



Étude de la performance énergétique d'une maison individuelle

**Bilan énergétique & financier ; propositions
d'isolation & retour sur investissement**

CHASSAGNE Rébecca, MACREZ Samuel, POULIQUEN Corentin

Mai 2011

1 Sommaire

2	Introduction à l'étude énergétique d'un bâtiment	4
2.1	Objectifs de l'étude	4
2.2	Démarche adoptée pour l'étude	4
2.3	Remarque générale	5
3	Étude thermique et énergétique d'un bâtiment – approche théorique.....	6
3.1	Caractérisation thermique d'un matériau.....	6
3.2	Dépensements énergétiques par conduction	6
3.3	Dépensement thermique surfacique moyenne d'un bâtiment.....	7
3.4	Dépensement thermique par renouvellement d'air	7
3.5	Coefficient de dépensement thermique global.....	7
3.6	Pertes thermiques	7
3.7	Apports solaires sur un bâtiment	8
3.8	Calcul des gains internes	8
3.9	Gains thermiques totaux et ratio gains/pertes	8
3.10	Température intérieure sans chauffage.....	8
3.11	Autres grandeurs utiles	9
3.12	Besoins énergétiques en chauffage	9
4	Analyse des caractéristiques du bâtiment étudié	10
4.1	Analyse & calculs	10
4.2	Observations.....	11
5	Bilan énergétique global du bâtiment existant.....	12
5.1	Pertes thermiques par conduction et par renouvellement d'air	12
5.2	Dépensements thermiques mensuelles et annuelles.....	12
5.2.1	Démarche	12
5.2.2	Résultats du point de vue énergétique	13
5.2.3	Résultats du point de vue financier.....	13

6	Solutions d'isolation – Propositions, analyses et critiques	14
6.1	Proposition d'isolation 1	14
6.1.1	Matériaux & performances associées	14
6.1.2	Nouvelles performances thermiques globales & coûts associés	15
6.2	Proposition d'isolation 2	16
6.2.1	Matériaux & performances associées	16
6.2.2	Nouvelles performances thermiques globales & coûts associés	17
6.3	Proposition d'isolation 3	18
6.3.1	Matériaux & performances associées	18
6.3.2	Nouvelles performances thermiques globales & coûts associés	19
7	Bilan global comparatif.....	21
7.1	Tableau synthétique.....	21
7.2	Analyse coût d'investissement / économie énergétique et financière.....	22
7.3	Coût annuel de chauffage	22
7.4	Etude du retour sur investissement	23
8	Conclusion	25
9	Annexes	26

2 Introduction à l'étude énergétique d'un bâtiment

2.1 Objectifs de l'étude

Le document qui suit porte sur l'étude thermique et énergétique d'un bâtiment donné (construit), dont les installations d'isolation sont quasiment inexistantes. Notre étude répond alors aux principes généraux suivants :

- L'évaluation de la consommation énergétique du bâtiment et du coût de chauffage nécessaire, selon l'isolation et l'énergie utilisée,
- La recherche de la diminution de la consommation énergétique du bâtiment, en réponse aux objectifs thermiques définis par le Grenelle de l'environnement et les réglementations thermiques,
- La caractérisation précise des performances énergétiques du bâtiment donné,
- La mise aux normes du bâtiment concernant les nouvelles réglementations thermiques (RT 2005 et RT 2012),
- L'élaboration de solutions d'isolation les plus adaptées possible au regard des critères thermiques, réglementaires et économiques.

Il est à noter que le document ici porte uniquement sur une étude thermique dans l'objectif de proposer des solutions pour isoler le bâtiment en réponse aux contraintes hivernales : on s'intéresse donc ici uniquement à l'isolation et au chauffage. Les questions de ventilation et de climatisation ne sont pas abordées.

2.2 Démarche adoptée pour l'étude

Le travail ici réalisé se décompose en plusieurs étapes :

- Dans un premier temps :
 - L'analyse de la structure, de la disposition, des matériaux et de l'ensemble des données du bâtiment étudié,
 - Le calcul des grandeurs caractérisant le comportement thermique du bâtiment,
 - L'évaluation de la performance énergétique du bâtiment et le coût de chauffage associé,
- Puis dans un second temps :
 - L'étude de la mise aux normes du bâtiment vis-à-vis de la réglementation thermique de 2005 puis celle de 2012,
 - La proposition de trois solutions d'isolation adaptées au bâtiment étudié,
 - Le calcul des coûts de mise en place de chaque type d'isolation,
 - L'évaluation de la performance énergétique du bâtiment pour chaque solution d'isolation choisie,
 - L'étude du temps de retour brut (rentabilité des différentes solutions d'isolation)

- Enfin, nous fournissons en conclusion un bilan des installations existantes, ainsi qu'une synthèse critique sur les enjeux thermiques, réglementaires et économiques des différentes solutions d'isolation proposées précédemment.

2.3 Remarque générale

Pour faciliter la lecture du document, seuls les résultats principaux sont présentés dans le corps du texte. Pour voir l'ensemble des résultats et calculs effectués, il faut se reporter aux annexes à la fin du présent document.

3 Étude thermique et énergétique d'un bâtiment – approche théorique

Un certain nombre de grandeurs permettent de caractériser les comportements thermiques et énergétiques des matériaux et donc des bâtiments. Nous en présentons les principales ici.

3.1 Caractérisation thermique d'un matériau

Chaque matériau se caractérise par la grandeur λ , appelée « conductivité thermique », exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Elle représente la facilité d'un matériau à transférer la chaleur (flux thermique).

On peut alors définir la seconde grandeur U, appelée « coefficient de déperdition surfacique », exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$, qui se calcule comme suit :

$$U(\text{paroi}) = 1/(R_{si} + R_{se} + \sum \frac{e}{\lambda})$$

Où :

- R_{si} et R_{se} sont les résistances superficielles intérieure et extérieure (correspondant aux échanges convectifs entre surface du matériau et fluide en contact),
- e est l'épaisseur en m du matériau constituant la paroi.

