

Amandine BROSSE  
Blandine CHAUVIN  
Emilie MORDACQUE

1A groupe 8  
Trinôme 84  
El Mankibi

## Energétique du bâtiment

# Etude de la réhabilitation énergétique d'une maison individuelle



23 mai 2005



Contexte.....	3
I. <u>Zone climatique</u> .....	3
II. <u>Données constantes</u> .....	3
III. <u>Description de la maison</u> .....	3
1. Dimensions caractéristiques.....	3
2. Façades et plans de la maison – dimensions.....	4
Evaluation de la performance énergétique de la maison.....	6
I. <u>Calcul de <math>U_{bat}</math> et comparaison avec <math>U_{bat\ ref}</math></u> .....	6
1. Notations.....	6
2. Equations physiques.....	6
3. Résultats.....	7
4. Détails des calculs.....	8
II. <u>Caractéristiques thermiques</u> .....	10
1. Ouverture solaire.....	10
2. Inertie.....	11
3. Taux de renouvellement d'air.....	11
III. <u>Besoins mensuels en chauffage</u> .....	11
1. Définitions et notations.....	11
2. Gains et pertes.....	12
a. Déperditions thermiques par transmission.....	12
b. Déperditions thermiques par renouvellement d'air.....	12
c. Apports solaires.....	12
d. Apports internes.....	12
3. Détermination des périodes de chauffage.....	13
a. Température sans chauffage.....	13
b. Périodes de chauffage et besoins mensuels en chauffage.....	14
4. Besoins en chauffage annuels et coût annuel.....	15
5. Détails des calculs.....	16
Elaboration d'un programme de réhabilitation énergétique.....	17
I <u>Solutions techniques</u> .....	17
1. Description.....	17
2. A propos du facteur solaire de la solution 7 (double vitrage).....	17
3. Performances énergétiques des portes.....	18
4. Performances énergétiques du plancher sur vide sanitaire.....	18
5. Détails pour l'installation d'un programmateur d'intermittence.....	18
II <u>Remarques générales</u> .....	19
1. De la modification des dimensions.....	19
2. Observations préliminaires.....	19
3. Démarche.....	19
III <u>Comparatif des solutions techniques prises seules</u> .....	20
1. Tableau comparatif.....	20
2. Détails des calculs pour la solution 9.....	21
3. Exploitation.....	23
a. Solutions très rentables.....	23
b. Solution à exclure.....	23
c. Solutions peu intéressantes.....	23
d. Solutions satisfaisantes.....	24
IV <u>Propositions de réhabilitation énergétique</u> .....	24
1. Tableau comparatif.....	24
2. Réhabilitation petit budget : <b>la solution minimale (8+9)</b> .....	26
3. Réhabilitation budget intermédiaire : <b>solution 1+8+9</b> .....	26
4. Réhabilitation grand budget : <b>une solution qui respecte la RT2000 (solution 1+4+5+5bis+6+8+9)</b> .....	26
V <u>Conclusion</u> .....	27
VI <u>Annexe : détails des calculs des pertes et gains pour les solutions proposées</u> .....	28

## Contexte

### I. Zone climatique

La maison de l'étude a été construite en 1975. Elle est située en lotissement urbain dans la ville de **Brest** (Finistère).

D'après l'annexe 1 de l'arrêté du 29 novembre 2000, relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiment, il vient la zone climatique correspondante :

Zone été <b>Ea</b>	Zone hiver <b>H2</b>
-----------------------	-------------------------

### II. Données constantes

Le système de chauffage assure une température intérieure constante de 20°C soit :  $T_{ai} = 20^{\circ}\text{C}$ .

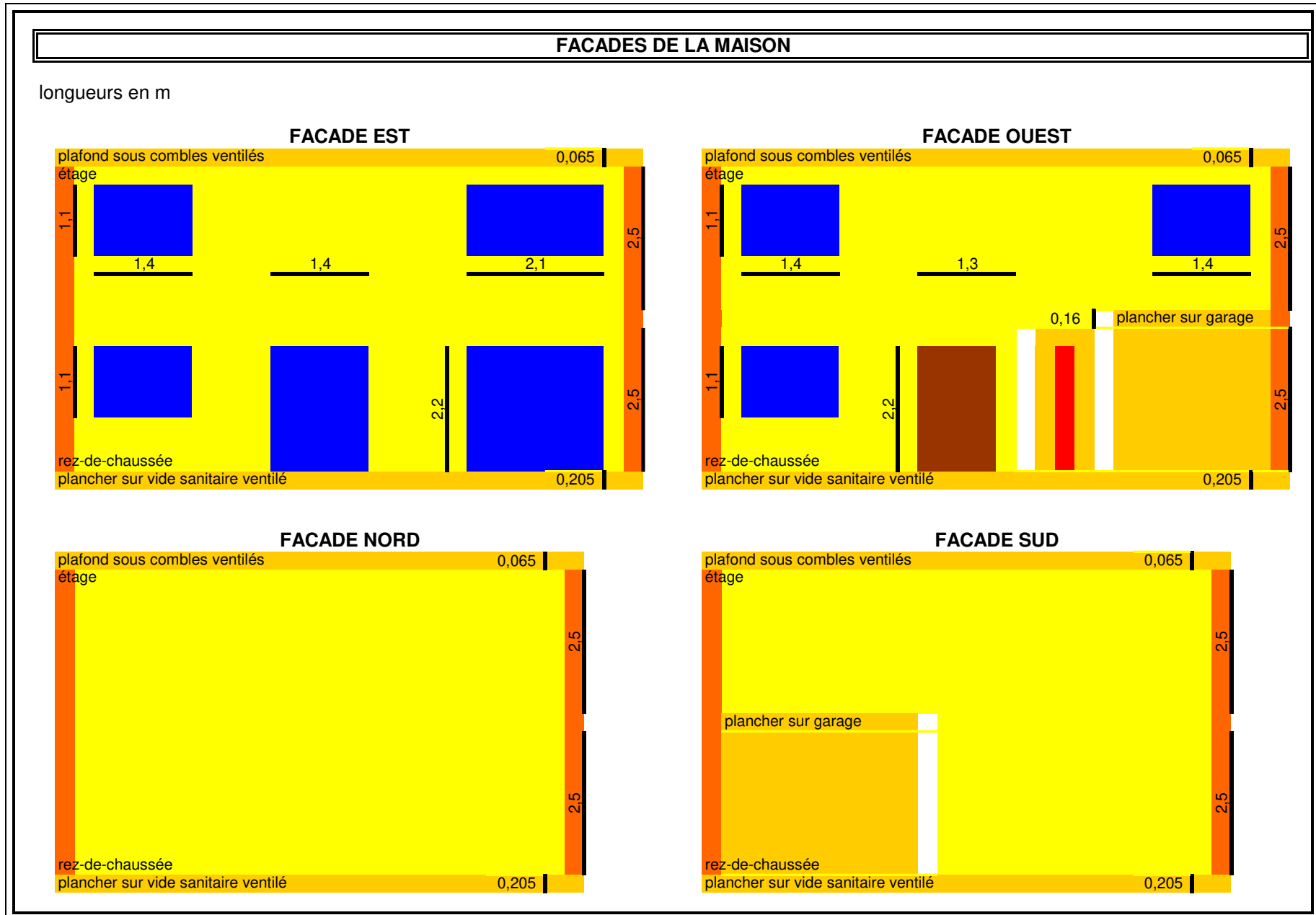
Les apports internes sont évalués, suivant la valeur réglementaire (RT2000) pour un logement, à  $I_i = 4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

