

Définition de solutions techniques pour la rénovation énergétique des logements collectifs d'après 1948 en Alsace

Rapport final - Novembre 2013



Etude réalisée par :



Table des matières

1	Résumé de l'étude	7
1.1	Objectifs	7
1.2	Résultats	7
2	Définition des typologies	10
3	Bâtiments types.....	11
3.1	Petit collectif 1948-1974.....	11
3.2	Collectifs moyens 1948-1974	12
3.3	Grand collectif 1948 - 1974.....	13
3.4	Petits collectifs 1975-1999	15
3.5	Collectifs moyens 1975-1999	16
3.6	Grands collectifs 1975-1999.....	18
4	Méthodologie suivie pour les calculs thermiques.....	19
4.1	Définitions de certaines grandeurs et unités utilisées	19
4.1.1	Besoin de chauffage.....	19
4.1.2	Indice de compacité : I_c	19
4.1.3	Proportion de balcon : $\%_B$	20
4.2	Hypothèses de simulation	21
4.2.1	Zonage.....	21
4.2.2	Températures de consigne.....	21
4.2.3	Occupation.....	21
4.2.4	Apports internes	22
4.2.5	Ventilation	22
4.2.6	Etanchéité à l'air.....	23
4.2.7	Climat extérieur	23
4.2.8	Masques solaires	23
4.3	Définition d'un bouquet de travaux de base.....	23
4.4	Calculs de sensibilité : méthodologie.....	24
5	Résultats des calculs thermiques.....	24

5.1	Petit collectif 1948-1974.....	26
5.2	Moyens collectifs 1948-1974.....	28
5.3	Grands collectifs 1948-1974.....	29
5.4	Petits collectifs 1975-1999.....	31
5.5	Moyens collectifs 1975-1999.....	35
5.6	Grands collectifs 1975-1999.....	37
5.7	Synthèse des résultats.....	39
5.8	Enseignements principaux.....	40
5.8.1	Bouquets de base.....	40
5.8.2	Orientation du bâtiment.....	40
5.8.3	Cas des petits bâtiments construits sur terre-plein.....	40
5.8.4	Masques solaires.....	41
5.8.5	Balcons.....	41
5.8.6	Compacité.....	41
5.8.7	Retours d'isolant en tableau (ITE).....	41
5.8.8	Traitement du pont thermique d'acrotère par « emballage ».....	41
5.8.9	Traitement du pont thermique planchers bas - mur.....	42
5.8.10	Enduit extérieur isolant dans le cas d'une isolation intérieure.....	42
5.8.11	Ventilation double flux à récupération de chaleur.....	42
5.8.12	Impact de l'étanchéité à l'air.....	42
5.8.13	Dégradation des performances des planchers hauts et bas.....	43
6	Approche globale sur la durée de vie du bâtiment.....	44
6.1	Introduction à l'analyse de cycle de vie.....	44
6.2	Exemple d'approche ACV pour le choix d'un isolant extérieur sous enduit.....	45
6.2.1	Temps de retour carbone par rapport à la solution de référence 12cm de polystyrène expansé.....	46
6.2.2	Epaisseur d'isolant : où s'arrêter dans l'augmentation de l'épaisseur ?.....	48
6.2.3	Choix de l'isolant : comparaison des impacts carbonés globaux.....	49
6.2.4	Limites de l'ACV présentée ici.....	52
7	Confort d'été.....	53

8	Détails de mise en œuvre	57
8.1	Pose des menuiseries	57
8.1.1	ITE - pose intérieure	57
8.1.2	ITE - pose nu extérieur.....	59
8.1.3	ITE - pose en applique (extérieure ou intérieure)	60
8.1.4	Problématique des protections solaires.....	61
8.2	Traitement du pont thermique de périmètre de fondation.....	62
8.2.1	Isolation enterrée en continuité ITE	62
8.3	Traitement du pont thermique d'acrotère.....	63
8.3.1	Acrotère emballée	63
8.4	Toiture en pente - ITE	64
8.5	Fermeture de loggias par un mur rideau : création d'un jardin d'hiver	65
8.6	Cages d'ascenseur et étanchéité à l'air	65
8.7	Terrasse accessible sur attique.....	67
9	Points de vigilance	68
9.1	Caractère architectural.....	68
9.2	Réglementation incendie.....	71
9.3	Pose des isolants : précautions de mise en œuvre	74
9.3.1	Isolation par l'extérieur sous enduit	74
9.3.2	Isolation par l'intérieur	74
9.4	Ordonnancement des travaux	75
9.4.1	Changement des fenêtres et ventilation	75
9.4.2	Isolation extérieure et changement des fenêtres	75
9.4.3	Isolation extérieure et isolation d'un toit terrasse	75
9.4.4	Découpage de la rénovation globale en 2 phases :.....	75
10	Accumulation d'humidité dans les parois	77
10.1	Diagrammes de Glaser.....	78
10.1.1	Isolation intérieur.....	78
10.1.2	ITE	83
10.1.3	Double mur à âme isolée	83

10.2	Isolation par l'intérieur d'un mur en béton ou maçonnerie - Approche dynamique du comportement hygrométrique avec WUFI.....	85
10.2.1	Calculs WUFI	85
10.2.2	Conclusions calculs WUFI.....	87
10.2.3	Analyse comparative avec l'étude HYGROBA mené par le CETE de l'Est sur le bâti ancien.....	88
11	Adaptation des systèmes de production, distribution, émission et régulation de chauffage.....	89
11.1	Production de chaleur.....	89
11.2	Régulation primaire (circuit production)	89
11.3	Régulation du circuit secondaire (circuit émetteurs).....	89
11.4	Réduction des pertes linéiques de chaleur.....	90
12	Ventilation.....	91
12.1	Ventilation naturelle assistée : systèmes basse pression (<80Pa).....	91
12.2	VMC simples flux (env. 110Pa).....	92
12.3	VMC double flux à récupération de chaleur.....	92
12.3.1	Systèmes centralisés par bâtiment.....	92
12.3.2	Systèmes centralisés par appartement	93
12.3.3	Systèmes décentralisés par pièces (sans conduits)	94
13	Eléments de chiffrage	95
13.1	La présente évaluation des coûts ne se substitue pas à un chiffrage par un maître d'œuvre	95
13.2	Méthode.....	95
13.2.1	Travaux pris en compte dans l'évaluation des coûts	96
13.2.2	Travaux non pris en compte dans l'évaluation des coûts	96
13.3	Evaluation des coûts par typologie.....	97
13.3.1	Evaluation des coûts, Petits 48-74.....	98
13.3.2	Evaluation des coûts, Moyens 48-74	100
13.3.3	Evaluation des coûts, Grands 48-74.....	101
13.3.4	Evaluation des coûts, Petits 75-99.....	101
13.3.5	Evaluation des coûts, Moyens 75-99	103

13.3.6	Evaluation des coûts, Grands 75-99.....	103
13.4	Evaluation des coûts, synthèse.....	104
14	Table des illustrations.....	108
14.1	Photos.....	108
14.2	Tableaux.....	108
14.3	Figures.....	109
15	Annexe 1 : Paramètres influant sur le besoin de chauffage calculé.....	112
16	Annexe 2 : Description des parois modélisées et de leur performance.....	114
16.1	Murs.....	114
16.2	Toitures.....	114
16.3	Planchers.....	115
16.4	Fenêtres.....	115
17	Annexe 3 : Ponts thermiques ; valeurs tabulées et calculs spécifiques.....	117
17.1	Ponts thermiques de nez de dalles intermédiaires.....	117
17.1.1	Isolation par l'intérieur, pas de traitement du pont thermique.....	117
17.1.2	Isolation par l'intérieur, correction thermique par 2cm d'enduit isolant extérieur	118
17.1.3	Isolation par l'extérieur.....	118
17.1.4	ITE balcons.....	119
17.2	Acrotères.....	119
17.2.1	Isolation par l'extérieur, acrotère non emballée.....	119
17.3	Planchers bas.....	121
17.4	Pose des menuiseries.....	121
18	Annexe 4 : Justification théorique de la relation entre variation du besoin de chauffage et indice de compacité.....	122

1 Résumé de l'étude

1.1 Objectifs

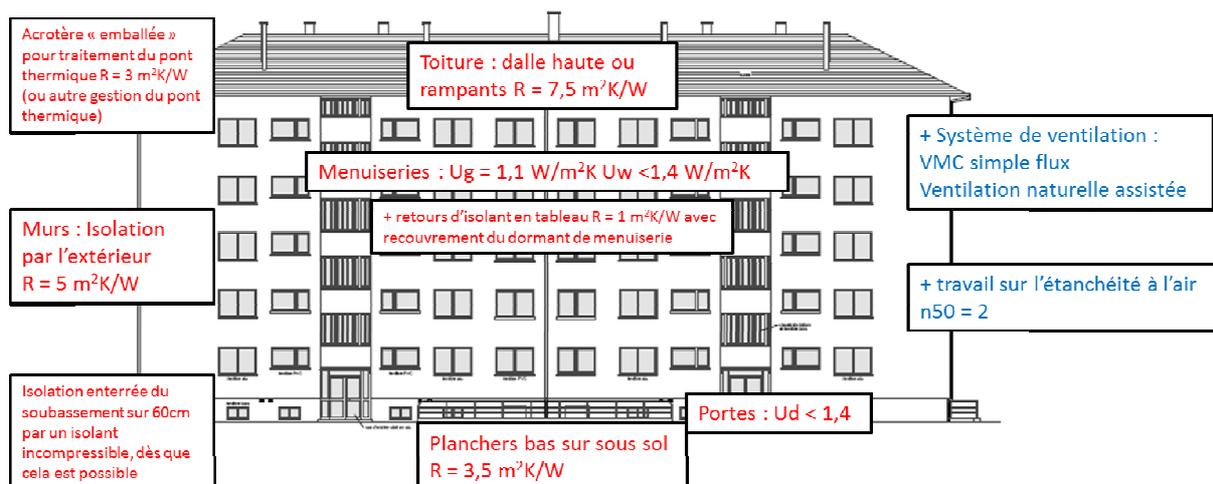
L'étude concerne la rénovation thermique des bâtiments de logement construits en Alsace entre 1948 et 1999. Elle porte sur les moyens à mettre en œuvre sur l'enveloppe des bâtiments, pour atteindre deux niveaux de performance : besoins de chauffage limités à 35 kWh/m²Shab/an et 15 kWh/m²Shab/an. Ces besoins de chauffage ont été estimés par simulation thermique dynamique en prenant en compte les conditions climatiques et les conditions d'usage les plus proches possibles de la réalité.

Six typologies différentes de bâtiment ont été identifiées dans le cadre de l'étude, représentant l'ensemble du parc alsacien. Elles ont été établies en distinguant :

- La morphologie des bâtiments : petit collectif R+2 à R+3, moyen collectif R+4 à R+6 et grand collectif R+7 et plus.
- La période de construction : avant 1974 (1^{ière} réglementation thermique) et après 1974.

1.2 Résultats

Constatant que les niveaux de performance visés nécessitaient des investissements irréalistes en particulier pour les typologies les moins compactes, l'étude s'est réorientée sur la définition d'un bouquet de travaux de base unique choisi dans la « meilleure technologie disponible à coûts maîtrisés » :



Besoins de chauffage :

Les besoins de chauffage suivants ont été estimés pour les six typologies étudiées (en kWh utiles par m² de Shab) :

Typologie de bâtiment	Période 1948-1974	Période 1975-1999
Petit collectif R+2 à R+3	47,4 kWh/m ² /an	52,3 kWh/m ² /an
Moyen collectif R+4 à R+6	34,2 kWh/m ² /an	32,8 kWh/m ² /an
Grand collectif R+7 et plus	35,0 kWh/m ² /an	30,0 kWh/m ² /an

Appliqué à l'ensemble du parc de logements collectifs d'Alsace de la période 1948-1999, le bouquet de travaux de base permet d'atteindre un besoin de chauffage moyenné de 40,5 kWh/m²/an.

En comparaison, le bouquet de travaux correspondant aux solutions de référence RT existant porterait les besoins de chauffage à 54 kWh/m²/an (+33%) et les gardes fous RT existant, à 64 kWh/m²/an (+58%).

Calculs de sensibilité sur divers paramètres : Ils ont permis de montrer que :

- L'isolation extérieure est toujours beaucoup plus performante que l'isolation intérieure (+18 kWh/m²/an pour l'ITI), notamment en raison du traitement des ponts thermiques de nez de dalle qui représentent à eux seuls 13 kWh/m²/an de besoins supplémentaires lorsqu'ils ne sont pas traités en ITI.
- L'isolation des tableaux avec recouvrement des dormants est indispensable (+25 kWh/m²/an sinon).
- L'étanchéité à l'air doit être traitée, notamment au niveau des menuiseries et coffres de volets roulants (+10 kWh/m²/an sinon).
- Le triple vitrage permet -de réduire les besoins de chauffage de 2 kWh/m²/an supplémentaires et les menuiseries « passives » avec dormant isolés de 5 à 6 kWh/m²/an.
- Une ventilation double-flux à récupération de chaleur permet une réduction des besoins de chauffage de 16 à 19 kWh/m²/an à elle seule. Elle est cependant contraignante à mettre en œuvre et ne peut pas être systématisée sur tous les projets.

Analyse de Cycle de Vie : Une approche en analyse de cycle de vie a permis de comparer le contenu CO₂ de la mise en œuvre de différents matériaux d'isolation avec la réduction des émissions de CO₂ associée à la baisse des besoins de chauffage. Nous montrons que jusqu'à une épaisseur de 25 à 30 cm d'isolant par l'extérieur, le bilan CO₂ est toujours favorable, même pour les énergies les moins carbonées (gaz naturel et électricité). L'ACV a également permis de pointer tout l'intérêt des matériaux biosourcés.

Confort d'été : Les simulations thermiques dynamiques ont montré que le confort en été est toujours amélioré après les travaux d'isolation thermique, dès lors que des protections solaires sont mises en place. En revanche, le nombre d'heure de surchauffe augmente après rénovation, si les logements ne sont pas protégés des apports solaires ou ne bénéficient pas de ventilation nocturne.

Qualité de l'air : Un changement des fenêtres et des baies et un bon niveau d'étanchéité à l'air nécessitent qu'un système de ventilation efficace assure un bon renouvellement d'air : ventilation mécanique contrôlée, ventilation naturelle assistée, ventilation double-flux, ...

Points de vigilance : L'étude dresse l'inventaire des points de vigilance à observer dans la réalisation des travaux. Elle se base sur des dessins de détails d'exécution qui pourront aider les maîtres d'œuvre et les artisans.

Le caractère architectural du bâtiment à rénover doit toujours faire l'objet d'une attention particulière, même pour des bâtiments qui pourraient apparaître d'architecture mineure. Les conseils d'un Architecte des Bâtiments de France, d'un spécialiste du Patrimoine ou des CAUE permettront de faire la liste des éléments à prendre en compte dans la rénovation thermique et orienteront les maîtres d'œuvre sur la manière de les traiter.

La réglementation incendie impacte la manière dont le bâtiment peut être rénové et peut faire apparaître des contraintes qui n'existaient pas lors de la construction initiale du bâtiment.

Approche économique : Une estimation du coût du bouquet de travaux de base a été réalisée suivant les différentes typologies. Les résultats, exprimés en euros HT/m²_{shab}, sont les suivants :

Typologie de bâtiment	Période 1948-1974	Période 1975-1999
Petit collectif R+2 à R+3	202 à 268 €/m ²	292 à 378 €/m ²
Moyen collectif R+4 à R+6	183 à 238 €/m ²	162 à 211 €/m ²
Grand collectif R+7 et plus	154 à 202 €/m ²	135 à 176 €/m ²

Ces estimations ont été réalisées sur la base du mètre des bâtiments modélisés et incluent l'ensemble des travaux de rénovation (y compris travaux afférents) mais pas les coûts spécifiques à une opération, du fait de particularités architecturales notamment.

2 Définition des typologies

La première phase de cette mission nous a conduits à définir 6 typologies de bâtiments jugés représentatifs des bâtiments de logements alsaciens de la période 1948-1999 :

- Petits collectifs (R+2 à R+3) de 1948 à 1974
- Collectifs moyens (R+4 à R+6) de 1948 à 1974
- Grands collectifs (R+7 et plus) de 1948 à 1974
- Petits collectifs (R+2 à R+3) de 1975 à 1999
- Collectifs moyens (R+4 à R+6) de 1975 à 1999
- Grands collectifs (R+7 et plus) de 1975 à 1999

Sur un total d'environ 230 000 logements collectifs sur la période 1948 - 1999, les statistiques de l'INSEE nous ont permis d'évaluer la représentativité des 6 typologies :

Tableau 1 - Proportions de bâtiments et de logements par typologie

	de 1949 à 1974		de 1975 à 1999		TOTAUX	
	Nb immeubles	Nb logements	Nb immeubles	Nb logements	Nb immeubles	Nb logements
Petit collectif	31%	18%	32%	24%	62%	42%
Collectif moyen	20%	22%	10%	17%	30%	40%
Grand collectif	6%	14%	1%	4%	8%	18%
Totaux	57%	54%	43%	46%	100%	100%

5 typologies principales se dégagent, avec 14% à 24% de l'ensemble des logements pour chaque catégorie. Seuls les grands collectifs d'après 75 sont minoritaires (4% des logements).

3 Bâtiments types

Les six bâtiments qui ont servi aux modélisations par simulations thermiques dynamiques sont des bâtiments réels, auxquels nous avons parfois apporté quelques modifications pour les rendre plus représentatifs de l'ensemble des bâtiments de leur typologie.

Suite à un appel à contribution lancé par la Région auprès des bailleurs sociaux et privés alsaciens, Habitat Haute Alsace et le Foyer Moderne de Schiltigheim nous ont fourni des plans de bâtiments type : petits collectifs 48-74 et petits collectifs 75-99. Les autres bâtiments types modélisés sont des bâtiments situés en région Rhône Alpes mais présentant des caractères similaires aux constructions alsaciennes de la même époque.

3.1 Petit collectif 1948-1974



Photos 1 - Petit collectif 48-74

A noter que le bâtiment possède un sous-sol semi-enterré sur l'ensemble de sa surface.

Modifications apportés pour la modélisation

Nous avons réduit le nombre d'étage pour arriver à un R+2 (et non R+4) pour rester dans la typologie « petits collectifs ».

Dans le calcul de base, nous avons considéré que les loggias n'étaient pas fermées, contrairement à la photo ci-dessus.

Le bâtiment présente une symétrie parfaite : deux cages d'escalier identiques le composent. De manière à réduire les temps de calcul sous PleaideComfie, nous n'avons dessiné que la

moitié du bâtiment et défini un des pignons comme une paroi mitoyenne accolé à une zone où la température est identique. Le besoin de chauffage ainsi calculé, ramené au m^2_{SHAB} , correspond donc bien au bâtiment réel (2 fois plus long que le modèle).

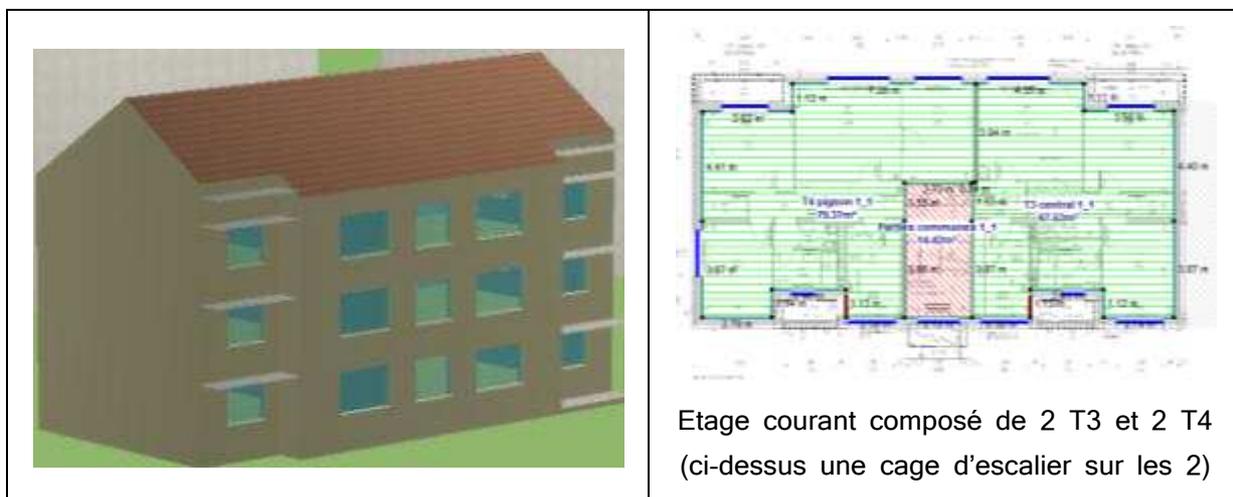


Figure 1 - Vue 3D du Petit collectif 48-74 modélisé sous Alcyone

3.2 Collectifs moyens 1948-1974

Le bâtiment modélisé est un bâtiment de logement en R+5, possédant un sous-sol sur l'ensemble de la surface du RDC.



Photos 2 - Moyen 48-74

Modifications apportés pour la modélisation

La deuxième simplification a consisté en la suppression des attiques et formes complexes en toiture qui nous ont semblé trop spécifiques. Le bâtiment modélisé possède donc des

toitures terrasses, conformément à la majorité des bâtiments de ce gabarit construits à cette époque.

Le bâtiment présentant une symétrie, nous n'avons modélisé que la moitié de la longueur du bâtiment, en définissant un des pignons comme mitoyen.

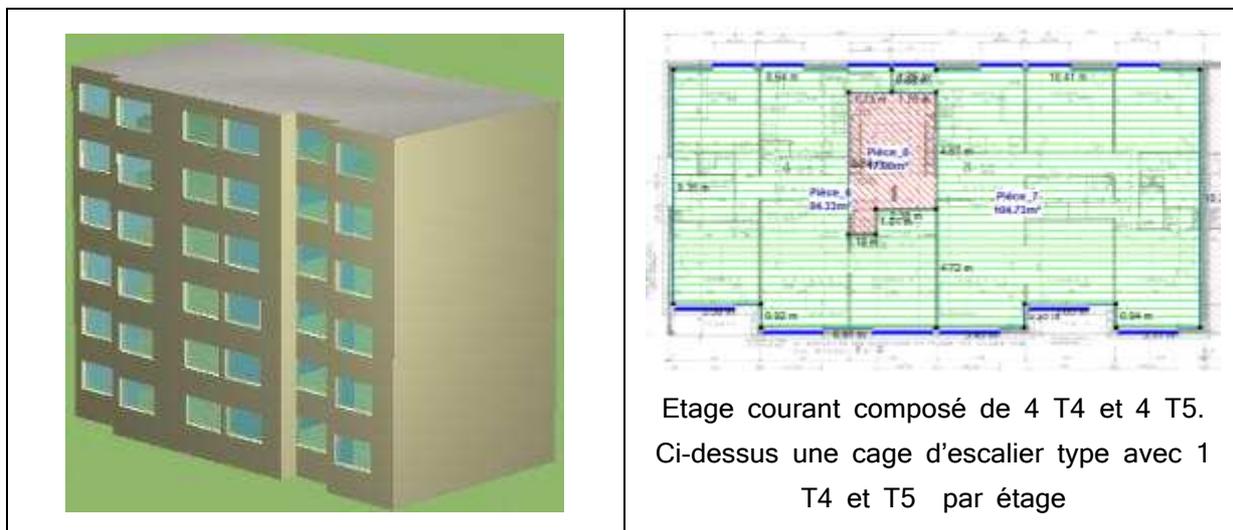


Figure 2 - Collectif moyen 48-74 modélisé sous Alcyone

3.3 Grand collectif 1948 - 1974

Le bâtiment modélisé est un bâtiment de logement en R+9, possédant un sous-sol sur l'ensemble de la surface du RDC.

Outre le nombre d'étage, la différence principale entre le grand collectif et le moyen est la présence d'un ascenseur dans le grand collectif. Bien qu'il soit possible de traiter l'étanchéité à l'air des cages d'ascenseur (cf. points de vigilance), nous avons considéré dans nos modélisations que celle-ci n'était pas améliorée.



Photos 3 -Grand 48-74

Modifications apportés pour la modélisation

Le bâtiment présentant une symétrie, nous n'avons modélisé que la moitié de la longueur du bâtiment, en définissant un des pignons comme mitoyen.

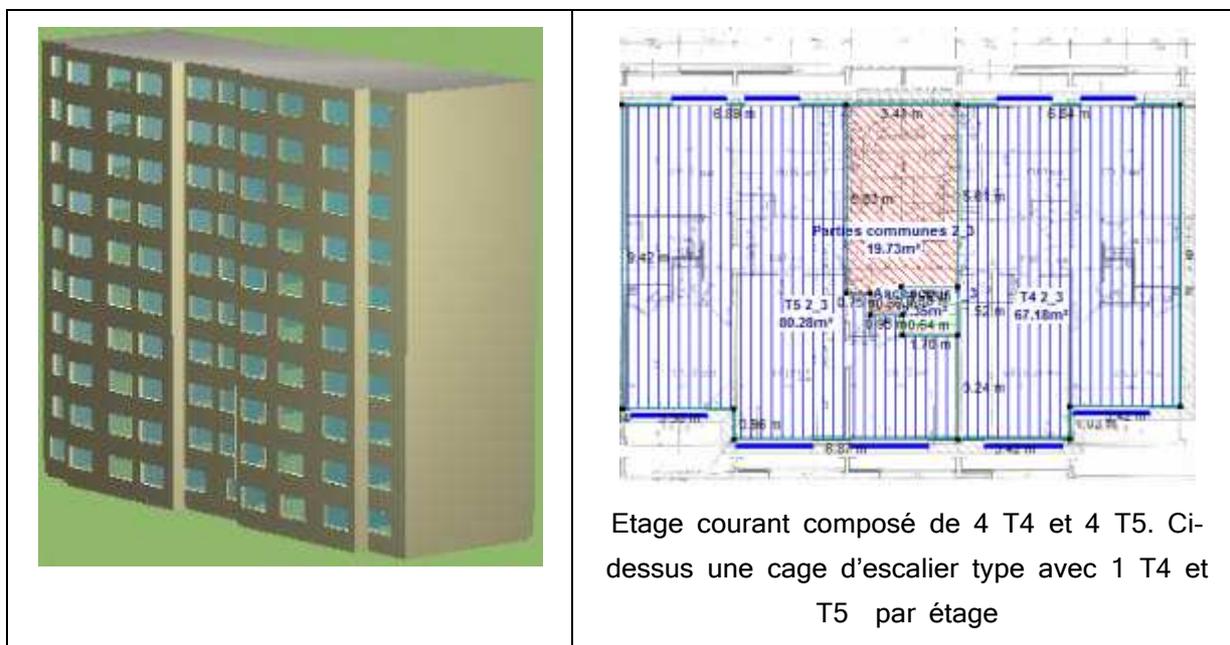


Figure 3 - Vue 3D du collectif moyen 48-74 modélisé sous Alcyone

3.4 Petits collectifs 1975-1999

Le bâtiment modélisé est un bâtiment de logement en R+3 de style « néo - Alsacien ».

Le bâtiment est construit sur terre-plein.



Photos 4 - Petits 75-99

Modifications apportés pour la modélisation

Le bâtiment réel a une forme en « L ». Nous n'avons modélisé qu'une partie du bâtiment qui est tout à fait représentative de l'ensemble. Les résultats de consommation étant exprimés en kWh/m²/an, cette simplification de forme n'a pas d'incidence sur les résultats.



Figure 4 - Petit collectif 75-99 modélisé sous Alcyone

3.5 Collectifs moyens 1975-1999

Le bâtiment modélisé est un bâtiment de logements en R+5 sur sous-sol.



Photos 5 - Moyens 75-99



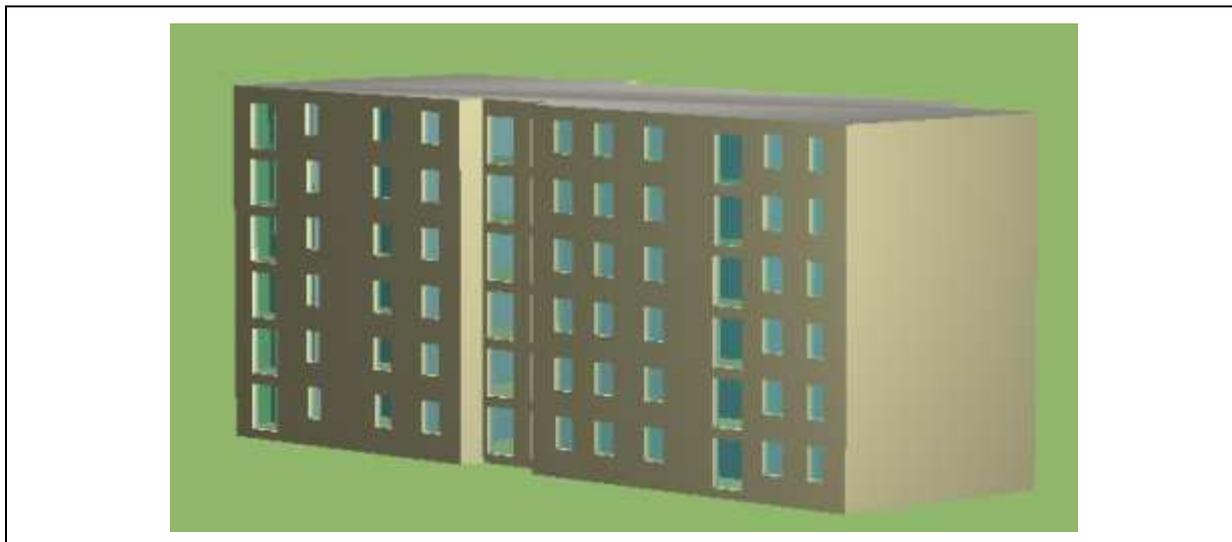


Figure 5 -Collectif moyen 75-99 modélisé sous Alcyone

Nous remarquons tout de suite une différence fondamentale entre les typologies 48-74 et celles de 75-99 qui est la largeur des trames bâti, beaucoup plus grandes durant la fin du XXe siècle. Cette propriété des bâtiments plus récents est favorable aux économies d'énergie dans la mesure où la compacité (ratio surfaces extérieures / surface habitable par exemple) est meilleure.

Remarque : Cette morphologie plus large présente cependant certains inconvénients : logements très rarement traversants ne permettant pas de ventilation naturelle efficace, éclairage naturel moins bon, notamment des parties communes,...

3.6 Grands collectifs 1975-1999

Notre bâtiment type « grand collectif 75-99 » est le même bâtiment que le « moyen collectif 75-99 » à qui nous avons ajouté des étages pour arriver à R+10.

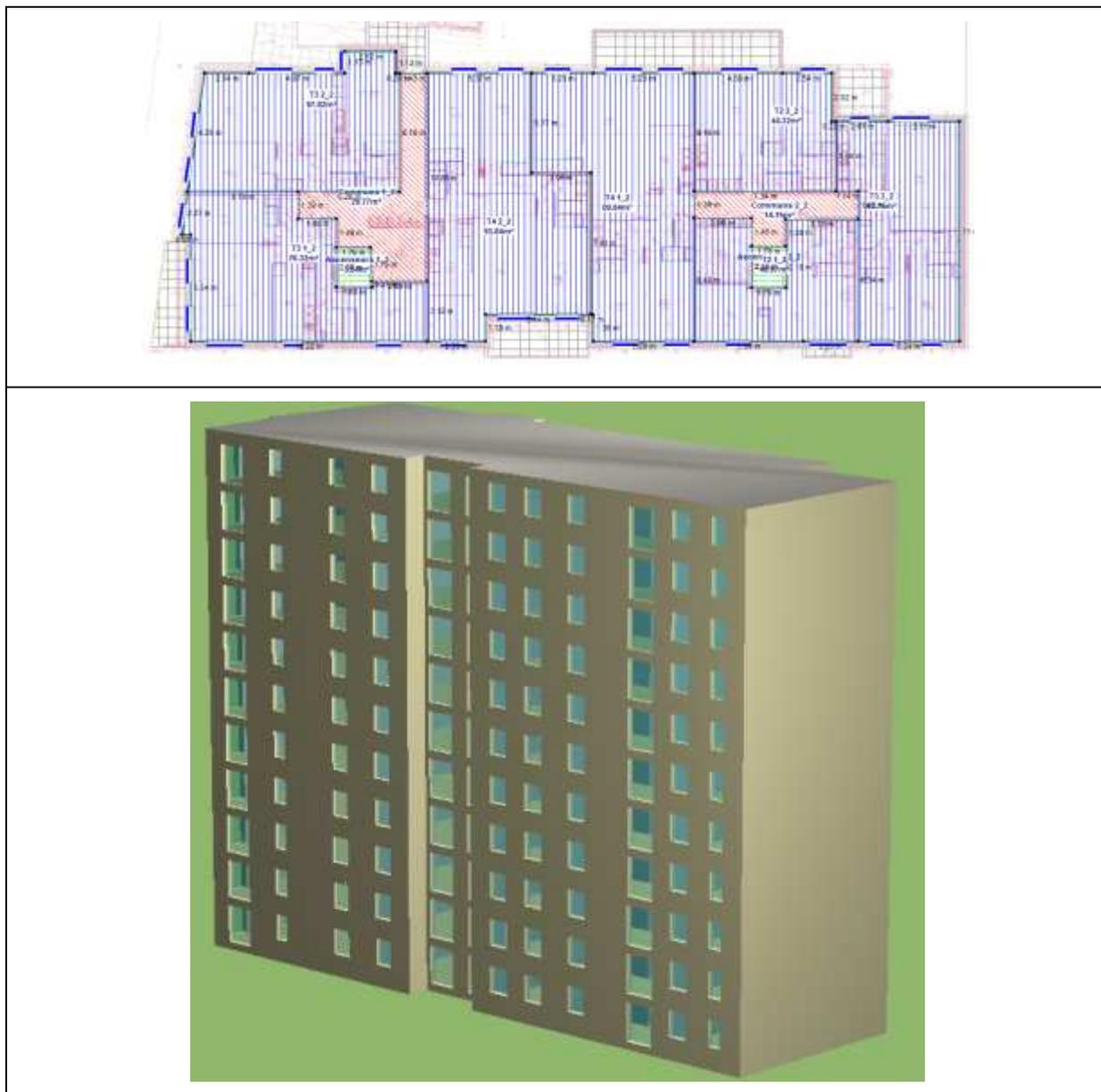


Figure 6 - Grands collectifs 75-99 modélisé sous Alcyone

4 Méthodologie suivie pour les calculs thermiques

L'ensemble des hypothèses de simulation qui concernent l'occupation, les températures de consigne, la ventilation, l'étanchéité à l'air, les apports internes et le climat extérieur sont décrits dans l'annexe 1.

Les descriptions des ponts thermiques et des complexes de parois sont décrits dans l'annexe 2.

Les simulations thermiques dynamiques (STD) ont été réalisées avec le logiciel Pleiades+Comfie v. 3.3.8.1. La STD, demandée de base dans le cahier des charges, est actuellement le meilleur outil pour évaluer finement les besoins de chauffage. Il est en effet possible d'appliquer des scénarii de fonctionnement (température, occupation,...) différents suivant les zones du bâtiment, ce qui est impossible avec des outils statiques de type PHPP 2007. De plus, la STD permet de modéliser le comportement en été du bâtiment.