3.2 Déperditions énergétiques par conduction

A partir du coefficient U, on peut calculer la déperdition énergétique totale par conduction H_t à travers une paroi :

$$H_t (\text{surface donnée}) = U_{\text{surface}} \times S_{\text{surface}}$$

Dans l'étude de plusieurs surfaces déperditives (cas de l'étude d'un bâtiment), le calcul de la déperdition énergétique totale doit se faire de la façon suivante :

$$H_t (\text{total}) = (\sum_i U_i \times S_i \times b_i) \times (1 + 0,1)$$

Où :

- Les facteurs b_i sont des coefficients modificateurs dont la valeur caractérise la présence d'un vide sanitaire ou d'un local non chauffé du côté extérieur de la paroi.
- Le coefficient 0,1 (représentant 10% de la déperdition énergétique par conduction à travers les parois) caractérise les pertes thermiques par ponts thermiques.

3.3 Déperdition thermique surfacique moyenne d'un bâtiment

On caractérise la grandeur $U_{bat, projet}$ de la façon suivante :

$$U_{bat\ projet} = \frac{Ht\ (total)}{\sum_i S_i}$$

En plus de cette grandeur, on utilise une deuxième grandeur similaire : $U_{bat\ réf}$, qui correspond à la déperdition thermique surfacique moyenne de référence pour un bâtiment, calculée par la méthode de calcul Th-C-E, comme définit dans *l'Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*.

3.4 Déperdition thermique par renouvellement d'air

La grandeur Hv (W/K) est le coefficient de déperdition thermique par renouvellement d'air. Cela caractérise la quantité d'énergie perdue du fait du renouvellement de l'air intérieur du bâtiment par les différents systèmes de ventilation :

$$Hv = q \times v_{en} \times \rho_{air} \times c_{air}$$

3.5 Coefficient de déperdition thermique global

H (W/K) est le coefficient de déperdition thermique global : $H = Ht + Hv$

La grandeur H caractérise la puissance totale des pertes thermiques du bâtiment, par degré de température de différence entre l'intérieur et l'extérieur.

3.6 Pertes thermiques

Les pertes thermiques Q_l (kWh/mois) à travers les parois déperditives du bâtiment, pour une température intérieure de consigne $T_{intérieure}$ (température intérieure que l'habitant souhaite avoir chez lui en période de chauffage), se calculent comme suit :

$$Q_l = H \times (T_{intérieure} - T_{extérieure}) \times 24 \times \frac{(\text{nombre de jours par mois})}{1000}$$

Où $T_{extérieure}$ est la température moyenne mensuelle extérieure fonction de la zone climatique considérée (cf. annexe).

3.7 Apports solaires sur un bâtiment

L'évaluation des apports énergétiques solaires sur un bâtiment se fait connaissant :

- Les valeurs des surfaces des différentes parois vitrées éclairées par le soleil (parois horizontales, paroi verticales donnant au Sud, à l'Est, à l'Ouest et au Nord).
- La surface équivalente d'ouverture pour chaque orientation, obtenue avec le calcul suivant :

$$A_s = \sum_i A_i \times S_i \times F_i$$

Où :

- o A est la surface de vitrage pour cette orientation
 - o S est le facteur solaire (0,51 ici)
 - o F est le facteur d'ombrage (1 ici)
- Les données climatiques I_s liées à la zone climatique où se situe le bâtiment (cf. annexe à la fin de ce document).

Connaissance cela, le calcul des gains solaires Q_s (kWh/mois) se fait selon la formule suivante :

$$Q_s = (I_{s_{horizontale}} \times A_{s_{horizontale}} + I_{s_{nord}} \times A_{s_{nord}} + I_{s_{sud}} \times A_{s_{sud}} + I_{s_{est}} \times A_{s_{est}} + I_{s_{ouest}} \times A_{s_{ouest}}) \times 24 \times \text{"nombre de jours du mois"} / 1000$$

3.8 Calcul des gains internes

Les gains énergétiques internes Q_i (kWh/mois), liés à l'utilisation du bâtiment par ses habitants, se calcule comme suit :

$$Q_i = 4 \times A_{batiment} \times 24 \times \frac{\text{nombre de jours du mois}}{1000}$$

3.9 Gains thermiques totaux et ratio gains/pertes

Les gains thermiques totaux Q_g sont : $Q_g = Q_i + Q_s$ et le ratio gains / pertes est : $\gamma = \frac{Q_g}{Q_l}$

3.10 Température intérieure sans chauffage

La température intérieure du bâtiment lorsqu'il n'y a pas de chauffage se calcule comme suit :

$$T_{int,sans\ chauffage} = T_{ext} + \frac{Q_g}{H} \times \frac{1000}{24 \times \text{nombre de jours du mois}}$$

3.11 Autres grandeurs utiles

Le facteur d'utilisation (facteur permettant de tenir compte du comportement du bâtiment) se définit comme suit :

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}}$$

L'inertie moyenne du bâtiment vaut : $Cm = \frac{165}{3.6} \times Abat$

La constante de temps associée : $\tau = \frac{Cm}{H}$

Le paramètre saisonnier : $a = 1 + \frac{\tau}{16}$

3.12 Besoins énergétiques en chauffage

Les besoins énergétiques en chauffage Q_h (Wh/mois) se calculent d'après la formule :

$$Q_h = (Q_l - \eta \times Q_g) \times \frac{\text{nombre de jours avec chauffage dans le mois}}{\text{nombre de jours du mois}}$$

4 Analyse des caractéristiques du bâtiment étudié

4.1 Analyse & calculs

Le bâtiment étudié est un logement d'habitation, de type « maison de plain-pied », dont la construction date de quelques décennies. Il est situé à Vaulx-en-Velin, à proximité de Lyon, situé en zone climatique H1.

La construction est de type béton, avec toiture plate en dalle béton (sans combles), sol en dalle béton avec vide sanitaire en dessous.

Pour chaque partie du bâtiment actuel, le tableau suivant présente :

- Les matériaux utilisés et leurs caractéristiques propres,
- Les déperditions surfaciques engendrées par chaque surface,
- La part de chaque surface pour la déperdition énergétique totale.