### III. Description de la maison

#### 1. Dimensions caractéristiques

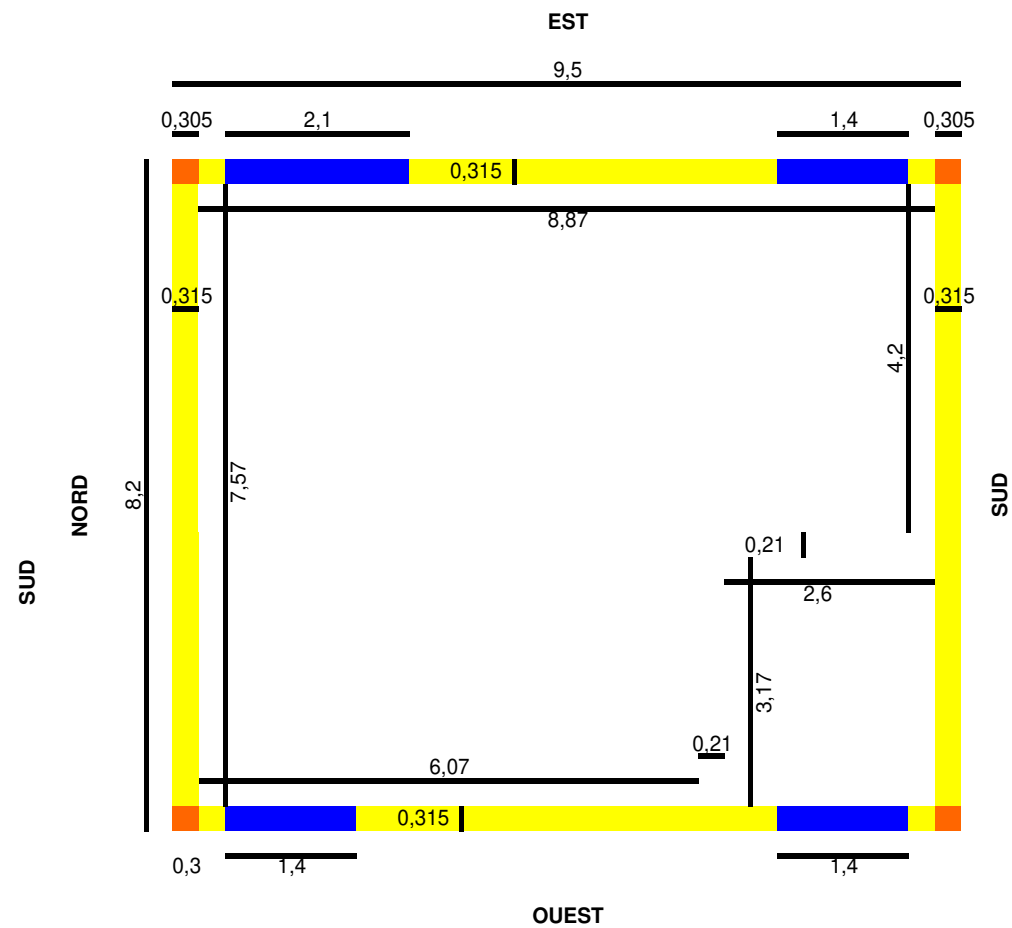
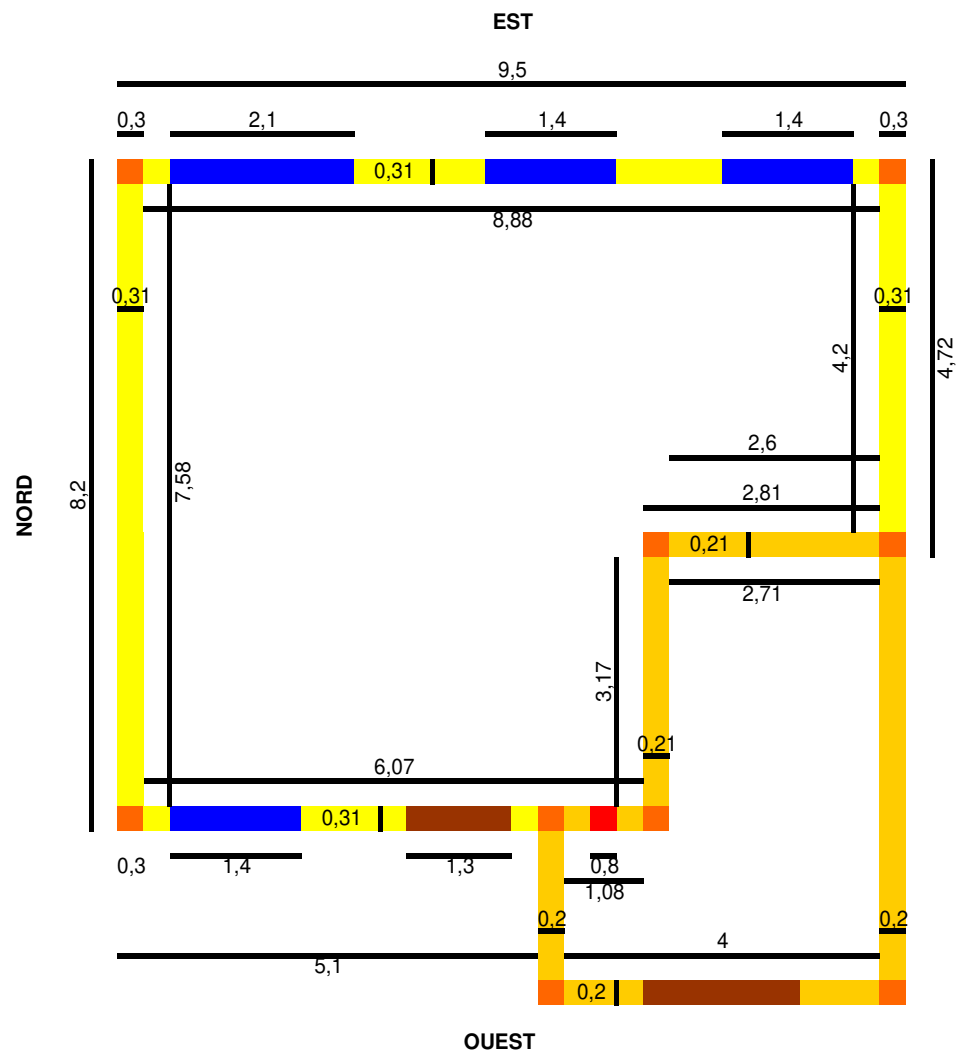
Surfaces verticales (m <sup>2</sup> )					Surfaces horizontales (m <sup>2</sup> )		Liaisons (m)	
		r-d-c	étage	Total				
Baies vitrées	Est	9,24	3,85	13,09	Plafond	67,15	Liaison mur/plancher	32,50
	Ouest	1,54	3,08	4,62	Plancher sur garage	8,24	Liaison mur/étage	32,50
	Total	10,78	6,93	17,71	Plancher sur vide sanitaire	57,81	Liaison mur/plafond	32,88
Porte extérieure	Ouest	2,86	0,00	2,86				
Porte sur garage	Ouest	1,76	0,00	1,76				
Murs extérieurs	Sud	10,50	18,93	29,43				
	Est	12,96	18,33	31,29				
	Nord	18,95	18,93	37,88				
	Ouest	7,58	19,10	26,67				
	Total	49,99	75,27	125,26				
Murs sur garage	Sud	7,93			Surface habitable (m <sup>2</sup> )	124,96		
	Ouest	7,44			Volume chauffé (m <sup>3</sup> )	312,40		
	Total	15,37						

## 2. Façades et plans de la maison – dimensions



REZ-DE-CHAUSSEE

ETAGE



# Evaluation de la performance énergétique de la maison

## I. Calcul de $U_{bat}$ et comparaison avec $U_{bat\ ref}$

### 1. Notations

$U_{bat}$	coefficient moyen de déperditions thermiques de l'enveloppe par transmission à travers les parois déperditives
$U_{bat\ ref}$	coefficient moyen de déperditions de référence réglementaire, fonction de la zone climatique choisie
$H_t$	coefficient de déperditions thermiques de l'enveloppe par transmission à travers les parois déperditives
$H_{t\ ref}$	coefficient de déperditions thermiques de l'enveloppe de référence réglementaire
$A_t$	surface totale des parois déperditives = surface intérieure des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol, des sous-sols, du vide sanitaire ou des locaux non chauffés

$U_i$	coefficient moyen de déperditions thermiques surfacique de la paroi i
$A_i$	surface de la paroi i
$b_i$	coefficient correctif égal à 1 si la surface est en contact avec l'extérieur, inférieur à 1 si la surface est en contact avec un vide sanitaire ou un local non chauffé
$\Psi_k$	coefficient de déperditions thermiques linéique de la liaison k
$I_k$	longueur de la liaison k
$U_{i\ ref}$	coefficient de déperditions thermiques surfacique de référence réglementaire
$\Psi_{i\ ref}$	coefficient de déperditions thermiques linéique de référence réglementaire
$a_i$	coefficient pour le calcul des déperditions thermiques de référence réglementaire

$R_{si}$	résistance superficielle intérieure
$R_{se}$	résistance superficielle extérieure
$e_j$	épaisseur du matériau j
$\lambda_j$	coefficient de conductibilité thermique du matériau j
$R_j$	résistance du matériau j pour une épaisseur $e_j$

### 2. Equations physiques

$$U_{bat} = \frac{H_t}{A_t}$$

$$H_t = \sum_{\text{parois } i} b_i A_i U_i + \sum_{\text{liaisons } k} I_k \Psi_k$$

$$U_i = \frac{1}{R_{sii} + R_{sei} + \sum_{\text{matériaux } j} R_j}$$

$$R_j = \frac{e_j}{\lambda_j}$$

Les  $R_s$  sont calculées grâce aux indications portées dans le tableau ci-dessous.

### RESISTANCES SUPERFICIELLES

*Paroi donnant sur l'extérieur, un passage ouvert, un local ouvert*

Paroi	$R_{si}$ (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	$R_{se}$ (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )
Verticale	0,13	0,04
Horizontale - flux ascendant (plafond)	0,1	0,04
Horizontale - flux descendant (plancher)	0,17	0,04

*Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, un comble ou un vide sanitaire,  $R_{si}$  s'applique des deux côtés.*

$$U_{\text{bat ref}} = \frac{a_1 A_1 + a_2 A_2 + a_3 A_3 + a_4 A_4 + a_5 A_5 + a_6 A_6 + a_7 A_7 + a_8 L_8 + a_9 L_9 + a_{10} L_{10}}{A_t}$$

Ce calcul issu de la réglementation RT2000 fait intervenir les coefficients  $a_i$  décrits ci-dessous, auxquels correspondent les surfaces  $A_i$ .

Les  $U_{i \text{ ref}}$  et les  $\Psi_{k \text{ ref}}$  sont égaux à l'un ou l'autre des  $a_i$ .

### COEFFICIENTS $a_i$ (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>) POUR LE CALCUL DES DEPERDITIONS POUR UNE MAISON INDIVIDUELLE EN ZONE H2

*cf. arrêté du 29 novembre 2000, titre II, chapitre I<sup>er</sup>, article 10*

Parois verticales opaques	$a_1$	0,40
Planchers sous combles ou rampants	$a_2$	0,23
Planchers hauts autres	$a_3$	0,30
Planchers bas	$a_4$	0,30
Portes opaques	$a_5$	1,50
Fenêtres, portes entièrement vitrées, portes-fenêtres, parois transparentes et translucides sans fermetures	$a_6$	2,40
Fenêtres, portes-fenêtres, parois transparentes et translucides avec fermetures	$a_7$	2,00
Liaison périphérique des planchers bas avec un mur	$a_8$	0,50
Liaison périphérique des planchers intermédiaires ou sous comble aménageable avec un mur	$a_9$	0,70
Liaison périphérique des planchers hauts autres avec un mur	$a_{10}$	0,70

$$H_{t \text{ ref}} = \sum_{\text{parois } i} A_i U_{i \text{ ref}} + \sum_{\text{liaisons } k} I_k \Psi_{k \text{ ref}}$$

Pour un bâtiment à usage d'habitation, la valeur du **garde-fou** correspond à **1,3 fois la valeur réglementaire**. La valeur effective correspondante ne doit pas dépasser ce garde-fou afin de respecter la réglementation RT2000.

### 3. Résultats

$U_{\text{bat}} = 1,37 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$	$U_{\text{bat ref}} = 0,66 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$	<b>garde-fou = 0,86 W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup></b>
--	--	---

$U_{\text{bat}} > U_{\text{bat ref}}$  donc la maison n'est pas conforme à la réglementation RT2000. Bien que son ancienneté autorise la maison à ne pas respecter cette norme, il est intéressant d'élaborer un programme de réhabilitation pour améliorer ses performances énergétiques, en se basant sur ces exigences réglementaires.

#### 4. Détails des calculs

DONNEES INITIALES								
CONSTITUTION DES ELEMENTS DEPERDITIFS								
Eléments de l'enveloppe i	Matériau j	e <sub>j</sub> (m)	e <sub>j tot</sub> (m)	R <sub>j</sub> (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	R <sub>si</sub> (m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> )	λ <sub>j</sub> (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	U <sub>i</sub> (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	b <sub>i</sub>
Murs verticaux rez-de-chaussée extérieur	Mortier	0,010	0,310	-	0,17	1,150		1
	Parpaing	0,200		0,22		-		
	Lame d'air	0,040		0,16		-		
	Brique	0,050		0,1		-		
	Plâtre	0,010		-		0,350		
Murs verticaux rez-de-chaussée sur garage	Parpaing	0,200	0,210	0,22	0,26	-		0,6
	Plâtre	0,010		-		0,350		
Murs verticaux étage	Bardage bois	0,015	0,315	-	0,17	0,230		1
	Brique	0,125		0,27		-		
	Lame d'air	0,040		0,16		-		
	Brique	0,125		0,25		-		
	Plâtre	0,010		-		0,350		
Plafond sous combles ventilés	Laine de verre	0,050	0,065	-	0,2	0,040		0,8
	Plâtre	0,015		-		0,350		
Plancher sur garage	Dalle de béton	0,150	0,160	-	0,34	1,750		0,6
	Plancher bois	0,010		-		0,230		
Plancher sur vide sanitaire ventilé	Hourdis et dalle béton	0,200	0,205	0,21	0,34	-		0,5
	Carrelage	0,005		-		1,500		
Baies vitrées	Simple vitrage	0,004			0,17		3,45	1
	Menuiserie bois							
	Volet bois ajouré							
Porte d'entrée	Bois plein				0,17		3,5	1
Porte d'accès au garage	Contreplaqué bois				0,17		2	0,6