4.1 Définitions de certaines grandeurs et unités utilisées

4.1.1 Besoin de chauffage

Nous parlons dans l'ensemble de notre étude de **besoin de chauffage**, qui est la quantité de chaleur qu'il est nécessaire d'introduire dans un bâtiment pour compenser les pertes de chaleur à travers les parois et les pertes aérauliques (ventilation + infiltration / exfiltration), une fois les apports solaires et internes gratuits déduits. En d'autres termes, le besoin de chauffage est équivalent à la consommation de chauffage avant déduction des pertes d'émission, distribution et production des systèmes énergétiques du bâtiment.

Nous exprimons ce besoin de chauffage en **kWh d'énergie utile par m² de surface habitable**, qui nous semble être le meilleur indicateur pour rendre compte de la performance thermique d'un bâtiment de logement. A noter que les circulations et parties communes, non chauffées, ne sont pas prises en compte dans la surface habitable.

4.1.2 Indice de compacité : Ic

La **compacité** est une caractéristique clé jouant sur la performance énergétique. Plus un bâtiment est compact, moins il consomme d'énergie. Nous considérons que l'indice de compacité souvent utilisé (Surface de parois divisée par le volume du bâtiment) n'est pas adapté à l'architecture dans la mesure où il favorise les grands volumes de manière trop importante. Nous définissons donc un indice de compacité que nous considérons beaucoup plus adapté :

$$I_c = \frac{\text{Surface des parois déperditives}}{\text{Surface habitable}}$$

De manière à prendre en compte le fait qu'un plancher est beaucoup moins déperditif que les parois en contact direct avec l'extérieur, nous appliquons un facteur 1/3 à la surface de plancher bas dans le calcul des surfaces de parois déperditives.

Pour chaque bâtiment type et chaque variante architecturale (mitoyenneté, variation du nombre d'étages, variation de la longueur de la façade principale, formes plus ou moins complexe), nous avons calculé I_c . Cela nous a permis d'établir une relation simple entre variation du besoin de chauffage (ΔB_{ch}) et variation de la compacité (ΔI_c). Cette relation (de proportionnalité) a été validée par plusieurs calculs pour chaque typologie.

$$\Delta B_{ch} = U_{moy} \times \Delta I_c$$

La justification théorique de la relation entre variation du besoin de chauffage et variation de l'indice I_c est présentée en annexe 4.

4.1.3 Proportion de balcon : %_B

Nous définissons l'indicateur %_B comme :

$$\%_B = \frac{\text{Linéaire total des balcons}}{\text{Linéaire total des nez de dalles intermédiaires}}$$

Cet indicateur permet de quantifier la proportion de balcon et nous a été très utile pour évaluer leur impact (ponts thermiques en particulier) sur la performance thermique d'un bâtiment.

Du point de vue des simulations thermiques, l'impact des balcons est dû au pont thermique des nez de dalle.

Les calculs de sensibilité nous ont permis, pour chaque typologie, de déterminer l'influence du linéaire de balcons sur le besoin de chauffage. De manière à évaluer l'impact des balcons le plus simplement possible pour le plus grand nombre de cas, nous avons exprimé les résultats en variation de besoin de chauffage par %_B. Plusieurs calculs pour chaque typologie ont ainsi été menés pour valider la relation entre variation de besoin de chauffage et l'indicateur %_B.

4.2 Hypothèses de simulation

4.2.1 Zonage

Les bâtiments ont été découpés suivant les zones thermiques suivantes :

- 1 zone chauffée : ensemble des logements
- 3 à 5 zones non chauffées distinctes :
 - Parties communes
 - Cage d'ascenseur largement ventilée
 - Sous-sol ou vide sanitaire
 - Combles non chauffés
 - Garages ou autres zones non chauffés au RDC

Le confort d'été n'est étudié que pour les bâtiments type sur une pièce jugée la plus défavorisée : orientation ouest ou sud, larges baies vitrées, absence de masques solaires.

L'ensemble des scénarii d'occupation, ventilation, apports internes sont identiques toutes les semaines (pas de période de vacances).

4.2.2 Températures de consigne

Bien que la réglementation française prévoit 19°C, nous optons pour une température de consigne de 20°C.

Nous considérons un réduit de nuit à 16°C de 23h à 6h et aucun réduit en journée.

En réalité, certains logements ont des réduits la nuit et la journée, d'autres seulement la nuit ou seulement la journée, ou aucun. Nous considérons notre hypothèse comme représentative de la moyenne des logements.

Rappelons que dans la règle Th-B-C-E, la température de consigne est de 19°C, avec un réduit à 16°C de 9h à 17h.

4.2.3 Occupation

Nous considérons que 100% d'occupation correspond à un ratio de 1 personne pour 33 m², soit 0,03 pers/m² (source INSEE - *Les logements en 2006*).

Dans la modélisation, une personne émet 80W de chaleur.

Scénario retenu :

- 22h à 7h : 70% (pour prendre en compte le fait qu'un corps humain endormi émet moins de chaleur qu'un corps humain éveillé).
- 7h à 9h en semaine : 100%
- 9h à 18h en semaine : 30%

- 13h à 18h le mercredi : 60%
- 18h à 22h : 100%
- 7h à 22h le WE : 100%

4.2.4 Apports internes

Les apports internes sont des apports de chaleur provenant d'une source située à l'intérieure des logements. Il s'agit par exemple des dégagements de chaleur dus à la cuisson, aux ampoules, aux appareils électroménagers.

Le dégagement de chaleur des occupants (« chaleur métabolique ») est dans le logiciel de simulation Pleiade Comfie considéré égal à 80 W/pers. Dans le logiciel, il ne fait pas partie des apports internes mais est directement comptabilisé à partir du scénario d'occupation.

Scénario de base

- 1 W/m² la nuit et en journée :
- 4,5 W/m² pendant 2h le matin, 4h le soir (7h-9h, 18h-22h)
- 4W/m² toute la journée le week-end (9h - 22h)

Soit une moyenne de 2,1 W/m².

Scénario utilisé pour les modélisations de confort d'été (séjour/cuisine):

- 3 W/m² nuit et journée
- 6 W/m² pendant 2h le matin et 2h le soir
- 16 W/m² pendant 1h le midi et 2h le soir

4.2.5 Ventilation

Nous considérons un renouvellement d'air de 0,4 vol/h constant, ce qui correspond à un peu plus que le débit minimum réglementaire pour un logement type (en ventilation auto-réglable).

Pour la ventilation naturelle nocturne en été :

- 3 vol/h si ventilation naturelle efficace (logement traversant, fenêtres ouvertes et portes intérieurs ouvertes).
- 1 vol/h si ventilation naturelle moins efficace (fenêtres ouvertes, portes chambre fermées, ou logement mono-orienté).

4.2.6 Etanchéité à l'air

Dans le cas où il y a une intervention sur l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment, en particulier sur les fenêtres, nous considérons une étanchéité à l'air $n_{50} = 2$. Cela correspond à une infiltration moyenne annuelle de 0,01 vol/h.

Dans le cas d'une rénovation simple de menuiserie avec conservation du dormant existant et donc pas de traitement efficace du joint d'étanchéité à l'air, nous considérons un $n_{50} = 6$, soit des infiltrations moyennes de 0,15 vol/h.

Le calcul de la correspondance entre n_{50} et taux d'infiltration moyen annuel a été réalisé sous PHPP 2007 pour un bâtiment type.

4.2.7 Climat extérieur

Le fichier météo a été établi avec Meteocalc, à partir des informations suivantes :

- Températures d'après Infoclimat, station de Strasbourg - Entzheim, période 1961 - 1990.
- Rayonnement d'après logiciel en ligne CalSol (INES).

Le fichier météo a été adapté pour tenir compte du réchauffement climatique observé ces dernières années :

- +1,5°C en juin et septembre
- +3°C en juillet et août

4.2.8 Masques solaires

Dans les calculs de base, nous ne considérons aucun masque solaire.

Nous faisons ensuite un calcul de variante avec les masques de bâtiment d'une hauteur de 20m situés à 20m, ce qui correspond à un environnement urbain dense.

Pour évaluer l'impact des apports solaires directs et indirects (albédo fixé à 0,2 dans tous les calculs), nous effectuons également un calcul en supprimant les apports solaires.

4.3 Définition d'un bouquet de travaux de base

Après avoir modélisé les 6 bâtiments types et fait varier certains paramètres d'enveloppe, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il serait très compliqué d'atteindre l'objectif d'un besoin de chauffage maximal de 35 kWh/m²/an sur certaines typologie (cf. résultats des calculs) avec des travaux réalistes économiquement.

Il a donc été décidé de considérer un bouquet de travaux de base pour l'ensemble des 6 typologies, intégrant les « meilleures technologies disponibles sur le marché à un coût maîtrisé » :

- **Murs : Isolation par l'extérieur $R = 4,9 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$,**
- **Planchers bas : $R = 3,4 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$,**
- **Toiture : $R = 8,5 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$,**
- **Menuiseries : $U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; $U_w < 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; si menuiseries alu, obligation de rupture de pont thermique**
- **Retours d'isolant en tableau de 4cm d'épaisseur avec recouvrement du dormant de menuiserie $R= 1 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$**
- **Isolation enterrée du soubassement sur 60cm par un isolant incompressible, $R = 3 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$**
- **Acrotère « emballée » pour traitement du pont thermique, $R = 3 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$**
- **Ventilation constante $0,4 \text{ vol/h}$, obtenue avec une VMC simple flux autoréglable ou une ventilation naturelle assistée**
- **Étanchéité à l'air améliorée : $n_{50} = 2 \text{ vol/h}$ (pose menuiseries étanches à l'air, peu d'infiltrations au niveau des coffres de VR)**
- **Portes d'entrée : $U_d = 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ et pose étanche à l'air**
- **Portes palières : pas de prescription particulière si la circulation est dans le volume chauffé.**

Remarque : En ce qui concerne la typologie « petits 1975-99 », le bouquet de base ne comprend pas l'isolation du plancher bas qui est sur terre-plein.

4.4 Calculs de sensibilité : méthodologie

A partir de ce bouquet de base, des calculs de sensibilité sont réalisés en faisant varier divers paramètres de performance de l'enveloppe (planchers, toitures, murs, menuiseries), et de formes architecturales (balcons, loggias, compacité : mitoyenneté, nombre d'étages,...).

Les résultats de ces calculs de sensibilité sont exprimés en écart de besoin de chauffage par rapport au bâtiment type rénové en « base », soit +/- X kWh/m²/an par rapport à la base.

Les résultats sont consignés dans un tableau récapitulatif, qui permet d'estimer le besoin de chauffage d'un bâtiment particulier en ajoutant ou retranchant l'impact des variations de besoin de chauffage dus aux différents traitements de l'enveloppe, aux particularités architecturales (compacité, balcon), ou autres paramètres (masques solaires).

Nous résumons dans l'annexe 1 l'ensemble des paramètres qui influent sur le besoin de chauffage calculé.

5 Résultats des calculs thermiques

L'influence sur le besoin de chauffage des divers paramètres de simulation est résumée par les pictogrammes suivants :

0 à 1 kWh/m ² /an	★
1 à 2,5 kWh/m ² /an	★★
2,5 à 5 kWh/m ² /an	★★★
5 à 10 kWh/m ² /an	★★★★
10 à 20 kWh/m ² /an	★★★★★
> 20 kWh/m ² /an	★★★★★★

Un code couleur a également été adopté :

- Couleur rouge lorsque le besoin de chaleur augmente par rapport au bâtiment de base
- Couleur verte lorsque le besoin de chaleur diminue par rapport au bâtiment de base

Remarque sur l'utilisation des tableaux de résultats :

Les tableaux 2 à 8 présentent la sensibilité de divers éléments constructifs sur la performance thermique globale.

Il pourrait par exemple permettre à un maître d'ouvrage de compenser certaines interventions de base qui ne pourraient pas être réalisées (épaisseur insuffisante d'isolant en façade par exemple) par une amélioration de la performance d'autres postes de travaux (meilleures fenêtres par exemple).

5.1 Petit collectif 1948-1974

Tableau 2 - Résultats STD petits collectifs 48-74

	Besoin de chauffage	Besoin de chauffage	Variation	Variation		
	kWh/an	kWh/m2/an	kWh/an	kWh/m2/an		
Base	20 893	47,4				
Orientation						
Rotation 90° (Est - ouest)	20 770	47,1	-123	-0,3	★	
Apports solaires						
Aucuns apports	28 480	64,6	7 587	17,2	+ ★★★★★★	
Masques : bâtiments de 20m situés à 20m	22 317	50,6	1 424	3,2	+ ★★★	
Variante compacité						
Loggia fermées Ic = 1,18 (variation besoin /à base sans PT balcons, cas fictif pour calculer l'influence de Ic)	18 164	37	-2 729	-6	★★★★★	
Variante Balcons						
Base, calcul sans ponts thermiques balcons Ic =1,56 (cas fictif pour le calcul de l'influence des balcons)	19 138	43,4	-1 755	-4,0	★★★	
Murs						
Isolation intérieure R = 2,7	28 817	65,3	7 924	18,0	+ ★★★★★★	
Isolation intérieure R = 2,7 + enduit extérieur isolant (R additionnelle = 0,4 m2K/W)	25 572	58,0	4 679	10,6	+ ★★★★★★	
ITE R = 5,8	20 385	46,2	-508	-1,2	★★	
ITE R = 4,4	21 288	48,3	395	0,9	+ ★	
ITE R = 3,8	21 787	49,4	894	2,0	+ ★★	
ITE R = 3,3	22 436	50,9	1 543	3,5	+ ★★★	
Tableaux de menuiseries non isolés	34 516	78,3	13 623	30,9	+ ★★★★★★★	
Base, ITE réduite à R = 2,7 sur les balcons	21 601	49,0	708	1,6	+ ★★	
Toiture						
Cas d'un toit terrasse avec acrotère emballée (en base : isol plancher des combles)	19 890	45,1	-1 003	-2,3	★★	
Planchers bas						
Plancher bas sur TP non isolé (cas fictif du bâtiment qui n'aurait pas de sous sol ou VS)	19 181	43,5	-1 712	-3,9	★★★	
Plancher bas sur TP R = 1,5	18 985	43,0	-1 908	-4,3	★★★	
Plancher bas sur sous sol isolé R = 2,3	21 090	47,8	197	0,4	+ ★	
Pas d'isolation périmétrique de planchers bas	21 598	49,0	705	1,6	+ ★★	
Menuiseries						
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 1,1	19 703	44,7	-1 190	-2,7	★★★	
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 0,77	17 753	40,3	-3 140	-7,1	★★★★★	
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air traitée)	26 527	60,2	5 634	12,8	+ ★★★★★★	
Double vitrage Ug = 2,4 et étanchéité à l'air mauvaise (n50 = 6 au lieu de 2)	30 422	69,0	9 529	21,6	+ ★★★★★★★	
Pose menuiseries nu ext	19 239	43,6	-1 654	-3,8	★★★	
Ventilation						
Ventilation double flux 70%	12 396	28,1	-8 497	-19,3	★★★★★	
Comparaison RT						
"RT existant - gardes fous"	31 994	72,5	11 101	25,2	+ ★★★★★★★	
"RT existant - références"	26 956	61,1	6 063	13,7	+ ★★★★★★	
Etanchéité à l'air						
Etanchéité à l'air non traitée : n50 = 6 au lieu de 2	24 514	55,6	3 621	8,2	+ ★★★★★	

Sur cette typologie, le bouquet de base ne permet pas d'atteindre l'objectif initial de 35 kWh/m²/an.

Données du bâtiment modélisé

Surface habitable : 441 m²

Surfaces de parois : 687 m²

Variation en fonction de l'indice de compacité I_c

Compacité bâtiment de base : $I_c = 1,56$

Compacité du bâtiment avec loggias fermées : $I_c = 1,18$

On approxime une relation entre compacité et variation du besoin de chaleur : **15 kWh/m²/an/ point d' I_c** . Cette relation est bien sûr approximative et ne vise qu'à donner une indication de l'impact de la compacité sur les besoins de chauffage.

Variation en fonction de la proportion de balcon $\%_B$

Linéaire total de nez de dalles intermédiaires = 117 m

Linéaire de ponts thermiques de balcons = 37 m

Proportion de balcons en base $\%_B = 32\%$

On déduit des calculs une relation entre proportion de balcon et variation du besoin de chaleur : **0,13 kWh/m²/an/ $\%_B$**

Travaux pour atteindre 35 kWh/m²/an

4 bouquet de travaux « 35 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux à récupération de chaleur
2. « Base » + fermeture loggias + triple vitrage + pose au nu extérieur
3. « Base » + fermeture loggias avec traitement ponts thermiques nez de dalle (structure rapportée par exemple) + triples vitrages
4. « Base » + menuiseries passives + pose au nu extérieur + ITE R = 5,8

Travaux pour atteindre 15 kWh/m²/an

1 bouquet de travaux « 15 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux + menuiseries passives + pose au nu extérieur + ITE R = 5,8 (m².K)/W (16 kWh/m²/an)

5.2 Moyens collectifs 1948-1974

Tableau 3 - Résultats STD moyens collectifs 48-74

	Besoin de chauffage		Variation	Variation		
	kWh/an	kWh/m2/an	kWh/an	kWh/m2/an		
Base	38 804	34,2				
Orientation						
Rotation 90° (Est - ouest)	39 745	35,0	941	0,8	+	★
Apports solaires						
Aucuns apports	58 269	51,4	19 465	17,2	+	★★★★★
Masques importants	41 661	36,7	2 857	2,5	+	★★★
Compacité						
Barre 2 x moins longue $l_c = 1,03$ (+12% ratio compacité)	41 328	36,4	2 524	2,2	+	★★
Balcons						
Base sans Balcons	36 312	32,0	-2 492	-2,2	-	★★
Base balcons partout	52 306	46,1	13 502	11,9	+	★★★★★
Balcons filants sur une façade principale	41 512	36,6	2 708	2,4	+	★★
Murs						
Isolation intérieure $R = 2,7$	59 475	52,4	20 671	18,2	+	★★★★★
Isolation intérieure 10cm $R = 2,7$ + correction enduit ext 3cm $R = 0,4$	51 679	45,6	12 875	11,4	+	★★★★★
ITE $R = 5,8$	37 691	33,2	-1 113	-1,0	-	★
ITE $R = 4,4$	39 679	35,0	875	0,8	+	★
ITE $R = 3,8$	40 785	36,0	1 981	1,7	+	★★
ITE $R = 3,3$	42 207	37,2	3 403	3,0	+	★★★
ITE 8cm non modifiée	47 318	41,7	8 514	7,5	+	★★★★
Tableaux de menuiseries non isolés	71 685	63,2	32 881	29,0	+	★★★★★★
Base, ITE réduite à $R = 2,7$ sur les balcons	40 501	35,7	1 697	1,5	+	★★
Toiture						
Toit terrasse 5cm XPS	43 581	38,4	4 777	4,2	+	★★★
Toiture $R = 5,3$	39 727	35,0	923	0,8	+	★
Acrotère non emballée	40 100	35,4	1 296	1,1	+	★★
Planchers bas						
Plancher bas non isolé	43 125	38,0	4 321	3,8	+	★★★
Flocage $R = 2,3$	39 432	34,8	628	0,6	+	★
Pas d'isolation périmétrique de planchers bas	39 604	34,9	800	0,7	+	★
Menuiseries						
Triple vitrage $U_g = 0,7$; $U_w = 1,1$	36 370	32,1	-2 434	-2,1	-	★★
Triple vitrage $U_g = 0,7$; $U_w = 0,77$	31 161	27,5	-7 643	-6,7	-	★★★★
Pose menuiseries nu ext	36 057	31,8	-2 747	-2,4	-	★★
Double vitrage $U_g = 2,4$ (étanchéité à l'air traitée)	54 243	47,8	15 439	13,6	+	★★★★★
Double vitrage $U_g = 2,4$ (étanchéité à l'air mauvaise : $n50 = 6$ au lieu de 2)	65 752	58,0	26 948	23,8	+	★★★★★★
Ventilation						
Ventilation double flux 70%	20 418	18,0	-18 386	-16,2	-	★★★★★
Comparaison RT						
RT existant gardes fous	64 364	56,7	25 560	22,5	+	★★★★★★
RT existant référence	52 467	46,3	13 663	12,0	+	★★★★★
Etanchéité à l'air						
Etanchéité à l'air non traitée : $n50 = 6$ au lieu de 2	49 631	43,8	10 827	9,5	+	★★★★

Données du bâtiment modélisé

Surface habitable du bâtiment modélisé : 1134 m²

Surfaces de parois : 1047 m²

Variation en fonction de l'indice de compacité I_c

Compacité bâtiment de base, I_c = 0,92

Compacité du bâtiment avec longueur divisée par 2 : I_c = 1,03

On déduit des calculs une relation entre compacité et variation du besoin de chaleur : **18 kWh/m²/an/ point d'I_c**

Variation en fonction de la proportion de balcon %_B

Linéaire total de nez de dalles intermédiaires = 320 m

Linéaire de ponts thermiques de balcons = 50 m

Proportion de balcons en base %_B = 16%

Linéaire de ponts thermiques de balcons si balcon filant sur une façade : 107 m

Proportion de balcons si balcons filants sur façade principale %_B = 32%

On déduit des calculs une relation entre proportion de balcon et variation du besoin de chaleur : **0,14 kWh/m²/an/%_B**

Travaux pour atteindre 35 kWh/m²/an

Le bouquet de base permet l'atteinte du niveau « 35 kWh/m²/an ».

Travaux pour atteindre 15 kWh/m²/an

3 bouquets de travaux « 15 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux + pose nu extérieur + ITE R = 5,8 (m².K)/W
2. « Base » + VMC double flux + triple vitrage + ITE R = 5,8 (m².K)/W
3. « Base » + VMC double flux + menuiseries passives (11 kWh/m²/an)

5.3 Grands collectifs 1948-1974

Tableau 4 - Résultats STD grands collectifs 48-74

	Besoin de chauffage	Besoin de chauffage	Variation	Variation	
	kWh/an	kWh/m2/an	kWh/an	kWh/m2/an	
Base	102 404	35,0			
Orientation					
Rotation 90° (Est - ouest)	105 928	36,2	3 524	1,2	+ ★★
Apports solaires					
Aucuns apports	147 991	50,5	45 587	15,6	+ ★★★★★
Masques importants	106 739	36,4	4 335	1,5	+ ★★★
Compacité					
Barre 2 x moins longue Ic = 0,86 (+9% ratio compacité)	106 117	36,2		1,3	+ ★★★
Barre 2 x moins longue R+6 Ic = 0,97 (+20% ratio compacité)	78 473	38,3		3,3	+ ★★★
Balcons					
Base sans Balcons	94 232	32,2	-8 172	-2,8	- ★★★
Base balcons partout	137 564	47,0	35 160	12,0	+ ★★★★★
Balcons filants façade sud	110 224	37,6	7 820	2,7	+ ★★★
Murs					
Isolation intérieure R = 2,7	158 774	54,2	56 370	19,2	+ ★★★★★
Isolation intérieure R=2,7 + correction enduit ext R = 0,4	137 194	46,8	34 790	11,9	+ ★★★★★
ITE R = 5,8	99 444	33,9	-2 960	-1,0	-★★
ITE R = 4,4	105 542	36,0	3 138	1,1	+★★
ITE R = 3,8	108 486	37,0	6 082	2,1	+★★
ITE R = 3,3	111 428	38,0	9 024	3,1	+★★★
ITE 8cm non modifiée	124 953	42,6	22 549	7,7	+★★★★
Tableaux de menuiseries non isolés	175 527	59,9	73 123	25,0	+★★★★★
Base, ITE réduite à R = 2,7 sur les balcons	105 741	36,1	3 337	1,1	+★★
Toiture					
Toiture R = 5,3	104 705	35,7	2 301	0,8	+★
Toit terrasse R = 1,5	110 117	37,6	7 713	2,6	+★★★
Acrotère non emballée	104 447	35,6	2 043	0,7	+★
Planchers bas					
Plancher bas non isolé	109 887	37,5	7 483	2,6	+★★★
Plancher bas sur ss sol R = 2,3	103 447	35,3	1 043	0,4	+★
Pas d'isolation périmétrique de plancher bas	103 673	35,4	1 269	0,4	+★
Menuiseries					
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 1,1	97 606	33,3	-4 798	-1,6	-★★
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 0,77	85 398	29,1	-17 006	-5,8	-★★★★
Pose menuiseries nu ext	96 148	32,8	-6 256	-2,1	-★★
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air traitée)	135 211	46,1	32 807	11,2	+★★★★★
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air mauvaise : n50 = 6 au lieu de 2)	162 462	55,4	60 058	20,5	+★★★★★
Ventilation					
Ventilation double flux 70%	53 653	18,3	-48 751	-16,6	-★★★★★
Comparaison RT					
RT existant gardes fous	159 027	54,3	56 623	19,3	+★★★★★
RT existant référence	132 125	45,1	29 721	10,1	+★★★★★
Etanchéité à l'air					
Etanchéité à l'air non traitée : n50 = 6 au lieu de 2	130 645	44,6	28 241	9,6	+★★★★
Cage ascenseur traitée étanche à l'air (renouvellement d'air 0,3 vol/h au lieu de 2 vol/h)	97 633	33,3	-4 771	-1,6	-★★

Données du bâtiment modélisé

Surface habitable du bâtiment modélisé : 2930 m²

Surfaces de parois : 2260 m²

Variation en fonction de l'indice de compacité I_c

Compacité bâtiment de base, $I_c = 0,77$

Compacité du bâtiment avec longueur divisée par 2 : $I_c = 0,86$

Compacité du bâtiment avec longueur divisée par 2 et étages réduits à R+6 : $I_c = 0,97$

On déduit des calculs une relation entre compacité et variation du besoin de chaleur : **16 kWh/m²/an/ point d' I_c**

Variation en fonction de la proportion de balcon $\%_B$

Linéaire total de nez de dalles intermédiaires = 818 m

Linéaire de ponts thermiques de balcons = 158 m

Proportion de balcons en base $\%_B = 19\%$

Linéaire de ponts thermiques de balcons si balcon filant sur une façade : 307 m

Proportion de balcons si balcons filants sur façade principale $\%_B = 38\%$

On déduit des calculs une relation entre proportion de balcon et variation du besoin de chaleur : **0,15 kWh/m²/an/ $\%_B$**

Travaux pour atteindre 35 kWh/m²/an

Le bouquet de base permet l'atteinte du niveau « 35 kWh/m²/an ».

Travaux pour atteindre 15 kWh/m²/an

3 bouquets de travaux « 15 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux + pose nu extérieur + ITE R = 5,8 (m².K)/W
2. « Base » + VMC double flux + triple vitrage + ITE R = 5,8 (m².K)/W
3. « Base » + VMC double flux + menuiseries passives (11 kWh/m²/an)

5.4 Petits collectifs 1975-1999

Tableau 5 - Résultats STD petits collectifs 75-99

	Besoin de chauffage	Besoin de chauffage	Variation			
			kWh/an	kWh/m2/an	kWh/m2/an	
Base	36 090	52,3				
Orientation						
Rotation 90° (Est - ouest)	36 299	52,6	0,3	+	★	
Apports solaires						
Aucuns apports	48 018	69,6	17,3	+	★★★★★	
Masques importants	38 526	55,8	3,5	+	★★★	
Compacité						
réduction hsp et isolation combles Ic=1,4 (forme plus compacte)	33 198	48,1	-4,2	-	★★★	
Fermeture des loggias, Ic = 1,31	33 265	46,6	-5,7	-	★★★★	
Balcons						
Absence de PT de balcons	35 544	51,5	-0,8	-	★	
Murs						
Isolation intérieure R = 2,7	55 700	80,7	28,4	+	★★★★★★	
Isolation intérieure R = 2,7 + correction enduit ext R = 0,4	50 162	72,7	20,4	+	★★★★★★	
ITE R = 5,8	34 341	49,8	-2,5	-	★★★	
ITE R = 4,4	37 449	54,3	2,0	+	★★	
ITE R = 3,8	39 163	56,8	4,5	+	★★★	
ITE R = 3,3	41 390	60,0	7,7	+	★★★★	
Isolation complète de l'enveloppe, y compris des garages, dont portes performantes	30 390	44,0	-8,3	-	★★★★	
Tableaux de menuiseries non isolés	50 698	36,8	21,2	+	★★★★★★	
Base, ITE réduite à R = 2,7 sur les balcons	36 843	18466,1	1,1	+	★★	
Toiture						
Toiture R = 5,3	36 983	53,6	1,3	+	★★	
Planchers bas						
Plancher bas isolé R = 2,3	35 420	51,3	-1,0	-	★	
Pas d'isolation enterrée fondation	36 912	53,5	1,2	+	★★	
Menuiseries						
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 1,1	35 170	51,0	-1,3	-	★★	
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 0,77	32 658	47,3	-5,0	-	★★★	
Pose menuiseries nu ext	34 090	49,4	-2,9	-	★★★	
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air traitée)	43 080	62,4	10,1	+	★★★★★★	
Double vitrage Ug = 2,4 (mauvaise étanchéité à l'air : n50 = 6 au lieu de 2)	51 111	74,1	21,8	+	★★★★★★	
Ventilation						
Ventilation double flux 70%	23 441	34,0	-18,3	-	★★★★★	
Comparaison RT						
RT existant gardes fous	58 035	84,1	31,8	+	★★★★★★	
RT existant référence	49 417	71,6	19,3	+	★★★★★★	
Etanchéité à l'air						
Etanchéité à l'air non traitée (n50 = 6 au lieu de 2)	42 676	61,8	9,5	+	★★★★	

Données du bâtiment modélisé

Surface habitable du bâtiment modélisé : 690 m²

Surfaces de parois : 1377 m²

Variation en fonction de l'indice de compacité I_c

Compacité bâtiment de base, $I_c = 1,71$

Compacité du bâtiment si réduction de la hauteur sous plafond en étages avec isolation des combles ainsi créés : $I_c = 1,4$

Compacité du bâtiment avec fermeture des loggias : $I_c = 1,3$ (Surface habitable = 714 m²)

On déduit des calculs une relation entre compacité et variation du besoin de chaleur : **15 kWh/m²/an/ point d' I_c**

Variation en fonction de la proportion de balcon $\%_B$

Linéaire total de nez de dalles intermédiaires = 222 m

Linéaire de ponts thermiques de balcons = 12 m

Proportion de balcons en base $\%_B = 6\%$ (En dehors des quelques loggias, pas de traversées de dalles intermédiaires)

On déduit des calculs une relation entre proportion de balcon et variation du besoin de chaleur : **0,14 kWh/m²/an/ $\%_B$**

Travaux pour atteindre 35 kWh/m²/an

Sur cette typologie, le bouquet de base ne permet pas d'atteindre l'objectif initial de 35 kWh/m²/an.

4 bouquet de travaux « 35 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux à récupération de chaleur
2. « Base » + isolation ITE complète y compris portes garages performantes + ITE R = 5,8 (m².K)/W + menuiseries passives au nu extérieur
3. « Base » + fermeture loggias + ITE R = 5,8 (m².K)/W + menuiseries passives au nu extérieur
4. « Base » + fermeture loggias + réduction hauteur sous plafond avec faux plafonds isolés + isolation ITE complète y compris portes garages performantes

Travaux pour atteindre 15 kWh/m²/an

1 bouquet de travaux « 15 kWh/m²/an » :

- « Base » + VMC double flux + fermeture loggias + réduction hauteur sous plafond avec faux plafonds isolés + isolation ITE complète y compris portes garages performantes + triple vitrage

5.5 Moyens collectifs 1975-1999

Tableau 6 - Résultats STD moyens collectifs 75-99

	Besoin de chauffage	Besoin de chauffage	Variation	Variation		
	kWh/an	kWh/m2/an	kWh/an	kWh/m2/an		
Base	93 825	32,8				
Orientation						
Rotation 90° (Est - ouest)	95 170	33,3	1 345	0,5	+	★
Apports solaires						
Aucuns apports	130 334	45,6	36 509	12,8	+	★★★★★
Masques importants	99 547	34,8	5 722	2,0	+	★★
Compacité						
Base, R+10	168 194	29,4		-3,4	-	★★★
Bâtiment mitoyen sur 1 côté (Ic = 0,76)	91 208	31,9	-2 617	-0,9	-	★
Balcons						
Base sans Balcons	83 008	29,0	-10 817	-3,8	-	★★★
Base balcons partout	113 775	39,8	19 950	7,0	+	★★★★★
Murs						
Isolation intérieure R = 2,7	129 553	45,3	35 728	12,5	+	★★★★★
Isolation intérieure R = 2,7 + correction enduit ext R = 0,4	112 253	39,2	18 428	6,4	+	★★★★★
ITE R = 5,8	91 563	32,0	-2 262	-0,8	-	★
ITE R = 4,4	95 589	33,4	1 764	0,6	+	★
ITE R = 3,8	97 821	34,2	3 996	1,4	+	★★
Tableaux de menuiseries non isolés	159 541	55,8	65 716	23,0	+	★★★★★★
Base, ITE réduite à R = 2,7 sur les balcons	97 301	34,0	3 476	1,2	+	★★
Toiture						
Toiture R = 5,3	96 028	33,6	2 203	0,8	+	★
Toit terrasse R = 1,5	105 367	36,8	11 542	4,0	+	★★★
Acrotère non emballée	96 862	33,9	3 037	1,1	+	★★
Planchers bas						
Plancher bas non isolé	102 185	35,7	8 360	2,9	+	★★★
Plancher bas R = 2,3	95 112	33,2	1 287	0,4	+	★
Périmètre fondation non isolé	96 023	33,6	2 198	0,8	+	★
Menuiseries						
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 1,1	88 937	31,1	-4 888	-1,7	-	★★
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 0,77	79 447	27,8	-14 378	-5,0	-	★★★★
Pose menuiseries nu ext	87 597	30,6	-6 228	-2,2	-	★★
Double vitrage Ug = 2,4	122 788	42,9	28 963	10,1	+	★★★★★
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air mauvaise : n50 = 6 au lieu de 2)	147 331	51,5	53 506	18,7	+	★★★★★
Ventilation						
Ventilation double flux 70%	49 146	17,2	-44 679	-15,6	-	★★★★★
Comparaison RT						
RT existant gardes fous	144 168	50,4	50 343	17,6	+	★★★★★
RT existant référence	121 144	42,3	27 319	9,5	+	★★★★
Etanchéité à l'air						
Etanchéité à l'air non traitée (n50 = 6 au lieu de 2)	120 643	42,2	26 818	9,4	+	★★★★

Données du bâtiment modélisé

Surface habitable du bâtiment modélisé : 2861 m²

Surfaces de parois : 2334 m²

Variation en fonction de l'indice de compacité I_c

Compacité bâtiment de base, $I_c = 0,82$

Compacité du bâtiment si mitoyen sur un pignon, $I_c = 0,76$

Compacité du bâtiment si mitoyen et R+10, $I_c = 0,59$

On déduit des calculs une relation entre compacité et variation du besoin de chaleur : **15 kWh/m²/an/ point d' I_c**

Variation en fonction de la proportion de balcon %B

Linéaire total de nez de dalles intermédiaires = 559 m

Linéaire de ponts thermiques de balcons = 209 m

Proportion de balcons en base %_B = 37%

On déduit des calculs une relation entre proportion de balcon et variation du besoin de chaleur : **0,11 kWh/m²/an/%_B**

Travaux pour atteindre 35 kWh/m²/an

Le bouquet de « base » atteint un besoin de chauffage de 33 kWh/m²/an < 35 kWh/m²/an.