Maison existante	Murs intérieur/extérieur		Murs intérieur/garage	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
Matériau de construction existant	Béton	∅	béton	∅
Lambda matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	1,15	*	1,15	*
Epaisseur (mm)	300	*	300	*
Surface (m^2)	136		17,3	
Déperdition surfacique U ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)	2,321		1,92	
Norme à atteindre U _{max}	0,45		0,5	
Pertes par transmission au travers des parois Ht ($W.K^{-1}$) (hors ponts thermiques)	315,7		16,6	
Contribution à la perte énergétique totale (%) (hors ponts thermiques)	35,1		1,8	

Fenêtres	Porte	Sol		Toiture	
		Construction	Isolation	Construction	Isolation
Simple vitrage	Porte simple	Béton	∅	Béton	Polyuréthane
1,15	*	1,15	*	1,15	0,04
5	*	150	*	300	50
59	3,6	181,6		181,6	
4,665	3,5	2,127		0,621	
2,6	*	0,4		0,28	
247,7	12,6	193,19		112,75	
27,6	1,4	21,5		12,5	

Figure 4.1 : Tableau des données du bâti

Par ailleurs, voici les caractéristiques globales du bâtiment étudié :

Surface totale au sol (m ²)	212,4
Surface totale habitable (m ²)	181,6
Hauteur plafond (m)	2,6
Volume total chauffé (m ³)	472,1
Surface totale déperditive (m ²)	578,90
Coefficient de forme du bâtiment (= rapport Surface déperditive/Volume à chauffer)	1,23

Figure 4.2 : Tableau des caractéristiques globales du bâtiment

4.2 Observations

La première observation est très simple : *l'isolation du bâtiment est quasiment inexistante*, étant donné que le béton à lui seul possède une très mauvaise résistance thermique. Par conséquent, dans les calculs qui suivent (bilan énergétiques de la maison), les déperditions énergétiques seront très importantes.

On constate ensuite que la déperdition énergétique générale (hors ponts thermiques) est principalement due aux pertes thermiques par les murs, les fenêtres et le sol (cases rouges et jaunes). Par conséquent, on cherchera par la suite à isoler en priorité ces trois éléments : murs, fenêtres et sol.

On observe par ailleurs que le coefficient de forme du bâtiment est élevé (>1), ce qui implique que les déperditions énergétiques seront importantes car la forme même du bâtiment y est propice : importante surface déperditive par rapport au volume total à chauffer.

5 Bilan énergétique global du bâtiment existant

Le calcul des différentes grandeurs présentées au chapitre 2 conduit aux résultats présentés dans les tableaux et graphiques qui suivent. Ceux-ci caractérisent le comportement thermique et énergétique global du bâtiment.

Pour les calculs détaillés, se reporter aux annexes A, B et C, p27 à p29.

5.1 Pertes thermiques par conduction et par renouvellement d'air

$U_{\text{bat (projet)}} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}\text{)}$	1,75
$U_{\text{bat (réf)}} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}\text{)}$	0,59

Pertes par transmission au travers des parois Ht (W.K⁻¹) (ponts thermiques compris)	1013,1
Pertes par renouvellement d'air Hv (W.K⁻¹)	80,25
Puissance de pertes totales H=Ht+Hv (W.K⁻¹)	1093,3

Figure 5.1 : Tableau des caractéristiques thermiques du bâtiment

5.2 Déperditions thermiques mensuelles et annuelles

5.2.1 Démarche

Pour effectuer les calculs des *pertes* thermiques nous avons pris en compte les éléments suivants :

- la température intérieure de consigne (température minimale intérieure que l'habitant souhaite avoir chez lui) est égale à 18 °C,
- le bâtiment est situé à proximité de Lyon, dans la zone climatique H1 (ce qui implique des températures moyennes extérieures spécifiques).

Pour effectuer les calculs des *gains* thermiques nous avons pris en compte les éléments suivants :

- les apports solaires spécifiques aux orientations des différentes parois du bâtiment, et à la zone climatique H1,
- les gains internes liés à l'utilisation et la présence d'habitants dans le bâtiment.

Ceci conduit tout d'abord à nous donner la période de chauffage : celle-ci s'étend de la période du 24 septembre au 20 mai, soit un total de 238 jours avec chauffage. (cf. annexe)

5.2.2 Résultats du point de vue énergétique

Les résultats du comportement thermique global du bâtiment sont présentés dans le graphique et le tableau qui suivent :

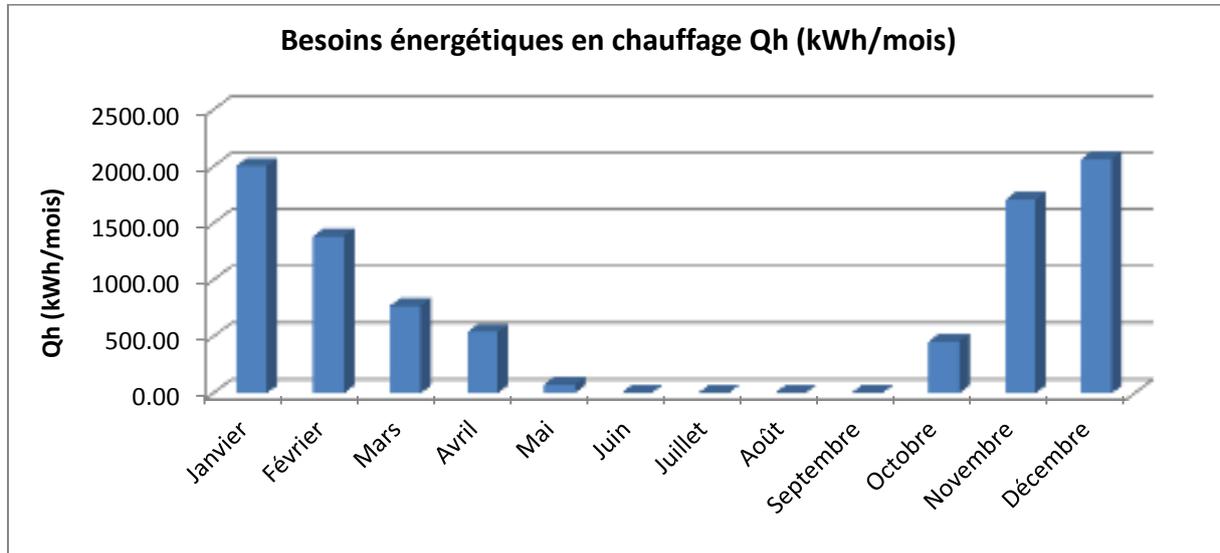


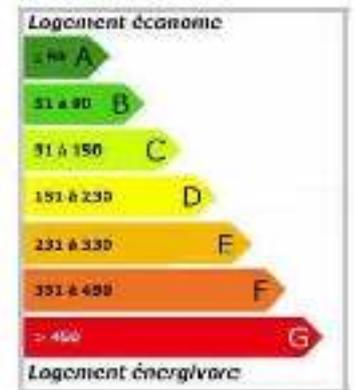
Figure 5.2 : Graphe des consommations mensuelles en chauffage du bâtiment