**CALCUL DE  $U_{bat}$  ET  $U_{ref}$  (ETAT INITIAL)**

**Localisation** Brest  
**Zone climatique** Zone été : Ea  
 Zone hiver : H2  
**Usage** Habitation

Eléments de l'enveloppe i	Type	$b_i$	$U_i$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$U_{i ref}$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	garde-fou ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ou $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) : $U_{i ref}$ ou $\Psi_{k ref}$	$A_i$ ( $m^2$ ) ou $l_k$ (m)	$b_i A_i U_i$ ou $l_k \Psi_k$ ( $W.K^{-1}$ )	$A_i U_{i ref}$ ou $l_k \Psi_{k ref}$ ( $W.K^{-1}$ )
			ou $\Psi_k$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	ou $\Psi_i$ ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )				

Murs verticaux rez-de-chaussée extérieurs	paroi verticale opaque	1	1,46	0,40	0,52	49,99	72,73	19,99
Murs verticaux rez-de-chaussée sur garage		0,6	1,97	0,40	0,52	15,37	18,13	6,15
Murs verticaux étage	plancher sous combles	1	1,06	0,40	0,52	75,27	79,75	30,11
Plafond sous combles ventilés		0,8	0,67	0,23	0,30	67,15	35,98	15,44
Plancher sur garage	plancher bas	0,6	2,13	0,30	0,39	8,24	10,54	2,47
Plancher sur vide sanitaire ventilé		0,5	1,81	0,30	0,39	57,81	52,24	17,34
Baies vitrées	fenêtre avec fermeture	1	3,45	2,00	2,60	17,71	61,10	35,42
Porte d'entrée	porte opaque	1	3,50	1,50	1,95	2,86	10,01	4,29
Porte d'accès au garage		0,6	2,00	1,50	1,95	1,76	2,11	2,64
Liaison mur/plancher	liaison plancher bas/mur	-	0,50	0,50	0,65	32,50	16,25	16,25
Liaison mur/étage	liaison plancher autre/mur	-	0,70	0,70	0,91	32,50	22,75	22,75
Liaison mur/plafond		-	0,70	0,70	0,91	32,88	23,02	23,02

■ garde-fou non respecté

296,15	404,61	195,87
$A_t$ ( $m^2$ )	$H_t$ ( $W.K^{-1}$ )	$H_{t ref}$ ( $W.K^{-1}$ )

$U_{bat}$ ( $W.K^{-1}.m^{-2}$ )	1,37
$U_{bat ref}$ ( $W.K^{-1}.m^{-2}$ )	0,66

**garde-fou : 1,3  $U_{bat ref}$  ( $W.K^{-1}.m^{-2}$ ) 0,86**

## II. Caractéristiques thermiques

### 1. Ouverture solaire

La capacité du bâtiment à capter les apports solaires est caractérisée par ses aires réceptrices équivalentes horizontales, Nord, Ouest, Sud, Est.

Dans notre projet, seules comptent l'Ouest et l'Est.

Notations

A	aire de la baie
F	facteur d'ombre (ou coefficient de masque architectural)
S	facteur solaire
A <sub>s</sub>	aire équivalente

$$A_s = AFS$$

Les aires équivalentes des baies vitrées prennent en compte le facteur d'ombre et le facteur solaire.

Le facteur d'ombre représente toute réduction du rayonnement solaire incident due à un ombrage permanent de la surface considérée du fait de :

- ombre portée d'autres bâtiments
- ombre due à la topographie (collines, arbres...)
- surplombs
- ombres portées par d'autres éléments du même bâtiment
- position d'une fenêtre par rapport à la surface externe du mur extérieur

Dans ce projet, on néglige les ombres portées sur les façades de même que les impacts des stores et rideaux. Il vient alors **F = 1**.

Le facteur solaire des baies est fonction de leur exposition au bruit, leur orientation, leur inclinaison, la zone climatique et de l'inertie quotidienne du bâtiment.

Ici on prend **S = 0,6**. Le facteur solaire ainsi choisi ne correspond pas à une réalité possible, mais sert d'*exemple indicatif*. En effet, dans la réglementation RT2000, pour une inertie moyenne, la zone Ea et une baie verticale courante, les facteurs solaires de référence sont respectivement de 0,45, 0,25 et 0,15 pour les expositions au bruit BR1, BR2, BR3. On peut penser que les facteurs solaires réels sont de l'ordre de ceux de référence. Il vient alors que le choix de S = 0,6 est éloigné de la réalité, et nous bénéficierons dans ce projet d'apports solaires possiblement beaucoup plus élevés que les apports réels, ce qui aura une répercussion sur tous les calculs.

Ouverture solaire		
Baies vitrées est	A (m <sup>2</sup> )	13,09
	S	0,6
	F	1
	A <sub>s est</sub> (m <sup>2</sup> )	7,85
Baies vitrées ouest	A (m <sup>2</sup> )	4,62
	S	0,6
	F	1
	A <sub>s ouest</sub> (m <sup>2</sup> )	2,77

## 2. Inertie

L'inertie thermique traduit l'existence d'un décalage entre le captage de l'énergie solaire et sa transmission à l'air intérieur due à la non instantanéité du phénomène de conduction. Ici, l'inertie de la maison est considérée comme **moyenne**.

Dans ce projet, nous ne la prenons pas vraiment en compte.

## 3. Taux de renouvellement d'air

Il n'y a pas de système de ventilation mécanique, mais l'ouverture des fenêtres et la mauvaise étanchéité de la façade conduisent à considérer que le taux de renouvellement d'air moyen pendant la saison de chauffe est de  $1,3 \text{ h}^{-1}$  donc le débit est  $Q_v = 1,3V \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , avec V le volume chauffé.

# III. Besoins mensuels en chauffage

## 1. Définitions et notations

*Notations (énergies calorifiques)*

$Q_{\text{ch final}}$	besoins en chauffage annuels
$Q_t$	déperditions thermiques de l'enveloppe par transmission à travers les parois déperditives annuelles
$Q_{\text{ra}}$	déperditions thermiques de l'enveloppe par renouvellement d'air annuelles
$Q_s$	apports solaires annuels
$Q_i$	apports internes annuels
$Q_p$	déperditions thermiques totales annuelles
$Q_g$	gains totaux annuels

On indice par m ces grandeurs pour définir les grandeurs mensuelles.

*Notations*

$n_m$	nombre de jours dans le mois m
$T_{\text{ae } m}$	température de l'air extérieur moyenne au mois m
$n_{\text{chauffe } m}$	nombre de jours de chauffe dans le mois m
$T_{\text{sc } m}$	température de l'air intérieur sans chauffage moyenne au mois m

$\rho_{\text{air}}$	masse volumique de l'air
$C_{p \text{ air}}$	capacité thermique massique de l'air
$M_{\text{air}}$	masse molaire de l'air
$V_m$	volume molaire (gaz)

$I_{\text{ouest } m}$	moyenne de l'ensoleillement surfacique sur un plan vertical ouest pour le mois m
$I_{\text{est } m}$	moyenne de l'ensoleillement surfacique sur un plan vertical est pour le mois m

$$\text{Pertes : } Q_p = Q_t + Q_{ra} \text{ et } Q_{p m} = Q_{t m} + Q_{ra m}$$

$$\text{Gains : } Q_g = Q_s + Q_i \text{ et } Q_{g m} = Q_{s m} + Q_{i m}$$

On note  $Q_{ch\ ini}$  la grandeur ci-après définie :

$$Q_{ch\ ini} = Q_p - Q_g \text{ et } Q_{ch\ m\ ini} = Q_{p m} - Q_{g m}$$

On déterminera ensuite  $Q_{ch\ final}$  en fonction des périodes de chauffe trouvées.

Ces expressions ne prennent pas en compte l'inertie de la maison. Elles sont simplifiées.

$$\text{On définit enfin le ratio gains/pertes : } \gamma_m = \frac{Q_g}{Q_p}.$$

## 2. Gains et pertes

### a. Déperditions thermiques par transmission

Selon les calculs effectués précédemment, le coefficient de déperditions thermiques par transmission est :  $H_t = 404,61 \text{ W.K}^{-1}$ .

L'énergie calorifique correspondant à un mois est définie par :

$$Q_{t m} = 24n_m H_t (T_{ai} - T_{ae m})$$

Cette formule est une approximation qui découle de la simplification effectuée dans le calcul de  $H_t$  (normalement divisé en trois parties : extérieur, sol et locaux non chauffés).

### b. Déperditions thermiques par renouvellement d'air

$$Q_{ra m} = 24n_m \frac{\rho_{air} C_{p air}}{3600} Q_v (T_{ai} - T_{ae m})$$

Le volume chauffé a été calculé précédemment :  $V = 312,40 \text{ m}^3$ .

$$\rho_{air} = \frac{M_{air}}{V_m} \text{ avec } M_{air} = 28,97 \text{ g.mol}^{-1}, V_m = 24 \text{ L.mol}^{-1} \text{ et } C_{p air} = 1,01.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

$$\text{Il vient alors } \frac{\rho_{air} C_{p air}}{3600} = 0,34 \text{ Wh.K}^{-1}.\text{m}^{-3}.$$

### c. Apports solaires

Les apports solaires sont calculés à partir des moyennes d'ensoleillement surfacique et des aires équivalentes des baies vitrées.

$$Q_{s m} = 24n_m (I_{ouest m} A_{s ouest} + I_{est m} A_{s est})$$

### d. Apports internes

Les apports internes représentent :

- la chaleur dégagée par le métabolisme des occupants, variable selon leur nombre et leur niveau d'activité
- la chaleur dégagée par l'utilisation d'appareils électriques (électroménager, éclairage, ordinateurs...)
- la chaleur ou le froid dégagé par les systèmes de chauffage ou de climatisation

Ainsi qu'il a été précisé plus tôt, les apports internes sont évalués à  $I_i = 4 \text{ W.m}^{-2}$ .