Travaux pour atteindre 15 kWh/m²/an

2 bouquets de travaux « 15 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux + triple vitrage
2. « Base » + VMC double flux + pose au nu extérieur

5.6 Grands collectifs 1975-1999

Tableau 7 - Résultats STD grands collectifs 75-99

	Besoin de chauffage		Variation kWh/an	Variation		
	kWh/an	kWh/m2/an		kWh/an	kWh/m2/an	
Base	171 694	30,0				
Orientation						
Rotation 90° (Est - ouest)	174 006	30,4	2 312	0,4	+	★
Apports solaires						
Aucuns apports	245 487	42,9	73 793	12,9	+	★★★★★
Masques importants	178 653	31,2	6 959	1,2	+	★★
Compacité						
Base, R+7	124 902	31,2		1,2	+	★★
Bâtiment mitoyen sur 1 côté	167 048	29,2	-4 646	-0,8	-	★
Balcons						
Base sans Balcons	149 312	26,1	-22 382	-3,9	-	★★★
Base balcons partout	213 345	37,3	41 651	7,3	+	★★★★★
Murs						
Isolation intérieure R = 2,7	246 481	43,1	74 787	13,1	+	★★★★★
Isolation intérieure R = 2,7 + correction enduit ext R = 0,4	213 542	37,3	41 848	7,3	+	★★★★★
ITE R = 5,8	165 801	29,0	-5 893	-1,0	-	★★
ITE R = 4,4	176 009	30,8	4 315	0,8	+	★
ITE R = 3,8	180 523	31,5	8 829	1,5	+	★★
Tableaux de menuiseries non isolés						
Base, ITE réduite à R = 2,7 sur les balcons						
Toiture						
Toiture R = 5,3	174 484	30,5	2 790	0,5	+	★
Toit terrasse R = 1,5	183 553	32,1	11 859	2,1	+	★★
Planchers bas						
Plancher bas non isolé	180 485	31,5	8 791	1,5	+	★★
Plancher bas R = 2,3	172 925	30,2	1 231	0,2	+	★
Menuiseries						
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 1,1	161 408	28,2	-10 286	-1,8	-	★★
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 0,77	142 060	24,8	-29 634	-5,2	-	★★★★★
Pose menuiseries nu ext	158 184	27,6	-13 510	-2,4	-	★★
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air traitée)	232 962	40,7	61 268	10,7	+	★★★★★
Double vitrage Ug = 2,4 (étanchéité à l'air mauvaise : n50 = 6 au lieu de 2)	247 301	43,2	75 607	13,2	+	★★★★★
Ventilation						
Ventilation double flux 70%	81 353	14,2	-90 341	-15,8	-	★★★★★
Comparaison RT						
RT existant gardes fous	269 266	47,1	97 572	17,1	+	★★★★★
RT existant référence	223 568	39,1	51 874	9,1	+	★★★★★
Etanchéité à l'air						
Etanchéité à l'air non traitée (n50 = 6 au lieu de 2)	225 381	39,4	53 687	9,4	+	★★★★★

Données du bâtiment modélisé

Surface habitable du bâtiment modélisé : 5722 m²

Surfaces de parois : 3957 m²

Variation en fonction de l'indice de compacité I_c

Compacité bâtiment de base, $I_c = 0,69$

Compacité du bâtiment si mitoyen sur un pignon, $I_c = 0,64$

Compacité du bâtiment si R+7, $I_c = 0,74$

On déduit des calculs une relation entre compacité et variation du besoin de chaleur : **18 kWh/m²/an/ point d' I_c**

Variation en fonction de la proportion de balcon $\%_B$

Linéaire total de nez de dalles intermédiaires = 1120 m

Linéaire de ponts thermiques de balcons = 420 m

Proportion de balcons en base $\%_B = 37\%$

On déduit des calculs une relation entre proportion de balcon et variation du besoin de chaleur : **0,11 kWh/m²/an/ $\%_B$**

Travaux pour atteindre 35 kWh/m²/an

Le bouquet de « base » atteint un besoin de chauffage de 33 kWh/m²/an < 35 kWh/m²/an.

Travaux pour atteindre 15 kWh/m²/an

Bouquet de travaux « 15 kWh/m²/an » (d'autres combinaisons de travaux sont possibles) :

1. « Base » + VMC double flux

5.7 Synthèse des résultats

Tableau 8 - Synthèse des calculs STD

	Petit 49-74	Moyen 49-74	Grand 49-74	Petit 75-99	Moyen 75-99	Grand 75-99
Base	47,4	34,2	35,0	52,3	32,8	30,0
Orientation						
Rotation 90° (Est - ouest)	-0,3	0,8	1,2	0,3	0,5	0,4
Apports solaires						
Aucuns apports	17,2	17,2	15,6	17,3	12,8	12,9
Masques importants	3,2	2,5	1,5	3,5	2	1,2
Compacité						
kWh/m2/an par point de compacité	15	18	16	15	16	18
Balcons						
kWh/m2/an/% _B	0,13	0,14	0,14	0,16	0,11	0,11
Murs						
Isolation intérieure R = 2,7	18	18,2	19,2	28,4	12,5	13,1
Isolation intérieure R = 2,7 + correction enduit ext R = 0,4	10,6	11,4	11,9	20,4	6,4	7,3
Isolation enveloppe complète (dont garages RDC)				-8,3		
ITE R = 5,8	-1,2	-1	-1	-2,5	-0,8	-1
ITE R = 4,4	0,9	0,8	1,1	2	0,6	0,8
ITE R = 3,8	2	1,7	2,1	4,5	1,4	1,5
ITE R = 3,3	3,5	3	3,1	7,5		
ITE sans retours tableaux	31	29	25	21	23	23
ITE sur balcons réduite à R = 2,7	1,6	1,5	1,3	1,1	1,2	1,2
Toitures						
Toiture R = 5,3		0,8	0,8	1,3	0,8	0,5
"Toit terrasse avec acrotère emballée" au lieu de "isolation des combles avec pont thermique non traité"	-2,3					
Acrotère non emballée		1,1	0,7		1,1	0,8
Planchers bas						
Plancher bas sur TP non isolé (si pas de cave)	-3,9					
Plancher bas sur TP R = 1,5	-4,3			0,4		
Plancher bas non isolé sur VS ou cave		3,8	2,6		2,9	1,5
Plancher bas sur sous sol R = 2,3	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2
Pas d'isolation du périmètre des fondations	1,6	0,7	0,4	1,2	0,8	0,5
Menuiseries						
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 1,1	-2,7	-2,1	-1,6	-1,3	-1,7	-1,8
Triple vitrage Ug = 0,7 ; Uw = 0,77	-7,1	-6,7	-5,8	-5	-5	-5,2
Pose menuiseries nu ext	-3,8	-2,4	-2,1	-3,8	-2,2	-2,4
Menuiseries Ug = 2,4, étanchéité à l'air traitée	12,8	13,6	11,2	10,1	10,1	10,7
Menuiseries Ug = 2,4, étanchéité à l'air non traitée (n50 = 6 au lieu de 2)	21,6	23,8	20,5	21,8	18,7	23,2
Ventilation						
Ventilation double flux 70%	-19,3	-16,2	-16,6	-19,3	-15,6	-15,8
Comparaison RT						
"RT existant - gardes fous"	25,2	22,5	19,3	31,8	17,6	17,1
"RT existant - références"	13,7	12	10,1	19,3	9,5	9,1
Etanchéité à l'air						
Etanchéité à l'air non traitée : n50 = 6 au lieu de 2	9,6	9,5	9,6	9,5	9,4	9,4

5.8 Enseignements principaux

5.8.1 Bouquets de base

Les 4 typologies « moyens 48-74 », « grands 48-74 », « moyens 75-99 » et « grands 75-99 » atteignent un besoin de chauffage inférieur à 35 kWh/m²/an après l'application du bouquet de base « meilleure technologie disponible à un coût maîtrisés ».

Les petits collectifs traités en « base » ont en revanche une performance assez éloignée de l'objectif initial fixé par la Région Alsace : 47 et 52 kWh/m²/an. Ceci s'explique en grande partie par la compacité assez faible de ces bâtiments.

En appliquant les résultats des calculs en version « base » aux statistiques établies pendant la première phase de l'étude, on obtient un besoin de chauffage moyen de **40,5 kWh/m²/an** après rénovation pour le parc de logements collectifs alsaciens construits après 1948.

L'application d'un bouquet de travaux « références RT existant » (cf. annexe 2) conduirait à un besoin de chauffage moyen de 54 kWh/m²/an.

L'application d'un bouquet de travaux « gardes fous RT existant » (cf. annexe 2) conduirait à un besoin de chauffage moyen de 64 kWh/m²/an.

RT existant - gardes fous	RT existant - références	Meilleure techno disponible à coût maîtrisé
64 kWh/m ² /an	54 kWh/m ² /an	40,5 kWh/m ² /an

5.8.2 Orientation du bâtiment

L'orientation du bâtiment influe assez peu sur la performance thermique. Si l'orientation Nord-Sud (hypothèse de base) est évidemment la plus favorable, l'influence d'une rotation à 90° sur le besoin de chauffage se limite à 0,5 à 1,2 kWh/m²/an suivant les typologies.

5.8.3 Cas des petits bâtiments construits sur terre-plein

Lorsqu'un bâtiment est construit sur terre-plein, les déperditions thermiques par le sol sont très réduites, les variations de température du sol étant bien moins importantes que celles de l'air.

Cette observation nous conduit à ne pas conseiller l'isolation des planchers bas sur terre-plein, ni sur vide sanitaire inaccessible. L'impact sur la baisse des consommations de chauffage est effet trop faible au regard du coût des travaux à réaliser.

5.8.4 Masques solaires

Logiquement, nous observons que l'influence d'un masque constitué par des bâtiments de 20m de hauteur situés à 20m de distance des façades, diminue avec la hauteur du bâtiment étudié. L'impact d'un tel masque varie de 1,2 kWh/m²/an (pour le bâtiment le plus grand et comportant un ratio de fenêtre un peu plus faible que les autres) à 3,5 kWh/m²/an pour un petit bâtiment avec plus de fenêtres.

5.8.5 Balcons

L'impact du pont thermique de balcon varie de 0,11 à 0,16 kWh/m²/an/%_B suivant les typologies. Cette valeur n'est absolument pas négligeable et souligne l'impact important des ponts thermiques des balcons dans un bâtiment à basse consommation d'énergie.

5.8.6 Compacité

L'impact de la compacité sur le besoin de chauffage varie de 15 à 18 kWh/m²/an/lc.

5.8.7 Retours d'isolant en tableau (ITE)

Nous avons calculé, pour la typologie « grands 48-74 », une variante où il n'y aurait pas de retours d'isolant en tableaux.

Cela engendre une augmentation du besoin de chauffage de 25 kWh/m²/an.

Il est donc absolument inenvisageable de se passer de ce traitement de pont thermique qui entraîne une surconsommation équivalente au gain engendré par l'isolation de l'ensemble des murs !

Cet enseignement est généralisable à l'ensemble des typologies. La surconsommation n'est toutefois pas toujours la même dans la mesure où les déperditions supplémentaires sont proportionnelles au linéaire de tableau.

5.8.8 Traitement du pont thermique d'acrotère par « emballage »

L'absence de traitement du pont thermique d'acrotère entraîne une augmentation du flux de chaleur à cet endroit. La valeur du pont thermique passe ainsi de $\psi = 0,1$ à $\psi = 0,5$ (valeurs calculées sous THERM 6).

La hausse moyenne de besoin de chauffage engendrée par l'absence de traitement du pont thermique d'acrotère est de 1 kWh/m²/an.

5.8.9 Traitement du pont thermique planchers bas - mur

L'absence de traitement du pont thermique de planchers bas (isolation enterrée $R = 3$ sur 60cm) entraîne une augmentation du flux de chaleur à cet endroit. La valeur du pont thermique passe ainsi de $\psi = 0,1$ à $\psi = 0,49$ (valeurs tabulées Th BCE).

La hausse de besoin de chauffage engendrée par l'absence de traitement du pont thermique du plancher bas varie de 0,5 à 1,5 kWh/m²/an.

Dans le cas des sous-sols semi-enterrés, l'ITE est posé jusqu'au niveau du sol. Le pont thermique de la dalle entre RDC et sous-sol est donc fortement réduit.

5.8.10 Enduit extérieur isolant dans le cas d'une isolation intérieure

La mise en œuvre d'un enduit isolant (3cm d'enduit chaux - chanvre par exemple + protection 2cm enduit chaux - sable) par l'extérieur permet, dans le cas d'une isolation par l'intérieur des murs, d'améliorer la résistance thermique du mur mais surtout de limiter fortement le pont thermique des nez de dalles intermédiaire, qui passe de $\psi_{ITI} = 0,97$ à $\psi_{ITI+correction\ enduit} = 0,6$. Les valeurs ψ ont été calculées avec le logiciel de calcul de pont thermique THERM6.

La baisse de besoin de chauffage engendrée par cette correction varie de 6 à 8 kWh/m²/an.

5.8.11 Ventilation double flux à récupération de chaleur

Du point de vue de la réduction des besoins de chauffage, la ventilation double flux à récupération de chaleur est une excellente solution. Elle permet un gain de 16 à 19 kWh/m²/an, soit environ la moitié du besoin de chauffage d'un bâtiment rénové avec les « meilleures technologies disponibles à un coût maîtrisé ».

Il nous semble toutefois nécessaire de rappeler que la consommation électrique des ventilateurs n'est pas négligeable : environ 4 à 5 kWh_{électrique} /m²/an, soit 11 kWh_{EP}/m²/an. En consommation d'énergie primaire, le gain induit par une VMC double flux à récupération de chaleur se situe donc plutôt autour de 5 à 8 kWh_{EP}/m²/an.

5.8.12 Impact de l'étanchéité à l'air

Les défauts d'étanchéité à l'air les plus fréquemment observés dans l'existant se situent au niveau :

- Des menuiseries elles même : parclozes, joints entre ouvrants et dormants,...
- De la jonction entre menuiseries et maçonnerie
- Des coffres de protections solaires (volets roulants en particulier)
- Des percements divers : gaines de ventilation, prises électriques,...
- Des joints de maçonnerie ou entre éléments préfabriqués

Dans le cadre d'une rénovation, il est possible d'améliorer grandement l'étanchéité à l'air des logements en supprimant les fuites au niveau des menuiseries (changement, pose soignée), des coffres de VR (coffres isolés, avec un joint étanche au niveau de la trappe d'accès côté intérieur), enduit étanche à l'air sur les joints d'éléments préfabriqués,...

Dans le cas où l'étanchéité à l'air ne serait pas améliorée, nous évaluons les infiltrations moyennes durant la période de chauffe à 0,15 vol/h (cf. annexe 2, paragraphe 12.6).

L'augmentation de besoin de chauffage est alors d'environ 10 kWh/m²/an. Lors d'une rénovation énergétique performante, il est donc souvent nécessaire de changer les dormant, ou à minima de vérifier par un test d'étanchéité à l'air que leur jonction avec la maçonnerie est bien étanche.

Au-delà des considérations purement énergétiques, il s'agit également de confort et de santé du bâti.

Remarque : lorsque les menuiseries ne sont pas changées (changement récent par exemple), il est toutefois possible d'améliorer sensiblement l'étanchéité à l'air, en procédant au réglage des menuiseries existantes, à la réfection des joints et au changement des coffres de volets roulants (pose à l'extérieur, pose d'un joint étanche à l'air au niveau de la trappe).

5.8.13 Dégradation des performances des planchers hauts et bas

Si la dégradation des performances thermiques des planchers (planchers bas non isolé, conservation d'une épaisseur faible d'isolant en toiture,...) n'est pas forcément très impactant à l'échelle du bâtiment, elle l'est beaucoup plus au niveau des logements en contact avec ces parois.

Il est alors important d'être très vigilant sur l'éventuel redimensionnement (cas d'une rénovation de chaufferie) et l'équilibrage des réseaux de chauffage, de manière à ce que la puissance de chauffage soit toujours suffisante dans ces logements.

Enfin, nous encourageons vivement l'isolation des planchers bas sur sous-sol pour éviter tout effet de parois froides source d'inconforts : sensation de "pieds froids".

6 Approche globale sur la durée de vie du bâtiment

6.1 Introduction à l'analyse de cycle de vie

Pour évaluer l'impact environnemental global d'un bâtiment, il est nécessaire de ne pas considérer seulement son impact pendant son utilisation, mais bien depuis l'extraction des matières premières nécessaires à son construction jusqu'à sa déconstruction et l'élimination des déchets.

On appelle cette approche globale une Analyse de Cycle de Vie (ACV).

On utilise communément les indicateurs d'impact environnementaux suivants :

- Consommation énergétique (« énergie grise » + énergie consommée en fonctionnement)
- Epuisement des ressources
- Consommation d'eau
- Production de déchets
- Changement climatique
- Acidification atmosphérique
- Pollution de l'air
- Pollution de l'eau
- Destruction de la couche d'ozone
- Formation d'ozone photochimique

Une ACV dans le domaine du bâtiment est assez complexe dans la mesure où un nombre très important de matériaux et systèmes entrent dans la construction des bâtiments.

Au vu du nombre d'indicateurs, on comprend aisément que la comparaison de différentes solutions constructives n'est pas triviale, une solution pouvant être meilleure sur un critère et moins bonne sur un autre.

De manière à comparer des solutions entre elles, il est donc nécessaire de hiérarchiser les critères, et ainsi définir des critères prioritaires sur lesquels baser notre analyse.

Nous pensons que la problématique la plus importante à l'heure actuelle est la lutte contre le changement climatique. Même si la plupart des acteurs du bâtiment communiquent aujourd'hui beaucoup plus sur la réduction de la consommation énergétique (aspect économique oblige), nous rappelons que c'est bien « l'urgence climatique » qui a conduit la France à prendre les engagements du Grenelle. La réduction de la consommation énergétique est un moyen de lutter contre le changement climatique (dans la mesure où la plupart des moyens de production d'énergie, notamment de chauffage, ont un impact fort sur le climat), mais il n'est pas le seul. En particulier, la mise en œuvre de matériaux à faible

impact carbone pendant leur construction, ou les matériaux biosourcés qui sont des puits de carbone, ont un impact très positif dans la lutte contre le changement climatique.

L'indicateur de consommation d'énergie n'est donc à notre sens pas très intéressant s'il est pris seul.

Nous conservons pour notre analyse le seul indicateur sur le changement climatique, exprimé en kg équivalent CO₂.

6.2 Exemple d'approche ACV pour le choix d'un isolant extérieur sous enduit

Nous proposons ci-dessous une analyse simplifiée avec une approche de type bilan carbone pour un bâtiment isolé par l'extérieur sous enduit avec différents matériaux.

Nous avons ainsi effectué une comparaison de l'impact global équivalent CO₂ d'une isolation extérieure avec 3 matériaux différents : polystyrène expansé, laine de roche et laine de bois.

Nous avons tout d'abord calculé, pour des résistances thermiques de parois allant de R = 3,3 à R = 8, les économies annuelles de chauffage par rapport à une solution de base, que nous avons ramenées au m² de paroi. Nous avons ensuite traduit ces économies d'énergie en réduction d'émission de CO₂ pour une solution gaz et une solution électrique. Voir tableau 10.

Tableau 9 - Impact CO₂, énergie de chauffage

	g eqCO ₂ / kWh
Electricité de chauffage (source Ademe / RTE)	180
Gaz (source Ademe)	234

Tableau 10 - Impact CO₂ des économies de chauffage électrique ou gaz avec l'augmentation de la résistance thermique de l'ITE (Cas du bâtiment de référence de la typologie moyens 48-74)

Murs - ITE (Moyen 48-74)	Epaisseur isolant	Impact CO ₂ dû aux variations de consommation énergétique (delta /à référence)			
		Besoin		Conso ($\eta_{elec} = 100\%$ / $\eta_{gaz} = 85\%$)	
		kWh/m ² _{SHAB} /an	kWh/m ² _{paroi}	kg eqCO ₂ /m ² _{paroi} élec	kg eqCO ₂ /m ² _{paroi} gaz
Référence R = 3,3 (12cm)	12	0,00	0	0,0	0,0
R = 3,8 (14cm)	14	-1,25	-3	-0,5	-0,7
R = 4,4 (16cm)	16	-2,23	-5	-0,8	-1,2
R = 4,9 (18cm)	18	-3,00	-6	-1,1	-1,7
R = 5,8 (22cm)	21,5	-3,98	-8	-1,4	-2,2
R = 7 (26cm)	26	-4,94	-10	-1,8	-2,8
R = 8 (30cm)	30	-5,54	-11	-2,0	-3,1

Le tableau 12 présente l'impact CO₂ de chaque matériau en fonction de son épaisseur, ramené au m² de paroi. Nous avons pour cela considéré que les durées de vie des 3 matériaux isolants étaient les mêmes, dans la mesure où ils sont tous utilisés dans les mêmes conditions comme isolants derrière un système d'ITE.

Tableau 11 - Impact changement climatique, isolation extérieure (source : outil e-LICCO, basé sur Eco Bau et adapté au contexte français)

Isolants extérieurs	kg eqCO ₂ / kg	kg/m ³	kg eqCO ₂ / m ³	kg eqCO ₂ / cm d'épaisseur
PSE blanc, produit standard	4,2	17	71	0,71
Laine de roche, haute résistance	1,4	110	149	1,49
Laine de bois rigide	-1,4	140	-198	-1,98

6.2.1 Temps de retour carbone par rapport à la solution de référence 12cm de polystyrène expansé

La première question que nous nous posons est celle du « temps de retour carbone » d'une augmentation d'épaisseur d'isolant par rapport à la référence R = 3,3 en polystyrène expansé.

La question est ici de savoir si l'impact carbone engendrée par l'augmentation d'épaisseur d'isolant par rapport à cette référence (12cm de PSE) est compensée par les économies de chauffage au bout d'un temps suffisamment faible (< 25 ans).

Nous ne posons cette question que pour la laine de roche et le polystyrène. En effet, la laine de bois étant un puits de carbone, la notion de temps de retour d'une augmentation d'épaisseur n'existe pas, dans la mesure où toute augmentation d'épaisseur entraîne un effet doublement positif : stockage de carbone plus important et réduction de la consommation de chauffage et des émissions de carbone associées.

Nous calculons donc dans le tableau 12 le nombre d'années au bout duquel la « neutralité carbone » par rapport à la solution de référence R = 3,3 en PSE (12cm d'isolant environ) est atteinte.

Tableau 12 - Calcul des « temps de retour carbone » pour des augmentations d'épaisseur de PSE et de laine de roche haute densité posés en ITE, par rapport à une solution 12cm de PSE

Murs - ITE (Moyen 48-74)	Epaisseur isolant	Impact CO2 matériaux		Bilan	
		Totale	(Delta /à référence)	Années justifiées "surperformance" des cm en + par rapport à 12cm R = 3,3	
				Chauffage élec	Chauffage gaz
		kg eqCO2/m ² paroi	kg eq CO2/m ² paroi	Années	Années
Référence R = 3,3 (12cm)	12	+9	+0		
R = 3,8 (14cm)	14	+10	+1	3,1	2,0
R = 4,4 (16cm)	16	+11	+3	3,5	2,3
R = 4,9 (18cm)	18	+13	+4	3,9	2,6
R = 5,8 (22cm)	21,5	+15	+7	4,7	3,1
R = 7 (26cm)	26	+19	+10	5,6	3,6
R = 8 (30cm)	30	+21	+13	6,4	4,2
Laine de roche (haute densité)					
R = 3,3 (12cm)	12	+18	+9		
R = 3,8 (14cm)	14	+21	+12	6,5	4,3
R = 4,4 (16cm)	16	+24	+15	7,3	4,8
R = 4,9 (18cm)	18	+27	+18	8,2	5,3
R = 5,8 (21,5cm)	21,5	+32	+23	9,7	6,4
R = 7 (26cm)	26	+39	+30	11,6	7,6
R = 8 (30cm)	30	+45	+36	13,3	8,7

Les calculs résumés dans le tableau 12 permettent de montrer que, par rapport à une solution avec 12cm de PSE, le choix d'une épaisseur d'isolant supérieure est toujours intéressant du point de vue de la lutte contre le changement climatique, car le « temps de retour carbone » est toujours inférieur à 25 ans.

6.2.2 Epaisseur d'isolant : où s'arrêter dans l'augmentation de l'épaisseur ?

Nous venons de nous rendre compte qu'il est toujours intéressant de choisir une épaisseur supérieure à 12cm de PSE. Mais où s'arrêter ? A partir de quand les cm supplémentaires ne se justifient plus ?

Nous avons pour cela calculé à nouveau des temps de retour carbone. Cependant, cette fois ci, nous n'avons plus comparé les différentes solutions par rapport à la seule référence 12cm de PSE, mais à chaque fois par rapport à une épaisseur tout juste inférieure (quelques cm de moins). Pour simplifier, la réflexion peut être résumée ainsi :

- Nous regardons si le passage de 12cm à 14cm est justifié.
- Si oui, nous regardons alors si le passage de 14cm à 16cm est justifié.
- Et ainsi de suite,...

Nous résumons les résultats dans le tableau 13

Tableau 13 - Calcul des « temps de retour carbone » pour des augmentations d'épaisseur de PSE et de laine de roche haute densité posés en ITE

Murs - ITE (Moyen 48-74)	Epaisseur isolant	Impact CO2 matériaux		Bilan	
		Totale	(Delta /à référence)	Années justifiées "surperformance" des cm en + par rapport à épaisseur précédente	
		kg eqCO2/m ² paroi	kg eq CO2/m ² paroi	Chauffage élec	Chauffage gaz
				Années	Années
Référence R = 3,3 (12cm)	12	+9	+0		
R = 3,8 (14cm)	14	+10	+1	3,1	2,0
R = 4,4 (16cm)	16	+11	+3	4,0	2,6
R = 4,9 (18cm)	18	+13	+4	5,1	3,3
R = 5,8 (22cm)	21,5	+15	+7	7,0	4,6
R = 7 (26cm)	26	+19	+10	9,2	6,0
R = 8 (30cm)	30	+21	+13	13,2	8,7
Laine de roche (haute densité)					
R = 3,3 (12cm)	12	+18	+9		
R = 3,8 (14cm)	14	+21	+12	6,5	4,3
R = 4,4 (16cm)	16	+24	+15	8,4	5,5
R = 4,9 (18cm)	18	+27	+18	10,6	6,9
R = 5,8 (21,5cm)	21,5	+32	+23	14,6	9,5
R = 7 (26cm)	26	+39	+30	19,1	12,5
R = 8 (30cm)	30	+45	+36	27,5	18,0

Dans l'exemple que nous venons de calculer, on se rend compte que :

- Au moins jusqu'à 30cm (pas de calculs au-delà), l'augmentation d'épaisseur de PSE est toujours rentable du point de vue bilan carbone
- Jusqu'à 26cm, l'augmentation de l'épaisseur de LDR haute densité est toujours rentable

- En revanche, les 4cm supplémentaire pour passer de 26cm à 30cm de laine de roche haute densité ne se justifient qu'après 18 ans (chauffage gaz) à 28 ans (chauffage électrique). Au regard de la durée de vie des matériaux et de l'urgence climatique, il ne nous semble donc pas opportun d'aller jusque-là.
- Plus on augmente l'épaisseur, plus les temps de retour sont long.

Remarque 1 : Attention, il s'agit d'une approche simplifiée ne prenant pas en compte la modification du système d'accroche avec augmentation de l'épaisseur.

Remarque 2 : Attention, ces conclusions ne sont valables que pour les densités précisées en ITE sous enduit. Les conclusions seraient différentes en isolation sous bardage ou en isolation par l'intérieur : on utiliserait en effet de laine de roche à plus faible densité ayant un impact carbone moindre, si bien que la laine deviendrait plus intéressante que le PSE.

6.2.3 Choix de l'isolant : comparaison des impacts carbonés globaux

Nous cherchons désormais, pour n'importe quel matériau et n'importe quelle épaisseur, à comparer les impacts CO₂ globaux pour un nombre d'années donné.

Cette approche nous permet par exemple de répondre aux types de questions suivantes :

- Ai-je intérêt à choisir un matériau à moindre impact carbone, quitte à réduire un peu la performance thermique ?
- Est-il plus intéressant, du point de vue bilan carbone, de mettre en œuvre 12cm de laine de bois ou 18cm de PSE ?
- A partir de combien d'années le gain de performance des 18cm de PSE compense-t-il l'impact carbone supérieur du matériau mis en œuvre ?

A partir des résultats du tableau 14, nous traçons les courbes de bilans carbone globaux des différentes solutions en fonction du temps.

Tableau 14 - Bilans carbonés comparés (par rapport à la référence R = 3,3 en PSE) d'isolations extérieures en PSE, laine de roche et laine de bois en différentes épaisseurs - Exemple après 15 ans d'utilisation

Murs - ITE (Moyen 48-74)	Epaisseur isolant	Impact CO2 économisé grâce à la réduction de conso énergétique (delta /à référence)		Impact CO2 matériaux		Bilan	
		Conso (nelec = 100% / ngaz= 85%)		Totale	(Delta /à référence)	Nb années :	15
		kg eqCO2/m ² paroi élec	kg eqCO2/m ² paroi gaz	kg eqCO2/m ² paroi	kg eq CO2/m ² paroi	Chauffage élec	Chauffage gaz
PSE							
Référence R = 3,3 (12cm)	12	0,0	0,0	9	0	0	0
R = 3,8 (14cm)	14	6,8	10,5	10	1,4	-5	-9
R = 4,4 (16cm)	16	12,2	18,6	11	2,9	-9	-16
R = 4,9 (18cm)	18	16,4	25,0	13	4,3	-12	-21
R = 5,8 (22cm)	21,5	21,7	33,2	15	6,8	-15	-26
R = 7 (26cm)	26	27,0	41,3	19	10,0	-17	-31
R = 8 (30cm)	30	30,2	46,2	21	12,9	-17	-33
Laine de roche (haute densité)							
R = 3,3 (12cm)	12	0,0	0,0	18	9,3	9	9
R = 3,8 (14cm)	14	6,8	10,5	21	12,2	5	2
R = 4,4 (16cm)	16	12,2	18,6	24	15,2	3	-3
R = 4,9 (18cm)	18	16,4	25,0	27	18,2	2	-7
R = 5,8 (21,5cm)	21,5	21,7	33,2	32	23,4	2	-10
R = 7 (26cm)	26	27,0	41,3	39	30,0	3	-11
R = 8 (30cm)	30	30,2	46,2	45	36,0	6	-10
Laine de bois (haute résistance)							
R = 3,3 (12cm)	12	0,0	0,0	-24	-32,3	-32	-32
R = 3,8 (14cm)	14	6,8	10,5	-28	-36,3	-43	-47
R = 4,4 (16cm)	16	12,2	18,6	-32	-40,3	-52	-59
R = 4,9 (18cm)	18	16,4	25,0	-36	-44,2	-61	-69
R = 5,8 (21,5cm)	21,5	21,7	33,2	-43	-51,2	-73	-84
R = 7 (26cm)	26	27,0	41,3	-52	-60,1	-87	-101
R = 8 (30cm)	30	30,2	46,2	-59	-68,0	-98	-114

Remarque quant à la lecture des courbes sur la figure 7 : dans la mesure où les bilans carbonés sont calculés par rapport à la solution de référence (R = 3,3 en PSE), les solutions mieux isolées que R = 3,3 ont des courbes de bilan carbone en fonction du temps dont la pente est négative (impact carbone annuel plus faible que la référence).

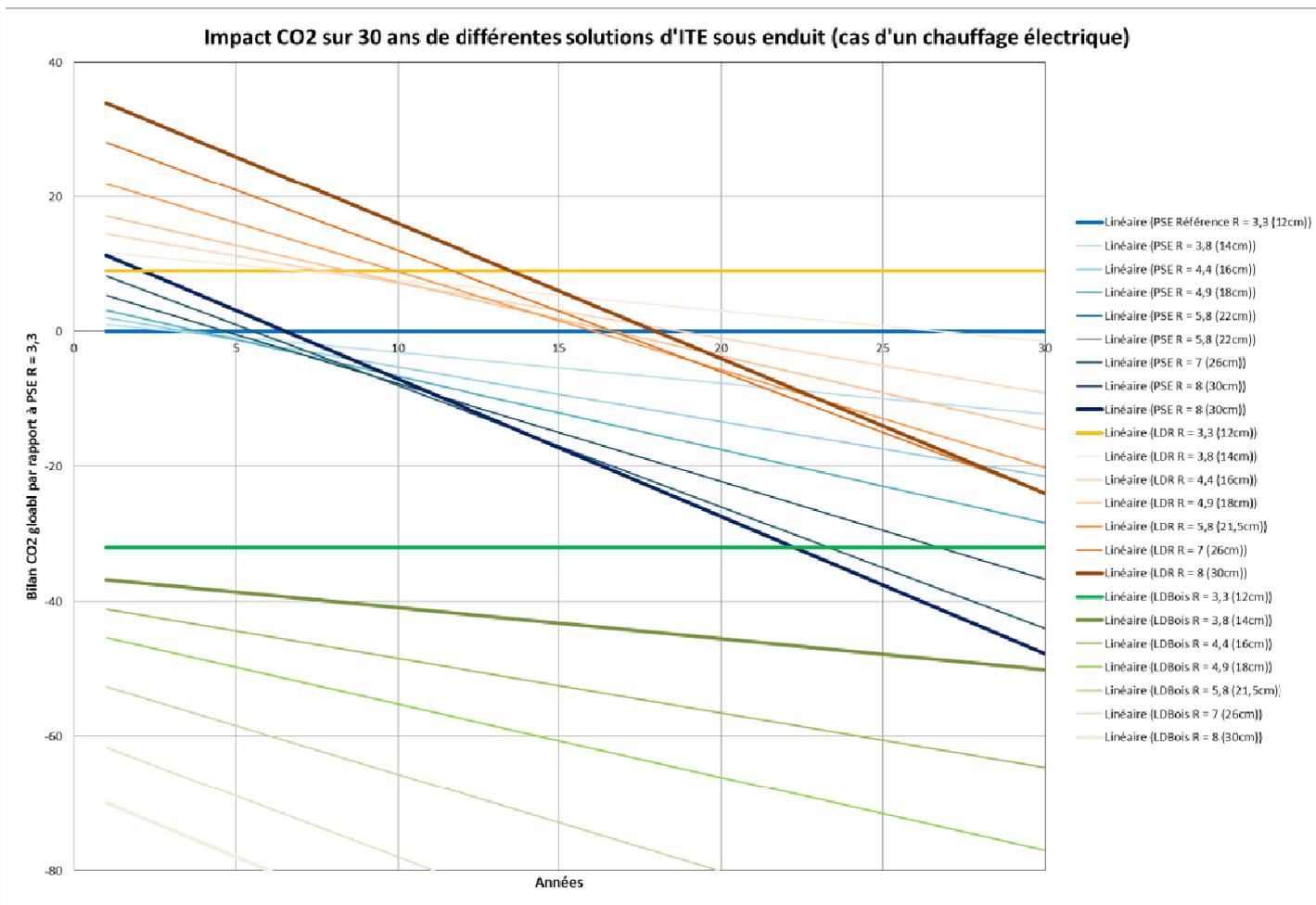


Figure 7 - Impact CO₂ global entre 0 et 30 ans d'utilisation de différentes solutions d'ITE sous enduit, chauffage électrique

Sur la figure 7, l'impact carbone des solutions laine de roche sont tracées dans les tons orangés, les solutions PSE dans les tons bleus et la laine de bois dans les tons verts.

Quelques enseignements :

- Sans surprise, on voit bien que la solution avec le maximum d'épaisseur de laine de bois est la meilleure solution : puits de carbone important dès la mise en œuvre (année 0) et grandes économies de chauffage.
- Jusqu'à 22 ans d'utilisation, il est plus intéressant d'avoir 12cm de laine de bois que toute autre solution avec PSE ou LDR. Après 22 ans, on voit que la courbe bleu foncé des 30cm de PSE croise la courbe verte des 12cm de laine de bois : les économies d'énergie annuelles ont à partir de ce moment-là compensées l'impact carbone supérieur du matériau PSE.