Total des besoins énergétiques en chauffage Qh (kWh/an)	53639,0
Besoins énergétiques en chauffage Qh_{surf} (kWh/m²/an)	295,4
Classification énergétique du Bâtiment	E

Figure 5.3 : Tableau des caractéristiques énergétiques du bâtiment

On constate donc immédiatement le très mauvais « résultat » de ce bâtiment en terme de performance thermiques : il n'est pas assez isolé, ce qui le place dans la catégorie E de la classification énergétique (sans même avoir compté l'énergie pour l'eau chaude sanitaire).

Du point de vue « gaspillage énergétique », ce bâtiment est un très bon exemple. Il est donc nécessaire de l'isoler pour faire diminuer drastiquement ses déperditions thermiques



Classification énergétique du bâtiment selon la valeur des besoins surfaciques en chauffage Qh (surf) :

5.2.3 Résultats du point de vue financier

Selon le type d'installation (électrique, fioul ou gaz), le coût nécessaire pour le chauffage varie. Le tableau suivant synthétise les différents coûts pour le chauffage :

	Electrique	Fioul	Gaz
Coût annuel du chauffage (€)	6 470,56	5 774,08	4 240,64
Coût surfacique annuel du chauffage (€/m²)	35,64	31,80	23,36

Figure 5.4 : Tableau des coûts de chauffage du bâtiment

6 Solutions d'isolation – Propositions, analyses et critiques

Nous proposons dans ce chapitre trois solutions d'isolation différentes, qui constituent la mise aux normes énergétique de la maison. Pour chaque solution seront présentés les matériaux utilisés, les nouvelles caractéristiques de chaque paroi, puis les déperditions totales et les besoins en chauffage, ainsi que tous les coûts monétaires relatifs à l'installation de chaque solution et aux nouveaux besoins de chauffage.

L'isolation est effectuée par l'extérieur pour diminuer les pertes par pont thermique et pour donner plus d'inertie thermique au bâtiment. Le vide sanitaire est également utilisé pour installer de l'isolation.

6.1 Proposition d'isolation 1

6.1.1 Matériaux & performances associées

La première solution d'isolation privilégie l'aspect économique : en effet, la laine de verre possède un très bon rapport qualité/prix. Pour les fenêtres, on utilise un double vitrage VIR (vitrage à isolation renforcée), c'est-à-dire un double vitrage à faible émissivité, qui lui aussi possède un très bon rapport qualité/prix. Cette solution permet de faire considérablement baisser U_{bat} , tout en dépensant un coût raisonnable (étant donné le très faible niveau d'isolation du bâtiment existant) de 17288.39 €. Avec cette solution, les U_{max} de la RT 2005 sont respectés, et la dépense en chauffage passe en dessous des 50 kWh.m⁻¹.an⁻¹, ce qui met la maison aux normes de la RT 2012.

Pour les calculs détaillés, se reporter à l'annexe D, p31.

Solution d'isolation 1 (Bonne Isolation)	Murs intérieur/extérieur		Murs intérieur/garage	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
<i>Matériau de construction existant</i>	Béton	∅	Béton	∅
Matériau de construction (isolant) à installer	Inchangé	laine de verre	Inchangé	laine de verre
Lambda matériau (W.m⁻¹.K⁻¹)	Inchangé	0,04	Inchangé	0,04
Energie grise (kWh/m³)	*	242 à 1 344	*	242 à 1 344
Epaisseur (mm)	Inchangé	100	Inchangé	100
Prix Matériau (€/m²)	*	3,1	*	3,1
Coût total Matériau (€)	*	680	*	53,63
crédit d'impôts en pourcentage	*	25	*	25
prix après déduction du crédit d'impôts	*	510	*	40
Surface (m²)	136		17,3	
Ancienne Déperdition surfacique U (W.m⁻².°C⁻¹)	2,321		1,92	
Déperdition surfacique U_{max} (W.m⁻².°C⁻¹) à ne pas dépasser	0,45		0,5	
Nouvelle Déperdition surfacique U (W.m⁻².°C⁻¹)	0,273		0,33	
Pertes par transmission au travers des parois Ht (W.K⁻¹) (hors ponts thermiques)	37,13		2,85	
Contribution à la perte énergétique totale (%) (hors ponts thermiques)	17		1,3	

Fenêtres	Sol		Toiture	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
Simple vitrage	Béton	∅	Béton	Polyuréthane
Double vitrage VIR	Inchangé	laine de verre	Inchangé	laine de verre
0,04	Inchangé	0,04	Inchangé	0,04
		242 à 1 344	*	242 à 1 344
20	Inchangé	100	Inchangé	100
165	*	3,1	*	3,1
9735	*	5084,8	*	908
15	*	25	*	25
7301,25	*	3816,6	*	681
59		181,6		181,6
4,665		2,127		0,621
2,6		0,4		0,28
1,5		0,348		0,205
88,50		31,60		37,23
40,8		14,6		17,2

On remarque que les fenêtres restent le plus gros vecteur de déperdition de chaleur ; pour les autres solutions d'isolation on se concentrera désormais sur celles-ci.

6.1.2 Nouvelles performances thermiques globales & coûts associés

Voici le nouveau comportement thermique et les coûts de chauffage, suite à l'isolation 1 :

$U_{\text{bat (projet)}}_1$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,38
$U_{\text{bat (réf)}}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,59

Pertes par transmission au travers des parois Ht ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$) (ponts thermiques compris)	220,0
Pertes par renouvellement d'air Hv ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)	80,25
Puissance de pertes totales $H=H_t+H_v$ ($\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$)	300,2

Total des besoins énergétiques en chauffage Qh (kWh/an)	9021,5
Besoins énergétiques en chauffage Qh _{surf} ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$)	49,7
Classification énergétique du Bâtiment	A-B



Classification énergétique du bâtiment selon la valeur des besoins surfaciques en chauffage Qh [surf].