On en déduit l'énergie calorifique correspondant à un mois :

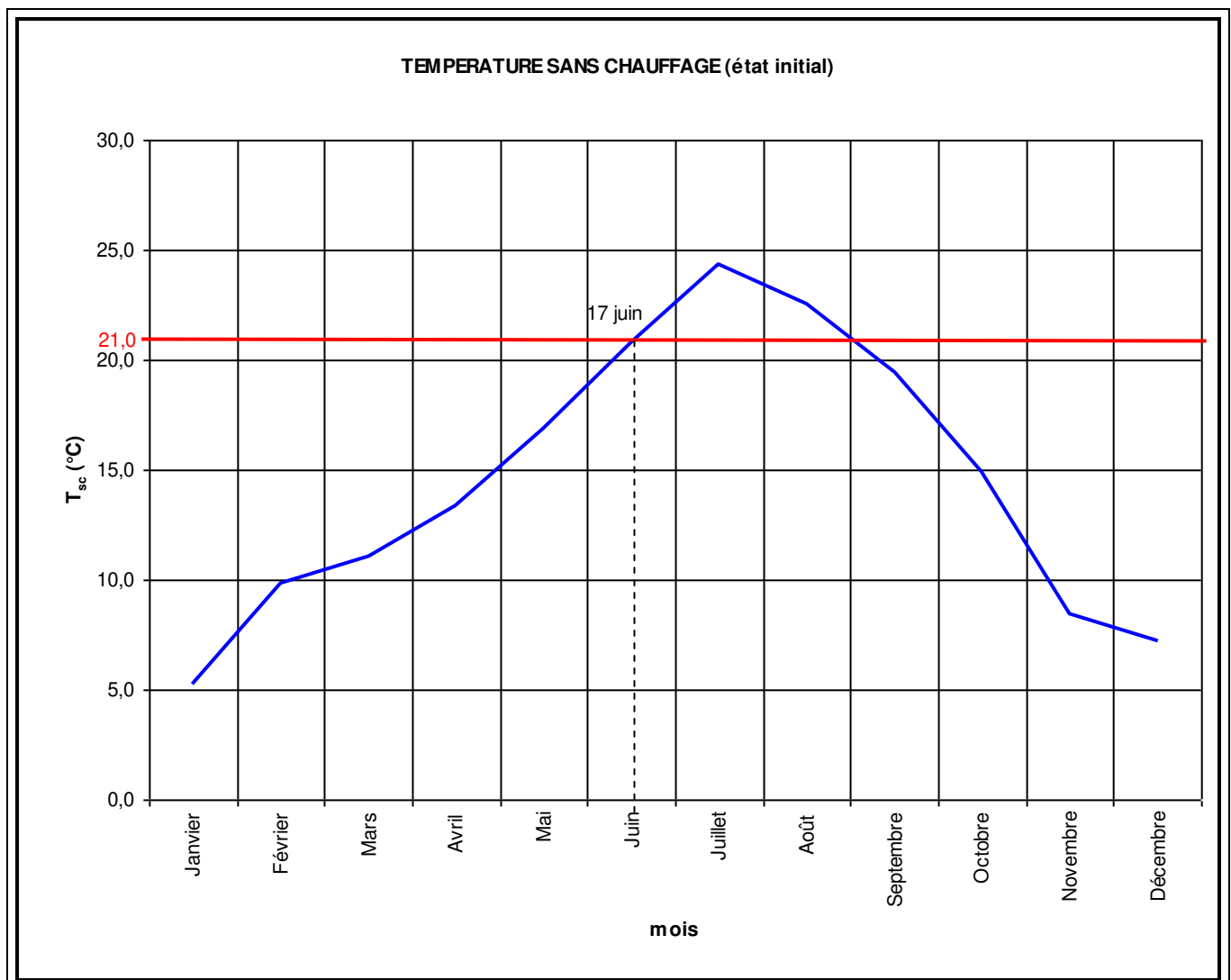
$$Q_i = 24n_m A_{hab} I_i \text{ avec } A_{hab} = 124,96 \text{ m}^2 \text{ (surface habitable)}$$

### 3. Détermination des périodes de chauffage

#### a. Température sans chauffage

On note  $T_{sc}$  la température qu'il y aurait dans la maison sans chauffage en annulant l'expression  $Q_{ch}$ .

$$T_{scm} = \frac{Q_{gm}}{24n_m (H_t + 0,34Q_v)} + T_{aem} = \frac{I_{ouestm} A_{souest} + I_{estm} A_{sest} + A_{hab} I_i}{H_t + 0,34Q_v} + T_{aem}$$



### b. Périodes de chauffage et besoins mensuels en chauffage

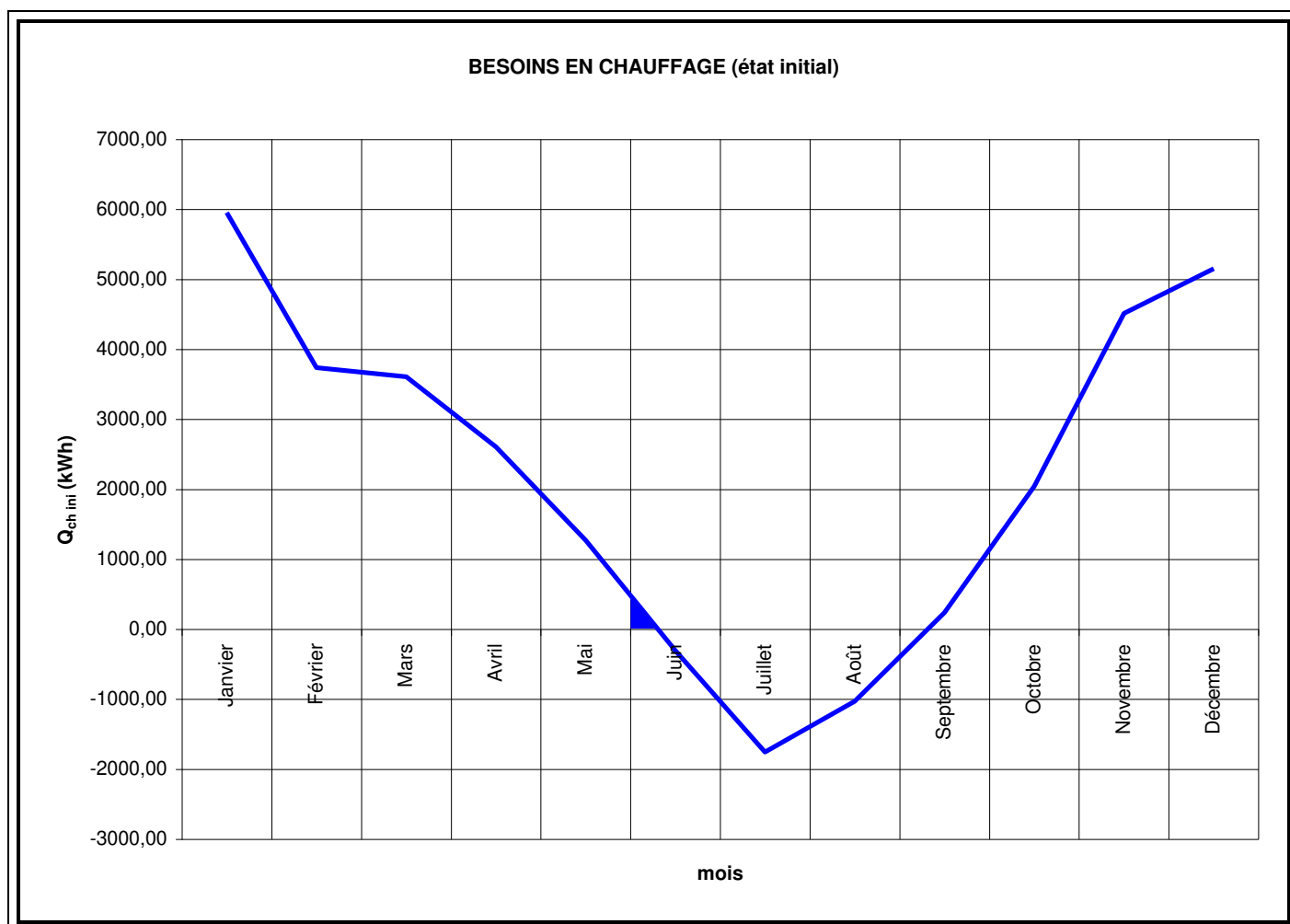
On chauffe les mois où  $T_{sc\ m} < T_{ai} + 1 = 21^{\circ}\text{C}$ .

Il s'agit d'une approximation, afin de prendre en compte de façon approchée le fait que si  $T_{sc\ m}$  est supérieure à la demande  $T_{ai}$ , il se peut que cette température soit inférieure à  $T_{ai}$  sur plusieurs jours du mois.

Toutefois, cela reste une approximation et la consigne de  $20^{\circ}\text{C}$  semble assez élevée.

Trois cas se présentent :

$Q_{ch\ m\ ini} > 0$	$T_{sc\ m} < T_{ai} + 1$	On chauffe pendant tout le mois.	$Q_{ch\ m\ final} = Q_{ch\ m\ ini}$
$Q_{ch\ m\ ini} < 0$	$T_{sc\ m} > T_{ai} + 1$	On ne chauffe pas ce mois-ci.	$Q_{ch\ m\ final} = 0$
$Q_{ch\ m\ ini} < 0$	$T_{sc\ m} < T_{ai} + 1$	On ne chauffe qu'une partie du mois.	<i>voir exemple ci-dessous</i>



#### Explication dans le cas hybride

On considère donc un mois où  $Q_{ch\ m\ ini} < 0$  mais où  $T_{sc\ m} < T_{ai} + 1$ .

Dans la situation initiale de notre sujet d'étude, le mois de *juin* correspond à ce cas.

En effet,  $Q_{ch\ juin\ ini} = -307,60\ \text{kWh}$  et  $T_{sc\ juin} = 20,8^{\circ}\text{C} < 21^{\circ}\text{C}$ .

On se reporte alors à la courbe des températures sans chauffage (modélisée par une fonction affine par morceaux), et on détermine l'intersection entre la courbe et la droite 21°C. On obtient la date du *17 juin*. On en déduit qu'il y aura 17 jours de chauffe. Puis on se réfère à la courbe des besoins en chauffage, plus particulièrement à la zone où  $Q_{ch\ m} > 0$  (triangle bleu sur le graphe). On considère la moyenne  $540/2 = 270$  kWh qui correspond aux 30 jours du mois de juin.

On en déduit que pour 17 jours,  $Q_{ch\ juin\ final} = 270 * 17/30 = 153$  kWh.

*On aurait pu procéder autrement, de façon un peu plus logique.*

En considérant  $T_{sc\ m}$  comme une fonction affine par morceaux (ce qui est toujours bien sûr une approximation, puisque nous ne disposons que des moyennes par mois), on aurait pu déterminer les périodes de chauffe en prenant les dates où la température ainsi modélisée était inférieure à 20°C.

#### **4. Besoins en chauffage annuels et coût annuel**

Les besoins en chauffage annuels sont de **29 292,28 kWh**.

Le mode de chauffage est **électrique**. Le coût du kWh est de **0,08 €** dans ce cas.

Le coût annuel est donc de **2 343,38 €**.