On peut également remarquer que jusqu'à un peu plus de 30 ans, une solution laine de bois $R = 3,8$ (vert foncé) possède un bilan carbone toujours meilleur que n'importe quelle solution en PSE ou LDR.

6.2.4 Limites de l'ACV présentée ici

Nous tenons à préciser que nos conclusions ne sont valables que pour les cas particuliers calculés ici. Même si des tendances se dégagent indéniablement, il ne nous est pas possible de généraliser, pour plusieurs raisons :

- L'impact environnemental des matériaux peut beaucoup varier en fonction de leurs procédés de fabrication, qui sont susceptibles d'évoluer.
- La densité (kg/m^3) influe beaucoup sur le contenu carbone des matériaux. Or la densité des isolants présents sur le marché varie beaucoup suivant les fabricants. Il est donc difficile de fixer une valeur représentative.

L'approche présentée ci-dessus a pour but de remettre en perspective les objectifs énergétiques au regard de l'enjeu de lutte contre le changement climatique.

Une politique de soutien à la rénovation énergétique des logements ne peut pas à notre sens se passer d'une incitation forte en faveur des matériaux et systèmes constructifs à moindre impact carbone, en particulier les isolants biosourcés. Nous venons en effet de montrer qu'il est peut être plus pertinent de choisir un matériau biosourcé, quitte à réduire quelque peu la performance thermique de la paroi.

7 Confort d'été

Nous avons effectué nos modélisations de confort d'été sur des salons orientés au sud ou à l'ouest. Les bâtiments ne présentent pas de masques solaires. Les scénarii d'occupation et d'apports internes ont été adaptés pour correspondre à un salon - salle à manger (cf. description des scénarii).

Nous avons fait varier deux paramètres fondamentaux influant sur le confort d'été :

- les protections solaires : absence de protection ou blocage de 70% du rayonnement solaire
- le taux de renouvellement d'air la nuit (de 22h à 8h) : 0,4 vol/h (VMC simple flux), 1 vol/h (fenêtres ouvertes avec mono-orientation) et 3 vol/h (fenêtres ouvertes avec logement traversant)

De plus, les calculs ont été menés pour les bâtiments types rénovés selon le bouquet de travaux de base mais également dans leur état non rénové, c'est-à-dire non isolé. Cela permet de se rendre compte si les travaux de rénovation énergétique sont susceptibles d'améliorer ou de dégrader le confort d'été.

Enfin, nous avons simulé une variante où l'ITE est remplacée par une isolation intérieure.

Les indicateurs utilisés sont les suivants :

- Nombre d'heures au-dessus de 28°C. A noter que le scénario d'occupation moyen du logement a été conservé. Le nombre d'heure total en occupation est donc de 8736h. La majorité des êtres humains occidentaux considèrent en effet comme confortable une pièce à 28°C lorsque l'air est immobile.
- Nombre d'heures au-dessus de 30°C. D'après les études de B. Givoni dans les années 1980, la majorité des êtres humains occidentaux considèrent en effet comme confortable une pièce à 30°C lorsque la vitesse d'air est de 0,5 m/s. Elle est même de 32°C avec une vitesse d'air de 1 m/s. Un simple ventilateur permet donc de « monter » le seuil d'inconfort à 30°C voire 32°C

Tableau 15 - Confort d'été dans les petits 48-74 (salon au dernier étage orienté sud)

		Nb h > 28°C	Nb h > 30°C
Petit 48-74 rénové - salon sud	Pas de protections solaires Ventilation normale	2079	1567
	Protections solaires 70% Ventilation normale	571	9
	Pas de protections solaires Ventilation 3vol/h 22h - 8h	145	8
	Protections solaires 70% Ventilation 3vol/h 22h - 8h	0	0
	Protections solaires 70% Ventilation 1vol/h 22h - 8h	71	0
	Protections solaires 70% Ventilation 1vol/h 22h - 8h Isolation intérieure	186	3
Petit 48-74 existant - salon sud	Pas de protections solaires Ventilation normale	604	210
	Pas de protections solaires Ventilation 3vol/h 22h - 8h	272	67
	Protections solaires 70% Ventilation 3vol/h 22h - 8h	134	27
	Protections solaires 70% Ventilation normale	377	87

Tableau 16 - Confort d'été dans les moyens et grands 48-74 (salon au dernier étage orienté sud)

		Nb h > 28°C	Nb h > 30°C
Moyen / Grand 48-74 rénové - salon sud	Pas de protections solaires Ventilation normale	2274	1978
	Pas de protections solaires Ventilation 3vol/h 22h - 8h	36	0
	Protections solaires 70% Ventilation 3vol/h 22h - 8h	0	0
	Protections solaires 70% Ventilation 1vol/h 22h - 8h	13	0
	Protections solaires 70% Ventilation normale	650	2
Moyen Grand 48-74 existant - salon sud	Pas de protections solaires Ventilation normale	640	233
	Pas de protections solaires Ventilation 3vol/h 22h - 8h	230	55
	Protections solaires 70% Ventilation 3vol/h 22h - 8h	83	10

	Protections solaires 70% Ventilation normale	325	62
--	---	-----	----

Nous tirons plusieurs enseignements de ces modélisations :

1. Si aucune mesure de protection n'est prise (pas de protections solaires, pas de ventilation nocturne autre que la VMC pour l'air hygiénique), la pièce est exposée à de fortes surchauffes estivales, que le bâtiment soit rénové ou non.
2. En l'absence de protections solaires et de ventilation nocturne, les travaux d'économie d'énergie dégradent le confort d'été.
3. Une ventilation nocturne efficace (3vol/h) permet pratiquement à elle seule de garantir un bon confort dans les bâtiments rénovés. Un tel renouvellement d'air n'est toutefois atteignable qu'avec des bâtiments traversants, en dormant les fenêtres ouvertes et les portes de chambre ouvertes.
4. Il est donc nécessaire de prévoir en complément de la ventilation nocturne des protections solaires efficaces (70% d'occultation minimum) sur les pièces orientées à l'est, à l'ouest et au sud.
5. Dès qu'un dispositif de lutte contre les surchauffes est mis en place (protections solaires et / ou ventilation nocturne), le bâtiment rénové se comporte mieux que le bâtiment existant. L'explication est assez simple : si l'on empêche la chaleur d'entrer et qu'on la décharge durant la nuit, le bâtiment rénové, mieux isolé, est moins dépendant des fortes températures extérieures et conserve mieux la fraîcheur. Si en revanche on laisse entrer la chaleur et qu'on ne l'évacue pas durant la nuit par ventilation, celle-ci ne s'échappe plus par conduction à travers les parois si bien que les pièces restent chaudes.
6. Comparée à l'isolation extérieure, l'isolation intérieure dégrade significativement le confort en été en raison de la perte d'inertie apportée par les murs intérieurs. Les bâtiments restent toutefois confortables avec des protections solaires et une ventilation nocturne minimale (1vol/h mini, 3 vol/h idéalement).
7. Un logement construit au dernier étage sous les combles (petit 48-74) est plus sujet aux surchauffes qu'un logement sous toiture terrasse (moyen 48-74), en raison de la température dans les combles qui est très souvent supérieure à la température extérieure. Les apports de chaleur par le plancher haut sont donc plus importants.

8. Les bâtiments construits entre 1948 et 1999 se comportent de façons très similaires. A noter toutefois que les logements construits après 1975 sont très souvent mono-orientés et qu'un renouvellement d'air de 3 vol/h par ventilation nocturne est difficile à atteindre. De plus, ils sont souvent isolés par l'intérieur, ce qui rend d'autant plus indispensable la mise en place de protections solaires efficace.

En résumé, deux conclusions aux calculs de confort d'été :

1. Si aucune mesure n'est prise pour lutter contre les surchauffes (protections solaires en particulier), le bâtiment après rénovation thermique est plus exposé aux surchauffes qu'avant rénovation
2. Dès que des protections solaires extérieures efficaces sont présentes, le bâtiment rénové se comporte mieux après rénovation.

Mesures pour lutter efficacement contre les surchauffes en été

1. Prévoir des protections solaires adaptées à l'orientation permettant de bloquer à minima 70% du rayonnement solaire direct en été, par exemple : casquettes au sud, brises soleils orientables, volets roulants, persiennes au sud, est et ouest.
2. Utiliser les protections solaires mobiles en journée.
3. Ventiler le moins possible pendant la journée tant que la température extérieure est supérieure à la température intérieure.
4. Ventiler le plus possible pendant la nuit pour apporter de la fraîcheur.

8 Détails de mise en œuvre

Dans un bâtiment à basse consommation d'énergie, les ponts thermiques peuvent représenter à eux seuls jusqu'à 50% des pertes thermiques à travers les parois.

Nous avons également vu précédemment qu'un défaut d'étanchéité à l'air ($n_{50} = 6$ au lieu de 2) peut entraîner une surconsommation de chauffage de 25%, voire encore plus.

La performance thermique d'un bâtiment basse consommation réside donc en bonne partie dans les détails de mise en œuvre qui doivent à la fois réduire au maximum les ponts thermiques et assurer une parfaite continuité de la couche étanche à l'air.

Nous proposons dans cette partie, pour certains cas types que l'on retrouve régulièrement en rénovation, des solutions permettant d'assurer les continuités de l'isolation et de la couche étanche à l'air.

8.1 Pose des menuiseries

8.1.1 ITE - pose intérieure

Ci-dessous deux détails de pose de menuiseries au nu intérieur dans le cas d'une nouvelle isolation extérieure. Remarquons le retour d'isolant en tableau qui vient recouvrir le dormant et ainsi réduire le pont thermique. Rappelons que l'absence de traitement de ce pont thermique de tableau est absolument indispensable dans la mesure où cela entraîne une surconsommation de 25 kWh/m²/an. Attention de bien prévoir une épaisseur de dormant suffisante pour recevoir l'isolant.

Le dessin de droite présente le cas où le dormant existant est conservé. Cette solution est particulièrement adaptée lorsque l'ITE est posée avant le changement des menuiseries. Le retour en tableaux peut ainsi être réalisé sur le dormant existant. La nouvelle menuiserie est ensuite choisie la plus fine possible pour conserver un clair de vitrage suffisant. Attention, il est très important dans ce cas où le dormant est conservé de bien s'assurer de l'étanchéité à l'air à la jonction dormant - maçonnerie, sous peine de fortes surconsommations dus aux infiltrations incontrôlées.

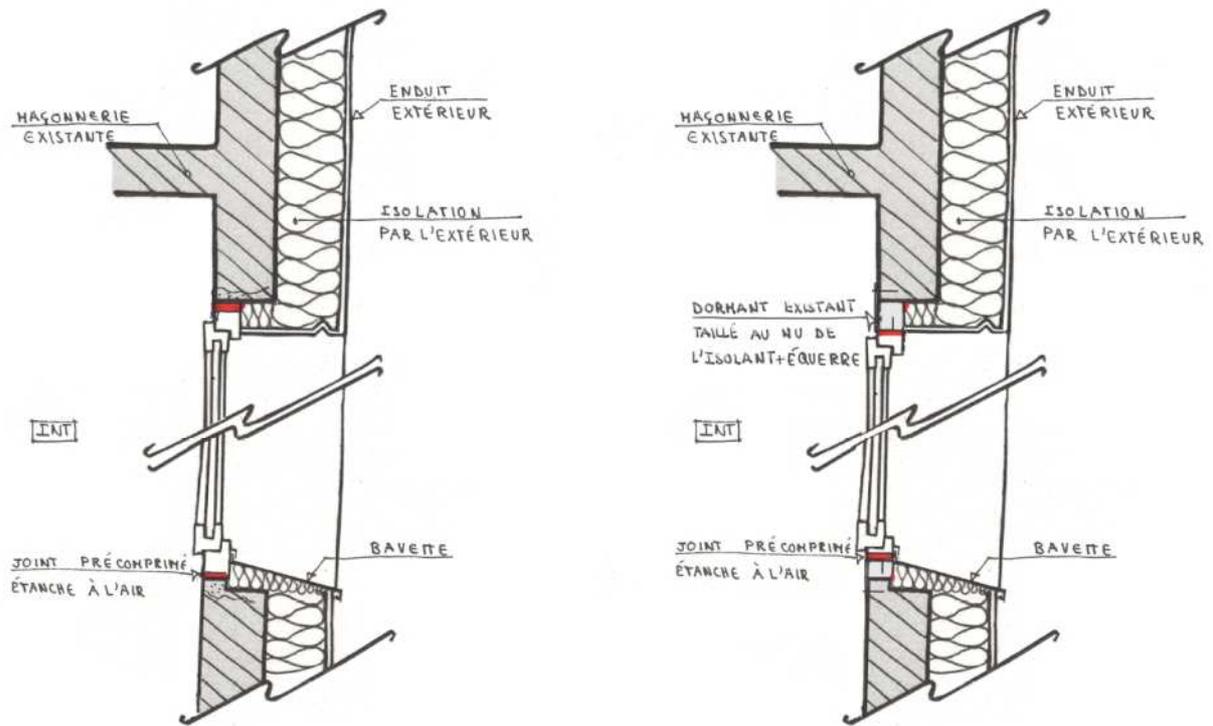


Figure 8 - Pose menuiserie au nu intérieur (avec et sans changement des dormants)

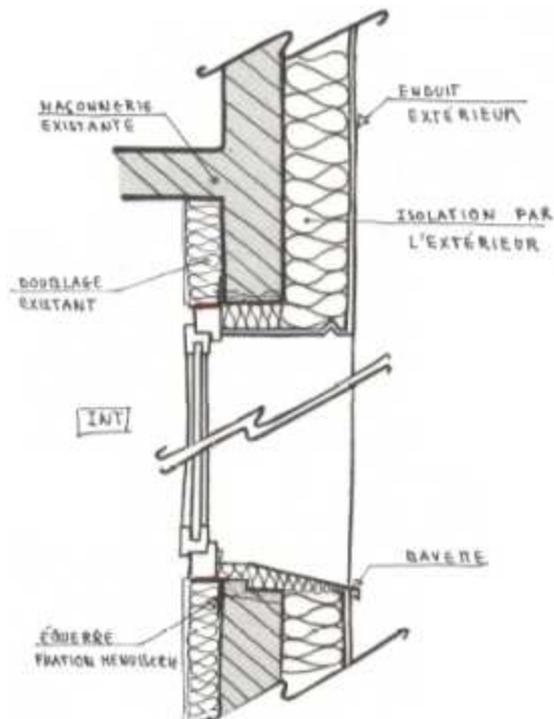


Figure 9 - Pose menuiserie au nu intérieur, cas d'une isolation intérieure et extérieure

8.1.2 ITE - pose nu extérieur

La pose des menuiseries au nu extérieur permet de réduire fortement le pont thermique à la jonction menuiseries / murs : de 2 à 4 kWh/m²/an.

Elle permet aussi, d'un point de vue architectural, de conserver les proportions de reculs des fenêtres en façade.

A noter qu'il est nécessaire de prévoir une reprise des tableaux intérieurs.

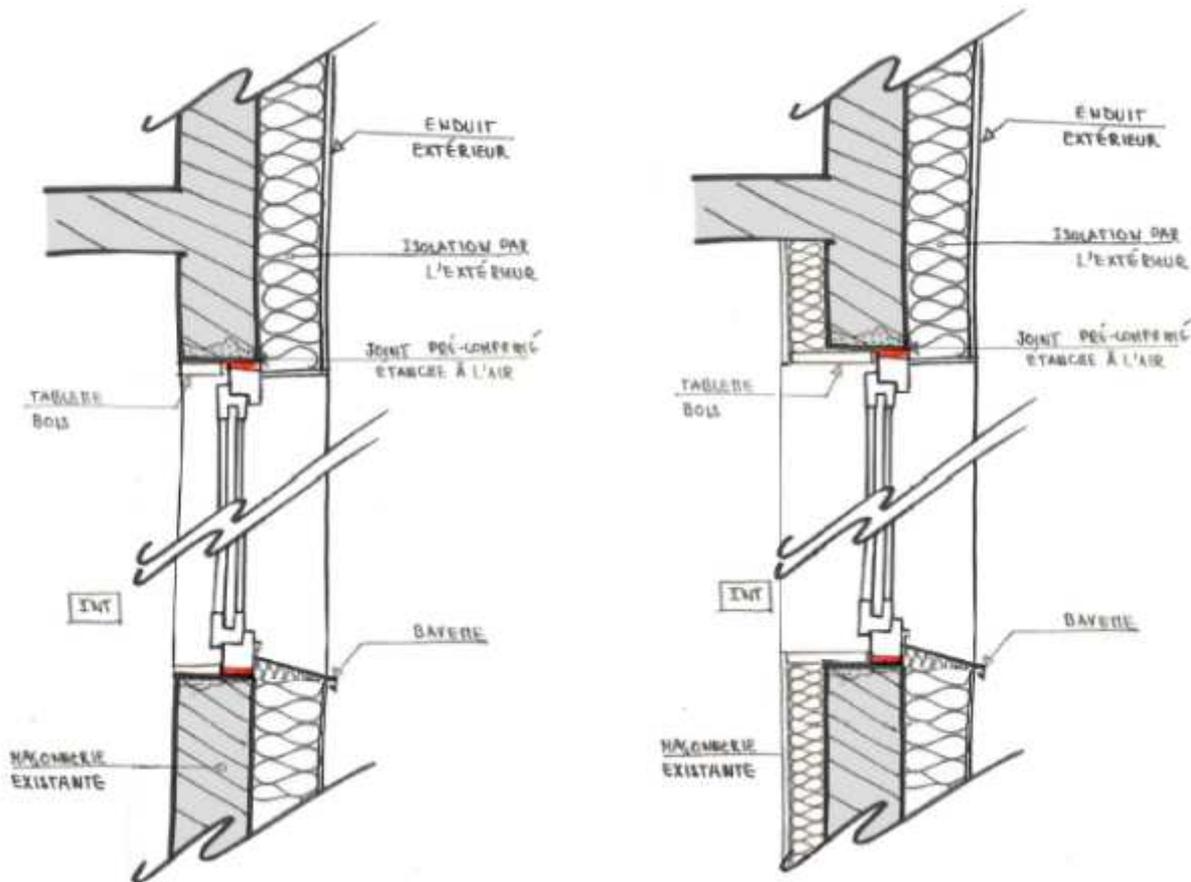


Figure 10 - Pose des menuiseries : ITE, pose au nu extérieur (avec ou sans isolant intérieur existant)

8.1.3 ITE - pose en applique (extérieure ou intérieure)

Le système idéal est de poser la menuiserie en applique dans l'épaisseur de l'isolant. Le pont thermique est alors nul.

Dans le cas d'une pose côté extérieure, cela suppose une reprise du tableau intérieure.

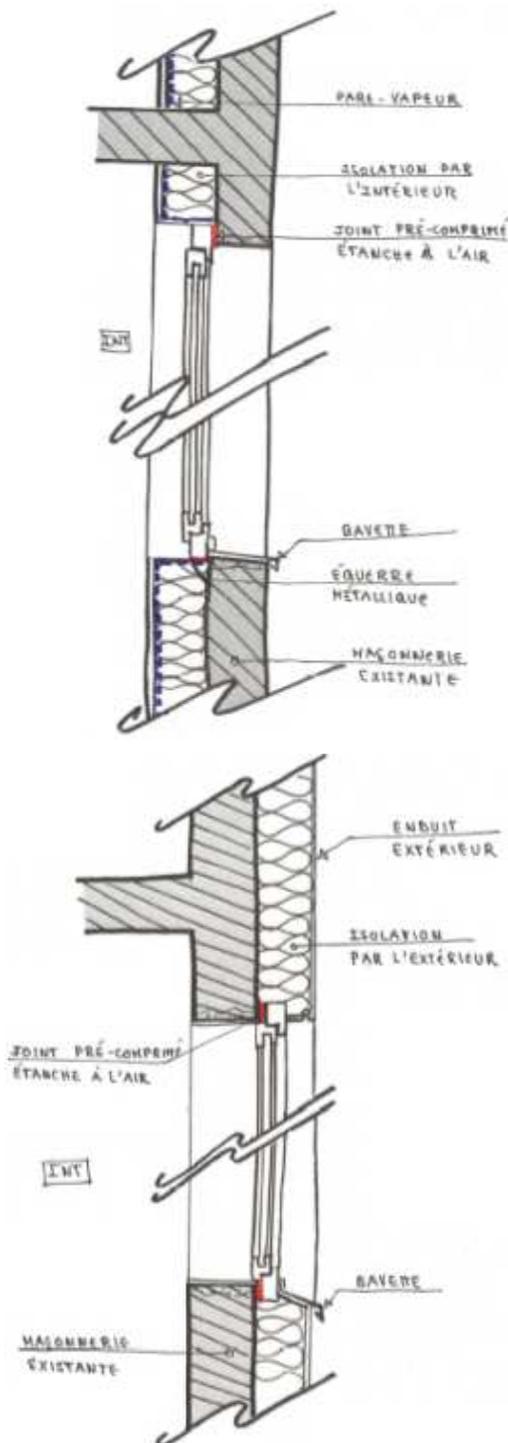


Figure 12 - Pose des menuiseries en applique extérieure, dans l'épaisseur de l'isolant

Figure 11 - Pose des menuiseries en applique intérieure, dans l'épaisseur de l'isolant

8.1.4 Problématique des protections solaires

Les protections extérieures, en particulier les coffres de volets roulants, peuvent s'avérer être d'importants points faibles de l'enveloppe aussi du point de vue isolation que d'étanchéité à l'air.

Le dessin ci-dessous à gauche illustre la façon dont on peut traiter ce détail, en isolant notamment le coffre de volets roulants. Il est également nécessaire de prévoir des joints performants au niveau de la trappe d'accès côté intérieure.

L'idéal est toutefois de poser le coffre côté extérieur lorsque cela est possible : pas / peu de ponts thermiques, et surtout pas de défaut d'étanchéité à l'air. Le dessin ci-dessous à droite montre le cas de coffres de VR d'une porte fenêtre de balcons posés côté extérieur.

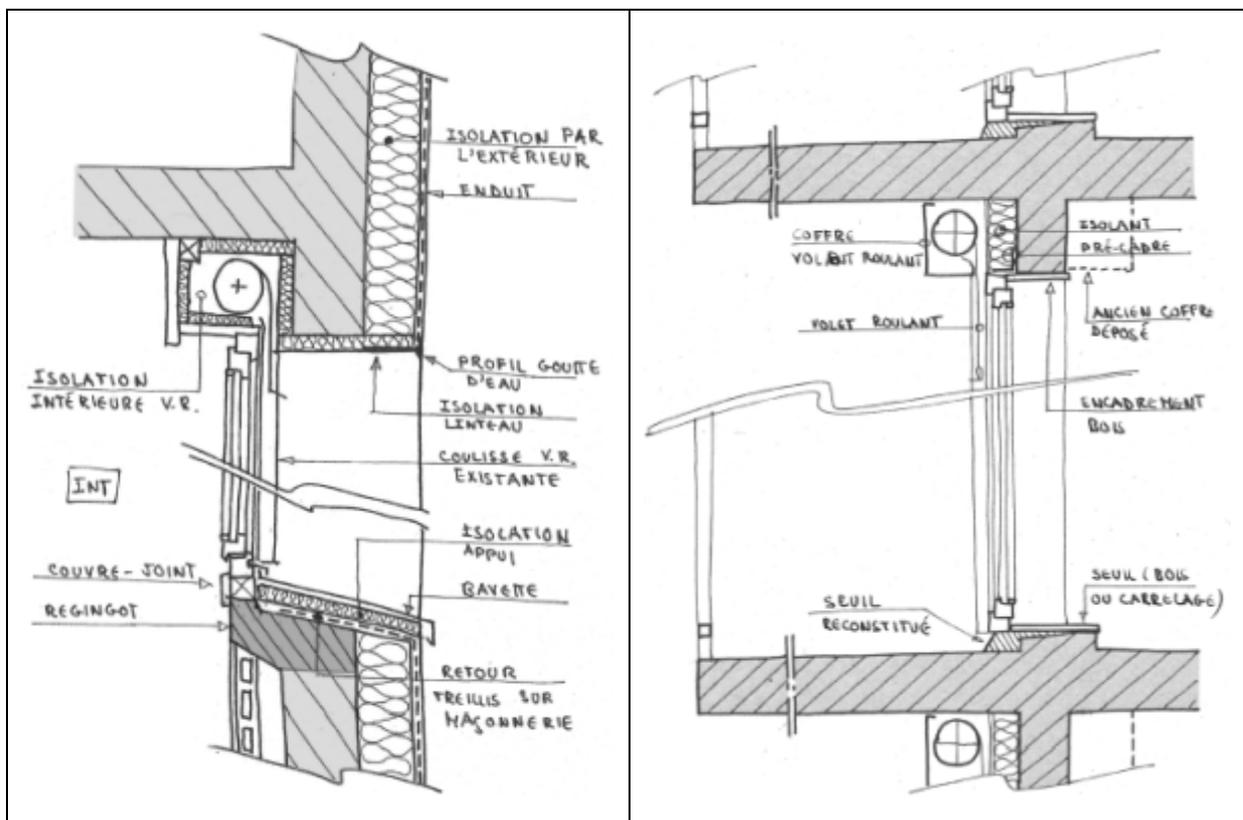


Figure 13 - Pose des coffres de protections solaires

8.2 Traitement du pont thermique de périmètre de fondation

8.2.1 Isolation enterrée en continuité ITE

Ci-dessous une solution d'isolation du périmètre des fondations, qui permet de réduire très fortement le pont thermique de jonction entre plancher bas et mur de façade.

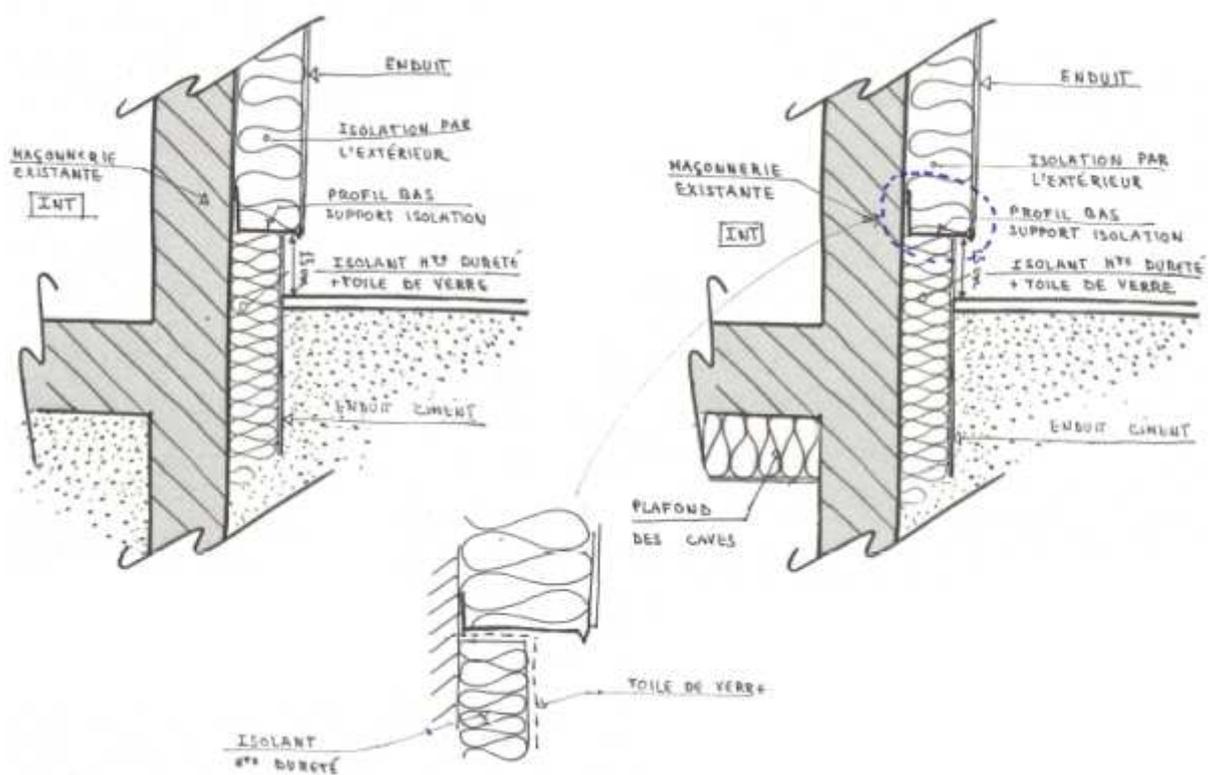


Figure 14 - Isolation périmétrique enterrée

8.3 Traitement du pont thermique d'acrotère

8.3.1 Acrotère emballée

Ci-dessous deux solutions d'isolation de l'acrotère, avec et sans rehausse (cas où l'acrotère n'est plus assez haute après pose de l'isolant de toiture).

Dans notre proposition, la rehausse de l'acrotère est en ossature bois. Cette solution n'est possible que dans le cas où aucun garde-corps n'est à fixer directement sur l'acrotère (gardes corps lestés sur le toit terrasse). Dans le cas contraire, la rehausse est nécessairement en béton plein.

Figure 15 - ITE et isolation sous étanchéité de toit terrasse, acrotère isolée

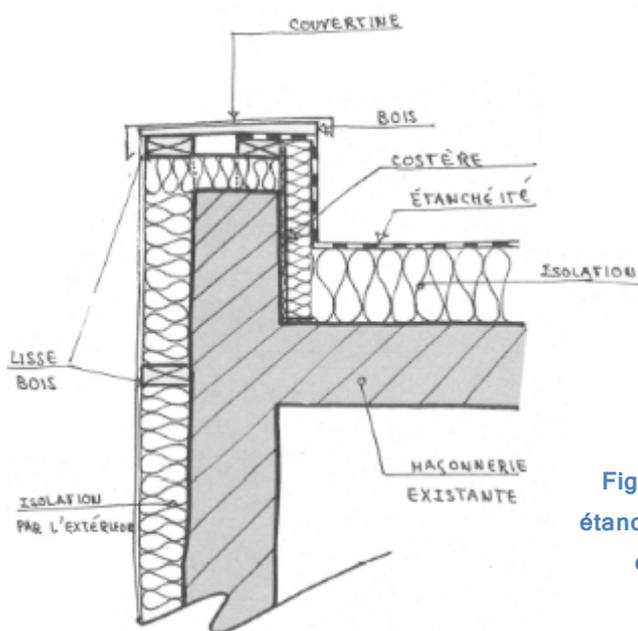
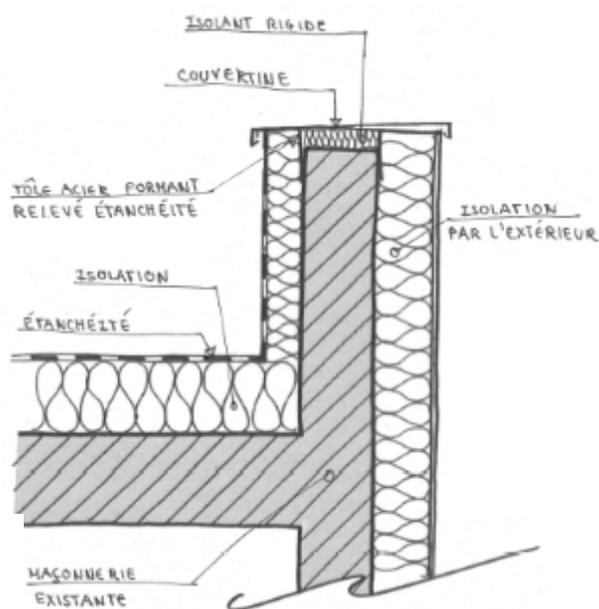


Figure 16 - ITE et isolation sous étanchéité de toit terrasse, rehausse d'acrotère en structure bois

8.4 Toiture en pente - ITE

Ci-dessous les détails de principe de l'isolation des toitures en pentes :

- Dessins de gauche : technique sarking
- Dessins de droite : isolation entre chevrons et intérieure

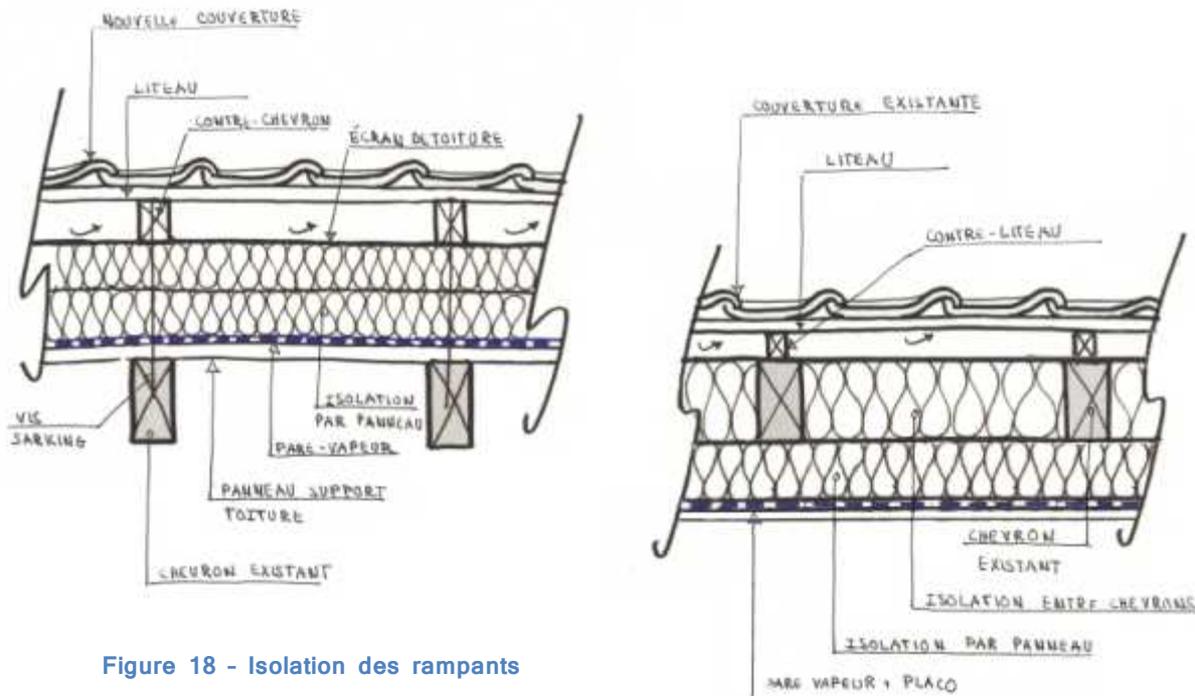


Figure 18 - Isolation des rampants

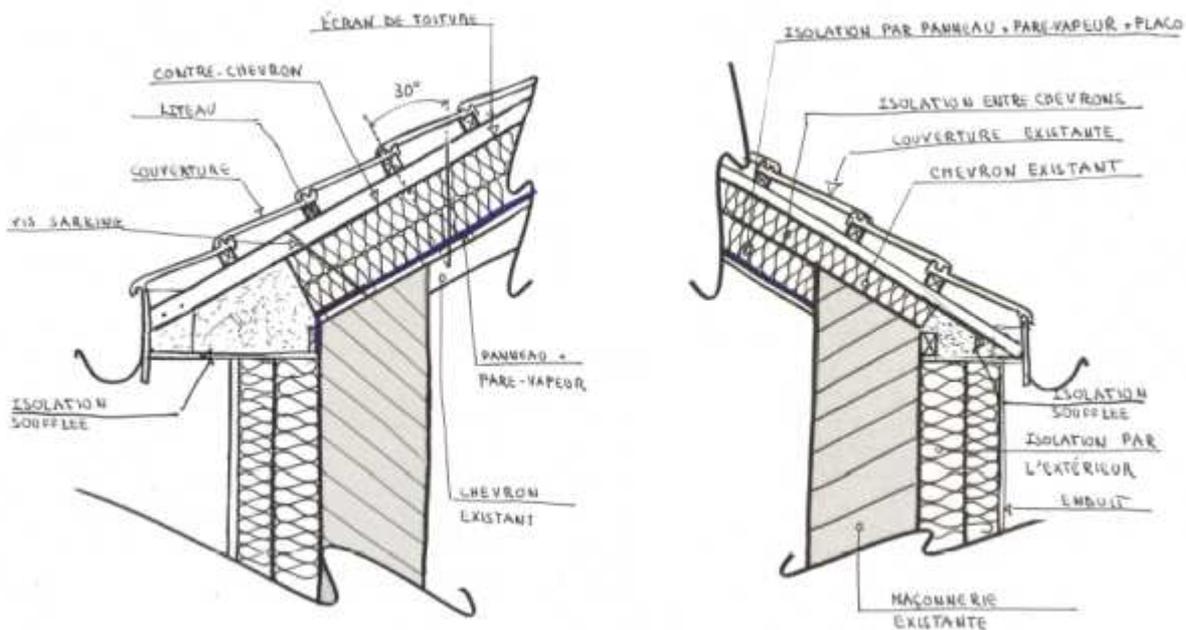


Figure 17 - Isolation des rampants - jonction avec l'ITE

8.5 Fermeture de loggias par un mur rideau : création d'un jardin d'hiver

Ci-dessous un exemple de fermeture de loggias par un mur rideau. Cette solution peut être particulièrement à des façades avec balcons filants que l'on souhaiterait fermer pour créer des jardins d'hiver.

