec argon.



Autre exemple d'une fenêtre triple vitrage de 0,8 m² en PVC de construction allemande, ayant un U_g de 0,7 watt/m² et °C pour un prix de vente voisin de 300 €/m²

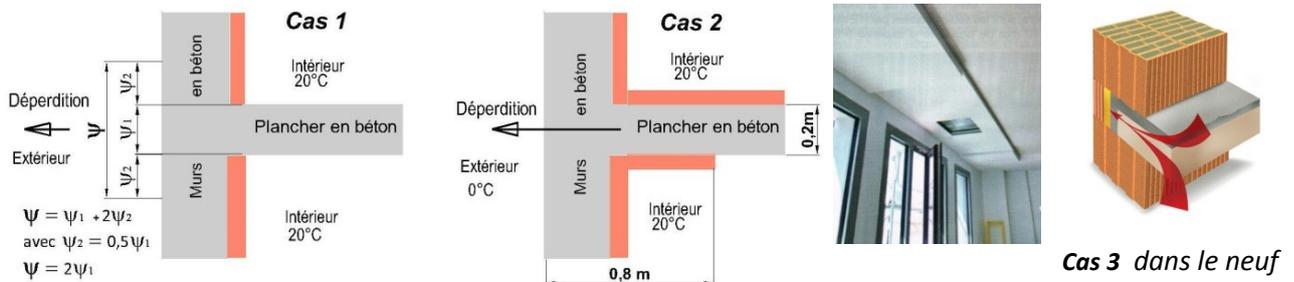


Les lutins thermiques et :



Une isolation par l'intérieur rend difficile la réduction des déperditions thermiques au niveau des planchers en béton. Outre le fait qu'elle limite la surface habitable, elle est contraignante par le fait que l'occupant doit quitter son logement pendant la rénovation thermique.

C) Par les ponts thermiques



Ponts thermiques avec isolation par l'intérieur

Cas 1 Murs seuls. On conçoit en observant la figure de gauche qu'avec ce type d'isolation les déperditions peuvent être deux à trois fois plus importantes lorsque le plancher en béton assure la fonction chauffage par le sol. Ceci par le fait que la température du plancher est alors sensiblement à 40°C alors qu'avec les radiateurs hydrauliques, il se stabilise à la température de la pièce soit 20°C. Un calcul simplifié des déperditions par mètre linéaire de ponts thermiques a été effectué page 433 dans le cadre du « cas pratique ». Ceci pour se substituer faute de moyens au calcul complexe des déperditions par la méthode aux éléments finis. Ce calcul met en évidence une déperdition voisine de 40 watts par mètre linéaire dans le cas des radiateurs pour 0°C extérieur ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$) pouvant dépasser 100 watts par mètre linéaire dans le cas des planchers chauffants et un ΔT 2 à 3 fois plus important. Plus généralement le coefficient de déperdition linéaire Ψ au niveau des planchers chauffants peut atteindre 6 watts/ml et °C au lieu de 2, voire même dépasser cette valeur dans les zones climatiques les plus défavorisées.

Cas 2 Murs avec sol et plafonds. Il est possible de réduire les déperditions en prolongeant l'isolation sur les parties horizontales. Les déperditions s'effectuant alors sur une épaisseur de 80 cm de béton, le ζ_b passe à $2/0,8 = 2,5$ watts/m² °C soit pour une épaisseur de plancher de 20 cm une déperdition au mètre linéaire de $0,2 \times 2,5 = 0,5$ watt/ml et °C nettement plus faible mais ceci au détriment du volume respirable et d'une esthétique discutable au plafond. Cette solution assez contraignante pour l'occupant qui doit quitter temporairement son logement permet de rendre les immeubles moins énergivores lorsque les façades comprennent des balcons. Ces deux exemples prouvent si besoin en était l'avantage d'une isolation par l'extérieur.

Photo Courtesy CFP

Isolation intérieure ou extérieure ?

Le prix moyen d'une isolation thermique par l'extérieur (ITE) est de l'ordre de 110 € HT/m² posé alors que celui d'une isolation thermique par l'intérieur (ITI) n'est que de l'ordre de 71 € HT/m².

Un peu moins onéreux l'isolation thermique par l'intérieur présente 3 inconvénients

- Le premier qui n'est pas le moindre est le nombre de m² habitables perdus avec l'impact négatif sur la valeur du bien et sa jouissance en cas d'occupation
- Elle oblige l'occupant à quitter le logement pendant les travaux ce qui n'est pas le cas de l'ITE
- Elle n'est pas l'occasion de refaire une beauté à d'anciennes façades parfois peu reluisantes.