## 5. Détails des calculs

### CALCUL DES PERTES ET GAINS (ETAT INITIAL)

$A_{hab}$ (m <sup>2</sup> )	124,96
$V$ (m <sup>3</sup> )	312,40

$A_{s\text{ ouest}}$ (m <sup>2</sup> )	2,77
$A_{s\text{ est}}$ (m <sup>2</sup> )	7,85

$T_{ai}$ (°C)	20,00
$T_{ai} + 1$ (°C)	21,00

$I_i$ (W.m <sup>-2</sup> )	4,00
----------------------------	------

$H_t$ (W.K <sup>-1</sup> )	404,61
----------------------------	--------

Taux $r_a$ (h <sup>-1</sup> )	1,30
$Q_v$ (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	406,12

**Localisation** Brest  
**Zone climatique** Zone été : Ea  
 Zone hiver : H2  
**Usage** Habitation

#### Electricité

Prix du kWh 0,08 €

#### Coût initial

2 343,38 €

Mois	$T_{ae\ m}$ (°C)	$Q_{s\ m}$ (kWh)	$Q_{i\ m}$ (kWh)	$Q_{g\ m}$ (kWh)	$Q_{t\ m}$ (kWh)	$Q_{ra\ m}$ (kWh)	$Q_{p\ m}$ (kWh)	$\gamma_m$	$T_{sc\ m}$ (°C)	$Q_{ch\ m\ ini}$ (kWh)	Période de chauffe	$n_{chauffe\ m}$	$Q_{ch\ m\ final}$ (kWh)
Janvier	3,6	294,16	371,88	666,04	4 936,89	1 684,79	6 621,68	0,10	5,2	5 955,64	du 1 au 31	31	5 955,64
Février	7,8	409,12	338,89	748,00	3 346,78	1 142,14	4 488,91	0,17	9,8	3 740,91	du 1 au 28,25	28,25	3 740,91
Mars	8,6	623,45	371,88	995,33	3 431,74	1 171,13	4 602,88	0,22	11,1	3 607,55	du 1 au 31	31	3 607,55
Avril	10,4	784,43	359,88	1 144,31	2 796,67	954,40	3 751,07	0,31	13,3	2 606,76	du 1 au 30	30	2 606,76
Mai	13,8	859,08	371,88	1 230,96	1 866,39	636,93	2 503,32	0,49	16,8	1 272,36	du 1 au 31	31	1 272,36
Juin	17,3	1 002,71	359,88	1 362,59	786,56	268,43	1 054,99	1,29	20,8	-307,60	du 1 au 17	17	153,00
Juillet	20,7	1 100,38	371,88	1 472,25	-210,72	-71,91	-282,63	-5,21	24,3	-1 754,89	pas de chauffage	0	0,00
Août	19,0	1 058,75	371,88	1 430,63	301,03	102,73	403,76	3,54	22,5	-1 026,87	pas de chauffage	0	0,00
Septembre	16,8	651,28	359,88	1 011,16	932,22	318,13	1 250,36	0,81	19,4	239,20	du 1 au 30	30	239,20
Octobre	13,0	410,00	371,88	781,88	2 107,21	719,12	2 826,33	0,28	14,9	2 044,45	du 1 au 31	31	2 044,45
Novembre	6,7	319,83	359,88	679,71	3 874,55	1 322,25	5 196,80	0,13	8,4	4 517,08	du 1 au 30	30	4 517,08
Décembre	5,8	206,20	371,88	578,08	4 274,63	1 458,78	5 733,41	0,10	7,2	5 155,33	du 1 au 31	31	5 155,33

**Total** | 7 719,39 4 381,54 12 100,94 28 443,95 9 706,91 38 150,86

290,25 29 292,28

**Coût** 2 343,38 €



## Elaboration d'un programme de réhabilitation énergétique

Afin d'améliorer la performance énergétique de la maison et d'approcher les exigences réglementaires de la RT2000, il importe de définir une stratégie de réhabilitation énergétique à partir de l'étude technico-économique de différentes solutions. En effet, les réductions de consommation d'énergie ainsi que les coûts d'investissement inhérents à ces solutions sont à évaluer en vue de proposer un programme de travaux. Celui-ci résultera d'un compromis entre les dépenses engagées et les économies réalisables sur le chauffage.

### I Solutions techniques

#### 1. Description

TYPES DE SOLUTIONS TECHNIQUES					
Solutions techniques	Matériau j	$e_j$ (m)	$\lambda_j$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$U_j$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )	Coût (€.m <sup>-2</sup> ou €)
1. Isolation des murs verticaux par doublage intérieur	Polystyrène	0,080	0,025		22
	Plâtre	0,010	0,350		
2. Isolation des murs verticaux par doublage intérieur	Polystyrène	0,150	0,025		30
	Plâtre	0,010	0,350		
3. Isolation extérieure des murs verticaux	Laine de verre	0,100	0,040		54
4. Isolation des murs du garage	Fibralith	0,100	0,100		20
5. Isolation du plancher sur garage	Polystyrène	0,100	0,025		24
6. Isolation du plafond sous combles	Laine de verre	0,150	0,040		23
7. Rénovation d'une baie vitrée par double vitrage (S=0,57)				2,5	300
8. Reprise de l'étanchéité de la façade et installation d'une ventilation mécanique contrôlée (taux ra = 0,5)					460
9. Installation d'un programmeur d'intermittence					77

#### 2. A propos du facteur solaire de la solution 7 (double vitrage)

Nous avons pris  $S=0,57$  car le sujet proposait 0,47 en ayant choisi auparavant 0,5, tandis que nous avons travaillé avec 0,6. Evidemment, il s'agit d'une hypothèse de notre part.

Nous avons pu vérifier par simulations sur Excel que prendre un facteur de 0,47 perturbait beaucoup les résultats car l'éloignement avec la valeur de départ est très importante. Ainsi, comme nous le verrons plus loin, la mise en place de baies vitrées a un temps de retour de plus de 70 ans, lequel était de près de 400 ans avec  $S = 0,47$  !

### 3. Performances énergétiques des portes

Aucune des solutions proposées ne permet d'améliorer les performances énergétiques de la porte de maison et de la porte sur garage.

Il vient donc que nous ne pourrions pas respecter dans cette étude la réglementation pour ces deux éléments de l'enveloppe, quelle que soit la solution envisagée.

### 4. Performances énergétiques du plancher sur vide sanitaire

Il en est de même pour le plancher sur vide sanitaire ventilé a priori. Mais nous pouvons proposer une solution d'isolation en prenant exemple sur celle du plancher sur garage.

Nous ajoutons donc au tableau précédent la *solution 5bis* qui consiste à ajouter 10 cm de polystyrène sous le plancher du rez-de-chaussée, à 24 € le m<sup>2</sup>.

### 5. Détails pour l'installation d'un programmeur d'intermittence

Cette solution consiste à varier au cours de la journée le mode de chauffage.

Cela peut se traduire ou par un fonctionnement du chauffage une partie seulement de la journée, ou par la variation de la consigne de température intérieure.

C'est la seconde possibilité que nous mettons en œuvre.

Les heures "creuses" se caractérisent par une réduction de la consigne à 16°C, entre 22h et 6h, soit durant 8 heures de la journée.

Les heures "pleines" restent caractérisées par une consigne de 20°C, entre 6h et 22h, soit durant 16 heures de la journée.

Pour les calculs, on procède de la même façon que précédemment, en distinguant pour chaque mois les résultats pour les heures creuses et ceux pour les heures pleines :

$$\begin{array}{l}
 \boxed{Q_{t\ m\ creuses} = 8n_m H_t (T_{ai\ creuses} - T_{ae\ m})} \text{ et } \boxed{Q_{t\ m\ pleines} = 16n_m H_t (T_{ai\ pleines} - T_{ae\ m})} \\
 \boxed{Q_{ra\ m\ creuses} = 8n_m 0,34Q_v (T_{ai\ creuses} - T_{ae\ m})} \text{ et } \boxed{Q_{ra\ m\ pleines} = 16n_m 0,34Q_v (T_{ai\ pleines} - T_{ae\ m})} \\
 \boxed{Q_{s\ m\ creuses} = 8n_m (I_{ouestm} A_{s\ ouest} + I_{estm} A_{s\ est})} \text{ et } \boxed{Q_{s\ m\ pleines} = 16n_m (I_{ouestm} A_{s\ ouest} + I_{estm} A_{s\ est})} \\
 \boxed{Q_{i\ m\ creuses} = 8n_m A_{hab} I_i} \text{ et } \boxed{Q_{i\ m\ pleines} = 16n_m A_{hab} I_i}
 \end{array}$$

Enfin, on remarque que la température sans chauffage est identique aux heures creuses comme aux heures pleines pour un mois donné, puisque la distinction creuses/pleines ne change que la consigne de température, laquelle n'intervient pas dans le calcul de T<sub>sc</sub> :

$$T_{sc\ m\ creuses} = \frac{8n_m (I_{ouestm} A_{s\ ouest} + I_{estm} A_{s\ est} + A_{hab} I_i)}{8n_m (H_t + 0,34Q_v)} + T_{ae\ m} = \frac{16n_m (I_{ouestm} A_{s\ ouest} + I_{estm} A_{s\ est} + A_{hab} I_i)}{16n_m (H_t + 0,34Q_v)} + T_{ae\ m} = T_{sc\ m\ pleines}$$

## **II Remarques générales**

### **1. De la modification des dimensions**

Les fichiers Excel que nous avons créés calculent automatiquement la modification des dimensions de la maison à partir de la donnée d'une nouvelle épaisseur d'isolant par exemple. En effet, ajouter 8 cm de polystyrène et 1 cm de plâtre par doublage intérieur entraîne une modification de la surface habitable. Par contre, si l'isolation est extérieure, les dimensions sont naturellement inchangées.

Nous avons donc pris en compte la modification éventuelle de l'épaisseur des parois verticales.

En revanche, nous considérons que la hauteur sous plafond est invariable (2,5 m), même si l'on ajoute une couche d'isolant. On peut penser pour le plafond que la couche est ajoutée dans les combles et pour le plancher sur garage qu'elle se met en place du côté du garage, ce qui paraît cohérent.

Pour ne pas charger inutilement le rapport, nous n'insérerons pas les nouveaux plans et façades de la maison, mais préciserons si besoin est certains chiffres nouveaux. Dans tous les cas, les fichiers Excel correspondant à toutes les solutions envisagées sont disponibles.

### **2. Observations préliminaires**

Dans un premier temps, on peut considérer les surfaces par lesquelles les pertes sont les plus importantes afin de guider notre étude.

On observe dans la feuille de calcul de  $U_{bat}$  et  $U_{bat\ ref}$  que les surfaces fortement déperditives sont :

- les murs verticaux rez-de-chaussée extérieurs et étage
- le plancher sur vide sanitaire
- les baies vitrées

Il semblerait donc qu'il faudrait isoler ces surfaces.

D'autre part, on observe que les pertes par renouvellement d'air sont importantes également, ce qui laisse penser que la VMC serait appréciable.

Enfin, les liaisons ont été supposées dans ce projet conformes aux normes. Ainsi, la valeur des  $U_i$  correspondants est égale à la valeur réglementaire.

### **3. Démarche**

Nous avons dans un premier temps effectué l'étude de chaque solution prise séparément, afin d'en observer les effets sur les performances énergétiques de la maison, la modification des  $U_i$  concernés par la solution (notamment le respect ou non du garde-fou) et la durée d'amortissement.

A la suite de quoi nous avons pu dégager des solutions qui semblaient plus intéressantes que d'autres pour lesquelles le bilan était plus mitigé, ainsi que des solutions à exclure.

Puis nous avons envisagé des solutions mixtes, afin de nous rapprocher au plus près des exigences réglementaires pour les différentes parties de l'enveloppe, tout en essayant d'obtenir une durée d'amortissement des coûts raisonnable.