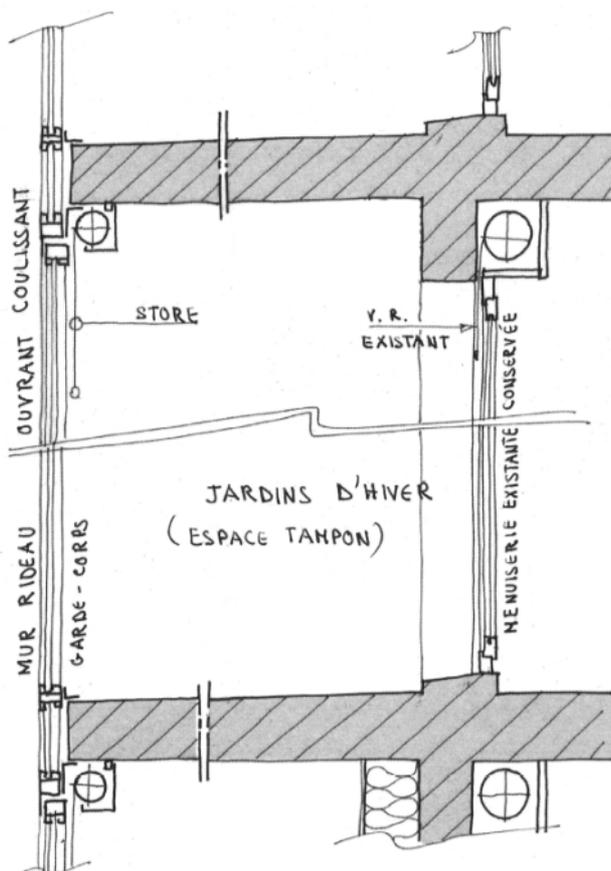


Figure 19 - Fermeture loggias par mur rideau, création de jardins d'hiver

8.6 Cages d'ascenseur et étanchéité à l'air

Les cages d'ascenseurs sont de très importantes sources de déperditions de chaleur. Moteurs et réducteurs de vitesse à faibles rendements, éclairage incandescent permanent des cabines, dissipation d'énergie au freinage, les sources de chaleur étaient nombreuses, ce qui justifiait une importante ventilation de ces cages. En conséquence, elles apportent de l'air froid à tous les étages en grande quantité, par les inétanchéités des portes des ascenseurs.

En outre, les trappes de désenfumage, très rarement étanches à l'air, contribuent également à fortement ventiler les cages.

Il est toutefois possible de maîtriser cette ventilation des cages et de ne faire pénétrer dans le bâtiment que le minimum d'air neuf.

La Fédération des Ascenseurs (FA) a édité en avril 2012 un dossier technique sur la ventilation des gaines d'ascenseurs. Dans ce document sont rappelés les règles et normes qui s'appliquent. La FA précise qu'il est tout à fait possible de remplacer la ventilation naturelle des cages (tirage thermique : « trop » efficace en hiver, pas assez en été) par une ventilation mécanique contrôlée. Le débit doit alors être de 50 m³/h et par ascenseur.

Dans le cas où une ventilation mécanique centralisée à l'échelle du bâtiment serait mise en place, il est intéressant de réfléchir à la possibilité d'ajouter la cage d'ascenseur à la liste des locaux ventilés mécaniquement.

Pour les grands collectifs, nous évaluons par STD à environ 1,5 kWh/m²/an l'impact du traitement de l'étanchéité à l'air des cages d'ascenseurs avec le remplacement de la ventilation naturelle incontrôlée par une VMC.

Enfin, la question du désenfumage peut être aisément réglée par un châssis à joints avec ouverture automatisée.

8.7 Terrasse accessible sur attique

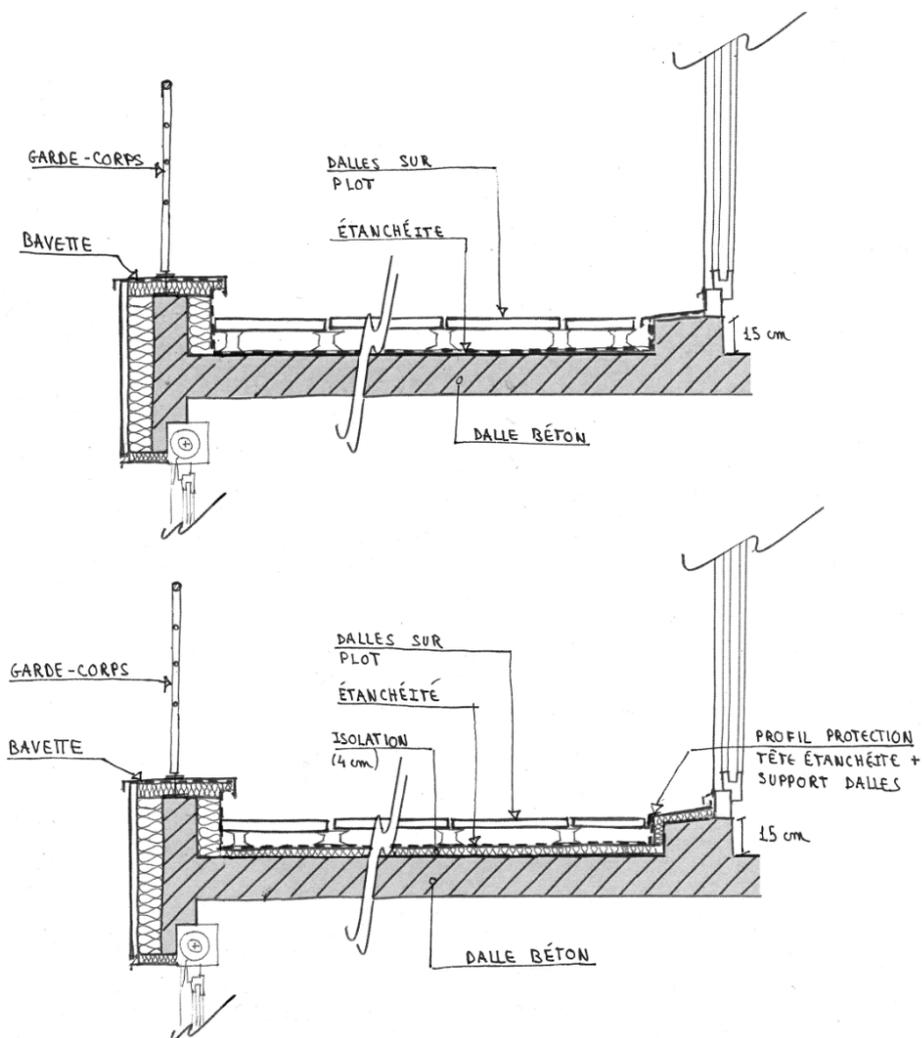


Figure 20 - Isolation d'un toit terrasse accessible par le logement en attique

Il n'est pas simple d'isoler les parties de toitures terrasses accessibles avec une porte ou porte fenêtre du logement en attique. Nous proposons sur la figure 20 une isolation de faible épaisseur mais qui permet d'éviter la modification de la hauteur de la menuiserie.

Le facteur limitant pour ce type d'intervention est le plus souvent les 15cm de relevés d'étanchéité au niveau de la menuiserie. En fonction de l'état existant, la solution présentée figure 20 est adaptable.

9 Points de vigilance

9.1 Caractère architectural

Il est indispensable, dès que l'on s'attaque à une rénovation globale d'un bâtiment susceptible de modifier significativement ses façades, de s'interroger sur son caractère architectural afin de déceler les particularités à prendre en compte.

Les particularités architecturales remarquables concernent souvent des détails qui peuvent paraître anodins mais qui en réalité caractérisent une époque, une manière de construire ou une manière d'habiller les bâtiments.

Il s'agit dans l'analyse d'un bâtiment d'essayer d'évaluer l'esthétique propre au bâtiment, mais également son rapport au contexte, son intégration urbaine : soubassement, rythme des façades,...

Nous présentons ci-dessous quelques caractéristiques remarquables de bâtiments typiques de cette période :

		
<p>Résille minérale sur montée d'escalier + coudière en débord + décor de céramique horizontal</p>	<p>Coudières en débord + volets métalliques en accordéon, corniche et balcons en U.</p>	<p>Enduit foncé à l'horizontal des baies + volets bois en accordéon + garde-corps en bois masquant les nez de dalle.</p>

Photos 6 - Exemples de caractères remarquables (1)

Nous présentons ci-dessous des exemples de traitements architecturaux envisageables :

	<p>Coudière en débord avec modénature en sous-face.</p>	<p>Coudière à reproduire avec élément à coller sur l'isolant et modénature en sous-face.</p>
	<p>Garde-corps métallique.</p>	<p>Reposer à l'identique.</p>
	<p>Volet métallique en accordéon.</p>	<p>Reposer à l'identique.</p>

Photos 7 - Traitement architectural possible : baie avec coudière, garde-corps et volet accordéon

	<p>Encadrement en débord autour des baies.</p>	<p>Encadrement noyé dans l'épaisseur de l'isolant et reproduction à l'identique à l'aide d'éléments collés sur l'isolant ou tôle métallique pliée formant tableau</p>
	<p>Corniche au niveau des dalles.</p>	<p>Corniche noyée dans l'épaisseur de l'isolant et reproduction à l'identique à l'aide d'éléments collés sur l'isolant.</p>

Photos 8 - Traitement architectural possible : encadrements de baies et corniches



Photos 9- Exemple de traitement architectural d'encadrements de baies / rénovation du groupe scolaire du Grégoire à Dardilly (69)

	<p>Revêtement minéral structuré.</p>	<p>Parement en béton accroché (le principe d'isolation est alors de type vêtue et ne correspond plus du tout au principe étudié) ou enduit structuré sur isolant (déconseillé, cette solution risquant de se révéler être une imitation de moindre facture de l'existant).</p>
--	--------------------------------------	--

Photos 10 - Traitement architectural possible : revêtement de façade minéral structuré

	<p>Encadrement de baie</p>	<p>Encadrement de baie noyé ans l'épaisseur de l'isolant et reproduction à l'identique à l'aide</p>
--	----------------------------	---

		d'éléments collés sur l'isolant ou tôle métallique pliée formant tableau.
	Garde-corps métallique.	Reposer à l'identique.
	Joint creux	Reproduire à l'identique.

Photos 11 - Traitement architectural possible : encadrement de baie, garde-corps, joints creux

La reproduction des détails à l'identique n'est pas toujours la solution. Avec l'accord de l'architecte ayant réalisé le bâtiment (ou de ses héritiers), une transfiguration du bâtiment est aussi possible.

Avant toute réflexion concernant la thermique des bâtiments, nous conseillons donc qu'une analyse soit faite afin de mettre en avant les particularités architecturales du bâtiment et d'intégrer dans les études et les coûts de travaux, la manière dont elles seront traitées. Le double regard d'un architecte et d'un maître d'œuvre spécialiste de la rénovation énergétique nous apparaît pour cela nécessaire.

Deux précautions sont ainsi à prévoir dans le cadre d'opération de rénovation énergétique:

- Les projets soumis devront être analysés au préalable par un architecte des services des Villes concernées, ou du CAUE, afin d'évaluer les risques liés à l'esthétique du bâtiment et les particularités architecturales à prendre en compte.
- Les projets devront être conduits par un maître d'œuvre qui se chargera de contacter l'architecte qui a conçu le bâtiment ou ses ayants droits et de veiller au respect de l'architecture originelle du bâtiment ou d'assumer au contraire, avec l'accord des ayants droits, une transfiguration du bâtiment si cette option s'avérait la plus pertinente.

9.2 Réglementation incendie

Comme détaillé dans les rapports de chaque copropriétés, les travaux engagés ne doivent pas dégrader la situation existante : il n'est pas demandé de remettre en conformité un bâtiment qui ne le serait pas mais que les travaux engagés respectent les règles de sécurité incendie.

Rappelons que la transmission du feu par les façades concerne :

- Les IGH (Immeuble de Grande Hauteur)
- Les ERP (sauf installation d'extinction automatique, ou système de sécurité de catégorie A)
- Les logements à partir de la troisième famille

L'Instruction Technique 249 détermine les règles à respecter en matière d'incendie. Ces règles sont basées sur la mesure du C+D tel qu'illustré ci-après.

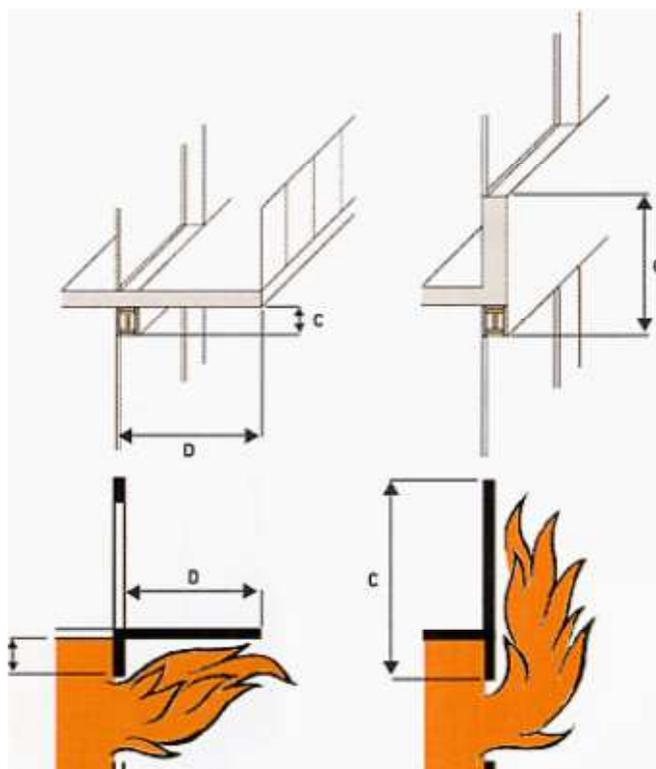


Figure 21 - Mesure du C+D

Les valeurs C et D sont liées par une des relations ci-dessous en fonction de la masse combustible mobilisable: C exprimé en mètres - D exprimé en mètres - M exprimé en MJ/m² étant la masse combustible mobilisable de la façade à l'exclusion des menuiseries, fermetures et garde-corps, rapportée au mètre carré de façade, baies comprises. Pour l'application de cette règle, il n'est pas tenu compte des orifices d'entrée d'air de ventilation dont la section ne dépasse pas 200 centimètres carrés.

Les valeurs du C+D sont différentes suivants que le bâtiment de logement est de la 3^{ème} Famille A ou de classe supérieure :

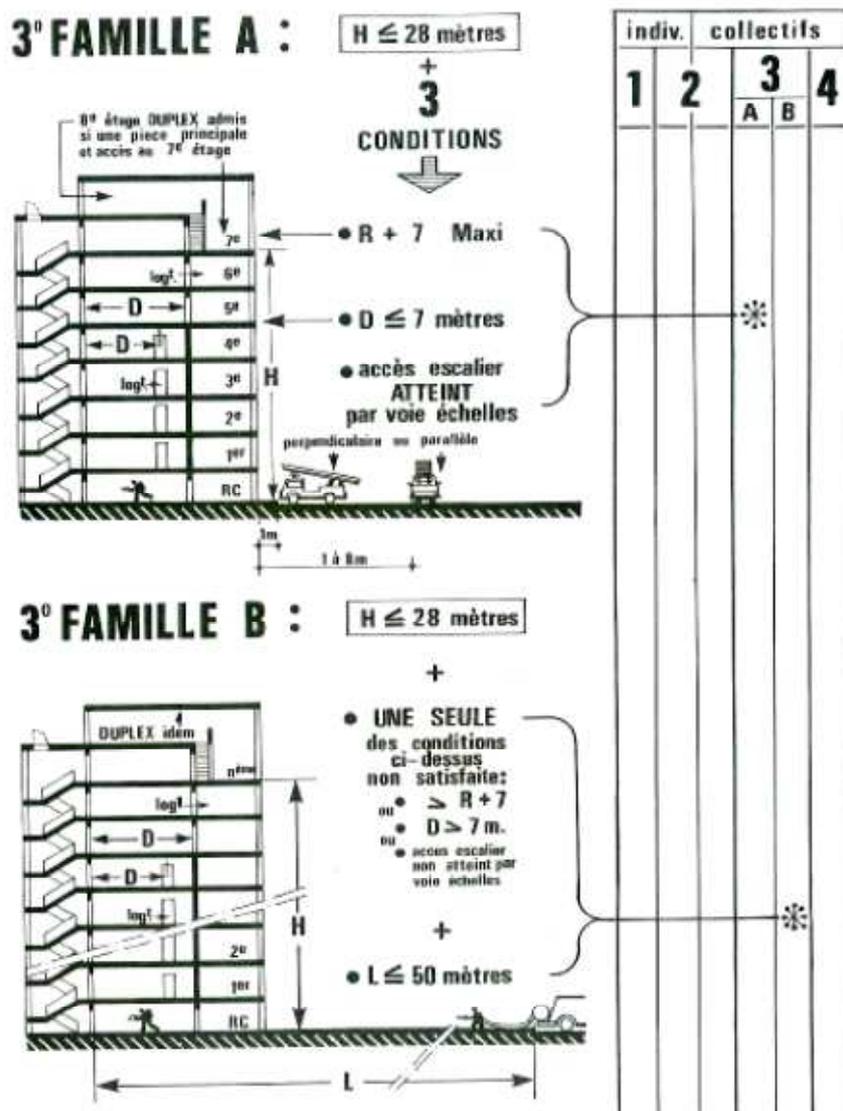


Figure 22 - Règlementation incendie, familles de bâtiments de logements

Troisième famille A :

- C + D => 0,80 mètre si M ≤ 80 MJ/m²
- C + D => 1,10 mètre si M > 80 MJ/m²

Troisième famille B et quatrième famille (bâtiments de logement dont la hauteur est comprise entre 28 et 50 m):

- C + D => 1,00 mètre si M ≤ 80 MJ/m²
- C + D => 1,30 mètre si M > 80 MJ/m²

9.3 Pose des isolants : précautions de mise en œuvre

Nous avons listé ci-après un certain nombre de précautions de mise en œuvre lors de l'isolation des parois opaques.

Ces recommandations rappellent quelques règles de pose et modes opératoires qu'il convient de respecter lors de travaux de rénovation énergétique. La liste ci-dessous n'est toutefois pas exhaustive et ne se substitue pas à une bonne connaissance des règles de l'art, règles professionnelles et DTU.

9.3.1 Isolation par l'extérieur sous enduit

Il convient d'éviter tant que possible la circulation d'air entre ou derrière les panneaux :

- Surfaces planes et propres pour la pose de l'ITE
- Mortier de collage continu sur le bord

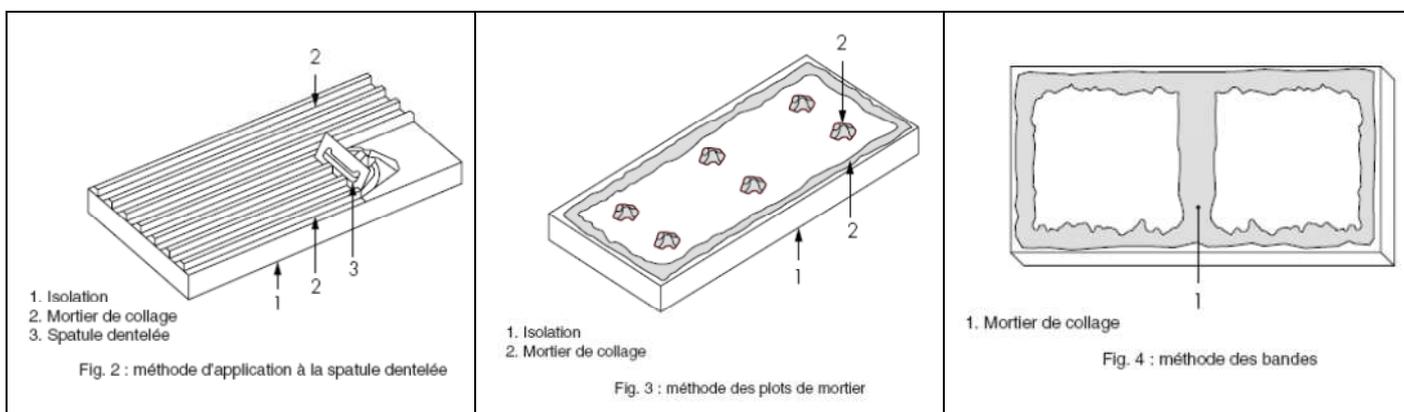


Figure 23 - Types de pose de l'ITE avec mortier de collage continu sur les bords

De manière à minimiser les ponts thermiques répartis, une pose soignée est nécessaire, à joints verticaux alternés, sans espaces entre les panneaux :

- Pas de joints > 2 mm entre les panneaux
- Remplissage des joints à la mousse polyuréthane (isolant)

Quand une fixation mécanique est nécessaire, les chevilles à rupture de pont thermique (matériau plastique) sont une bonne alternative aux chevilles métalliques.

9.3.2 Isolation par l'intérieur

Les calculs d'évaluation du risque de condensation dans les parois (méthode statique Glaser, calculs dynamiques WUFI) montrent que les murs isolés par l'intérieur sont particulièrement vulnérables dans le cas où il y a des défauts d'étanchéité à l'air.

Nous préconisons ainsi systématiquement la mise en place d'une barrière étanche à l'air du côté chaud de l'isolant. Cette barrière étanche sera de préférence plutôt fermée à la vapeur

d'eau (c'est-à-dire avec un $S_d > 50m$) dans le cas où les murs sont en béton ou maçonnerie.

Cette barrière étanche à l'air peut être de plusieurs types : film pare / frein vapeur, enduit étanche à l'air, panneaux OSB avec adhésif étanche à l'air.

9.4 Ordonnancement des travaux

9.4.1 Changement des fenêtres et ventilation

Une intervention sur les baies devra toujours être menée conjointement avec une intervention sur la ventilation pour garantir le renouvellement hygiénique de l'air dans le logement et assurer l'évacuation de la vapeur d'eau générés par les occupants et des polluants.

9.4.2 Isolation extérieure et changement des fenêtres

Une intervention sur les baies est toujours préférable avant une intervention sur les façades pour assurer l'isolation sur les retours de tableau.

Toutefois, dans les cas où le changement de l'ensemble des fenêtres est compliqué (cas des copropriétés privées notamment), un détail de principe est proposé (figure 7, dessin de droite) pour permettre d'isoler par l'extérieur avant de changer les fenêtres.

9.4.3 Isolation extérieure et isolation d'un toit terrasse

De manière à bien traiter la problématique du pont thermique d'acrotère, les lots ITE et étanchéité doivent travailler conjointement.

Les blocs de ventilation mécanique sont très souvent positionnés en toiture. Il est important d'intégrer cette problématique aux réflexions en phases études, pour bien gérer l'interface entre lots CVC et étanchéité.

9.4.4 Découpage de la rénovation globale en 2 phases :

La première phase comprendra à minima le changement des fenêtres et une intervention sur le système de ventilation.

Ci-dessous un exemple de découpage des travaux en 2 phases dont les coûts sont à peu près équivalents:

Tableau 17 - Exemple d'organisation des travaux en 2 phases de coûts équivalents

Phase 1	Changement fenêtres, dont protections solaires
---------	--

	Ventilation Isolation du plancher bas
Phase 2	Isolation extérieure, dont retours d'isolant en tableaux + isolation périmétrique des fondations Isolation de la toiture, dont traitement pont thermique d'acrotère

10 Accumulation d'humidité dans les parois

L'accumulation d'humidité dans les parois peut conduire à des pathologies plus ou moins graves : développement de moisissures, dégradation des matériaux, notamment des isolants (tassement, perte du pouvoir isolant,...).

Cette humidité qui s'accumule peut avoir plusieurs origines :

- Environnement extérieur : pluie qui s'infiltre. Ce problème est résolu dès qu'une protection efficace à la pluie est mise en place : film pare pluie, enduit extérieur,... Nous ne nous intéressons pas à ces cas dans le présent rapport.
- Environnement intérieur, notamment dans les pièces humides :
 - Migration à travers la paroi de la vapeur d'eau contenue dans l'air intérieur
 - Défauts d'étanchéité à l'air : l'air intérieur chargé d'humidité s'infiltre dans la paroi et condense dès que la température devient trop faible (à la température de saturation).

Nous listons ci-dessous quelques pathologies potentielles dues à une accumulation trop importante d'humidité dans les parois :

- Dégradation des performances thermiques des isolants, en particulier des laines.
- Dégradation et tassement des laines de verre et de roche.
- Risques structurels dus au gel/dégel
- Fissures d'enduits
- Moisissures
- Pourrissement d'éléments en bois à l'intérieur des parois (cas rare dans le bâti d'après 1948)

Une méthode relativement rapide pour étudier les risques de condensation dans les parois est la méthode de Glaser. Il s'agit d'une méthode statique, qui permet, pour des conditions intérieure et extérieure fixées, de constater s'il y a risque de condensation. La méthode de Glaser est le plus souvent très pessimiste par rapport au cas réel dans la mesure où c'est une méthode statique avec des conditions intérieures et extérieures souvent choisies très défavorables : temps froid, forte humidité intérieure. Dans la réalité, même si une paroi peut accumuler de l'humidité en hiver, elle sèche le plus souvent pendant les mois d'été.

De manière à étudier plus finement les phénomènes d'accumulation d'humidité dans les parois, nous utilisons le logiciel WUFI Pro 5.2 du Fraunhofer Institut. Il s'agit d'un outil de calcul dynamique des flux de chaleur et d'humidité à travers les parois. En réalisant des

calculs sur une durée d'environ 10 ans, il permet de vérifier s'il y a ou non accumulation d'humidité dans les parois, ou si certaines valeurs limites de teneur en eau sont atteintes.

Une fonction permet en outre de simuler des défauts d'étanchéité à l'air sous forme d'une source d'humidité interne à la paroi.

Nous étudions dans un premier temps les risques de condensation au moyen de diagramme de Glaser. Les parois identifiées comme à risque seront ensuite modélisées sous WUFI pour mesurer le risque réel.

10.1 Diagrammes de Glaser

Nous nous plaçons dans le cas défavorable suivant :

- Extérieur : Température de -10°C , humidité relative de 80%
- Intérieur : Température de -20°C , humidité relative de 60%, ce qui correspond à une pièce humide avec un léger défaut de ventilation

Les diagrammes de Glaser ont été obtenus avec l'applet en ligne Applet Glaser, version 1.00 réalisée par Philippe Courtin.

10.1.1 Isolation intérieure

10.1.1.1 Pas de pare vapeur - PSE

Cas d'un PSE plutôt ouvert à la diffusion de vapeur, $\mu = 30$ et d'un béton plutôt fermé, $\mu = 234$ (tels que décrits dans la base de données du Fraunhofer Institut). Il y a un risque de condensation. Cf. figure 23.

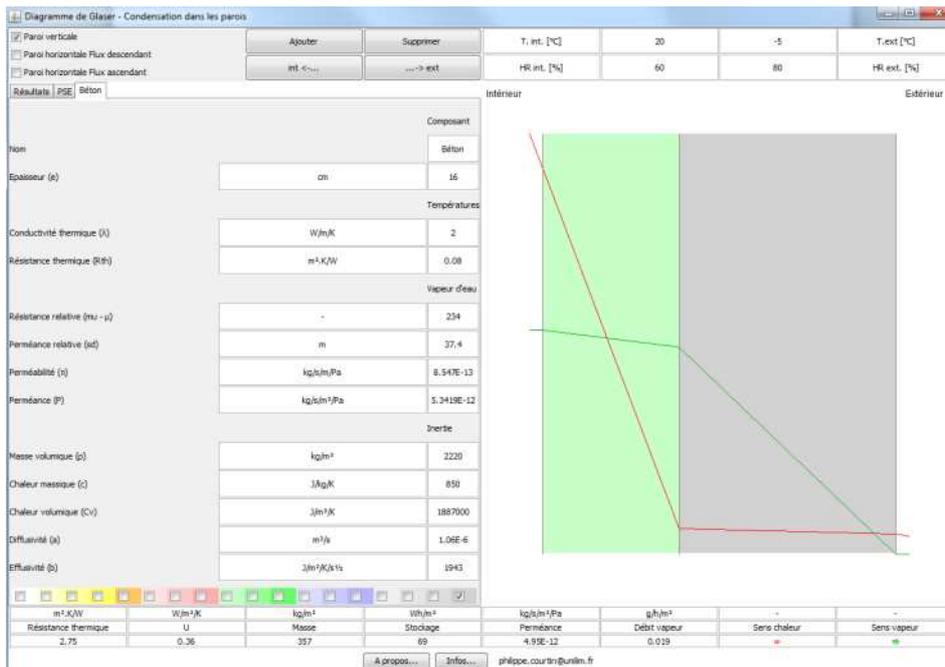


Figure 24 - Glaser : ITI, pas de pare vapeur, PSE (hypothèses matériaux 1)

Sur la figure 24 : cas d'un PSE moins ouvert à la diffusion de vapeur, $\mu = 150$ (fourchette haute de la base de données du site energieplus-lesite.be, Université Technologique de Louvain) et d'un béton plus ouvert, $\mu = 13$ (fourchette basse bétons de la même base de données). Pas de problème identifiable.

Conclusion : suivant le type de polystyrène et le type de béton mis en œuvre, il peut y avoir des risques de condensation dans une paroi isolée par l'intérieure avec du polystyrène expansée.

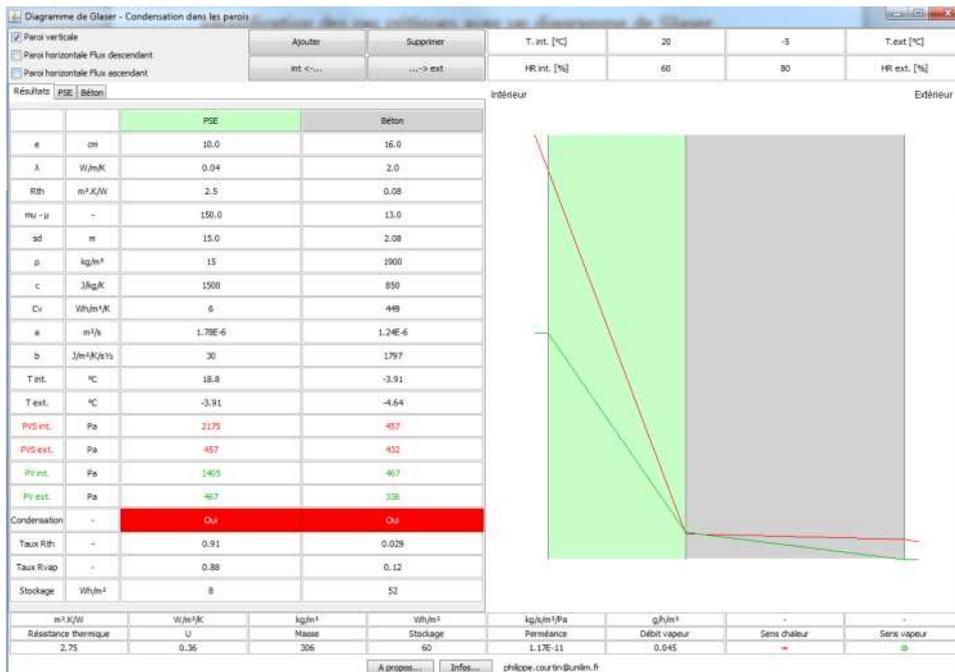


Figure 25 - Glaser : ITI, pas de pare vapeur, PSE (hypothèses matériaux 2)

10.1.1.2 Pas de pare vapeur - laine de verre

En effectuant le même type de calcul avec une laine de verre, on remarque également un risque de condensation dans la paroi.

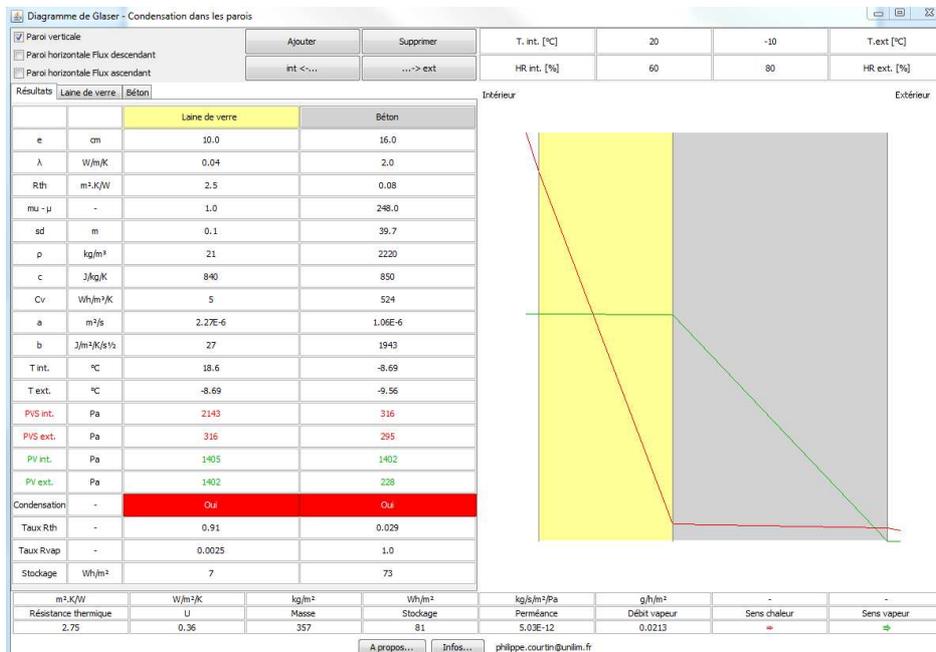


Figure 26 - Glaser : ITI, pas de pare vapeur, laine de verre

10.1.1.3 Pare vapeur très fermé

Pas de condensation avec pare vapeur Sd = 1500m.

Rappelons tout de même que la méthode du diagramme de Glaser sous-entend une excellente étanchéité à l'air.