Une autre considération à prendre en compte réside dans le fait qu'une absence d'isolation par l'extérieur est moins grave qu'une absence d'isolation par l'intérieur puisque l'énergie traversant la paroi dans le premier cas est totalement perdue alors qu'elle ne l'est pas dans le second puisqu'elle chauffe le voisin.

L'isolation et le ROI

La difficulté dans l'isolation d'un bâtiment est d'obtenir un ROI acceptable. Devoir investir 2 € dans l'isolation pour économiser par la suite 1 kWh annuellement dans la pose d'un isolant avec un prix de revient de l'énergie primaire de 0,1 €/kWh conduit à un temps de retour économique hors aide fiscale de 20 ans soit environ 10 ans avec une aide fiscale de 50 %. Si le Maître d'ouvrage en accord avec le syndicat des copropriétaires juge qu'un tel retour économique est trop long, il peut légitimement juger qu'il est plus intéressant de limiter l'investissement à la modernisation de la chaufferie. On bénéficie dans ce cas de l'amélioration du rendement de la chaufferie diminuant le prix de revient du kWh thermique (Chaudières nouvelle génération équipées de la condensation ou mieux d'une génération d'EnR). Une aide fiscale pouvant atteindre 50 % de l'investissement peut aussi dans ce dernier cas réduire significativement le temps de retour économique.

Un comparatif des prix montre que le prix au m² posé de l'isolation des murs opaques est sensiblement 5 fois inférieur à celui du m² posé des parois vitrées qui est voisin en France de 500 € m² posé. Si l'on observe les coefficients de déperdition qui précèdent on s'aperçoit que le gain en énergie finale par m² étant sensiblement le même on peut dire que le RSI d'une ITE n'incorporant que les parois opaques collectives seraient 5 fois plus court que le RSI de travaux n'incorporant que les parois vitrées privatives ce qui prouve bien encore une fois qu'il faut tout l'intérêt à raisonner collectif plutôt que privatif en ce qui concerne le chauffage de l'habitat.

Cas du vitrage

Estimation de retour économique pour pose de double vitrage en remplacement d'un simple vitrage ($\delta = 1$ watt/m² et °C au lieu de 5). Pour une différence de température moyenne de 10 °C, la puissance thermique moyenne perdue en moins est de 40 watts/m². Le gain annuel en énergie thermique pendant une période de chauffe de 220 jours est donc 0,04 x 220 x 24 = 211 kWh par m² (Energie = puissance x temps). En supposant que les frais d'implantation des fenêtres avec double vitrage soit de 500 €/m² posé l'investissement de départ est de 500/211 = 2,37 € par kWh économisé annuellement. A raison d'une énergie fioul à 0,09 €/kWh (correspondant sensiblement à 0,9 € le litre de fioul) le temps de retour économique est important, 2,37/0,09 = 26 ans. ROI qui devient encore plus important lorsque le prix de l'énergie primaire baisse*

Type paroi	Prix isolant posé €/m ²	Prix isolant posé exprimé en € / kWh économisé annuellement	Coût de l'énergie primaire €/ kWh (FOD) (janvier 2012)	Retour économique Années
Vitrage	500 à 800	2,37 à 3,8	0,09 €	26 à 42 ans
Pont thermique	60	0,14	0,09 €	3 ans

Exemples de paroi opaque

Calcul de retour économique en région parisienne DJU = 2200 °C avec période de chauffe de 220 j

Cas 1 Isolation par l'intérieur (ITI)

Avec pose d'un panneau isolant mince multicouches ayant un R de 5 sur un mur en béton de 20 cm non isolé ($\zeta = 10$ watts/m² et °C)

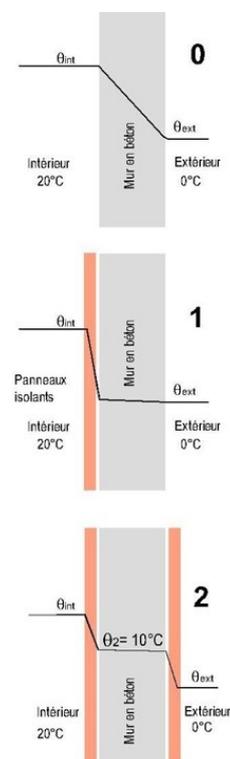
Pour un bâtiment en région parisienne ayant un DJU favorable de 2200 °C avec une période de chauffe de 220 jours, la différence de température moyenne entre l'extérieur et l'intérieur est de 10°C. Avec une puissance thermique moyenne perdue dans le béton de $10 \times 10 = 100$ watts/m², l'énergie perdue en est égale à $0,1 \times 220 \times 24 = 528$ kWh par m² (Energie = puissance x temps). Et l'énergie perdue en moins annuellement grâce à l'isolant voisin de 500 kWh

En supposant que les frais d'implantation de ce PIV soient de 100 €/m² posé (Fourniture de l'isolant de 60 €/m² + pose à 40 €/m² on investit dans la pose de cet isolant $100 / 500 = 0,2$ € par kWh économisé annuellement. À raison d'une énergie fioul à 0,09 €/kWh (correspondant sensiblement à 0,9 € le litre de fioul) on peut estimer un retour économique proche de 2 ans avec un tel isolant. On observe au travers de ces chiffres tout l'intérêt qu'il y a à se rapprocher de des isolants minces pour l'isolation intérieure en ville vu le prix du m² habitable.