### III Comparatif des solutions techniques prises seules

#### 1. Tableau comparatif

#### COMPARATIF DES SOLUTIONS PRISES UNE A UNE





		Solutions											
		garde fou	état initial	1	2	3	4	5	5bis	6	7	8	9
$U_i$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) ou $\Psi_k$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Murs verticaux rez-de-chaussée extérieurs	0,52	1,46	0,26	0,15	0,33	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
	Murs verticaux rez-de-chaussée sur garage	0,52	1,97	1,97	1,97	1,97	0,66	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97
	Murs verticaux étage	0,52	1,06	0,24	0,14	0,31	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
	Plafond sous combles ventilés	0,30	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,19	0,67	0,67	0,67
	Plancher sur garage	0,39	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	0,22	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
	Plancher sur vide sanitaire ventilé	0,39	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	0,22	1,81	1,81	1,81	1,81
	Baies vitrées	2,60	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	2,50	3,45	3,45
	Porte d'entrée	1,95	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
	Porte d'accès au garage	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Liaison mur/plancher	0,65	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	Liaison mur/étage	0,91	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	Liaison mur/plafond	0,91	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

$U_{bat\ ref}$ (W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	0,66	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
$U_{bat}$ (W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	1,37	0,96	0,92	0,98	1,33	1,33	1,21	1,28	1,31	1,37	1,37	

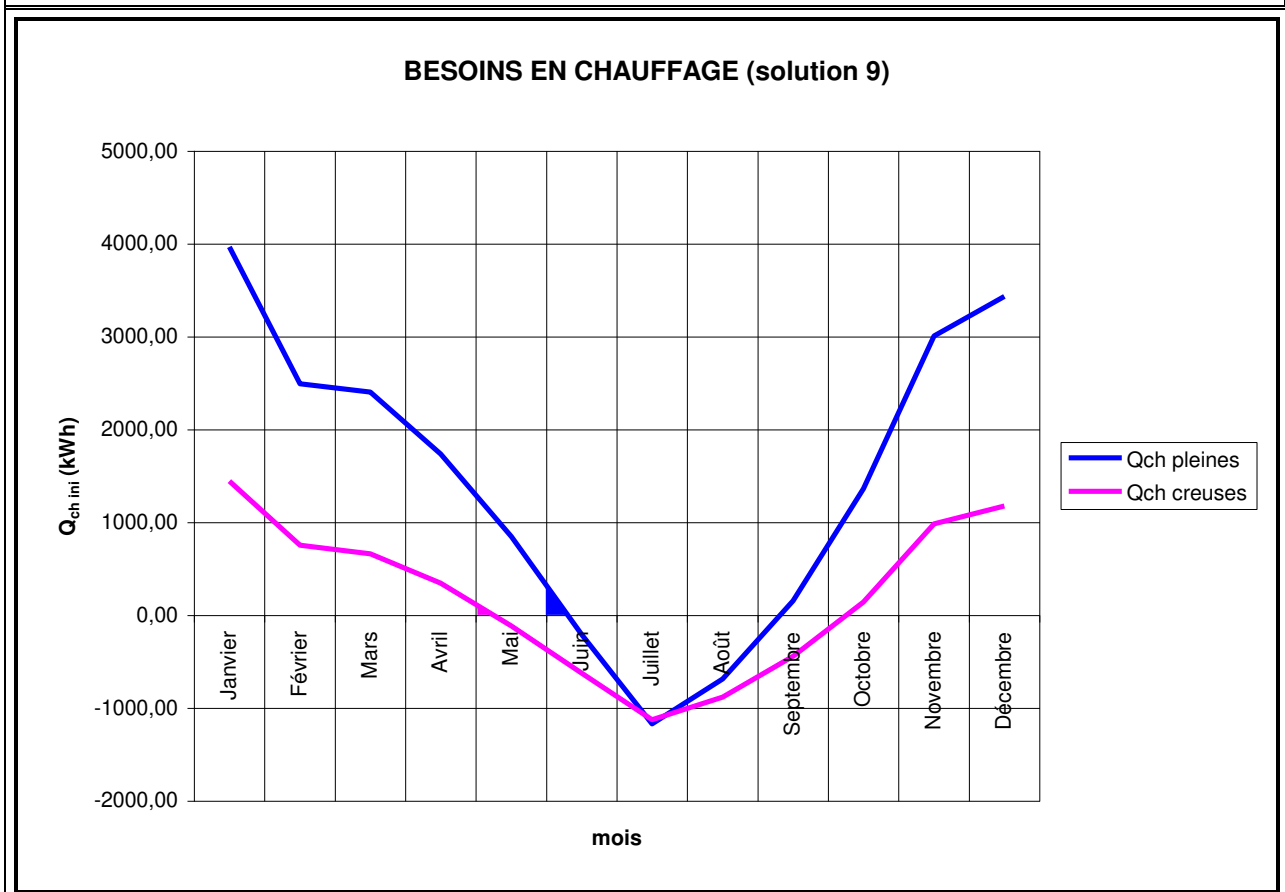
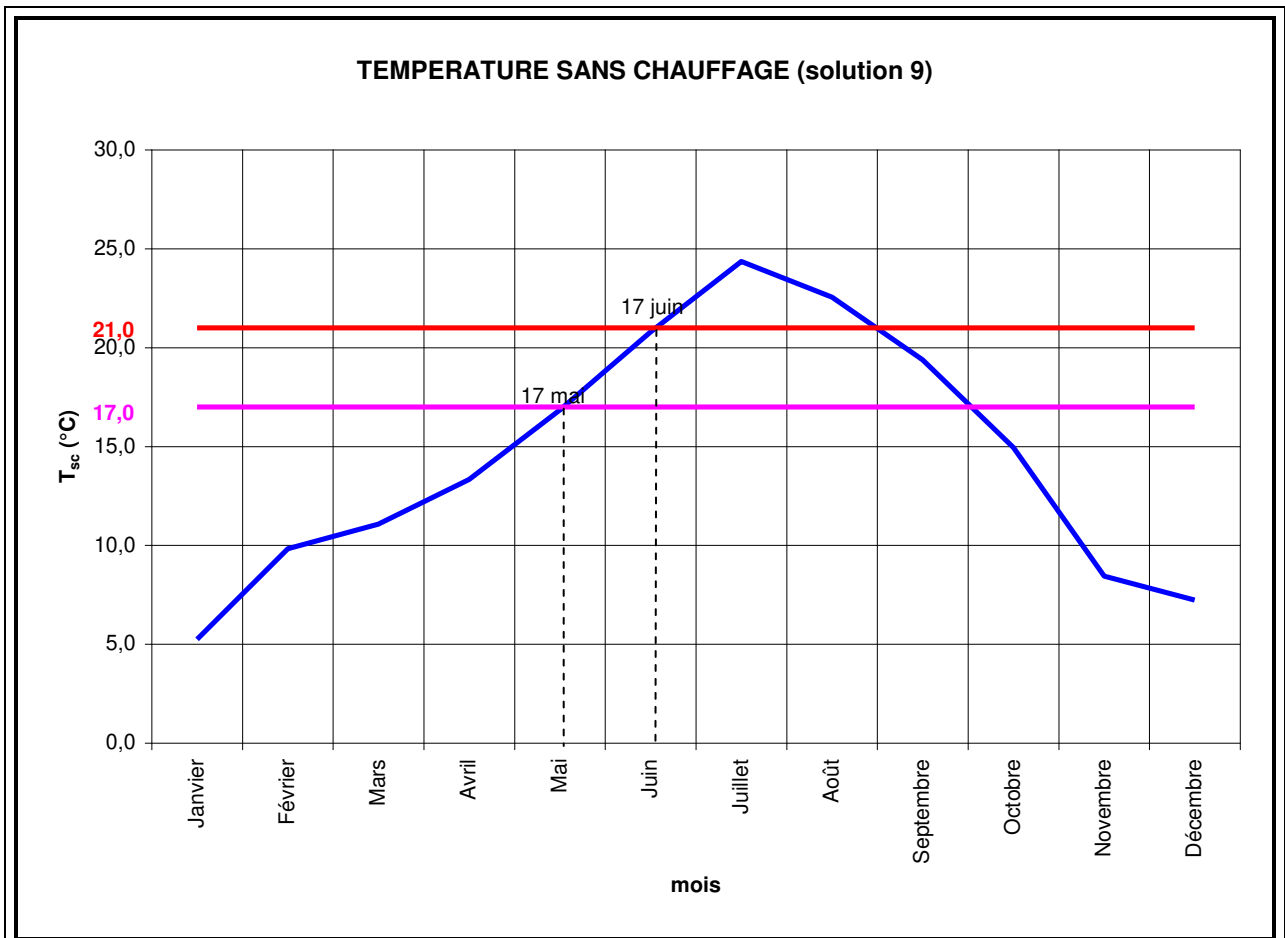
$Q_{ch\ final}$ (kWh)	29 292,28	20 411,41	19 020,99	21 746,89	28 359,81	28 615,08	26 012,55	27 385,77	28 360,25	23 349,95	25 068,95
Coût en électricité annuel (0,08 €/kWh)	2 343,38 €	1 632,91 €	1 521,68 €	1 739,75 €	2 268,78 €	2 289,21 €	2 081,00 €	2 190,86 €	2 268,82 €	1 868,00 €	2 005,52 €

Coût de la réhabilitation	-	2 686,31 €	3 589,65 €	6 763,77 €	297,30 €	197,81 €	1 387,50 €	1 544,36 €	5 313,00 €	460,00 €	77,00 €
---------------------------	---	------------	------------	------------	----------	----------	------------	------------	------------	----------	---------

Temps d'amortissement	-	3,78 ans	4,37 ans	11,21 ans	3,99 ans	3,65 ans	5,29 ans	10,13 ans	71,26 ans	0,97 ans	0,23 ans
-----------------------	---	----------	----------	-----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	----------	----------

	garde-fou non respecté mais $U_i$ non améliorabile
	garde-fou non respecté
	garde-fou respecté après réhabilitation
	garde-fou toujours non respecté après réhabilitation mais $U_i$ amélioré

## 2. Détails des calculs pour la solution 9



### CALCUL DES PERTES ET GAINS (SOLUTION 9)

A <sub>hab</sub> (m <sup>2</sup> )	124,96	A <sub>s ouest</sub> (m <sup>2</sup> )	2,77
V (m <sup>3</sup> )	312,40	A <sub>s est</sub> (m <sup>2</sup> )	7,85
I <sub>i</sub> (W.m <sup>-2</sup> )	4,00	Taux ra (h <sup>-1</sup> )	1,30
H <sub>t</sub> (W.K <sup>-1</sup> )	404,61	Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	404,61
T <sub>ai</sub> (°C)	20,00	T <sub>ai</sub> (°C)	16,00
T <sub>ai + 1</sub> (°C)	21,00	T <sub>ai + 1</sub> (°C)	17,00
h pleines	16,00	h creuses	8,00