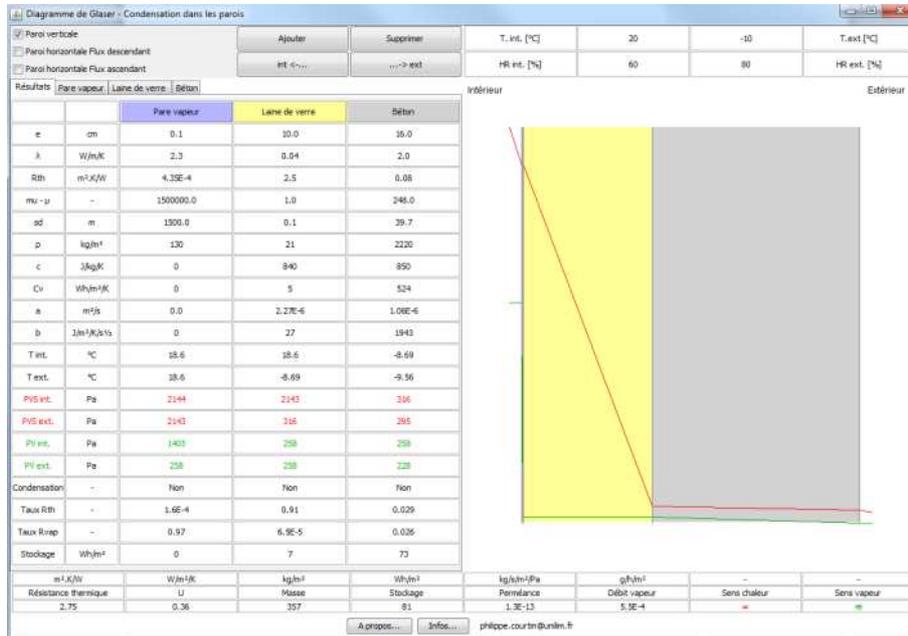


Figure 27 - Glaser : ITI, pare vapeur Sd = 1500m, laine de verre

10.1.1.4 Pare vapeur plus ouvert

Sd = 100m et étanchéité à l'air parfaite: petit risque

Sd = 10m et étanchéité à l'air parfaite: risque plus important

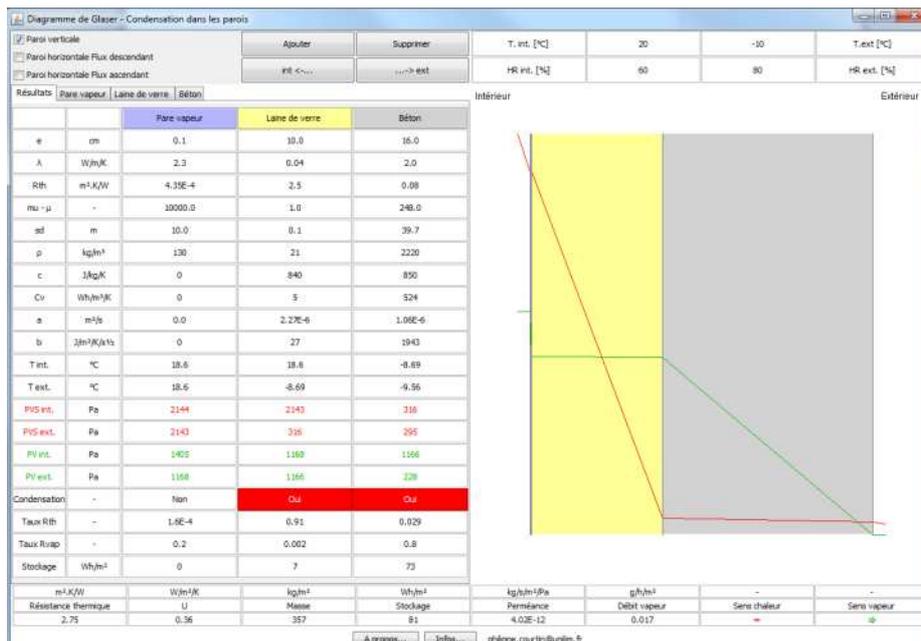


Figure 28 - Glaser : ITI, pare vapeur Sd = 10m, laine de verre

10.1.1.5 ITI sans pare vapeur + ITE

Cas d'une isolation intérieure existante de 8cm PSE + 16cm de béton. On ajoute en rénovation 14cm de PSE par l'extérieur.

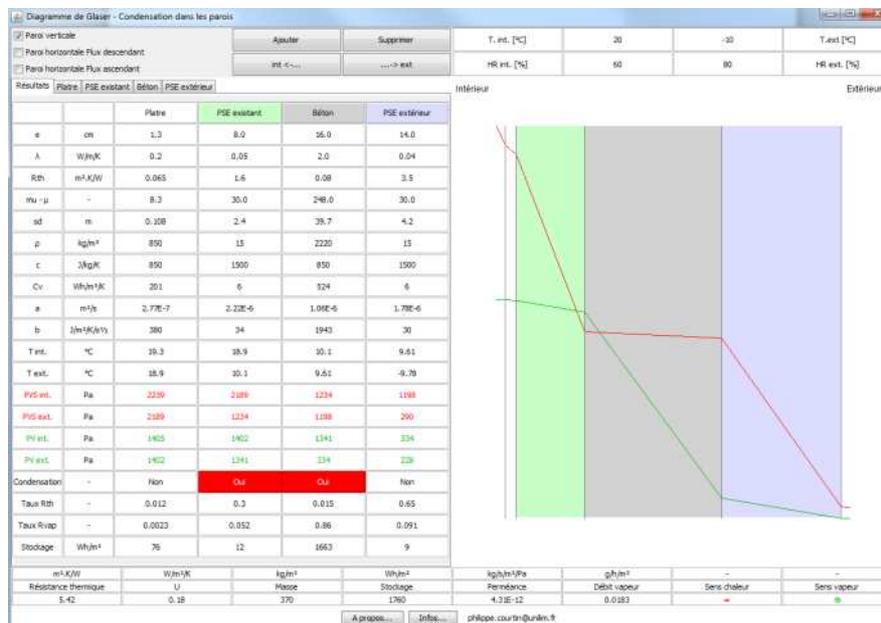


Figure 29 - Glaser : ITI + ITE réno, -10°C ext

Le PSE n'est pas une très bonne barrière à la vapeur d'eau, contrairement à ce que l'on pourrait penser.

On remarque ainsi un très léger risque de condensation sur la figure 28.

Le risque disparaît toutefois au-dessus de -5°C extérieur ou avec une épaisseur de PSE légèrement supérieure, ce qui nous permet de conclure que ce type de paroi ne présente pas de risque significatif du point de vue hygrothermique :

On note un risque de condensation sur la figure 31, toutefois légèrement moins important qu'avec une ITI, en raison de la barrière étanche créée par le béton côté intérieur.

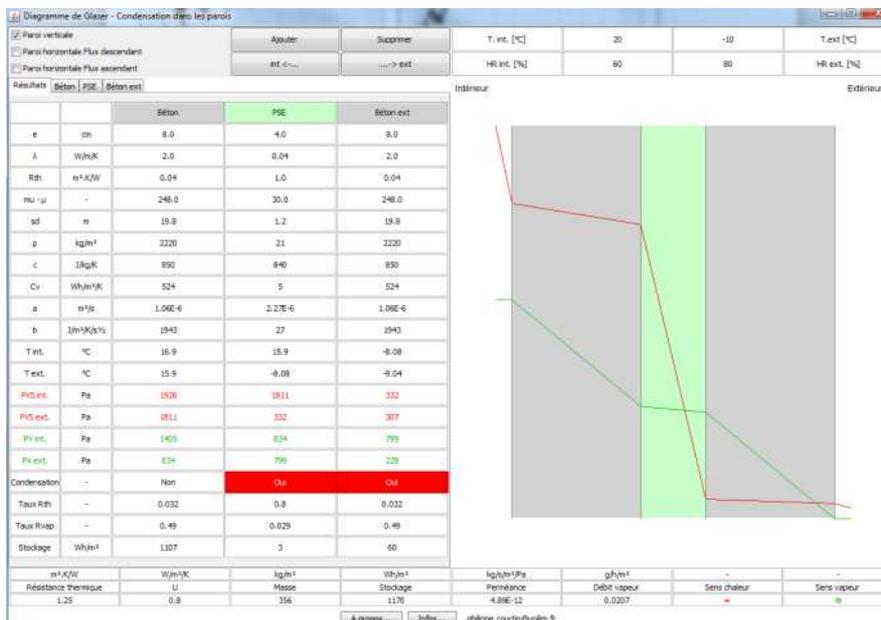


Figure 32 - Glaser, double mur béton à âme isolante

10.1.3.2 Isolation extérieure en rénovation

Si on isole le double mur par l'extérieur en rénovation, on règle le problème. Exemple ci-dessous avec ajout de 10cm par l'extérieur. Il n'y a donc pas de risque avec des épaisseurs supérieures.

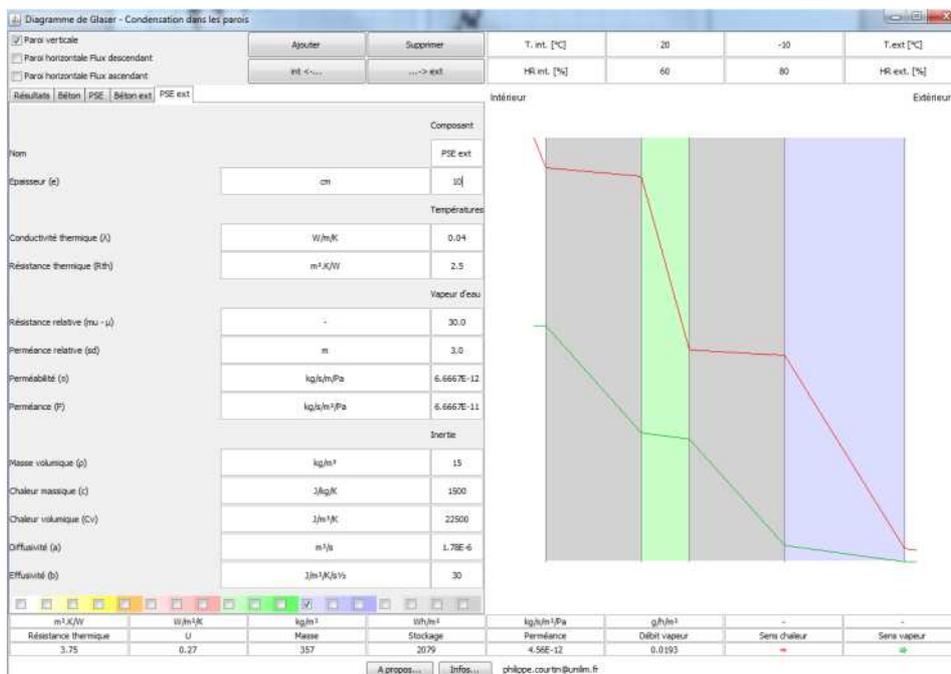


Figure 33 - Glaser, double mur béton à âme isolante, rénovation ITE

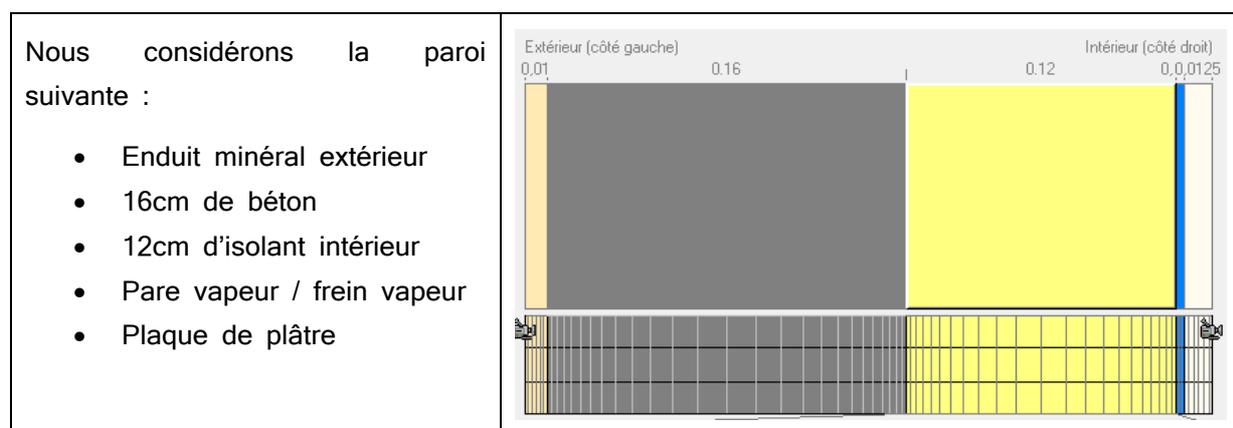
10.2 Isolation par l'intérieur d'un mur en béton ou maçonnerie - Approche dynamique du comportement hygrométrique avec WUFI

Nous avons choisi de nous intéresser au seul cas vraiment critique du point de vue du risque de condensation identifié avec la méthode Glaser et très souvent rencontré dans les rénovations énergétiques : l'isolation par l'intérieur d'un mur béton ou maçonnerie.

10.2.1 Calculs WUFI

Les modélisations sont faites avec le climat de Fribourg, et pour une pièce humide.

Conformément aux préconisations du Fraunhofer Institut, le premier indicateur que nous observons dans une modélisation avec WUFI Pro est l'évolution de la quantité d'eau totale contenue dans une paroi au fil des années. Si l'accumulation d'humidité dépasse $1\text{kg}_{\text{eau}}/\text{m}^2$ de paroi, des problèmes peuvent survenir.



Nous faisons varier les paramètres suivants :

- Nature de l'isolant : laine de verre, polystyrène, laine de bois
- Étanchéité à l'air côté intérieur : très bonne ou mauvaise ($Q_{50} = 5$)

Tableau 18 - Evolution de la teneur en eau totale de la paroi après 10 ans - WUFI Pro

	Bonne étanchéité à l'air	Mauvaise étanchéité à l'air
ITI - laine de verre	+ 0,3 kg/m^2	+ 1,5 kg/m^2

ITI - laine de bois	Stable (descend légèrement)	+ 0,7 kg/m ²
ITI - Polystyrène expansé	+ 1 kg/m ²	+ 1,4 kg/m ²

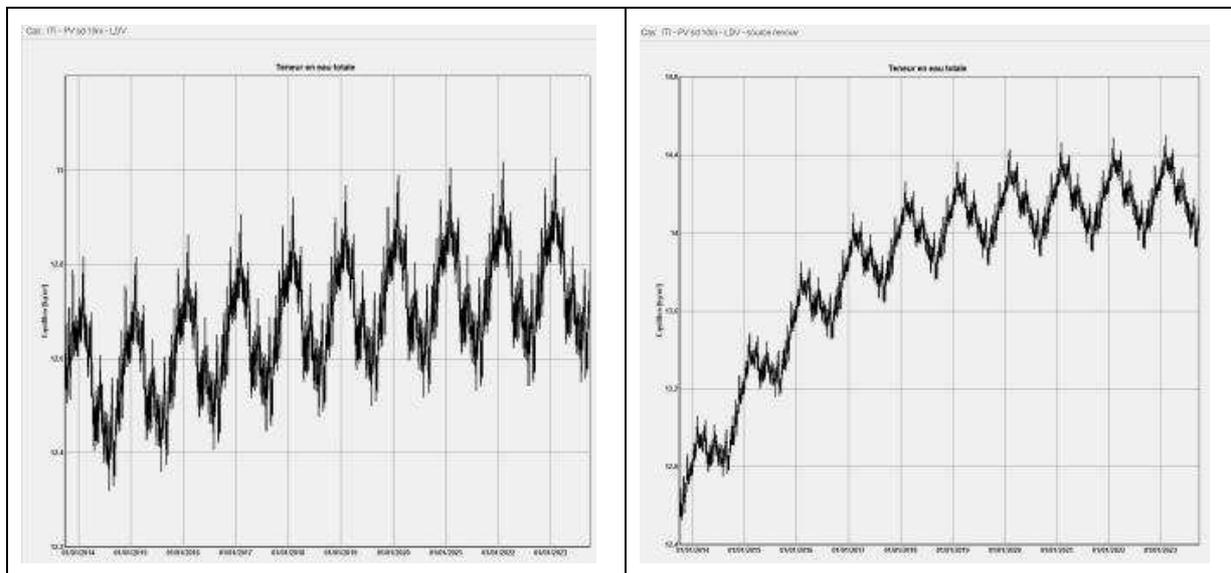


Figure 34 - Graphes d'évolution de la teneur en eau total de la paroi, isolation intérieure laine de verre, avec (droite) et sans (gauche) défaut d'étanchéité à l'air

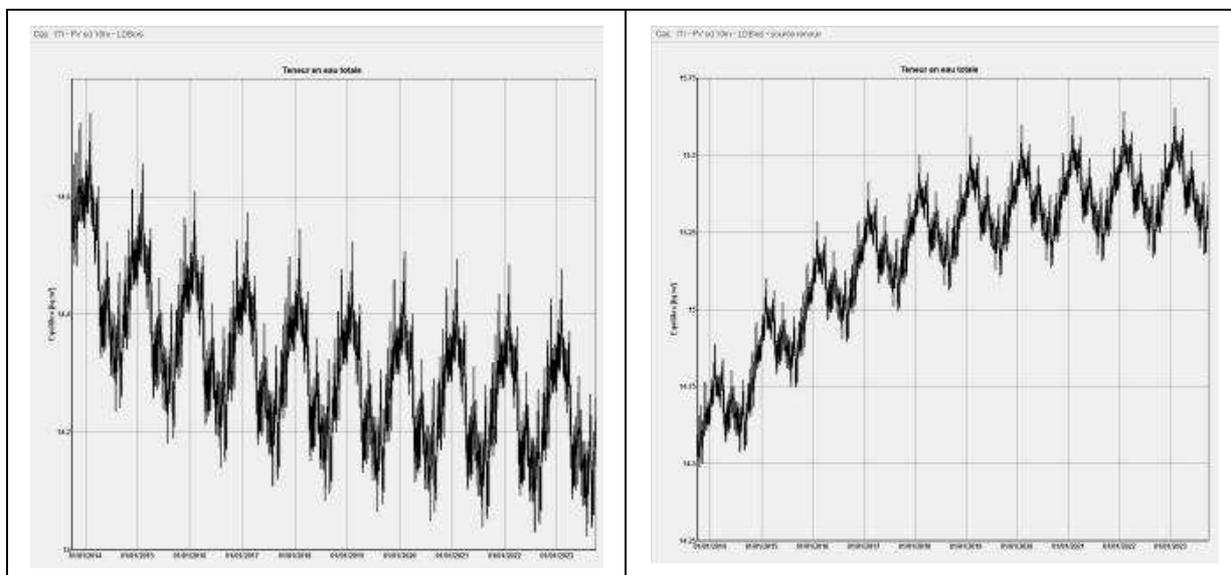


Figure 35 - Graphes d'évolution de la teneur en eau total de la paroi, isolation intérieure laine de bois, avec (droite) et sans (gauche) défaut d'étanchéité à l'air

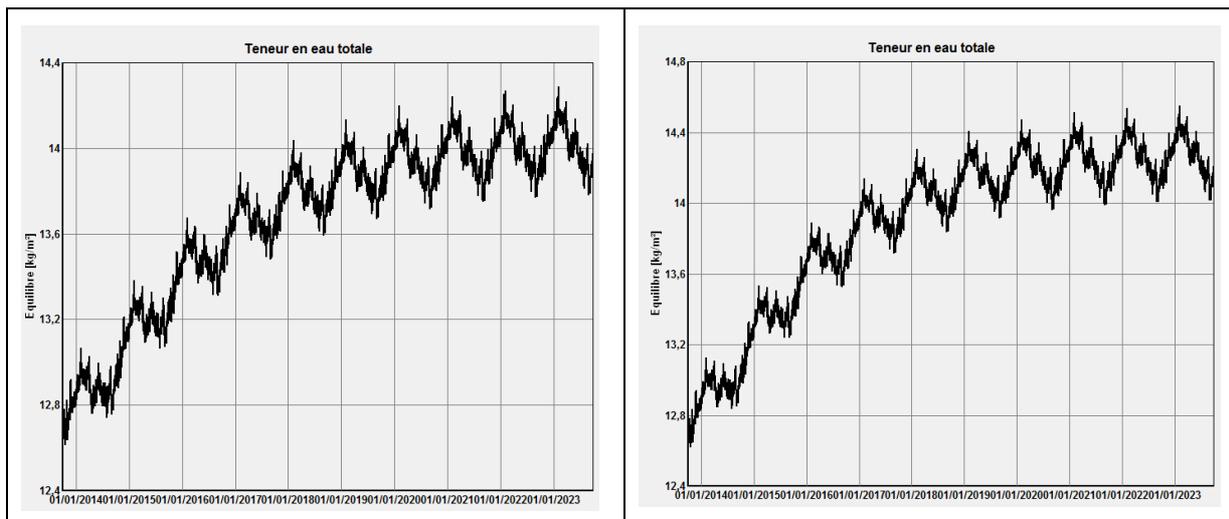


Figure 36 - Graphes d'évolution de la teneur en eau totale de la paroi, isolation intérieure PSE, avec (droite) et sans (gauche) défaut d'étanchéité à l'air

10.2.2 Conclusions calculs WUFI

Les calculs sous WUFI permettent de tirer plusieurs conclusions (illustration sur les figures 33, 34, 35) :

1. Dès que l'étanchéité à l'air est bien assurée du côté intérieur de l'isolant, et tant que les remontées capillaires et les infiltrations d'eau de pluie sont faibles, il n'y a aucun risque d'accumulation significative d'humidité dans les parois.
2. En revanche, dès qu'il y a une source d'humidité dans la paroi (mauvaise étanchéité à l'air, remontées capillaires, infiltrations d'eau de pluie), on observe une accumulation d'humidité au fil des ans non négligeable dans une paroi isolée en laine de verre ou en polystyrène. La capacité de séchage d'une telle paroi est trop faible.
3. Même en cas de défauts d'étanchéité à l'air, l'accumulation d'humidité dans les parois isolées par l'intérieur en laine de bois reste inférieure au seuil critique de 1 kg/m² de paroi préconisé par le Fraunhofer Institut. Grâce à son caractère hydrophile et capillaire, la laine de bois est capable d'évacuer en été l'humidité accumulée pendant l'hiver.

10.2.3 Analyse comparative avec l'étude HYGROBA menée par le CETE de l'Est sur le bâti ancien

Dans le cas des typologies de murs du bâti ancien, le CETE de l'Est concluait dans son étude HYGROBA que la meilleure solution est toujours l'isolation par l'extérieure. Cette affirmation est également vraie pour le bâti d'après 1948.

Il concluait également qu'une isolation intérieure posait le plus souvent des problèmes, notamment du point de vue de la capacité de séchage. HYGROBA pointait un risque potentiel de désordres dès qu'une source d'humidité était présente (due à des défauts d'étanchéité à l'air, des remontés capillaires,...).

Une des conclusions principales d'HYGROBA était que les parois isolées par l'intérieure les moins sensibles sont toujours celles qui sont perméables à la vapeur d'eau à la fois à l'extérieur et à l'intérieur.

Or, dans le cas du bâti d'après 1948 que nous étudions ici, les murs existants sont presque toujours imperméables à la vapeur d'eau (béton banché, béton préfabriqué, blocs maçonnés,...). Les matériaux composant ces murs sont également très peu capillaires, les risques de remontés d'humidité par capillarités sont donc très faibles. Les solutions mises en avant par le rapport HYGROBA ne s'appliquent donc pas.

Nous avons montré ici par les calculs WUFI que, dans le cas d'une isolation par l'intérieur et à partir du moment où le mur existant est étanche à la vapeur d'eau, la capacité de séchage du mur est toujours trop faible au regard des apports d'humidité par diffusion depuis l'intérieur. Il est ainsi toujours préférable de prévoir un pare vapeur fermé à la vapeur d'eau dans le cas d'une ITI sur un bâtiment d'après 1948.

Cela suppose d'être particulièrement attentif à la continuité du pare vapeur côté intérieur et de traiter les éventuels remontées capillaires ou les problèmes d'infiltration d'eau de pluie. Rappelons enfin qu'un mur isolé avec un matériau hygroscopique (c'est-à-dire doté d'une capacité de stockage de l'eau) et capillaire se comporte toujours mieux.

11 Adaptation des systèmes de production, distribution, émission et régulation de chauffage

L'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment nécessite toujours une intervention sur le système de chauffage, dans la mesure où la puissance de chauffe est fortement réduite après les travaux.

Nous listons ci-dessous un certain nombre de réflexions qu'il est nécessaire d'avoir sur chaque opération, ainsi que certaines interventions types.

11.1 Production de chaleur

Dans le cas où un changement de la chaudière serait programmé à court terme, le dimensionnement de la nouvelle chaudière doit se faire avec soin, au plus près des besoins, avec une surpuissance la plus limitée possible.

11.2 Régulation primaire (circuit production)

Le système de distribution et émission étant généralement inchangé, les radiateurs se trouvent surdimensionnés si le système de régulation n'est pas adapté.

La courbe de chauffe doit être adaptée. Les radiateurs qui fonctionnaient initialement en haute température (régime 80/60 °C voire 90/70 °C) fonctionnent après rénovation à des températures plus basses (70/50 °C voire plus faibles).

Dans le cas de chaudières à condensation ou basse température de moins de 300 kW, ce qui est le cas de la grande majorité des bâtiments de logements, nous conseillons de limiter au maximum le recyclage d'eau dans la chaudière (bouteille de découplage, soupape de décharge, vannes trois voies à décharge,...). Nous préférons une irrigation de la chaudière avec un circulateur de recyclage. Cette solution permet de récupérer un maximum de calories par condensation, ce qui est impossible si la température en entrée de chaudière est trop importante (cas d'un recyclage d'eau trop important. De plus, cette solution a l'avantage d'être moins consommatrice d'électricité (pompes). A noter que cette solution n'est pas applicable sur les chaudières dont le débit minimum est trop important (supérieur à la moitié ou plus du débit nominal).

11.3 Régulation du circuit secondaire (circuit émetteurs)

Il est nécessaire de vérifier et d'adapter l'ensemble du système de régulation secondaire :

- Installation d'une régulation terminale performante :

- Robinets thermostatiques seuls
 - Robinets thermostatiques + 1 vanne électrothermique par logement commandée par un thermostat d'ambiance
 - Robinets thermostatiques + 1 vanne électrothermique par pièce commandée par thermostat d'ambiance
 - Robinet électrothermique sur chaque émetteur commandé par un thermostat par pièce.
- Equilibrage du réseau en fonction d'un calcul des pertes de charges réalisé par le bureau d'étude fluide : vannes d'équilibrage en pieds de colonnes ou tout autre endroit utile.
 - Dans le cas où des robinets thermostatiques (ou tout autre vannes 2 voies de régulation) seraient installés, ce qui est un cas fréquent, la mise en place d'un circulateur à vitesse variable et à pression différentielle variable est très pertinente. Outre des économies de consommation électrique, ce montage permet d'éviter l'apparition de trop grandes différences de pression sur les robinets thermostatiques dans les colonnes où beaucoup sont fermés.

11.4 Réduction des pertes linéiques de chaleur

Calorifugeage de tous les réseaux de distribution en dehors du volume chauffé (chaufferie, sous-sol,...) mais également dès que cela est possible dans le volume chauffé.

L'isolation performante du réseau de distribution de l'ECS est particulièrement importante pour deux raisons : limitation des pertes thermiques, limitation des surchauffes dues à ces pertes. Nous notons que les CEE relatifs à ces opérations sont particulièrement intéressants.

Les organes telles que les vannes (isolement, trois voies,...) sont générateurs d'importantes pertes de chaleur. Des coques isolantes préformées existent chez certains fabricants.

12 Ventilation

Les enjeux de la ventilation dans le cadre de la rénovation sont :

- d'assurer le renouvellement d'air hygiénique permettant de conserver un air sain à l'intérieur des logements.
- de limiter les déperditions thermiques, donc de ne pas trop ventiler en hiver.

Avant rénovation, une part du renouvellement d'air est assurée par les défauts d'étanchéité du bâtiment (liaison fenêtre/mur, coffre de volets roulants, gaines électriques,...). Lors de la rénovation, l'étanchéité doit être traitée afin de maîtriser le renouvellement d'air et de garantir le bon fonctionnement du système de ventilation. Si la rénovation de la ventilation n'est pas engagée, il y a un risque de renouvellement d'air insuffisant, qui peut amener à des désordres importants (concentration de polluants, humidité et moisissures aux murs).

La ventilation en place fonctionne principalement pour les bâtiments d'avant 1980 par tirage thermique (l'air chaud monte) et par effets de différences de pression (vent...). Ce système ne permet pas de contrôle des débits d'air, qui se retrouvent être importants en hiver (fortes différences de températures) et faibles voire nuls en mi-saison et en été.

Pour les bâtiments à partir de 1980, un certain nombre sont équipés de VMC simple flux autoréglables. Ces VMC sont souvent mal entretenues et nécessite un nettoyage complet voir le changement de certains organes à l'occasion d'une rénovation globale.

La rénovation du système de ventilation offre plusieurs possibilités :

12.1 Ventilation naturelle assistée : systèmes basse pression (<80Pa)

Ce système ne requiert pas de rénovation lourde des conduits. Des entrées d'air sont mises en place en façade des pièces sèches (sur les menuiseries des fenêtres par exemple), ainsi que des bouches d'extraction dans les pièces humides (salles de bain, WC, cuisine). Un système est mis en place à l'extrémité des conduits, sur la toiture.

Cependant, une étude complémentaire doit être réalisée par l'entreprise pour vérifier la compatibilité des conduits et équipements existants.

Ainsi, la mise en place d'une ventilation naturelle assistée (système basse pression) est souvent la solution la plus adaptée aux cas où il existe déjà des conduits de ventilation naturelle (type conduits shunt).

12.2 VMC simples flux (env. 110Pa)

Ces systèmes requièrent de rénover les conduits afin de les rendre étanches. Cela passe en général par un re-tubage, qui peut être onéreux. Des entrées d'air sont mises en place en façade des pièces sèches (sur les menuiseries des fenêtres par exemple), ainsi que des bouches d'extraction dans les pièces humides (salles de bain, WC, cuisine). Un extracteur (ventilateur) est mis en place en extrémité des conduits, en toiture.

Il est possible de mettre en place dans les logements des entrées et grilles d'extraction hygroréglable, qui permettent d'adapter le débit extrait en fonction de l'humidité de l'air. Les avantages de l'hygroréglable sont d'extraire l'air lorsque nécessaire, et de limiter les déperditions. Toutefois, ces systèmes ont parfois tendance à ne pas suffisamment ventiler, entraînant une dégradation de la qualité d'air intérieure.

12.3 VMC double flux à récupération de chaleur

La mise en place d'une ventilation double flux à récupération de chaleur permet de récupérer les calories de l'air extrait pour les transmettre à l'air entrant. Nous avons calculé précédemment un gain sur le besoin de chauffage d'environ 15 à 20 kWh/m²/an.

Nous décrivons ci-dessous plusieurs systèmes possibles :

12.3.1 Systèmes centralisés par bâtiment

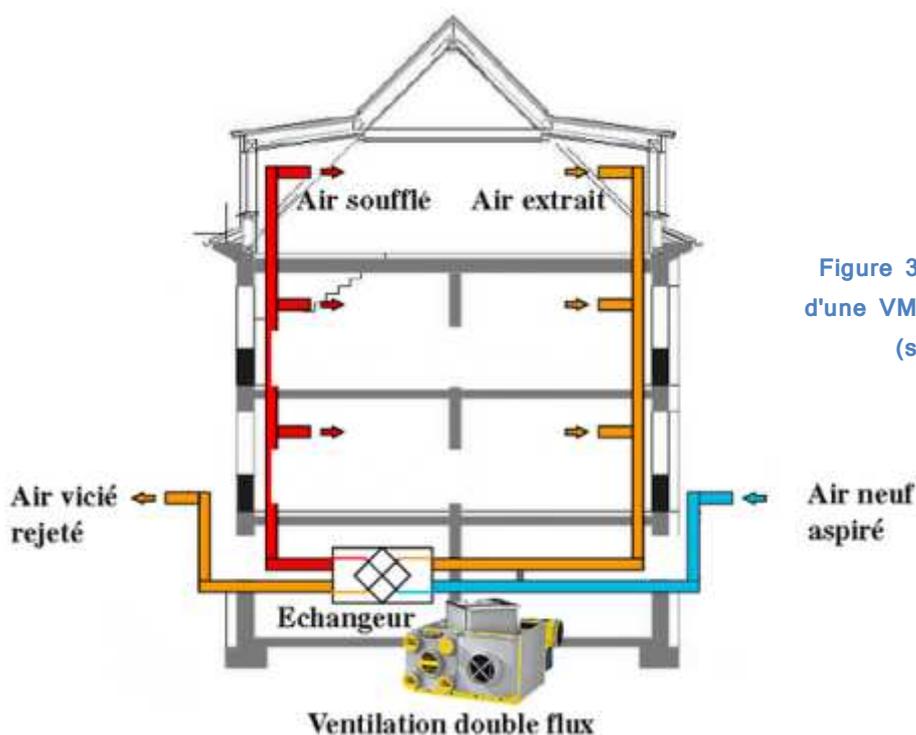


Figure 37 - Schéma de principe d'une VMC double flux centralisée (source : Acqualys)

Un système de ventilation double flux centralisé est composé des éléments suivants :

- Dans les locaux techniques communs, situés généralement en sous-sol ou en toiture :
 - les ventilateurs d'extraction et de soufflage
 - L'échangeur de chaleur
- Les réseaux de soufflage et de reprise circulent dans des gaines verticales, les faux plafonds des parties communes puis dans les logements (le plus souvent en faux plafonds des circulations, pièces humides, entrée).
- En raison de la réglementation incendie, des clapets coupe-feu doivent être installés à chaque traversée de paroi donnant sur un logement.
- Des bouches de soufflage sont installées à l'entrée des pièces de vie, des bouches de reprise sont installées dans les pièces humides.

Avec cette solution, beaucoup d'organes sont centralisés, ce qui permet une maintenance aisée en raison de l'absence de technicité à l'intérieur des logements, notamment pour la gestion des filtres.

En revanche, nous pouvons noter un certains nombres d'inconvénients : les clapets coupe-feu génère de la complexité (gestion de leur ouverture / fermeture, pertes de charges supplémentaires, coût), encombrement des locaux techniques (souvent à créer) et des faux plafonds (souvent à créer, surtout à l'intérieur des logements).

A noter que pour éviter la création de faux plafonds et de gaines dans les parties communes, il existe des solutions de gaines cheminant verticalement dans l'isolant extérieur.

12.3.2 Systèmes centralisés par appartement

Cette solution est particulièrement adaptée aux petites opérations et aux propriétaires souhaitant atteindre une performance énergétique supérieure sur leur logement sans pouvoir imposer la VMC double flux centralisée à l'ensemble du bâtiment.

Le principe de fonctionnement est le même que celui de la VMC centralisée au niveau du bâtiment, à ceci près que l'ensemble du système est situé dans le logement et qu'il fonctionne de manière autonome.

Des systèmes ventilateurs + échangeur + caisson répartiteur existent pour une installation en faux plafond.

Ce système possède l'avantage de ne pas nécessiter la mise en place de clapets coupe feux.

12.3.3 Systèmes décentralisés par pièces (sans conduits)

Une dernière solution peut être envisagée : il s'agit de mettre en place dans chaque logement un ou plusieurs modules de ventilation double flux individuelle sans conduit.

Ces systèmes de ventilation à récupération de chaleur ne nécessitent pas d'installation de conduits, ce qui est un avantage de taille en rénovation : peu d'encombrement, pas de faux plafonds.