	Electrique	Fioul	Gaz
Coût annuel du chauffage (€)	1 088,28	971,14	713,23
Coût surfacique annuel du chauffage (€/m ²)	5,99	5,35	3,93

On constate immédiatement que la consommation et le coût annuel de chauffage a été grandement diminué : il a été divisé par 5 ! Ce qui permet au bâtiment de presque rentrer dans la catégorie A de la classification énergétique.

6.2 Proposition d'isolation 2

6.2.1 Matériaux & performances associées

La deuxième solution d'isolation est une solution intermédiaire tant en terme de performance thermique que de coût. La laine de roche remplace la laine de verre, car c'est un matériau plus écologique (valeur d'énergie grise plus faible) et moins dangereux à la pose (problème des poussières). On lui ajoute de la fibre de bois, un matériau certes cher, mais dont l'isolation phonique est bonne, et qui est particulièrement durable.

Pour les fenêtres, on utilise un double vitrage à lame d'argon, matériau répandu et efficace. Là encore, la maison respecte les normes RT 2005 et RT 2012.

Pour les calculs détaillés, se reporter à l'annexe E, p31.

Solution d'isolation 2 (Très Bonne Isolation)	Murs intérieur/extérieur		Murs intérieur/garage	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
<i>Matériau de construction existant</i>	Béton	∅	Béton	∅
Matériau de construction (isolant) à installer	Inchangé	Fibre de bois / laine de roche	Inchangé	Fibre de bois / laine de roche
Lambda matériau (W.m⁻¹.K⁻¹)	Inchangé	0,05 / 0,04	Inchangé	0,05 / 0,04
Energie grise (kWh/m³)	*	13 à 50 / 123 à 10 006	*	13 à 50 / 123 à 10 006
Epaisseur (mm)	Inchangé	118	Inchangé	118
Prix Matériau (€/m²)	*	3,08 / 8,2	*	3,08 / 8,2
Coût total Matériau (€)	*	1534,08	*	195,144
crédits d'impôts en pourcentage	*	25	*	25
prix après déduction du crédit d'impôts	*	1150,56	*	146,358
Surface (m²)	136		17,3	
Ancienne Déperdition surfacique U (W.m⁻².°C⁻¹)	2,321		1,92	
Déperdition surfacique U_{max} (W.m⁻².°C⁻¹) à ne pas dépasser	0,45		0,5	
Nouvelle Déperdition surfacique U (W.m⁻².°C⁻¹)	0,3		0,3	
Pertes par transmission au travers des parois Ht (W.K⁻¹) (hors ponts thermiques)	40,8		2,6	
Contribution à la perte énergétique totale (%) (hors ponts thermiques)	20,5		1,3	

Fenêtres	Sol		Toiture	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
Simple vitrage	Béton	∅	Béton	Polyuréthane
double vitrage 4/argon16/4	Inchangé	Fibre de bois / laine de roche	Inchangé	Fibre de bois / laine de roche
0,039	Inchangé	0,05 / 0,04	Inchangé	0,05 / 0,04
	*	13 à 50 / 123 à 10 006	*	13 à 50 / 123 à 10 006
24	Inchangé	118	Inchangé	118
225	*	3,08 / 8,2	*	3,08 / 8,2
13275	*	2048,448	*	2048,448
15	*	25	*	25
11283,75	*	1536	*	1536
59	181,6		181,6	
4,665		2,127		0,621
2,6		0,4		0,28
1,2		0,3		0,22
70,8		27,24		39,95
35,5		13,7		20

Là encore, même avec un double vitrage amélioré, les fenêtres restent le premier vecteur de déperdition thermique.

6.2.2 Nouvelles performances thermiques globales & coûts associés

Voici le nouveau comportement thermique et les coûts de chauffage, suite à l'isolation 2 :

$U_{bat (projet)}_2 (W.m^{-2}.K^{-1})$	0,35
$U_{bat (réf)} (W.m^{-2}.K^{-1})$	0,59

Pertes par transmission au travers des parois Ht ($W.K^{-1}$) (ponts thermiques compris)	202,6
Pertes par renouvellement d'air Hv ($W.K^{-1}$)	80,25
Puissance de pertes totales $H=Ht+Hv (W.K^{-1})$	282,9

Total Besoins énergétiques en chauffage Qh (kWh/an)	8208,76
Besoins énergétiques en chauffage Qh (kWh/m ² /an)	45,21
Classification énergétique du Bâtiment	A-B



Classification énergétique du bâtiment selon la valeur des besoins surfaciques en chauffage Qh (surfacique).

	Electrique	Fioul	Gaz
Coût annuel du chauffage (€)	990,24	883,65	648,97
Coût surfacique annuel du chauffage (€/m ²)	5,45	4,87	3,57

6.3 Proposition d'isolation 3

6.3.1 Matériaux & performances associées

La troisième solution représente une excellente isolation. On isole grâce à du polystyrène extrudé, qui est un très bon isolant. Les fenêtres sont remplacées par des triples vitrages, une innovation récente, donc encore chère, mais très efficace. La maison respecte largement les normes RT 2005 et RT 2012.

Pour les calculs détaillés, se reporter à l'annexe F, p32.