Electricité	
Prix du kWh	0,08 €

Coût initial
2 343,38 €

Coût 9
2 005,52 €

Solution 9	
Prix	77,00 €

Coût de la solution 9	77,00 €
-----------------------	---------

Temps d'amortissement	0,23 ans
-----------------------	----------

Mois	Q <sub>s m</sub> (kWh)	Q <sub>i m</sub> (kWh)	Q <sub>g m</sub> (kWh)	Q <sub>t m</sub> (kWh)	Q <sub>ra m</sub> (kWh)	Q <sub>p m</sub> (kWh)	γ <sub>m</sub>	T <sub>sc m</sub> (°C)	Q <sub>ch m ini</sub> (kWh)	Période de chauffe	n <sub>chauffe m</sub>	Q <sub>ch m final</sub> (kWh)
Janvier	196,11	247,92	444,03	3 291,26	1 123,19	4 414,45	0,10	5,25	3 970,43	du 1 au 31	31	3 970,43
	98,05	123,96	222,01	1 244,26	424,62	1 668,88	0,13	5,25	1 446,87	du 1 au 31	31	1 446,87
Février	272,75	225,92	498,67	2 231,18	761,42	2 992,61	0,17	9,83	2 493,94	du 1 au 28,25	28,25	2 493,94
	136,37	112,96	249,33	749,82	255,89	1 005,71	0,25	9,83	756,38	du 1 au 28,25	28,25	756,38
Mars	415,64	247,92	663,55	2 287,83	780,75	3 068,58	0,22	11,07	2 405,03	du 1 au 31	31	2 405,03
	207,82	123,96	331,78	742,54	253,40	995,94	0,33	11,07	664,17	du 1 au 31	31	664,17
Avril	522,95	239,92	762,87	1 864,44	636,27	2 500,71	0,31	13,33	1 737,84	du 1 au 30	30	1 737,84
	261,48	119,96	381,44	543,80	185,58	729,37	0,52	13,33	347,94	du 1 au 30	30	347,94
Mai	572,72	247,92	820,64	1 244,26	424,62	1 668,88	0,49	16,85	848,24	du 1 au 31	31	848,24
	286,36	123,96	410,32	220,76	75,34	296,09	1,39	16,85	-114,23	du 1 au 17	17	31,34
Juin	668,47	239,92	908,39	524,38	178,95	703,33	1,29	20,79	-205,07	du 1 au 17	17	88,13
	334,24	119,96	454,20	-126,24	-43,08	-169,32	-2,68	20,79	-623,52	pas de chauffage	0	0,00
Juillet	733,58	247,92	981,50	-140,48	-47,94	-188,42	-5,21	24,35	-1 169,92	pas de chauffage	0	0,00
	366,79	123,96	490,75	-471,61	-160,95	-632,56	-0,78	24,35	-1 123,31	pas de chauffage	0	0,00
Août	705,83	247,92	953,75	200,69	68,49	269,17	3,54	22,54	-684,58	pas de chauffage	0	0,00
	352,92	123,96	476,88	-301,03	-102,73	-403,76	-1,18	22,54	-880,64	pas de chauffage	0	0,00
Septembre	434,18	239,92	674,10	621,48	212,09	833,57	0,81	19,39	159,47	du 1 au 30	30	159,47
	217,09	119,96	337,05	-77,69	-26,51	-104,20	-3,23	19,39	-441,25	pas de chauffage	0	0,00
Octobre	273,33	247,92	521,25	1 404,81	479,41	1 884,22	0,28	14,94	1 362,97	du 1 au 31	31	1 362,97
	136,67	123,96	260,63	301,03	102,73	403,76	0,65	14,94	143,14	du 1 au 31	31	143,14
Novembre	213,22	239,92	453,14	2 583,03	881,50	3 464,53	0,13	8,44	3 011,39	du 1 au 30	30	3 011,39
	106,61	119,96	226,57	903,09	308,19	1 211,28	0,19	8,44	984,71	du 1 au 30	30	984,71
Décembre	137,47	247,92	385,39	2 849,75	972,52	3 822,27	0,10	7,23	3 436,89	du 1 au 31	31	3 436,89
	68,73	123,96	192,69	1 023,50	349,28	1 372,79	0,14	7,23	1 180,09	du 1 au 31	31	1 180,09

Total	7 650,66	4 257,59	11 908,24	22 691,36	7 743,75	30 435,12
-------	----------	----------	-----------	-----------	----------	-----------

290,25	19 514,32
229,25	5 554,63
	25 068,95

Coût	2 005,52 €
------	------------

### 3. Exploitation

#### a. Solutions très rentables

##### Solution 8 : installation d'une VMC

La solution 8 donne des résultats très intéressants. A elle seule, elle permet une réduction de la facture énergétique annuelle de  $29\,292,28 - 23\,349,95 = 5\,942,33$  kWh, ce qui correspond à une réduction de **20,3%**. Ainsi, même si l'installation d'une VMC nécessite un investissement de 460 €, il faut **0,97 an**, soit un peu moins d'un an, pour amortir cet achat.

Cette solution est donc très rentable et nous semble donc indispensable à mettre en place lors de la réhabilitation de la maison.

##### Solution 9 : installation d'un programmeur d'intermittence

Avec une réduction de la facture énergétique de  $29\,929,28 - 25\,068,95 = 4\,223,33$  kWh, soit une réduction de **14,4%**, et un investissement de 77 €, qui se traduisent par un temps de retour de **0,23 an**, soit moins de 3 mois, l'installation d'un programmeur d'intermittence se révèle être elle aussi indispensable.

#### b. Solution à exclure

##### Solution 3 : isolation extérieure des murs

Les solutions 1, 2 et 3 étant incompatibles, il faut choisir l'une des 3. Or, la solution 3 est non seulement moins performante au niveau de l'amélioration des  $U_i$  des murs verticaux, donc de la facture énergétique, mais en plus est plus onéreuse et a un temps de retour de plus de 10 ans. Nous ne l'étudierons donc pas davantage.

#### c. Solutions peu intéressantes

##### Solution 4 : isolation des murs sur garage

La réduction de la facture énergétique est faible dans ce cas, car la surface des murs sur garage est relativement faible. D'autre part, la valeur du  $U_i$  est toujours supérieure au garde-fou, bien qu'elle ait été nettement améliorée (de 1,97 à 0,66  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Toutefois, cette solution ne coûte pas très cher (297,30 €), a un temps de retour correct (3,99 ans) et améliore le  $U_{\text{bat}}$  (0,98  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Elle peut donc éventuellement être mise en œuvre.

##### Solution 6 : isolation du plafond sous combles

L'isolation du plafond sous combles est peu intéressante en raison d'une faible performance énergétique et d'un coût assez élevé par rapport à cette performance (due à une assez grande surface) donc d'un temps de retour trop long (10,13 ans).

Elle permet néanmoins d'améliorer le  $U_i$  du plafond.

##### Solution 7 : double vitrage

Doubler le vitrage semblait au départ intéressant. Mais en fait, le gain énergétique est assez limité ( $29\,292,28 - 28\,360,25 = 932,03$  kWh par an, soit une réduction de seulement de 3,2%) et le coût très élevé (à raison de 300 € par  $\text{m}^2$  avec près de 18  $\text{m}^2$  de baies vitrées).

Il semblerait donc que le double vitrage ait avant tout un intérêt en acoustique plutôt qu'en énergétique.

Enfin, ne doubler qu'une partie des vitrages n'a pas d'intérêt non plus car les façades est et ouest reçoivent sensiblement la même quantité d'énergie venant de la voûte céleste.

L'unique intérêt de cette solution est de respecter le garde-fou pour les baies vitrées.

#### *d. Solutions satisfaisantes*

##### Solutions 1 et 2 : doublage intérieur des murs verticaux

Les solutions 1 et 2 ne diffèrent que par l'épaisseur du matériau isolant (8 cm de polystyrène contre 15). Le gain énergétique de la solution 2 par rapport à la solution 1 existe mais reste assez faible ( $20\,411,41 - 19\,020,99 = 1\,390,42$  kWh par an, soit une réduction de 6,8%) et le coût est plus élevé au départ. Il nous semble que la solution 2 n'apporte pas de gains significatifs, et nous nous contenterons d'étudier la solution 1.

Au niveau énergétique, la solution 1 est très intéressante avec un gain de  $29\,929,28 - 20\,411,41 = 8\,880,87$  kWh sur la consommation annuelle, ce qui représente une **baisse de 30,3%**. Le temps de retour, **3,78 ans**, est raisonnable.

##### Solution 5 : isolation du plancher sur garage

La solution 5 semble relativement peu intéressante au niveau global. En effet, les surfaces concernées sont faibles par rapport aux autres surfaces caractéristiques.

Néanmoins, l'isolation du plancher sur garage est peu onéreuse et permet de respecter le garde-fou pour cet élément de l'enveloppe.

##### Solutions 5bis : isolation du plancher sur vide sanitaire

Le gain énergétique réalisé par l'isolation du plancher sur vide sanitaire est moyen (11,2%), de même que le temps de retour (5,29 ans). Les surfaces et les coûts surfaciques sont analogues à ceux de la solution 1, mais les performances énergétiques sont moindres.

Cette solution peut être envisagée si le consommateur en a les moyens, et sera de toute façon à mettre en œuvre si l'on veut essayer de se rapprocher de la valeur de  $U_{\text{bat ref}}$ .

## **IV Propositions de réhabilitation énergétique**

### **1. Tableau comparatif**



## COMPARATIF DE SOLUTIONS HYBRIDES

### Solutions

garde fou	état initial	8+9	4,5,5bis,8,9	1,8,9	1,5,8,9	1,4,5,6,8,9	1,5,5bis,8,9	1,4,5,5bis,8,9	1,4,5,5bis,6,8,9	2,4,5,5bis,6,7,8,9
-----------	--------------	-----	--------------	-------	---------	-------------	--------------	----------------	------------------	--------------------

$U_i$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) ou $\Psi_k$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )												
	Murs verticaux rez-de-chaussée extérieurs	0,52	1,46	1,46	1,46	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Murs verticaux rez-de-chaussée sur garage	0,52	1,97	1,97	0,66	1,97	1,97	0,66	1,97	0,66	0,66	0,66	0,66
Murs verticaux étage	0,52	1,06	1,06	1,06	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,14
Plafond sous combles ventilés	0,30	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,19	0,67	0,67	0,19	0,19	0,19
Plancher sur garage	0,39	2,13	2,13	0,22	2,13	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Plancher sur vide sanitaire ventilé	0,39	1,81	1,81	0,22	1,81	1,81	1,81	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Baies vitrées	2,60	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45	2,50
Porte d'entrée	1,95	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Porte d'accès au garage	1,95	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Liaison mur/plancher	0,65	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Liaison mur/étage	0,91	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Liaison mur/plafond	0,91	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

$U_{bat\ ref}$ (W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	0,66	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$U_{bat}$ (W.K <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	1,37	1,37	1,12	0,96	0,93	0,79	0,78	0,72	0,63	0,54	0,54	0,54

$Q_{ch\ final}$ (kWh)	29 292,28	19 933,18	15 792,68	12 627,46	12 081,50	9 679,26	9 593,78	8 627,03	7 282,51	5 612,52	5 612,52	5 612,52
Coût en électricité annuel (0,08 €/kWh)	2 343,38 €	1 594,65 €	1 263,41 €	1 010,20 €	966,52 €	774,34 €	767,50 €	690,16 €	582,60 €	449,00 €	449,00 €	449,00 €

Coût de la réhabilitation	-	537,00 €	2 406,00 €	3 223,31 €	3 408,85 €	5 161,01 €	4 739,20 €	5 014,32 €	6 491,36 €	12 596,79 €	12 596,79 €	12 596,79 €
---------------------------	---	----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	-------------	-------------	-------------

Temps d'amortissement	-	0,72 ans	2,23 ans	2,42 ans	2,48 ans	3,29 ans	3,01 ans	3,03 ans	3,69 ans	6,65 ans	6,65 ans	6,65 ans
-----------------------	---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

	garde-fou non respecté mais $U_i$ non améliorable
	garde-fou non respecté
	garde-fou respecté après réhabilitation
	garde-fou respecté après réhabilitation mais $U_{bat} > U_{bat\ ref}$
	garde-fou toujours non respecté après réhabilitation mais $U_i$ amélioré

## 2. Réhabilitation petit budget : la solution minimale (8+9)

Il s'agit de l'installation d'une VMC couplée à celle d'un programmeur d'intermittence (solution 8+9).