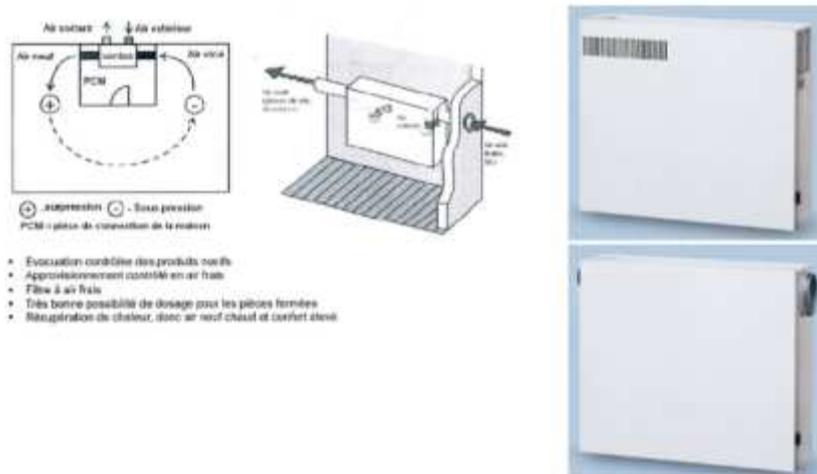


Figure 38 - VMC DF sans conduit, extrait documentation Paul

La circulation d'air est basée sur le principe d'une diffusion d'air neuf préchauffé par l'air extrait (rendement supérieur à 80%) dans une pièce sèche et de l'extraction dans une pièce humide selon le schéma suivant :

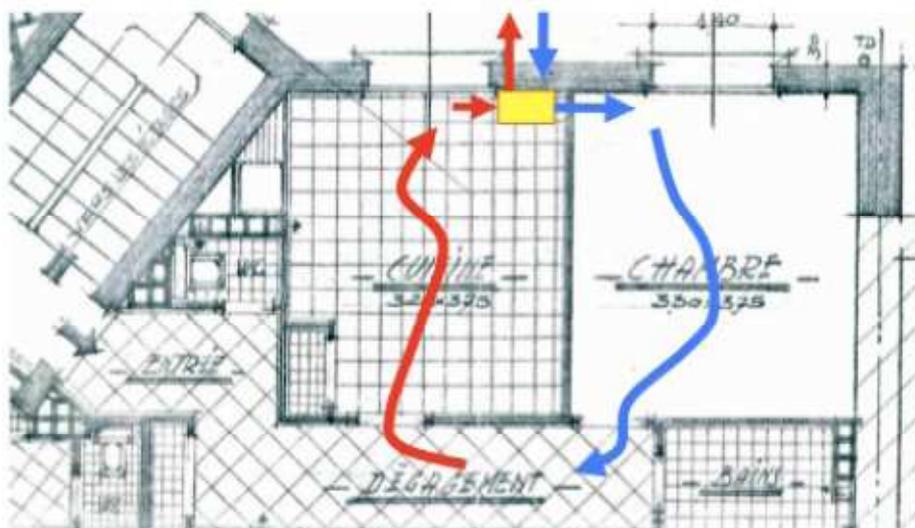


Figure 39 - Principe de fonctionnement VMC DF sans conduits (source : étude Copro 2012 à Grenoble, Tekhnê Architectes)

13 Eléments de chiffrage

13.1 La présente évaluation des coûts ne se substitue pas à un chiffrage par un maître d'œuvre

L'évaluation des coûts présentée ici n'a pas pour but de chiffrer précisément le coût d'une opération de rénovation énergétique, ce qui est impossible pour plusieurs raisons :

- Bien que jugés représentatifs du parc alsacien, nous raisonnons néanmoins dans notre étude sur des bâtiments théoriques qui présentent nécessairement des différences avec les bâtiments réels qui seront rénovés. Les métrés, proportions de fenêtres, balcons, éléments architecturaux particuliers sont autant de paramètres qui varient et rendent le présent chiffrage approximatif.
- Chaque projet est un cas particulier. Un diagnostic technique et architectural est indispensable pour toute opération de rénovation. Les conclusions de ces diagnostics peuvent pointer la nécessité de réaliser certains travaux non chiffrés ici.

Il s'agit donc bien d'une évaluation des coûts. Celle-ci ne doit pas se substituer au travail d'un maître d'œuvre.

13.2 Méthode

Un métré précis a été réalisé pour chaque bâtiment type, en décomposant l'ensemble des postes de travaux : murs, planchers bas, toitures, fenêtres, protections solaires, linéaires d'acrotère et de périmètre de planchers bas.

Des prix unitaires ont été établis pour l'ensemble des travaux de base et des variantes. Ces prix unitaires proviennent de bases de données externes (Batiprix, adaptée), interne (base d'opérations suivies par eEgénie et Tekhnê). Ces PU ont été contrôlés et validés par un économiste de la construction. Nous donnons systématiquement un prix unitaire « fourchette haute » et une autre « fourchette basse ».

Grâce aux métrés et prix unitaires, nous avons, pour chaque typologie, calculé le coût de chaque poste de travaux. Nous exprimons ces coûts sous forme de ratios en €/m²_{SHAB}.

Pour les variantes, ces coûts sont exprimés en plus ou moins-value par rapport à la solution de base.

De manière à faciliter la lecture et à ne pas donner l'illusion qu'il s'agit d'un chiffrage à utiliser directement pour consulter des entreprises, nous utilisons des pictogrammes correspondant à des fourchettes de prix :

Tableau 19 - Fourchettes de prix, signification des pictogrammes

€	0 à 10 €/m ² _{SHAB}
€€	10 à 20 €/m ² _{SHAB}
€€€	20 à 40 €/m ² _{SHAB}
€€€€	40 à 60 €/m ² _{SHAB}
€€€€€	60 à 90 €/m ² _{SHAB}
€€€€€€	> 90 €/m ² _{SHAB}

13.2.1 Travaux pris en compte dans l'évaluation des coûts

Toutes les évaluations de coûts sont faites en € HT, fourniture et pose incluses.

Les coûts d'échafaudage et de toute installation de chantier nécessaire sont également inclus.

Lorsque des ouvrages sont déposés, le coût de la dépose est pris en compte. C'est par exemple le cas des interventions d'isolation + étanchéité en toitures terrasses, ou de remplacement des menuiseries.

A noter que pour le chiffrage des protections solaires, nous avons considéré que les menuiseries faisaient en moyenne 1,5 m² et qu'on installait une protection solaire extérieure sur 2/3 d'entre elles.

13.2.2 Travaux non pris en compte dans l'évaluation des coûts

Un certain nombre de travaux spécifiques ne sont pas évalués ici car ils dépendent trop fortement de la situation particulière de chaque bâtiment. Il s'agit de travaux qui sont parfois nécessaires de réaliser.

Parmi eux, nous citons par exemple :

- Le déplacement des descentes d'eaux pluviales quand on isole la toiture et les murs par l'extérieur
- Le décaissage des pieds de murs pour l'isolation des pieds de façade
- Les gardes corps en toiture
- Des finitions différentes de celles décrites dans les tableaux d'évaluation des coûts

13.3 Evaluation des coûts par typologie

Les tableaux ci-après présentent plusieurs indicateurs intéressants :

- Les métrés des bâtiments type modélisés, en valeurs brutes en valeur ramenées à la surface habitable
- Une fourchette de coûts de travaux pour la rénovation avec le bouquet de base pour chaque typologie
- Des fourchettes de coûts de travaux pour chacun des postes de travaux

Le coût des variantes est toujours exprimé en plus ou moins-value par rapport à la solution de base.

13.3.1 Evaluation des coûts, Petits 48-74

Tableau 20 - Evaluation des coûts, Petits 48-74

	Unités	Métrés	Evaluation coût	
Surface totale utile logements	m ²	441		
Murs				
Façades (surfaces nettes après déduction menuiseries) ITE R = 4,9	m ²	341		€€€€€
Périmètre plancher bas , isolation périmétrique 60cm	m linéaire	56		€
Plancher bas				
Plancher bas sur sous sol ou VS, flocage R = 3,4	m ²	170		€€€€
Toiture				
Plancher de combles : isolation ouate de cellulose	m ²	170		€€
Menuiseries				
Menuiseries	m ²	87		€€€€€
Protections solaires stores screen ext	Unités	39		€€
Ventilation				
Logements	Nb logt	6		€€€
Fourchette du coût des travaux de base	€/m²_{SHAB}	202	à	268
VARIANTES (prix en plus ou moins value / base)				
ITE R = 5,8	m ²	341	+	€€
ITE R = 4,4	m ²	341	-	€
ITE R = 3,8	m ²	341	-	€
ITE R = 3,3	m ²	341	-	€€
ITI R = 2,7	m ²	341	-	€€€
Bardage bois mélèze simple ossature (jusqu'à 14cm d'isolant)	m ²	341	+	€€€
ITI R = 2,7 + enduit isolant extérieur R = 0,4	m ²	341	+	€€€€
Plus value ITE biosourcée R = 4,9	m ³	341	+	€€
Flocage isolant 10cm au lieu de 15cm	m ²	170	-	€
Isolation sous étanchéité toiture 20cm PU au lieu de plancher des combles (dont dépose étanchéité existante et nouvelle étanchéité)	m ²	170	+	€€€€€
Isolation entre chevrons et dessous	m ²	170	+	€€
Sarking (isolation extérieure des rampants, refecton de la toiture), non compris couverture	m ²	170	+	€€€€€€
Isolant bio sourcé rampants (plus value par rapport à isolation des rampants avec produit standard type laine de verre)	m ²	170	+	€
Triple vitrage Ug = 0,7	m ²	87	+	€€
Triple vitrage passif Uw = 0,77	m ²	87	+	€€€
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	m ²	87	+	€€€
Menuiserie bois alu	m ²	87	+	€€€€
Brises soleils orientables	Unités	39	+	€
Volets roulants PVC	Unités	39	-	€
Volets roulants Alu	Unités	39	+	€
VMC double flux à récupération de chaleur	Nb logt	6	+	€€€
Ventilation naturelle assistée	Nb logt	6	-	€
VMC DF décentralisée par pièce	Nb logt	6	+	€€€

Remarque : si ce petit collectif possédait une toiture et non des combles isolés, la dépose de l'étanchéité + isolation + pose d'une nouvelle étanchéité augmenterait considérablement le coût au m²_{SHAB} de la rénovation.

13.3.2 Evaluation des coûts, Moyens 48-74

Tableau 21 - Evaluation des coûts - Moyens 48-74

	Unités	Métrés	Evaluation coût	
Surface totale utile logements	m ²	1134		
Murs				
Façades (surfaces nettes après déduction menuiseries) ITE R = 4,9	m ²	561		€€€€
Périmètre plancher bas , isolation périmétrique 60cm	m linéaire	63		€
Plancher bas				
Plancher bas sur sous sol ou VS, flocage R = 3,4	m ²	207		€€
Toiture				
Toit terrasse - Dépose étanchéité existante, isolation R = 8,5 sous étanchéité, relevés d'étanchéités	m ²	207		€€€€
Isolation de l'acrotère	m linéaire	208		€
Menuiseries				
Menuiseries	m ²	210		€€€€
Protections solaires stores screen ext	Unités	93		€€
Ventilation				
Logements	Nb logt	16		€€€
Fourchette du coût des travaux de base	€/m²_{SHAB}	183	à	238
VARIANTES (prix en plus ou moins value / base)				
ITE R = 5,8	m ²	561		+ €
ITE R = 4,4	m ²	561		- €
ITE R = 3,8	m ²	561		- €
ITE R = 3,3	m ²	561		- €
ITI R = 2,7	m ²	561		- €€
Bardage bois mélèze simple ossature (jusqu'à 14cm d'isolant)	m ²	561		+ €€
ITI R = 2,7 + enduit isolant extérieur R = 0,4	m ²	561		+ €€€
Plus value ITE biosourcée R = 4,9	m ²	561		+ €€
Flocage isolant 10cm au lieu de 15cm	m ²	207		- €
Isolation sous étanchéité toiture 12cm au lieu de 20	m ²	207		- €
Protection lourde dalles sur plots à la place de gravillons	m ²	207		+ €€
Végétalisation de la toiture	m ²	207		+ €€
Réhausse acrotère en béton plein	m linéaire	63		+ €
Réhausse acrotère en structure bois	m linéaire	63		+ €
Isolation plancher des combles	m ²	207		- €€€
Isolation entre chevrons et dessous	m ²	207		- €€€
Sarking (isolation extérieure des rampants, refecton de la toiture), non compris couverture	m ²	208		+ €
Isolant bio sourcé rampants (plus value par rapport à isolation des rampants avec produit standard type laine de verre)	m ²	207		+ €
Triple vitrage Ug = 0,7	m ²	210		+ €€
Triple vitrage passif Uw = 0,77	m ²	210		+ €€€
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	m ²	210		+ €€€
Menuiserie bois alu	m ²	210		+ €€€€
Brises soleils orientables	Unités	93		+ €
Volets roulants PVC	Unités	93		- €
Volets roulants Alu	Unités	93		+ €
VMC double flux à récupération de chaleur	Nb logt	16		+ €€€
Ventilation naturelle assistée	Nb logt	16		- €
VMC DF décentralisée par pièce	Nb logt	16		+ €€€

13.3.3 Evaluation des coûts, Grands 48-74

Tableau 22 - Evaluation des coûts - Grands 48-74

	Unités	Métrés	Evaluation coût	
Surface totale utile logements	m ²	2930		
Murs				
Façades (surfaces nettes après déduction menuiseries) ITE R = 4,9	m ²	1503	€€€€	
Périmètre plancher bas , isolation périmétrique 60cm	m linéaire	81	€	
Plancher bas				
Plancher bas sur sous sol ou VS, flocage R = 3,4	m ²	340	€€	
Toiture				
Toit terrasse - Dépose étanchéité existante, isolation R = 8,5 sous étanchéité, relevés d'étanchéités	m ²	340	€€€	
Isolation de l'acrotère	m linéaire	81	€	
Menuiseries				
Menuiseries	m ²	465	€€€€	
Protections solaires stores screen ext	Unités	207	€	
Ventilation				
Logements	Nb logt	42	€€€	
Fourchette du coût des travaux de base	€/m ² _{SHAB}	154	à	202
VARIANTES (prix en plus ou moins value / base)				
ITE R = 5,8	m ²	1503	+ €€	
ITE R = 4,4	m ²	1503	- €	
ITE R = 3,8	m ²	1503	- €	
ITE R = 3,3	m ²	1503	- €	
ITI R = 2,7	m ²	1503	- €€	
Bardage bois mélèze simple ossature (jusqu'à 14cm d'isolant)	m ²	1503	+ €€	
ITI R = 2,7 + enduit isolant extérieur R = 0,4	m ²	1503	+ €€€	
Plus value ITE biosourcée R = 4,9	m ²	1503	+ €€	
Flocage isolant 10cm au lieu de 15cm	m ²	340	- €	
Isolation sous étanchéité toiture 12cm au lieu de 20	m ²	340	- €	
Protection lourde dalles sur plots à la place de gravillons	m ²	340	+ €	
Végétalisation de la toiture	m ²	340	+ €€	
Réhausse acrotère en béton plein	m linéaire	81	+ €	
Réhausse acrotère en structure bois	m linéaire	81	+ €	
Isolation plancher des combles	m ²	340	- €€€	
Isolation entre chevrons et dessous	m ²	340	- €€	
Sarking (isolation extérieure des rampants, refecton de la toiture), non compris couverture	m ²	81	+ €	
Isolant bio sourcé rampants (plus value par rapport à isolation des rampants avec produit standard type laine de verre)	m ²	340	+ €	
Triple vitrage Ug = 0,7	m ²	465	+ €	
Triple vitrage passif Uw = 0,77	m ²	465	+ €€	
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	m ²	465	+ €€€	
Menuiserie bois alu	m ²	465	+ €€€€	
Brises soleils orientables	Unités	207	+ €	
Volets roulants PVC	Unités	207	- €	
Volets roulants Alu	Unités	207	+ €	
VMC double flux à récupération de chaleur	Nb logt	42	+ €€€	
Ventilation naturelle assistée	Nb logt	42	- €	
VMC DF décentralisée par pièce	Nb logt	42	+ €€€	

13.3.4 Evaluation des coûts, Petits 75-99

Tableau 23 - Evaluation des coûts - Petits 75-99

	Unités	Mètres	Evaluation coût	
Surface totale utile logements	m ²	685		
Murs				
Façades (surfaces nettes après déduction menuiseries) ITE R = 4,9	m ²	765		€€€€€€
Périmètre plancher bas , isolation périmétrique 60cm	m linéaire	330		€
Plancher bas				
Plancher bas sur terre plein : pas d'isolation	m ²	250		0
Toiture				
Sarking (isolation extérieure des rampants, refecton de la toiture), non compris couverture	m ²	336		€€€€€€
Menuiseries				
Menuiseries	m ²	90		€€€€
Protections solaires stores screen ext	Unités	40		€
Ventilation				
Logements	Nb logt	10		€€€
Fourchette du coût des travaux de base	€/m²_{SHAB}	292	à	378
VARIANTES (prix en plus ou moins value / base)				
ITE R = 5,8	m ²	765	+	€€€
ITE R = 4,4	m ²	765	-	€
ITE R = 3,8	m ²	765	-	€€
ITE R = 3,3	m ²	765	-	€€
ITI R = 2,7	m ²	765	-	€€€
Bardage bois mélèze simple ossature (jusqu'à 14cm d'isolant)	m ²	765	+	€€€€
ITI R = 2,7 + enduit isolant extérieur R = 0,4	m ²	765	+	€€€€€
Plus value ITE biosourcée R = 4,9	m ²	765	+	€€€
Isolation sous étanchéité toiture 20cm PU au lieu du sarking	m ²	336	-	€€€
Couverture tuiles	m ²	336	+	€€€
Isolation plancher des combles	m ²	336	-	€€€€€€
Isolation entre chevrons et dessous	m ²	336	-	€€€€€€
Isolant bio sourcé rampants (plus value par rapport à isolation des rampants avec produit standard)	m ²	336	+	€
Triple vitrage Ug = 0,7	m ²	90	+	€
Triple vitrage passif Uw = 0,77	m ²	90	+	€€
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	m ²	90	+	€€€
Menuiserie bois alu	m ²	90	+	€€€
Brises soleils orientables	Unités	40	+	€
Volets roulants PVC	Unités	40	-	€
Volets roulants Alu	Unités	40	+	€
VMC double flux à récupération de chaleur	Nb logt	10	+	€€€
Ventilation naturelle assistée	Nb logt	10	-	€
VMC DF décentralisée par pièce	Nb logt	10	+	€€€

13.3.5 Evaluation des coûts, Moyens 75-99

Tableau 24 - Evaluation des coûts - Moyens 75-99

	Unités	Métrés	Evaluation coût	
Surface totale utile logements	m ²	2861		
Murs				
Façades (surfaces nettes après déduction menuiseries) ITE R = 4,9	m ²	1206		€€€€
Périmètre plancher bas , isolation périmétrique 60cm	m linéaire	112		€
Plancher bas				
Plancher bas sur sous sol ou VS, flocage R = 3,4	m ²	532		€€
Toiture				
Toit terrasse - Dépose étanchéité existante, isolation R = 8,5 sous étanchéité, relevés d'étanchéités	m ²	532		€€€€
Isolation de l'acrotère	m linéaire	112		€
Menuiseries				
Menuiseries	m ²	418		€€€€
Protections solaires stores screen ext	Unités	186		€
Ventilation				
Logements	Nb logt	41		€€€
Fourchette du coût des travaux de base	€/m ² _{SHAB}	162	à	211
VARIANTES (prix en plus ou moins value / base)				
ITE R = 5,8	m ²	1206		+ €
ITE R = 4,4	m ²	1206		- €
ITE R = 3,8	m ²	1206		- €
ITE R = 3,3	m ²	1206		- €
ITI R = 2,7	m ²	1206		- €€
Bardage bois mélèze simple ossature (jusqu'à 14cm d'isolant)	m ²	1206		+ €€
ITI R = 2,7 + enduit isolant extérieur R = 0,4	m ²	1206		+ €€€
Plus value ITE biosourcée R = 4,9	m ²	1206		+ €€
Flocage isolant 10cm au lieu de 15cm	m ²	532		- €
Isolation sous étanchéité toiture 12cm au lieu de 20	m ²	532		- €
Protection lourde dalles sur plots à la place de gravillons	m ²	532		+ €€
Végétalisation de la toiture	m ²	532		+ €€
Réhausse acrotère en béton plein	m linéaire	112		+ €
Réhausse acrotère en structure bois	m linéaire	112		+ €
Isolation plancher des combles	m ²	532		- €€€
Isolation entre chevrons et dessous	m ²	532		- €€€
Sarking (isolation extérieure des rampants, refecton de la toiture), non compris couverture	m ²	112		+ €
Isolant bio sourcé rampants (plus value par rapport à isolation des rampants avec produit standard type laine de verre)	m ²	532		+ €
Triple vitrage Ug = 0,7	m ²	418		+ €
Triple vitrage passif Uw = 0,77	m ²	418		+ €€
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	m ²	418		+ €€€
Menuiserie bois alu	m ²	418		+ €€€€
Brises soleils orientables	Unités	186		+ €
Volets roulants PVC	Unités	186		- €
Volets roulants Alu	Unités	186		+ €
VMC double flux à récupération de chaleur	Nb logt	41		+ €€€
Ventilation naturelle assistée	Nb logt	41		- €
VMC DF décentralisée par pièce	Nb logt	41		+ €€€

13.3.6 Evaluation des coûts, Grands 75-99

Tableau 25 - Evaluation des coûts - Grands 75-99

	Unités	Métrés	Evaluation coût	
Surface totale utile logements	m ²	5722		
Murs				
Façades (surfaces nettes après déduction menuiseries) ITE R = 4,9	m ²	2412		€€€€
Périmètre plancher bas, isolation périphérique 60cm	m linéaire	112		€
Plancher bas				
Plancher bas sur sous sol ou VS, flocage R = 3,4	m ²	532		€
Toiture				
Toit terrasse - Dépose étanchéité existante, isolation R = 8,5 sous étanchéité, relevés d'étanchéités	m ²	532		€€€
Isolation de l'acrotère	m linéaire	112		€
Menuiseries				
Menuiseries	m ²	836		€€€€
Protections solaires stores screen ext	Unités	372		€
Ventilation				
Logements	Nb logt	82		€€€
Fourchette du coût des travaux de base	€/m ² _{SHAB}	135	à	176
VARIANTES (prix en plus ou moins value / base)				
ITE R = 5,8	m ²	2412	+	€
ITE R = 4,4	m ²	2412	-	€
ITE R = 3,8	m ²	2412	-	€
ITE R = 3,3	m ²	2412	-	€
ITI R = 2,7	m ²	2412	-	€€
Bardage bois mélèze simple ossature (jusqu'à 14cm d'isolant)	m ²	2412	+	€€
ITI R = 2,7 + enduit isolant extérieur R = 0,4	m ²	2412	+	€€€
Plus value ITE biosourcée R = 4,9	m ²	2412	+	€€
Flocage isolant 10cm au lieu de 15cm	m ²	532	-	€
Isolation sous étanchéité toiture 12cm au lieu de 20	m ²	532	-	€
Protection lourde dalles sur plots à la place de gravillons	m ²	532	+	€
Végétalisation de la toiture	m ²	532	+	€
Réhausse acrotère en béton plein	m linéaire	112	+	€
Réhausse acrotère en structure bois	m linéaire	112	+	€
Isolation plancher des combles	m ²	532	-	€€
Isolation entre chevrons et dessous	m ²	532	-	€€
Sarking (isolation extérieure des rampants, refection de la toiture), non compris couverture	m ²	112	+	€
Isolant bio sourcé rampants (plus value par rapport à isolation des rampants avec produit standard type laine de verre)	m ²	532	+	€
Triple vitrage Ug = 0,7	m ²	836	+	€
Triple vitrage passif Uw = 0,77	m ²	836	+	€€
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	m ²	836	+	€€€
Menuiserie bois alu	m ²	836	+	€€€€
Brises soleils orientables	Unités	372	+	€
Volets roulants PVC	Unités	372	-	€
Volets roulants Alu	Unités	372	+	€
VMC double flux à récupération de chaleur	Nb logt	82	+	€€€
Ventilation naturelle assistée	Nb logt	82	-	€
VMC DF décentralisée par pièce	Nb logt	82	+	€€€

13.4 Evaluation des coûts, synthèse

Tableau 26 - Synthèse de l'évaluation des coûts de travaux

	Petit 48-74		Moyen 48-74		Grands 48-74		Petit 75-99		Moyen 75-99		Grand 75-99	
Fourchette bouquets de base (en €/m²_{SHAB})	202	268	183	238	154	202	292	378	162	211	135	176
Bouquets de travaux de base												
ITE R = 4,9, produits standard PSE	€€€€€		€€€€		€€€€		€€€€€€		€€€€		€€€€	
Plus value isolation périmètre fondations	€		€		€		€		€		€	
Planchers bas flochage isolant 15cm, produits standards	€€€€		€€		€€		Non isolé, sur TP		€€		€	
Toiture R = 8,5, 20cm PU sous étanchéité			€€€€		€€€				€€€€		€€€	
Plus value isolation acrotère (pas de réhausse)			€		€				€		€	
Isolation du plancher des combles R = 8,5 ouate cellulose	€€											
Toiture R = 8,5, sarking							€€€€€€					
Menuiseries DV Ug = 1,1 ; produits standards PVC	€€€€€		€€€€		€€€€		€€€€		€€€€		€€€€	
Stores screen sur 60% des fenêtres	€€		€€		€		€		€		€	
VMC simple flux autoréglable	€€€		€€€		€€€		€€€		€€€		€€€	
Variantes en plus ou moins value par rapport aux travaux de base												
Murs extérieurs												
ITE R = 5,8	+	€€	+	€	+	€€	+	€€€	+	€	+	€
ITE R = 4,4	-	€	-	€	-	€	-	€	-	€	-	€
ITE R = 3,8	-	€	-	€	-	€	-	€€	-	€	-	€
ITE R = 3,3	-	€€	-	€	-	€	-	€€	-	€	-	€
Isolation intérieure ITI R = 2,7	-	€€€	-	€€	-	€€	-	€€€	-	€€	-	€€
Plus value bardage simple ossature (max 14cm d'isolant)	+	€€€	+	€€	+	€€	+	€€€€	+	€€	+	€€
ITI R = 3,7 + enduit extérieur isolant R = 0,4	+	€€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€€€	+	€€€	+	€€€
Plus value isolation biosourcée en ITE	+	€€	+	€€	+	€€	+	€€€	+	€€	+	€€
Planchers bas												
Flochage planchers bas 10cm	-	€	-	€	-	€	Non isolé, sur TP		-	€	-	€
Toiture												
Isolation sous étanchéité toiture 12cm PU au lieu de 20			-	€	-	€			-	€	-	€
Isolation sous étanchéité toiture 20cm PU au lieu de isolation du plancher des combles	+	€€€€€										
Isolation sous étanchéité toiture 20cm PU au lieu du sarking (cas d'une morphologie de bâtiment différente)							-	€€€				
Protection lourde dalles sur plots à la place de gravillons			+	€€	+	€			+	€€	+	€
Végétalisation de la toiture			+	€€	+	€€			+	€€	+	€
Plus value réhausse acrotère béton plein			+	€	+	€			+	€	+	€
Plus value réhausse acrotère structure bois			+	€	+	€			+	€	+	€
Isolation plancher des combles		Base	-	€€€	-	€€€	-	€€€€€€	-	€€€	-	€€
Isolation entre chevrons et dessous	+	€€	-	€€€	-	€€	-	€€€€€€	-	€€€	-	€€
Sarking	+	€€€€€€	+	€	+	€	Base		+	€	+	€
Plus value isolant bio sourcé rampants	+	€	+	€	+	€	+	€	+	€	+	€
Menuiseries extérieures												
Triple vitrage Ug = 0,7	+	€€	+	€€	+	€	+	€	+	€	+	€
Triple vitrage passif Uw = 0,77	+	€€€	+	€€€	+	€€	+	€€	+	€€	+	€€
Menuiserie bois (type pin français, certifié PEFC)	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€
Menuiserie bois alu	+	€€€€	+	€€€€	+	€€€€	+	€€€	+	€€€€	+	€€€€
Brises soleils orientables	+	€	+	€	+	€	+	€	+	€	+	€
Volets roulants PVC	-	€	-	€	-	€	-	€	-	€	-	€
Volets roulants Alu	+	€	+	€	+	€	+	€	+	€	+	€
Ventilation												
VMC double flux à récupération de chaleur	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€
Ventilation naturelle assistée	-	€	-	€	-	€	-	€	-	€	-	€
VMC DF décentralisée par pièce	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€	+	€€€

Nous tirons certains enseignements de l'évaluation des coûts :

- Le coût du bouquet de base peut varier du simple au double voire plus suivant la typologie de bâtiment.

- On explique les disparités de coût du bouquet de base avant tout par les différences de compacité. Le coût est en effet plus ou moins proportionnel à la surface de parois à traiter. La rénovation d'un bâtiment peu compact sera donc bien plus onéreuse ramenée au m^2_{SHAB} .
- Les bâtiments compacts (souvent les grands bâtiments) ont ainsi un double avantage par rapport aux bâtiments plus petits ou à l'architecture plus découpée : le même bouquet de base permet d'atteindre une meilleure performance thermique tout en étant moins cher.
- La rentabilité des opérations de rénovation thermique est toutefois bien réelle pour l'ensemble des typologies. Même si la performance énergétique après rénovation d'un petit bâtiment est moins bonne que celle d'un grand, sa consommation initiale est également bien plus grande. Les économies générées par les travaux sont sensiblement les mêmes lorsqu'on les ramène à une surface d'enveloppe traitée, et donc à un € investit.
- Certaines caractéristiques du bâtiment type expliquent également des différences importantes dans les coûts. Par exemple, le petit 48-74 possède des combles non aménagés dont le plancher est isolé par de l'isolant en vrac. S'il avait eu une toiture terrasse, le coût du bouquet de base aurait été d'environ 80€ plus cher ramené au m^2_{SHAB} .
- On remarque que l'ITE et le changement des menuiseries sont presque toujours les 2 postes d'investissement les plus importants.
- Les variations de coût en faisant varier l'épaisseur d'isolant sont souvent assez faibles en dessous de 20 cm. Le coût matière pèse en effet assez peu dans le coût global d'une solution d'ITE : systèmes de fixation, treillis, enduit, échafaudage, main d'œuvre,...
- Le choix d'une isolation biosourcée ne représente pas un surcoût important.
- En regardant à la fois les économies de chauffage réalisées et les coûts, la rentabilité économique des menuiseries triple vitrage « passives » (c'est à dire avec cadres isolés) semble meilleure que les triples vitrages classiques.

Remarque : certains types de travaux sont beaucoup plus chers que d'autres pour arriver à la même performance, au niveau des toitures notamment. Nous jugeons essentiel de rappeler que les travaux chiffrés ici ne sont pas toujours exclusivement thermiques : le

chiffrage de l'isolation sous étanchéité en toiture terrasse comprend par exemple la dépose de l'étanchéité existante puis la pose d'une nouvelle étanchéité. A l'inverse, l'isolation en vrac des combles ne comprend rien d'autre que le soufflage de 30cm de ouate de cellulose. Il est donc très important de manipuler ces tableaux de coûts approximatifs avec précaution et de ne pas tirer de conclusions trop hâtives.