Solution d'isolation 3 (excellente Isolation)	Murs intérieur/extérieur		Murs intérieur/garage	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
<i>Matériau de construction existant</i>	Béton	∅	Béton	∅
type d'isolant à ajouter	Inchangé	polystyrène extrudé	Inchangé	chanvre
Lambda matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Inchangé	0,032	Inchangé	0,038
Energie grise (kWh/m^3)	*	450	*	40
Epaisseur (mm)	Inchangé	120	Inchangé	100
Prix ($€/m^2$)	*	15	*	13,5
Coût total Matériau (€)	*	2040	*	233
crédit d'impôts en pourcentage	*	25	*	25
prix après déduction du crédit d'impôts	*	1530	*	174
Surface (m^2)	136		17,3	
Ancienne Déperdition surfacique U ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)	2,321		1,92	
Déperdition surfacique U _{max} ($W.m^{-2}.°C^{-1}$) à ne pas dépasser	0,45		0,5	
Nouvelle Déperdition surfacique U ($W.m^{-2}.°C^{-1}$)	0,226		0,345	
Pertes par transmission au travers des parois Ht ($W.K^{-1}$) (hors ponts thermiques)	30,74		2,98	
Contribution à la perte énergétique totale (%) (hors ponts thermiques)	20		1,9	

Fenêtres	Sol		Toiture	
	Construction	Isolation	Construction	Isolation
Simple vitrage	Béton	∅	Béton	Polyuréthane
Triple vitrage	Inchangé	polystyrène extrudé	Inchangé	lin
0,036	Inchangé	0,032	Inchangé	0,037
	*	450	*	30
4-16-4-16-4	Inchangé	120	Inchangé	100
390	*	15	*	12
23010	*	2715	*	2179,2
40	*	25	*	25
13806	*	2036	*	1527
59		181,6		181,6
4,665		2,127		0,621
2,6		0,4		0,28
0,7		0,223		0,243
41,3		20,25		44,13
27		13,2		28,8

Nous avons fortement réduit les pertes par les fenêtres. Ici le principal vecteur des déperditions est la toiture ; peut être faudrait-il envisager de l'isoler plus.

6.3.2 Nouvelles performances thermiques globales & coûts associés

Voici le nouveau comportement thermique et les coûts de chauffage, suite à l'isolation 3 :

$U_{bat (projet)}_3 (W.m^{-2}.K^{-1})$	0,27
$U_{bat (réf)} (W.m^{-2}.K^{-1})$	0,59

Pertes par transmission au travers des parois Ht (W.K ⁻¹) (ponts thermiques compris)	156,3
Pertes par renouvellement d'air Hv (W.K ⁻¹)	80,25
Puissance de pertes totales H=Ht+Hv (W.K ⁻¹)	236,6

Total des besoins énergétiques en chauffage Qh (kWh/an)	6137,0
Besoins énergétiques en chauffage Qh _{surf} (kWh/m ² /an)	33,8
Classification énergétique du Bâtiment (cf. schéma ci-contre)	A



Classification énergétique du bâtiment selon la valeur des besoins surfaciques en chauffage Qh [surf].

	Electrique	Fioul	Gaz
Coût annuel du chauffage (€)	740,32	660,63	485,19
Coût surfacique annuel du chauffage (€/m ²)	4,08	3,64	2,67

On remarque que cette dernière solution permet de diminuer de façon importante les besoins énergétiques en chauffage. Cette baisse est caractérisée par $Q_{h_{\text{surfacique}}}$, qui passe de 295.4 kWh/m²/an pour la maison existante, à 33.8 kWh/m²/an pour cette troisième solution d'isolation. On est désormais entièrement dans la catégorie A de la classification énergétique du bâtiment. Cependant l'investissement pour à ces performances y parvenir est élevé.

7 Bilan global comparatif

Nous allons maintenant comparer ces trois solutions d'isolation, en termes de déperditions thermiques, et de rentabilité financière. Nous allons les évaluer entre elles ainsi que les comparer par rapport au bâtiment avant isolation.

7.1 Tableau synthétique

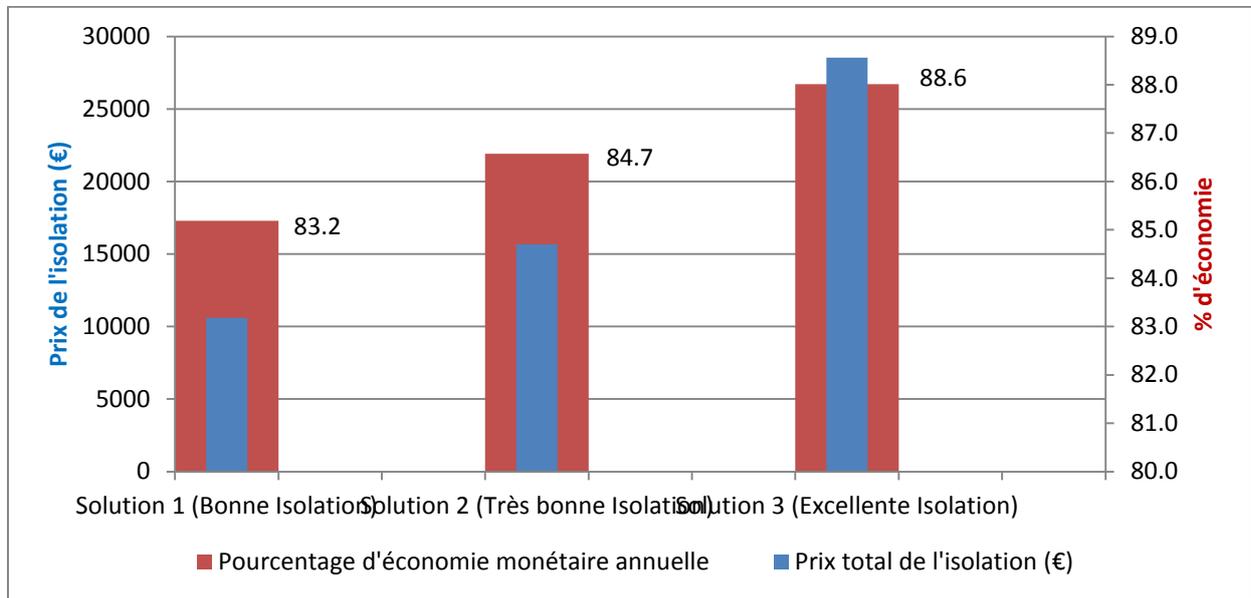
Le tableau qui suit présente la synthèse des caractéristiques du bâtiment avant isolation, puis dans chaque cas de nouvelle isolation ; sont également présentées les économies financières annuelles selon le type d'énergie utilisé, et le temps de rentabilité de chaque solution d'isolation.