Cas 2

Avec pose d'un panneau isolant sous vide (PIV) sur un mur en béton de 20 cm déjà isolé de l'intérieur par 5 cm de polystyrène

Dans ce cas le R initial est $R = 1/0,88 + 1/10 = 1,13 + 0,1 = 1,23$ soit un nouveau coefficient de déperdition globale $\zeta = 1/R = 0,88$ watt/m² et °C et un temps de retour économique sensiblement plus important.



Comparaison prix tertiaire logement conventionnel (sujet à variations selon matériaux)

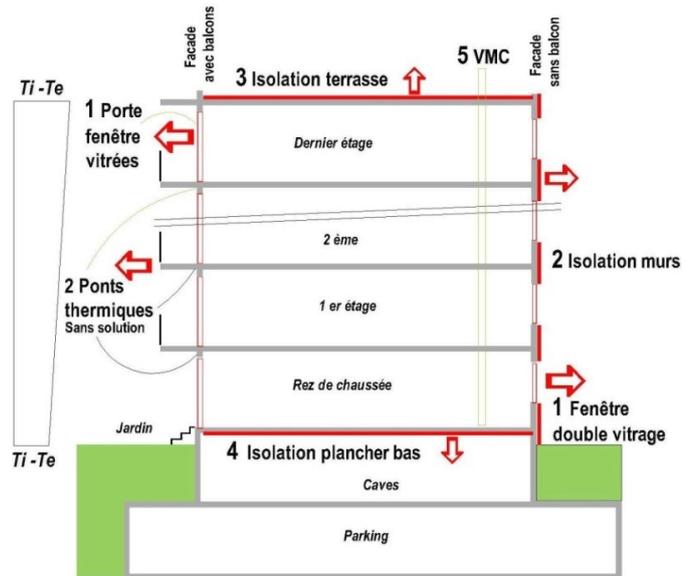
Rep	Tertiaire*	Logement conventionnel en rénovation
1	**96 €/m ² Baies vitrées avec protection solaire	Avec enlèvement du dormant 500 à 800 €/m ² selon solution (PVC ou Aluminium)
2	17 €/m ² (Pas de solution pour face avec balcons)	40
3	14 €/m ²	50
4	13 €/m ²	30

**Probablement pour vitre seule. Le fait qu'il n'y ait pas à démonter le dormant dans une construction neuve ne suffit pas à expliquer la différence des prix pratiqués entre le tertiaire et la rénovation dans l'ancien pour le repère 1

Les lutins thermiques et :

Remarques :

- Les repères 1 à 4 sont indiqués par ordre de déperdition thermique d'importance décroissante. (Source : projet réel dans le tertiaire, voir bibliographie repère 21 page 528, et d'après multiples consultations locales pour la rénovation)
- Les ponts thermiques aux planchers en béton ne peuvent pas être traités de l'extérieur sur les façades avec balcons et peuvent avec les planchers chauffants devenir très importants voire supérieures aux déperditions par les baies vitrées



La figure ci-dessus situe l'importance relative des différentes déperditions thermiques d'un immeuble. La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur diminue lorsque l'on se rapproche du sol. L'isolation du bâtiment par l'extérieur afin d'éviter les ponts thermiques au niveau des planchers n'est envisageable que sur les façades sans balcons. Le mode de chauffage utilisé pour l'immeuble (Electrique individuel fioul, gaz, PAC ou géothermie profonde) a peu d'influence sur la valeur des déperditions. A noter que les tuyauteries du circuit d'eau chaude sanitaire qui circulent dans les gaines verticales sont à l'intérieur de l'enveloppe alors que les portions horizontales des tuyauteries du circuit de chauffage sont à l'inverse à l'extérieur du bâti

Les déperditions globales dans tout le bâti

Un immeuble est en quelque sorte une enveloppe (une boîte appelée **bâti** dans les revues spécialisées) chauffée de l'intérieur en hiver et de l'extérieur en été. Evaluer le besoin thermique réel d'une habitation n'est pas simple. Les Lutins thermiques constatent que la *thermographie* ne permet pas encore d'évaluer avec une précision suffisante le coefficient de déperdition des parois et ils espèrent que cette technologie deviendra rapidement quantitative en complément de son utilité comparative actuelle. Ce sont l'ensemble des déperditions dans chacune des parois du **bâti** de l'immeuble qui conditionnent la puissance **P** que devra fournir la chaufferie.