14 Table des illustrations

14.1 Photos

Photos 1 - Petit collectif 48-74	11
Photos 2 - Moyen 48-74.....	12
Photos 3 -Grand 48-74	14
Photos 4 - Petits 75-99	15
Photos 5 - Moyens 75-99.....	16
Photos 6 - Exemples de caractères remarquables (1)	68
Photos 7 - Traitement architectural possible : baie avec coudière, garde-corps et volet accordéon	69
Photos 8 - Traitement architectural possible : encadrements de baies et corniches	69
Photos 9- Exemple de traitement architectural d'encadrements de baies / rénovation du groupe scolaire du Grégoire à Dardilly (69)	70
Photos 10 - Traitement architectural possible : revêtement de façade minéral structuré.....	70
Photos 11 - Traitement architectural possible : encadrement de baie, garde-corps, joints creux	71

14.2 Tableaux

Tableau 1 - Proportions de bâtiments et de logements par typologie	10
Tableau 2 - Résultats STD petits collectifs 48-74.....	26
Tableau 3 - Résultats STD moyens collectifs 48-74.....	28
Tableau 4 - Résultats STD grands collectifs 48-74	30
Tableau 5 - Résultats STD petits collectifs 75-99.....	32
Tableau 6 - Résultats STD moyens collectifs 75-99.....	35
Tableau 7 - Résultats STD grands collectifs 75-99	37
Tableau 8 - Synthèse des calculs STD	39
Tableau 9 - Impact CO ₂ , énergie de chauffage	45

Tableau 10 - Impact CO ₂ des économies de chauffage électrique ou gaz avec l'augmentation de la résistance thermique de l'ITE (Cas du bâtiment de référence de la typologie moyens 48-74).....	46
Tableau 11 - Impact changement climatique, isolation extérieure (source : outil e-LICCO, basé sur Eco Bau et adapté au contexte français).....	46
Tableau 12 - Calcul des « temps de retour carbone » pour des augmentations d'épaisseur de PSE et de laine de roche haute densité posés en ITE, par rapport à une solution 12cm de PSE.....	47
Tableau 13 - Calcul des « temps de retour carbone » pour des augmentations d'épaisseur de PSE et de laine de roche haute densité posés en ITE.....	48
Tableau 14 - Bilans carbonés comparés (par rapport à la référence R = 3,3 en PSE) d'isolations extérieures en PSE, laine de roche et laine de bois en différentes épaisseurs - Exemple après 15 ans d'utilisation.....	50
Tableau 15 - Confort d'été dans les petits 48-74 (salon au dernier étage orienté sud).....	54
Tableau 16 - Confort d'été dans les moyens et grands 48-74 (salon au dernier étage orienté sud).....	54
Tableau 17 - Exemple d'organisation des travaux en 2 phases de coûts équivalents.....	75
Tableau 18 - Evolution de la teneur en eau totale de la paroi après 10 ans - WUFI Pro ..	85
Tableau 19 - Fourchettes de prix, signification des pictogrammes.....	96
Tableau 20 - Evaluation des coûts, Petits 48-74.....	98
Tableau 21 - Evaluation des coûts - Moyens 48-74.....	100
Tableau 22 - Evaluation des coûts - Grands 48-74.....	101
Tableau 23 - Evaluation des coûts - Petits 75-99.....	102
Tableau 24 - Evaluation des coûts - Moyens 75-99.....	103
Tableau 25 - Evaluation des coûts - Grands 75-99.....	104
Tableau 26 - Synthèse de l'évaluation des coûts de travaux.....	104

14.3 Figures

Figure 1 - Vue 3D du Petit collectif 48-74 modélisé sous Alcyone.....	12
Figure 2 - Collectif moyen 48-74 modélisé sous Alcyone.....	13
Figure 3 - Vue 3D du collectif moyen 48-74 modélisé sous Alcyone.....	14

Figure 4 - Petit collectif 75-99 modélisé sous Alcyone	15
Figure 5 -Collectif moyen 75-99 modélisé sous Alcyone.....	17
Figure 6 - Grands collectifs 75-99 modélisé sous Alcyone	18
Figure 7 - Impact CO ₂ global entre 0 et 30 ans d'utilisation de différentes solutions d'ITE sous enduit, chauffage électrique.....	51
Figure 8 - Pose menuiserie au nu intérieur (avec et sans changement des dormants).....	58
Figure 9 - Pose menuiserie au nu intérieur, cas d'une isolation intérieure et extérieure	58
Figure 10 - Pose des menuiseries : ITE, pose au nu extérieur (avec ou sans isolant intérieur existant).....	59
Figure 11 - Pose des menuiseries en applique intérieure, dans l'épaisseur de l'isolant	60
Figure 12 - Pose des menuiseries en applique extérieure, dans l'épaisseur de l'isolant	60
Figure 13 - Pose des coffres de protections solaires.....	61
Figure 14 - Isolation périmétrique enterrée	62
Figure 15 - ITE et isolation sous étanchéité de toit terrasse, acrotère isolée	63
Figure 16 - ITE et isolation sous étanchéité de toit terrasse, rehausse d'acrotère en structure bois	63
Figure 17 - Isolation des rampants - jonction avec l'ITE	64
Figure 18 - Isolation des rampants.....	64
Figure 19 - Fermeture loggias par mur rideau, création de jardins d'hiver.....	65
Figure 20 - Isolation d'un toit terrasse accessible par le logement en attique	67
Figure 21 - Mesure du C+D.....	72
Figure 22 - Règlementation incendie, familles de bâtiments de logements.....	73
Figure 23 - Types de pose de l'ITE avec mortier de collage continu sur les bords	74
Figure 24 - Glaser : ITI, pas de pare vapeur, PSE (hypothèses matériaux 1)	79
Figure 25 - Glaser : ITI, pas de pare vapeur, PSE (hypothèses matériaux 2)	80
Figure 26 - Glaser : ITI, pas de pare vapeur, laine de verre	80
Figure 27 - Glaser : ITI, pare vapeur Sd = 1500m, laine de verre.....	81
Figure 28 - Glaser : ITI, pare vapeur Sd = 10m, laine de verre.....	81
Figure 29 - Glaser : ITI + ITE réno, -10°C ext	82
Figure 30 - Glaser : ITI + ITE réno, -5°C ext	83
Figure 31 - Glaser, ITE	83

Figure 32 - Glaser, double mur béton à âme isolante.....	84
Figure 33 - Glaser, double mur béton à âme isolante, rénovation ITE.....	84
Figure 34 - Graphes d'évolution de la teneur en eau total de la paroi, isolation intérieure laine de verre, avec (droite) et sans (gauche) défaut d'étanchéité à l'air.....	86
Figure 35 - Graphes d'évolution de la teneur en eau total de la paroi, isolation intérieure laine de bois, avec (droite) et sans (gauche) défaut d'étanchéité à l'air.....	86
Figure 36 - Graphes d'évolution de la teneur en eau total de la paroi, isolation intérieure PSE, avec (droite) et sans (gauche) défaut d'étanchéité à l'air.....	87
Figure 37 - Schéma de principe d'une VMC double flux centralisée (source : Acqualys).....	92
Figure 38 - VMC DF sans conduit, extrait documentation Paul.....	94
Figure 39 - Principe de fonctionnement VMC DF sans conduits (source : étude Copro 2012 à Grenoble, Tekhnê Architectes).....	94
Figure 40 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITI - dalle.....	117
Figure 41 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITI enduit isolant ext - dalle.....	118
Figure 42 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - dalle.....	119
Figure 43 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITI - dalle balcon.....	119
Figure 44 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - acrotère non emballée.....	120
Figure 45 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - acrotère emballée.....	120
Figure 46 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - plancher des combles isolé par 30cm.....	121

15 Annexe 1 : Paramètres influant sur le besoin de chauffage calculé

Ci-dessous un résumé des différents paramètres qui influent sur le besoin de chauffage calculé :

- **Période de construction :**
 - 48-74
 - 75-99

- **Nombre d'étages**
 - R+2 et R+3
 - R+4 à R+6
 - R+7 et plus

- **Balcons.** De manière à éviter qu'un maître d'ouvrage soit obligé de calculer lui-même le coefficient %_B de son bâtiment, nous avons établi des ratios types ci-dessous :

Balcons	Ratio % _B
Balcons filants sur 1 façade principale	33%
Balcons filants sur 2 façades principales	67%
Quelques balcons décrochés sur façade principale (1/3 linéaire de façade)	11%
Quelques balcons encastrés sur façade principale (1/3 linéaire de façade)	17%
Nombreux balcons décrochés sur façade principale (2/3 linéaire de façade)	22%
Nombreux balcons encastrés sur façade principale (2/3 linéaire de façade)	33%
Balcons décrochés sur 2 façades ou + (1/3 linéaire de chaque façade)	29%
Balcons encastrés sur 2 façades ou + (1/3 linéaire de chaque façade)	43%
Nombreux balcons décrochés sur 2 façades ou + (2/3 linéaire de chaque façade)	38%
Nombreux balcons encastrés sur 2 façades ou + (2/3 linéaire de chaque façade)	56%

Remarque : les balcons encastrés sont des loggias extérieures, alors que les balcons décrochés sont des balcons en saillie.

- **Masques solaires**
 - Absence de masques significatifs (base)
 - Bâtiments de 20m distant de 20m sur les 4 côtés
 - Aucun apport solaire

- **Murs**
 - Isolation par l'extérieure R = 5,8 / 4,9 (base) / 4,4 / 3,8 / 3,3
 - Isolation par l'intérieur R = 2,7
 - Isolation par l'intérieur + enduit isolant extérieur 2cm pour correction des ponts thermiques de nez de dalle, R_{murs} = 3,1

- **Plancher bas :**
 - Sur terre-plein, plancher non isolé
 - Sous-sol ou VS accessible, isolé $R = 3,4 / 2,5$

- **Toiture :**
 - Isolation des toitures terrasses : $R = 8,5 / 5,3 /$
 - Isolation rampants : $R = 8,5 / 5,3$
 - Isolation planchers des combles : $R = 8,5$

- **Menuiseries :**
 - Base : double vitrage $U_g = 1,1 ; U_w = 1,4$
 - Triple vitrage $U_g = 0,7 ; U_w = 1,1$
 - Menuiserie passive $U_g = 0,7 ; U_w = 0,77$

- **Pose des menuiseries**
 - En base : pose au nu intérieur avec retour d'isolant en tableau
 - Pose au nu extérieur
 - Pose en applique extérieure

- **Compacité.** La compacité varie dans nos simulations en fonction du nombre d'étages, de la mitoyenneté, de la longueur des bâtiments, de la forme architecturale, de la fermeture ou non des loggias,...

- **Etanchéité à l'air**

- **Ventilation**

16 Annexe 2 : Description des parois modélisées et de leur performance

16.1 Murs

Rappel des valeurs de la réglementation thermique dans l'existant :

- RT éléments par éléments : $R = 2,3 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Gardes fous RT globale : $R = 2,2 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Référence RT globale : $R = 2,8 \text{ m}^2\text{K/W}$

Nous avons étudié l'impact des travaux suivants :

- En base, isolation par l'extérieure (ITE) 18cm de polystyrène expansé (PSE) $\lambda = 0,038 \text{ W/m/K}$ sous enduit : $R = 4,9 \text{ m}^2\text{K/W}$.
- ITE « performance » : 18cm PSE gris $\lambda = 0,032 \text{ W/m/K}$ sous enduit : $R = 5,8 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Sensibilité de l'épaisseur d'isolant extérieur (PSE blanc $\lambda = 0,038 \text{ W/m/K}$) en façade :
 - 16cm $R = 4,4$
 - 14cm $R = 3,8$
 - 12cm $R = 3,3$
- Isolation par l'intérieur (ITI) par 10cm d'isolant $\lambda = 0,039 \text{ W/m/K}$, soit $R = 2,7$
- ITI $R=2,7$ + enduit isolant projeté $R=0,4$ (type enduit chaux chanvre), $R = 3,1$ et diminution des ponts thermiques de nez de dalle (cf. annexe 3 ponts thermiques).

16.2 Toitures

Rappel des valeurs de la réglementation thermique dans l'existant :

Rth en $\text{m}^2\text{K/W}$			Toit terrasse	Rampants	Combles perdus
RT éléments	par	éléments	2,5	4	4,5
Gardes fous globale	RT	fous	2,95	3,6	3,6
Référence RT globale			3,7	5	5

Nous avons étudié l'impact des travaux suivants :

- En base, isolation des toits terrasses, rampants et combles perdus avec un $R = 8,5 \text{ m}^2\text{K/W}$. Cela correspond par exemple à des épaisseurs de 20cm de polyuréthane (PU) ou 35cm de ouate de cellulose.
- $R = 5 \text{ m}^2\text{K/W}$, soit par exemple 12cm de PU ou 12cm de polystyrène extrudé en toiture inversée sur un complexe existant isolé avec 5cm de polystyrène.
- Conservation de la toiture terrasse existante avec 5cm de polystyrène extrudé (XPS) sous étanchéité : $R = 2 \text{ m}^2\text{K/W}$.

16.3 Planchers

Rappel RT existant :

- Eléments par éléments : $R = 2 \text{ à } 2,3 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Garde fous RT globale : $R = 2,5 \text{ à } 2,8 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Référence RT globale : $R = 3,7 \text{ m}^2\text{K/W}$

Nous avons étudié l'impact des travaux suivants :

- En base, isolation des planchers bas sur sous-sol ou vide sanitaire par 15cm de flochage isolant ($\lambda = 0,046 \text{ W/m/K}$) : $R = 3,4 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Isolation des planchers bas par 10cm de flochage isolant : $R = 2,3 \text{ m}^2\text{K/W}$
- En base, pas d'isolation des planchers sur terre-plein

16.4 Fenêtres

Rappel RT existant :

- Eléments par éléments : $U = 2,3 \text{ à } 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Garde fous RT globale : $U = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Référence RT globale : $U = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Nous avons étudié l'impact des travaux suivants :

- En base, menuiseries double vitrage $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_f = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$, soit $U_w = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Soit par exemple une menuiserie bois avec double vitrage 4/16/4 basse émissivité remplissage Argon.
- Triple vitrage $U_g = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_f = 2, \text{ W/m}^2\text{K}$ soit $U_w = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Soit par exemple menuiserie bois triple vitrage 4/12/4/12/4 basse émissivité à remplissage Argon.
- Menuiseries passive (performance thermique accrue des parties pleines) : triple vitrage $U_g = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_w = 0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Nous avons également étudié différents types de poses de menuiseries dont l'impact thermique est décrit dans l'annexe 3 ponts thermiques.

17 Annexe 3 : Ponts thermiques ; valeurs tabulées et calculs spécifiques

Les valeurs retenues pour les ponts thermiques linéiques et de menuiseries sont issues des valeurs tabulées des méthodes réglementaires Th-B-C-E, Th-C-Ex, ainsi que de calculs spécifiques sous THERM 6.

17.1 Ponts thermiques de nez de dalles intermédiaires

17.1.1 Isolation par l'intérieur, pas de traitement du pont thermique

Nous sommes dans le cas classique d'une ITI avec une traversée de dalle de plancher.

Mur béton de 16cm,

Isolant de 10cm côté intérieur

Dalle béton intermédiaire de 16cm

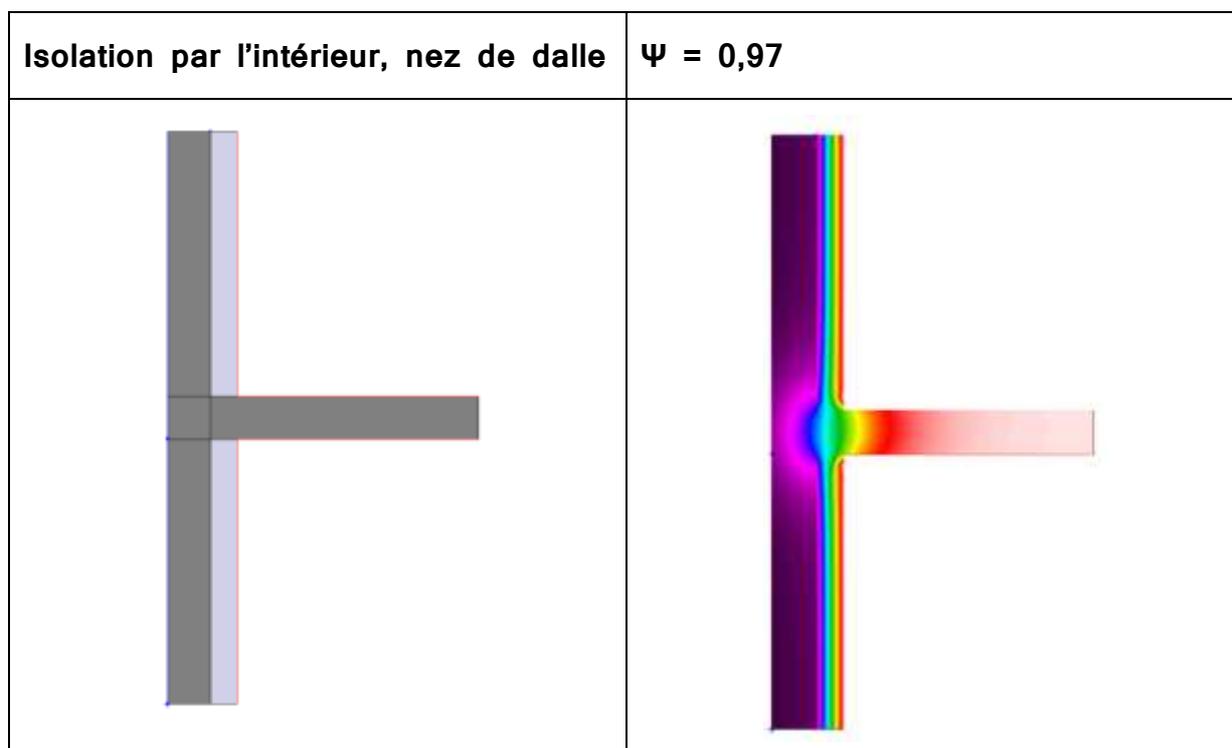


Figure 40 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITI - dalle

A noter que, dans le cas d'ITI, le pont thermique d'une dalle intermédiaire est sensiblement le même avec ou sans balcon.

17.1.2 Isolation par l'intérieur, correction thermique par 2cm d'enduit isolant extérieur

Mur béton de 16cm,

Isolant de 10cm côté intérieur

Dalle béton intermédiaire de 16cm

Enduit isolant extérieur continu 3cm

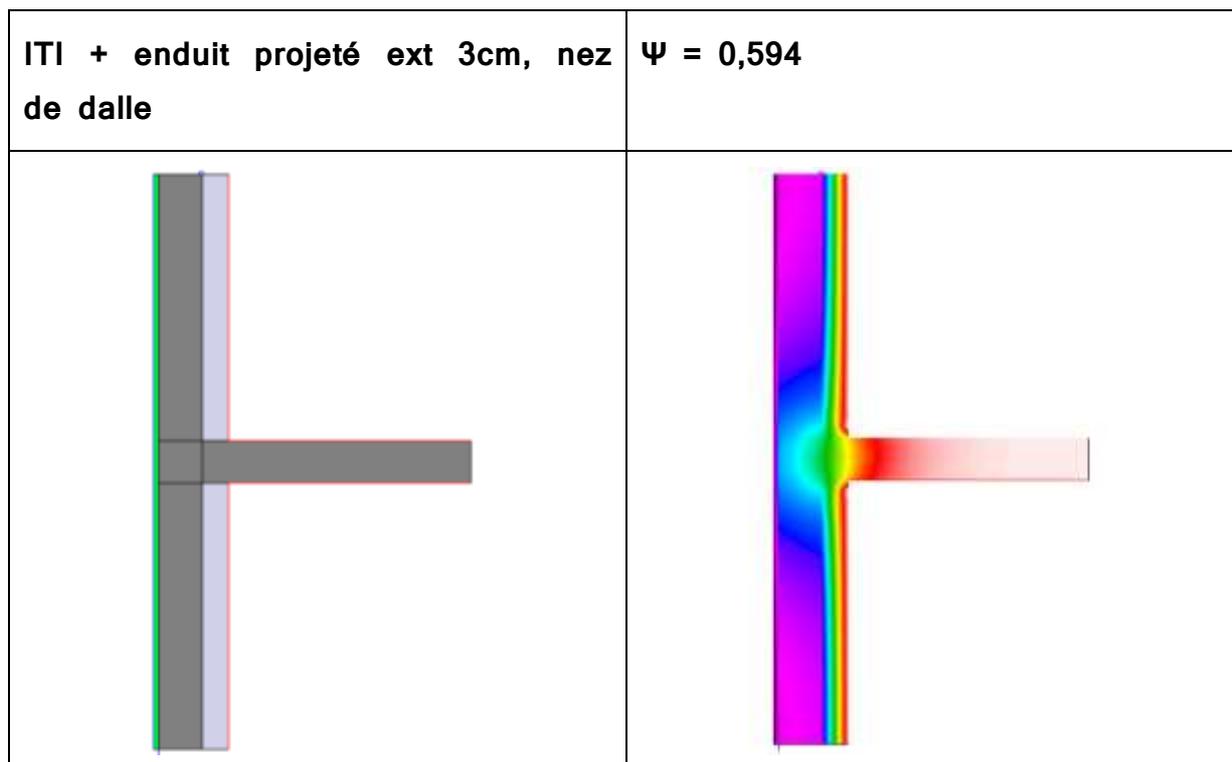


Figure 41 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITI enduit isolant ext - dalle

17.1.3 Isolation par l'extérieur

Mur béton de 16cm,

Isolant de 18cm côté intérieur

Dalle béton intermédiaire de 16cm

<p>ITE nez de dalle</p>	<p>$\Psi = 0,05$</p>
--------------------------------	--

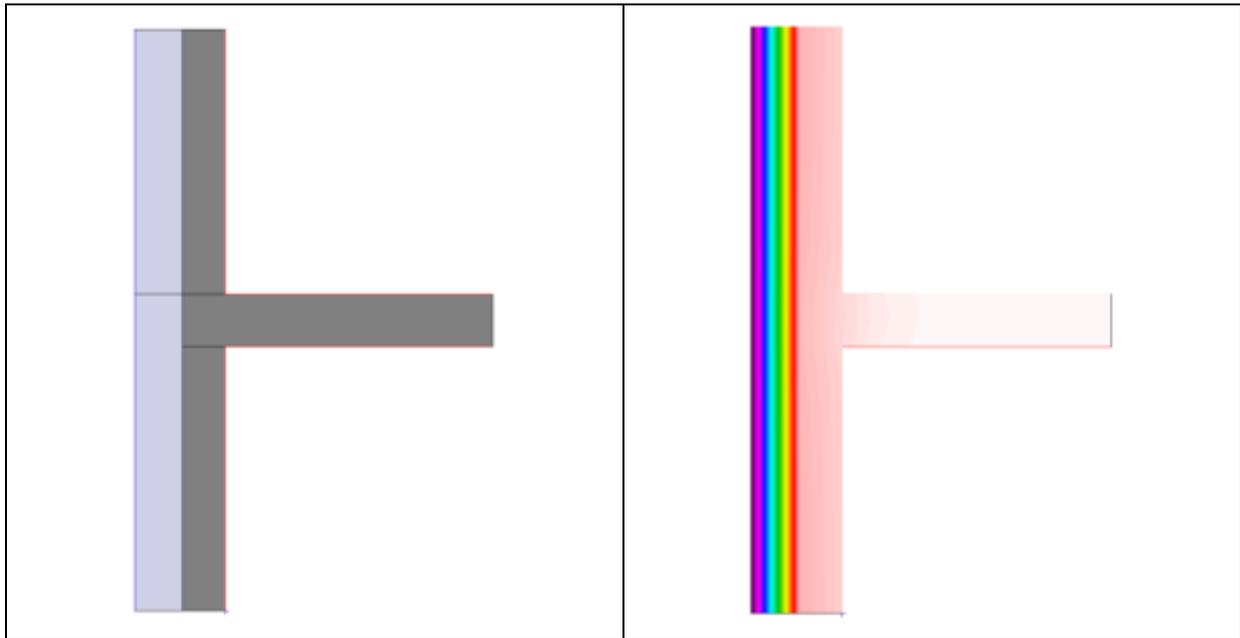


Figure 42 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - dalle

17.1.4 ITE balcons

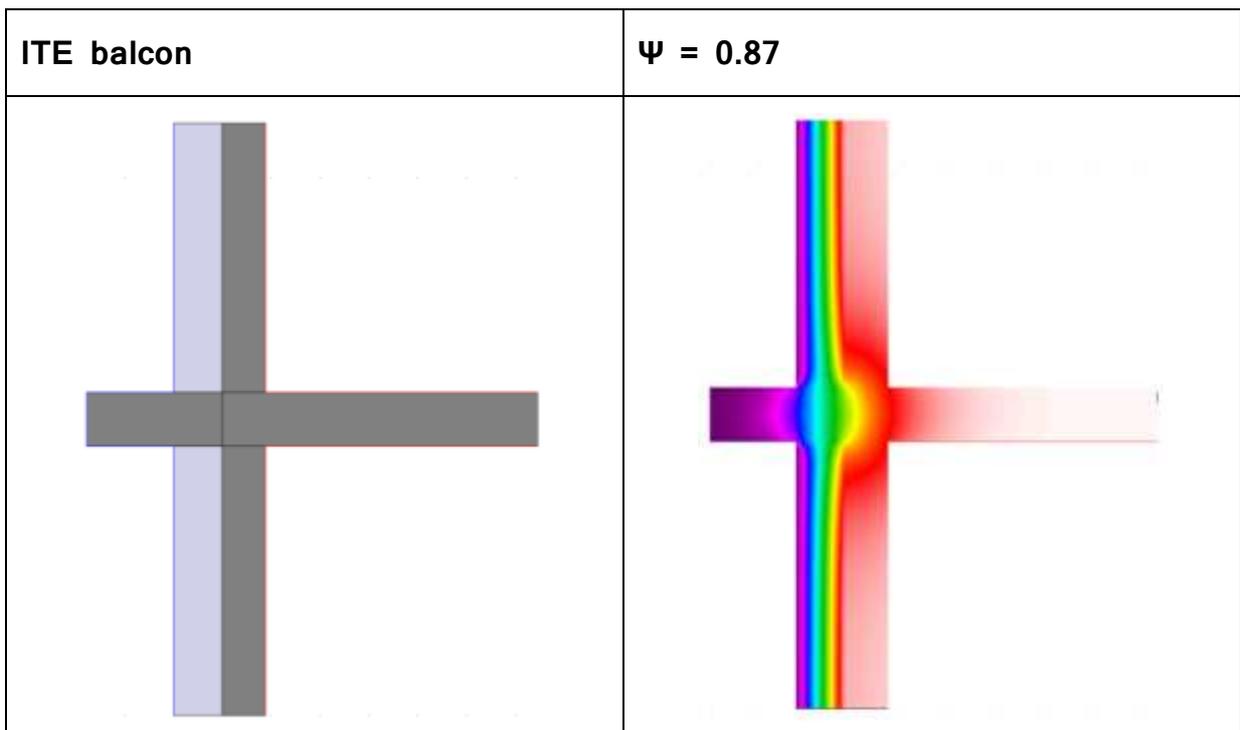


Figure 43 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITI - dalle balcon

17.2 Acrotères

17.2.1 Isolation par l'extérieur, acrotère non emballée

Mur béton de 16cm,

Isolant de 18cm côté intérieur

Dalle béton intermédiaire de 16cm

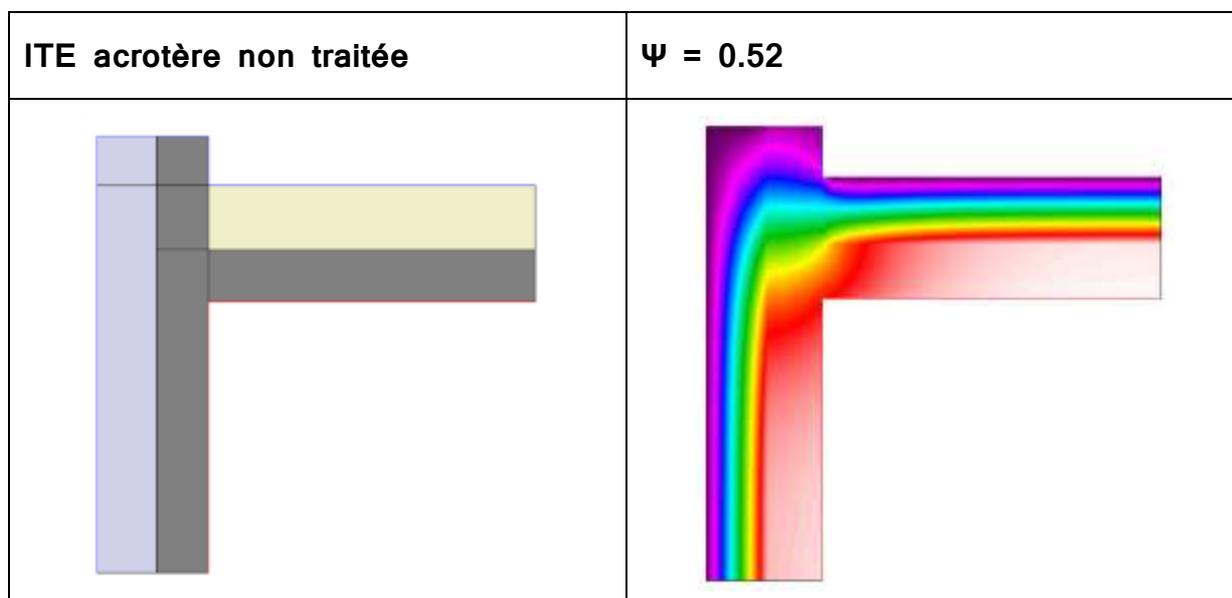


Figure 44 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - acrotère non emballée

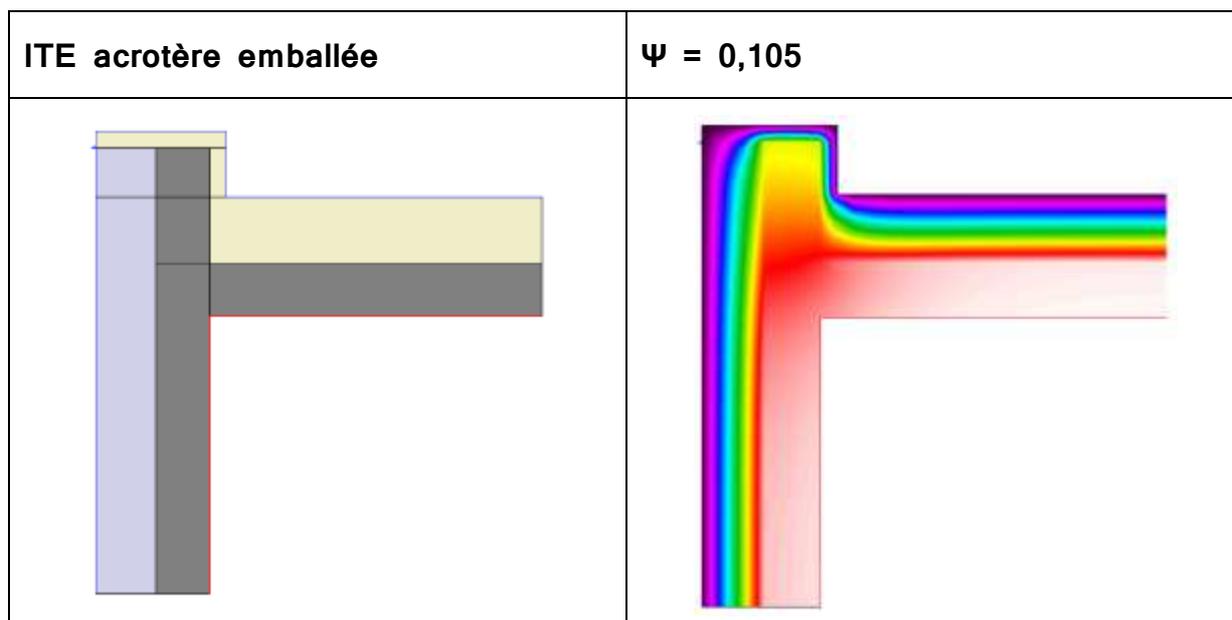


Figure 45 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - acrotère emballée

ITE - isolation 30cm plancher des combles	$\Psi = 0,39$
--	---------------------------------

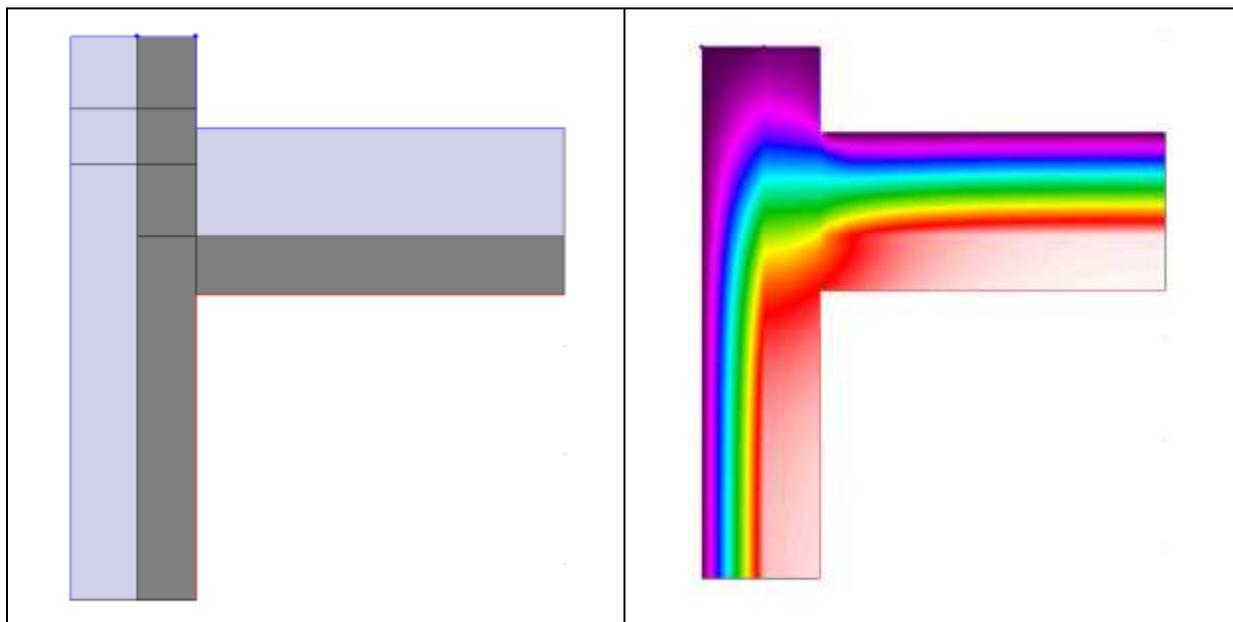


Figure 46 - Modélisation THERM 6 du pont thermique ITE - plancher des combles isolé par 30cm

17.3 Planchers bas

Les valeurs ci-dessous sont issues des tables Th-B-C-E

Isolation en sous face de dalle, ITE isolée en pied de façade sur 50cm : $\psi = 0,35 \text{ W/m/K}$

Isolation en sous face de dalle, ITI : $\psi = 0,63 \text{ W/m/K}$

Plancher non isolé sur terre-plein, ITE isolé pied façade sur 50cm, $\psi = 0,2 \text{ W/m/K}$

17.4 Pose des menuiseries

Les valeurs ci-dessous sont issues des tables Th-B-C-E

ITE, menuiserie au nu intérieur, pas de retours en tableaux : $\psi = 0,9 \text{ W/m/K}$

ITE, menuiserie au nu intérieur, retours d'isolant 4cm en tableaux : $\psi = 0,1 \text{ W/m/K}$ tableau et linteau, $\psi = 0,12 \text{ W/m/K}$ appui.

ITE, menuiserie au nu extérieur : $\psi = 0,37$ appui, $\psi = 0,04$ pour les 3 autres côtés

ITE, menuiserie en applique extérieur dans l'épaisseur d'isolant : $\psi = 0$

ITI, menuiserie au droit intérieur : $\psi = 0,2$ appui, $\psi = 0,1$ autres côtés

18 Annexe 4 : Justification théorique de la relation entre variation du besoin de chauffage et indice de compacité

Nous proposons ci-dessous une justification plus complète, avec une approche annuelle (mais toutefois toujours statique, c'est-à-dire que l'on considère dans nos formules une température de consigne constante et une inertie très faible). La conclusion que nous en tirons reste vraie pour une approche dynamique :

A chaque instant t , (dans une simulation thermique dynamique pour chaque pas de temps du calcul) :

$$Bch(t) = \frac{Q_{\text{parois}}(t) + Q_{\text{ventil}}(t) - Q_{\text{solaire}}(t) - Q_{\text{interne}}(t)}{\text{Surface habitable}} \quad (1)$$

tant que $Q_{\text{parois}}(t) + Q_{\text{ventil}}(t) - Q_{\text{solaire}}(t) - Q_{\text{interne}}(t) > 0$, c'est-à-dire tant que les apports gratuits ne suffisent pas à compenser les pertes par conduction et pertes par renouvellement d'air.

Et $Bch(t) = 0$ dès que $Q_{\text{parois}}(t) + Q_{\text{ventil}}(t) - Q_{\text{solaire}}(t) - Q_{\text{interne}}(t) < 0$ (apports gratuits suffisent).

Or, le besoin de chauffage annuel est égal à :

$$Bch \text{ annuel} = \int_{t=1er \text{ janvier } 0h00}^{t=31 \text{ décembre } 23h59} Bch(t) \quad (2)$$

$$Bch \text{ annuel} = \int_{\text{Temps où le chauffage est en marche}} \frac{Q_{\text{parois}}(t) + Q_{\text{ventil}}(t) - Q_{\text{solaire}}(t) - Q_{\text{interne}}(t)}{\text{Surface habitable}} \quad (3)$$

Ainsi, lorsque l'on résume en une formule le besoin de chauffage annuel à :

$$Bch = \frac{U_{moy} \times S_{parois} + Q_{ventil} - Q_{solaire} - Q_{interne}}{\text{Surface habitable}} \quad (4)$$

$$Bch = U_{moy} \times Ic + \frac{Q_{ventil} - Q_{solaire} - Q_{interne}}{\text{Surface habitable}} \quad (5)$$

Il est sous-entendu que Q_{ventil} , $Q_{solaire}$, Q_{parois} , $Q_{interne}$ sont des sommes sur les périodes de chauffe de $Q_{ventil}(t)$, $Q_{solaire}(t)$, $Q_{parois}(t)$ et $Q_{interne}(t)$, et non pas des sommes sur toute l'année de ces valeurs.

Prenons un exemple évident pour illustrer ce propos : les apports solaires en été ne contribuent pas à la réduction du besoin de chauffage.

Ainsi, les apports solaires et internes ainsi que les pertes par conduction et renouvellement d'air **en dehors des heures où un apport artificiel de chauffage est nécessaire** n'apparaissent pas dans la formule simplifiée du besoin de chauffage annuel : formules (4) et (5).

Lorsque le besoin de chauffage varie, la période de chauffe varie elle aussi très souvent.

Toutefois, lorsque le besoin de chauffage ne varie que très peu, comme c'est le cas lorsqu'on ne fait varier que la compacité dans les exemples de notre étude, les moments de l'année où le chauffage est allumé sont pratiquement les mêmes si bien que la simplification ci-dessus est tout à fait justifiée. .

Nous approximons ainsi une relation entre variation du besoin de chauffage et variation de l'indice de compacité :

$$\Delta Bch = U_{moy} \times \Delta Ic$$

Etude réalisée par :



43 rue des Hérideaux 69008 LYON
tél : 04 78 74 41 58 ● fax : 09 81 40 23 81
courriel : eegenie@eegenie.com ● www.eegenie.com



SARL au capital de 30 000 € - Siret 532 482 254 00010 - APE 7112B - Siren 532 482 254 RCS Lyon