Bilan énergétique comparatif	Maison existante (Mauvaise Isolation)		
	Electrique	Fioul	Gaz
$U_{\text{bat}} \text{ (projet) (W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	1,75		
Pertes par transmission Ht (W.K ⁻¹)	1013,1		
Coût annuel du chauffage (€)	6 470,56	5 774,08	4 240,64
Coût surfacique annuel du chauffage (€/m ²)	35,64	31,80	23,36
Economie monétaire annuelle (€)	*		
Pourcentage d'économie monétaire annuelle	*		
Prix total des matériaux (€)	*		
Prix de la main d'œuvre (€)	*		
Prix total de l'isolation (€)	*		
Temps de rentabilité (années)	*		

Solution 1 (Bonne Isolation)			Solution 2 (Très bonne Isolation)			Solution 3 (Excellente Isolation)		
Electrique	Fioul	Gaz	Electrique	Fioul	Gaz	Electrique	Fioul	Gaz
0,38			0,35			0,27		
220			202,6			156,3		
1 088,28	971,14	713,23	990,24	883,65	648,97	740,32	660,63	485,19
5,99	5,35	3,93	5,45	4,87	3,57	4,08	3,64	2,67
5 382,28	4 802,94	3 527,41	5 480,32	4 890,43	3 591,66	5 730,24	5 113,45	3 755,45
83,2			84,7			88,6		
12348,85			15652,67			19073		
4939,54			6261,07			7629,2		
17288,39			21913,74			26702,2		
3,2	3,58	4,88	3,98	4,46	6,07	4,64	5,2	7,08

7.2 Analyse coût d'investissement / économie énergétique et financière

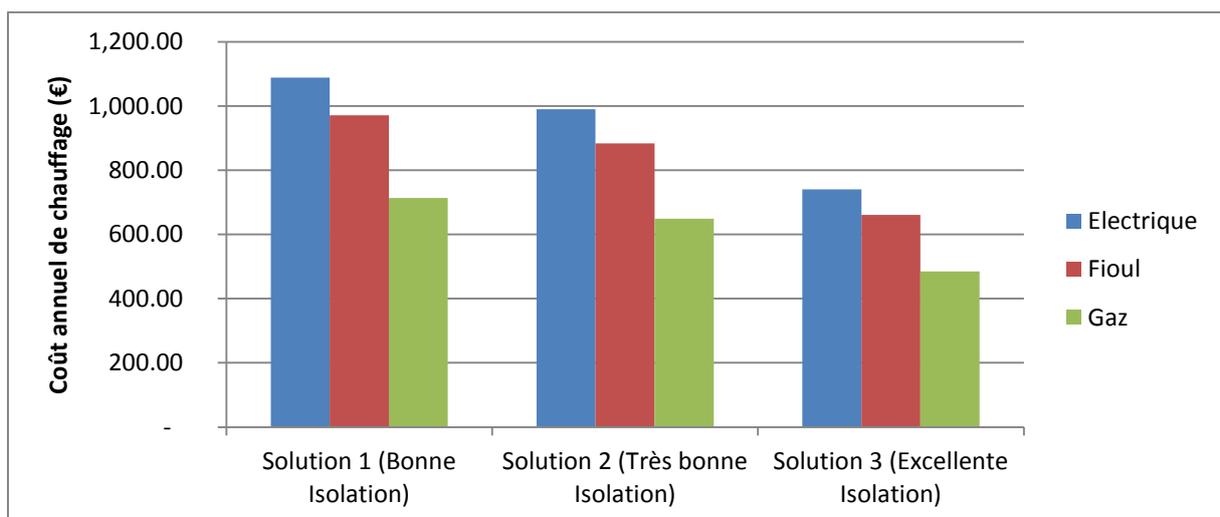
Le graphique suivant donne un ordre d'idée du lien entre investissement pour effectuer l'isolation, et pourcentage d'économie (énergétique et financière) réalisée ensuite :



On constate que pour la solution d'isolation 3, l'investissement devient très important, mais l'économie qui en résulte n'est pas « à la hauteur » de l'argent dépensé pour l'isolation.

7.3 Coût annuel de chauffage

Le graphique qui suit représente le comparatif combiné des différentes isolations selon le type de chauffage utilisé :

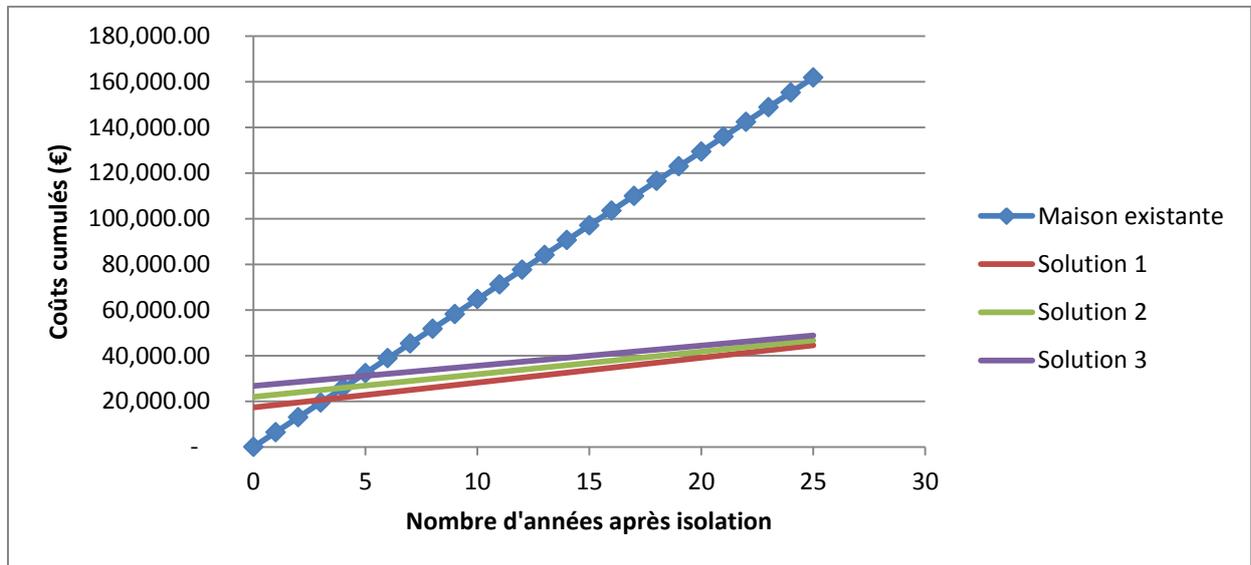


On constate qu'il peut être très avantageux de mener simultanément l'installation d'une nouvelle isolation et le changement du système de chauffage pour passer à un autre type d'énergie (gaz en particulier) ou pour augmenter le rendement.