Ce besoin en puissance est de la forme $P = k f(\Delta\theta)$,

- k étant une constante composée de la somme des déperditions des différentes surfaces composant le bâti
- et $\Delta\theta$ écart de température entre l'air intérieur et extérieur $\Delta\theta = \theta_i - \theta_e$
Par 0°C extérieur et 20°C dans les pièces de vie $\Delta\theta = 20^\circ\text{C}$
Par -10°C extérieur et 20°C dans les pièces de vie $\Delta\theta = 30^\circ\text{C}$

$P = \Delta\theta [\sum (\zeta S)]$ avec :

$$\sum (\zeta S) = \zeta_m S_m + \zeta_t S_t + \zeta_v S_v$$

ζ_m Coefficient de déperdition des murs en watt/m² °C

ζ_t Coefficient de déperdition des terrasses en watt/m² °C

ζ_v Coefficient de déperdition par les surfaces vitrées en watt/m² °C

S_m Surface des murs en m²

S_t Surface des terrasses en m²

S_v Surface des fenêtres en m²

Les lutins thermiques et :

Notas

- Il est intéressant de comparer les deux termes $\zeta_m S_m$ et $\zeta_v S_v$ en valeur relative. Lorsque les murs ne sont pas isolés, le terme $\zeta_v S_v$ peut être nettement plus faible que $\zeta_m S_m$. Dans ce cas il est souhaitable d'agir prioritairement sur l'isolation des parties communes à savoir les murs opaques.
- Le coefficient de déperdition vers le sol est souvent composé de deux termes. L'un ζ_s en watt/m² °C est fonction de l'isolation du plancher. Le deuxième dépend des déperditions dans les tuyauteries en sous-sol

Coup de gueule des Lutins

Concernant la pose des doubles vitrages, on peut s'interroger sur les raisons pour lesquelles le retour sur investissement est parfois si long. Certes la pose d'un double vitrage avec le cadre demande du travail mais avec un prix moyen de 500 à 800 €/m² posé selon les matériaux utilisés les prix français malgré une énorme concurrence sont environ 2 fois plus élevés que les prix allemands ! A titre d'information, à l'occasion de la rénovation thermique d'un immeuble à Berlin comprenant la fourniture d'un triple vitrage sur 4 fenêtres identiques en PVC blanc inter / couleur bois extérieur avec ouverture deux axes couvrant une surface totale de 7,8 m², le prix total comprenant la fourniture et la pose avec l'évacuation des anciennes fenêtres a été de 1900 € taxes comprises soit 243 €/m². Prix à comparer à celui pratiqué dans l'hexagone proche de 500 €/m² pour la plupart du temps un double vitrage. Position de monopole de St Gobain ? difficile d'expliquer pourquoi les prix de vente pratiqués en France pour les doubles ou triple vitrages sont si élevés par rapport à nos voisins allemands. La rénovation thermique des doubles et triples vitrages dans les bâtiments anciens français est pour cette raison et par la force des choses ralenties. Le dynamisme des vendeurs et le besoin thermique engendré par l'augmentation prévisible du prix des énergies fossiles sont tels que l'activité n'est pas totalement au point mort. Elle perdure en effet grâce à la vente privative (au " K par K ") qui augmente les marges du vendeur avec pour conséquence la difficulté pour le Maître d'œuvre d'obtenir un prix de rénovation globale permettant de baisser les prix et d'accélérer la rénovation thermique des immeubles. Le coût d'une rénovation de toutes les fenêtres d'un immeuble devrait permettre non seulement d'obtenir un prix quantitatif pour le matériel mais également un prix plus faible pour la main d'œuvre par le fait qu'avec l'habitude, les ouvriers mettent moins de temps pour la pose. Le rôle passif du syndic qui laisse faire et attend qu'un consensus se dessine au sein des copropriétaires, l'endormissement du législateur qui s'obstine à considérer que les fenêtres sont privatives pour la rénovation, le nombre d'intermédiaires, et enfin le fait que la société assurant la pose n'est pas nécessairement le constructeur de la fenêtre, ni même celle qui a chiffré cette dernière. Bref, tout cela n'accélère pas le mouvement

Isoler sa maison ou son immeuble, c'est valoriser son patrimoine. C'est aussi réduire sa dépense en combustible puisque l'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas. C'est enfin réduire le prix de l'énergie thermique rendue dans les pièces de vie par le fait que l'isolation en diminuant la température requise à la source chaude améliore les performances de la pompe à chaleur.