7.4 Etude du retour sur investissement

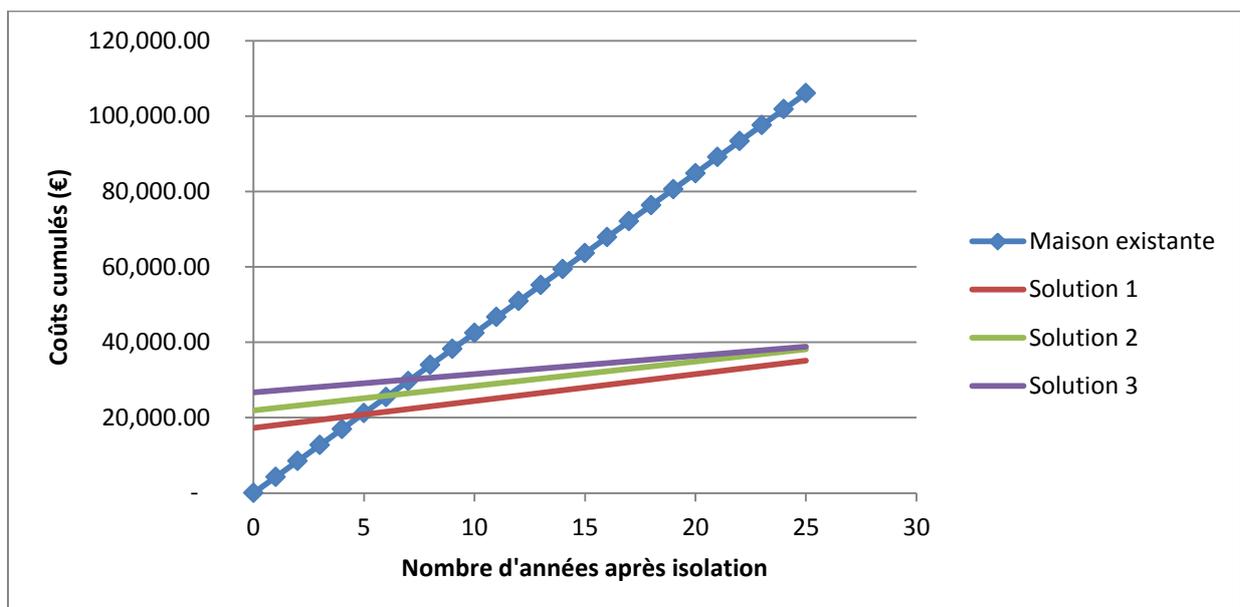
Les deux tableaux suivant illustrent l'évolution des dépenses pour l'isolation et le chauffage en terme de coûts cumulés, permettant de constater les temps de rentabilité des différentes solutions proposées :

- Pour un chauffage électrique :



Le temps de rentabilité varie de 4 à 5 ans selon les solutions.

- Pour un chauffage gaz :



Le temps de rentabilité varie de 5 à 8 ans selon les solutions.

Ceci nous amène alors à différentes observations :

- Dans tous les cas, le temps de rentabilité est plus court lorsque l'on utilise un chauffage électrique, car son coût est plus élevé,
- La solution 1 est plus vite rentabilisée que la solution 2, elle-même plus vite rentabilisée que la solution 3,
- Toutes les solutions sont rentabilisées en moins de 10 ans, ce qui est tout à fait acceptable pour un bâtiment de particulier,
- Il faut plus de 20 ans pour que les solutions 2 et 3 soient rentabilisées par rapport à la solution 1, ce qui n'est pas une durée acceptable (en effet, les trois courbes convergent en un même point très lointain, car les coûts de chauffage pour les trois solutions sont bas et peu différents).

8 Conclusion

L'étude énergétique de ce bâtiment permet d'effectuer un certain nombre de conclusions :

- L'isolation est indispensable, autant en terme de mise à niveau vis-à-vis de la réglementation, que de nécessité d'économie énergétique et de diminution des coûts à moyen et long termes. En effet sur 25 ans, l'isolation du bâtiment aura permis une économie d'environ 110 000 €.
- La solution 2 devient plus rentable que la solution 1 au bout de 30 ans. On imagine qu'à très long terme, la solution 3 sera plus rentable que les autres solutions.
- On en déduit que la meilleure solution à adopter pour isoler ce bâtiment est d'isoler au « minimum », en respectant les normes, sans dépenser trop. Car au moins jusqu'à 25ans, la solution 1 reste plus rentable que les deux autres solutions.
- Il est à noter cependant que les différents matériaux utilisés ne se valent pas tous : d'une part en terme de performance énergétique, de coût, mais aussi en terme d'impact sur l'environnement : des matériaux ont nécessité plus d'énergie grise pour les produire que d'autre. Le choix des matériaux peut donc aussi refléter un choix environnemental sa constitution même.
- Il peut être aussi intéressant de remarquer que les cours de l'énergie sont en perpétuelle augmentation, et risquent de continuer à augmenter. De ce fait, les coûts pour le chauffage vont augmenter (à isolation égale), et la solution 3 peut en fait s'avérer plus avantageuse à moyen terme qu'elle n'y paraît.

On aurait également pu étudier la possibilité d'ajouter des volets pour diminuer les déperditions thermiques (notamment sur la face nord, et pendant la nuit).

L'installation éventuelle d'une toiture végétalisée pourrait également valoir le coup d'être étudiée.

9 Annexes

Les pages qui suivent regroupent l'ensemble des tableaux des résultats détaillés qui ont permis les calculs de toutes les grandeurs présentées dans le document :

Annexe A : *Ensemble des données sur la maison existante (p27)*

Annexe B : *Calcul des apports énergétiques solaires et de la saison de chauffe (p28)*

Annexe C : *Calcul des performances énergétiques du bâtiment existant (p29)*

Annexe D : *Calcul des performances énergétiques du bâtiment avec la proposition d'isolation 1 (p30)*

Annexe E : *Calcul des performances énergétiques du bâtiment avec la proposition d'isolation 2 (p31)*

Annexe F : *Calcul des performances énergétiques du bâtiment avec la proposition d'isolation 3 (p32)*