Cette solution permet de faire une économie énergétique substantielle, à raison de  $29\,292,28 - 19\,933,18 = 9\,359,10$  kWh par an, soit une baisse de **32,0%**.

En revanche, cette solution ne modifie évidemment pas les performances énergétiques de l'enveloppe. On ne se rapproche donc pas des exigences réglementaires de la RT2000, avec  $U_{\text{bat}} = 1,37 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ .

Cependant, il nous semble que cette solution est très intéressante dans un premier temps au niveau des coûts de chauffage et abordable pour tous les budgets, avec un investissement de **537 €** et un temps de retour de **0,72 an**, soit moins de 9 mois !

## 3. Réhabilitation budget intermédiaire : solution 1+8+9

Il s'agit ici d'isoler les murs verticaux extérieurs au rez-de-chaussée et à l'étage et d'installer une VMC et un programmeur d'intermittence.

On réalise un gain énergétique de  $29\,292,28 - 12\,627,46 = 16\,664,82$  kWh par an, soit une réduction par rapport à l'état initial de **56,9%**, ce qui est appréciable. L'investissement est de **3 223,31 €** et le temps de retour **2,42 ans** (2 ans et 5 mois), ce qui est tout à fait convenable. Bien que la RT 2000 ne soit toujours pas respectée, les performances énergétiques de l'enveloppe sont améliorées, avec  $U_{\text{bat}} = 0,96 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ .

## 4. Réhabilitation grand budget : une solution qui respecte la RT2000 (solution 1+4+5+5bis+6+8+9)

Cette réhabilitation consiste en l'isolation des murs verticaux extérieurs, des murs sur garage, des planchers sur garage et sur vide sanitaire, du plafond sous combles et l'installation d'une VMC et d'un programmeur d'intermittence.

Cette solution apporte un gain énergétique très appréciable avec  $29\,292,28 - 7\,282,51 = 22\,009,77$  kWh, soit une réduction de **75,1%** !

L'investissement est assez conséquent : **6 491,36 €**, mais le temps d'amortissement reste honorable : **3,69 ans**, soit 3 ans et 8 mois et demi.

En outre, la RT2000 est respectée pour le bâtiment :  $U_{\text{bat}} = 0,63 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  pour  $U_{\text{bat ref}} = 0,67 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Qui plus est, le garde-fou est respecté pour la plupart des éléments de l'enveloppe, à l'exception des baies vitrées et des portes.

Cette solution nous paraît adéquate du point de vue énergétique, pour peu que les propriétaires puissent dépenser près de 6 500 €.

## **V Conclusion**

En fonction du budget, on peut améliorer les performances énergétiques de la maison par différents procédés. Ainsi, la réhabilitation minimale à mettre en œuvre consiste à installer une ventilation mécanique contrôlée et un programmateur d'intermittence. En second lieu, on peut isoler les murs extérieurs, qui sont des surfaces fortement déperditives. Enfin, si le budget est adapté, on peut isoler les autres murs, les planchers et le plafond.

Cette étude était orientée sur les besoins en chauffage, et donc leur optimisation. On obtient donc des résultats très intéressants. Par exemple, on peut parfois ne pas chauffer pendant plusieurs mois.

En revanche, on remarque que les températures sans chauffage peuvent être très élevées en été, atteignant parfois 30°C tandis que la température extérieure n'est au plus que de 20°C. Cela s'explique par une grande réduction des pertes, due à la réhabilitation énergétique, et des gains qui restent importants, à la fois internes et solaires. Nous avons déjà évoqué les seconds : nous pensons que le facteur solaire choisi ne correspond pas aux réalités climatiques de Brest. Il reste qu'avec ce choix de valeurs, il fait trop chaud dans la maison en été, ce qui laisse penser que cette étude est incomplète : il faudrait étudier le rafraîchissement en été, prendre en compte la ventilation supplémentaire à mettre en œuvre, les rideaux, volets etc. (il faudrait prendre un facteur d'ombre inférieur à 1), éventuellement la climatisation (à éviter si possible, en sachant que la maison se trouve à Brest)...

**VI Annexe : détails des calculs des pertes et gains pour les solutions proposées**

**CALCUL DES PERTES ET GAINS (SOLUTION 1,4,5,5bis,6,8,9) (1/2)**

$A_{hab}$ (m <sup>2</sup> )	119,65
$V$ (m <sup>3</sup> )	299,13

$A_{s\ ouest}$ (m <sup>2</sup> )	2,77
$A_{s\ est}$ (m <sup>2</sup> )	7,85

$T_{ai}$ (°C)	20,00
$T_{ai} + 1$ (°C)	21,00
$h$ pleines	16

$T_{ai}$ (°C)	16,00
$T_{ai} + 1$ (°C)	17,00
$h$ creuses	8

$I_i$ (W.m <sup>-2</sup> )	4,00
----------------------------	------

$H_t$ (W.K <sup>-1</sup> )	180,51
----------------------------	--------

Taux ra (h <sup>-1</sup> )	0,50
$Q_v$ (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	149,56

**Electricité**

Prix du kWh	0,08 €
-------------	--------

**Coût initial**

2 343,38 €
------------

**Solution 1**

Prix du m <sup>2</sup>	22,00 €
------------------------	---------

**Coût 1,4,5,5bis,6,8,9**

582,60 €
----------

**Solution 4**

Prix du m <sup>2</sup>	20,00 €
------------------------	---------

**Solutions 5 et 5bis**

Prix du m <sup>2</sup>	24,00 €
------------------------	---------

**Solution 6**

Prix du m <sup>2</sup>	23,00 €
------------------------	---------

**Solution 8**

Prix	460,00 €
------	----------

**Solution 9**

Prix	77,00 €
------	---------

Murs extérieurs (m <sup>2</sup> )	122,11
Murs sur garage (m <sup>2</sup> )	14,42
Plancher sur garage (m <sup>2</sup> )	7,18
Plancher sur VS (m <sup>2</sup> )	55,43
Plafond sous combles (m <sup>2</sup> )	64,22

Coût de la solution 1	2 686,31 €
Coût de la solution 4	288,30 €
Coût des solutions 5 et 5 bis	1 502,71 €
Coût de la solution 6	1 477,04 €
Coût de la solution 8	460,00 €
Coût de la solution 9	77,00 €
<b>Total solution 1,4,5,5bis,6,8,9</b>	<b>6 491,36 €</b>

Temps d'amortissement	3,69 ans
-----------------------	----------

**CALCUL DES PERTES ET GAINS (SOLUTION 1,4,5,5bis,6,8,9) (2/2)**

Mois	Q <sub>s m</sub> (kWh)	Q <sub>i m</sub> (kWh)	Q <sub>g m</sub> (kWh)	Q <sub>t m</sub> (kWh)	Q <sub>ra m</sub> (kWh)	Q <sub>p m</sub> (kWh)	γ <sub>m</sub>	T <sub>sc m</sub> (°C)	Q <sub>ch m ini</sub> (kWh)	Période de chauffe	n <sub>chauffe m</sub>	Q <sub>ch m final</sub> (kWh)
Janvier	196,11	237,39	433,49	1 468,33	413,65	1 881,97	0,23	7,38	1 448,48	du 1 au 31	31	1 448,48
	98,05	118,69	216,75	555,10	156,38	711,48	0,30	7,38	494,73	du 1 au 31	31	494,73
Février	272,75	216,33	489,07	995,40	280,41	1 275,81	0,38	12,48	786,74	du 1 au 28,25	28,25	786,74
	136,37	108,16	244,54	334,52	94,24	428,76	0,57	12,48	184,22	du 1 au 28,25	28,25	184,22
Mars	415,64	237,39	653,02	1 020,67	287,53	1 308,20	0,50	14,29	655,18	du 1 au 31	31	655,18
	207,82	118,69	326,51	331,27	93,32	424,59	0,77	14,29	98,08	du 1 au 31	31	98,08
Avril	522,95	229,73	752,68	831,78	234,32	1 066,11	0,71	17,18	313,42	du 1 au 30	30	313,42
	261,48	114,86	376,34	242,60	68,34	310,95	1,21	17,18	-65,39	pas de chauffage	0	0,00
Mai	572,72	237,39	810,11	555,10	156,38	711,48	1,14	20,86	-98,63	du 1 au 16	16	27,65
	286,36	118,69	405,05	98,49	27,74	126,23	3,21	20,86	-278,82	pas de chauffage	0	0,00
Juin	668,47	229,73	898,20	233,94	65,90	299,84	3,00	25,39	-598,36	pas de chauffage	0	0,00
	334,24	114,86	449,10	-56,32	-15,87	-72,18	-6,22	25,39	-521,29	pas de chauffage	0	0,00
Juillet	733,58	237,39	970,97	-62,67	-17,66	-80,33	-12,09	29,16	-1 051,30	pas de chauffage	0	0,00
	366,79	118,69	485,49	-210,40	-59,27	-269,67	-1,80	29,16	-755,16	pas de chauffage	0	0,00
Août	705,83	237,39	943,22	89,53	25,22	114,75	8,22	27,22	-828,47	pas de chauffage	0	0,00
	352,92	118,69	471,61	-134,30	-37,83	-172,13	-2,74	27,22	-643,74	pas de chauffage	0	0,00
Septembre	434,18	229,73	663,91	277,26	78,11	355,37	1,87	22,78	-308,54	pas de chauffage	0	0,00
	217,09	114,86	331,96	-34,66	-9,76	-44,42	-7,47	22,78	-376,38	pas de chauffage	0	0,00
Octobre	273,33	237,39	510,72	626,73	176,56	803,28	0,64	17,45	292,56	du 1 au 31	31	292,56
	136,67	118,69	255,36	134,30	37,83	172,13	1,48	17,45	-83,23	pas de chauffage	0	0,00
Novembre	213,22	229,73	442,95	1 152,37	324,64	1 477,00	0,30	10,69	1 034,05	du 1 au 30	30	1 034,05
	106,61	114,86	221,48	402,89	113,50	516,40	0,43	10,69	294,92	du 1 au 30	30	294,92
Décembre	137,47	237,39	374,85	1 271,36	358,16	1 629,51	0,23	9,07	1 254,66	du 1 au 31	31	1 254,66
	68,73	118,69	187,43	456,61	128,63	585,25	0,32	9,07	397,82	du 1 au 31	31	397,82

**Total**

7 650,66	4 076,73	11 727,38	10 123,28	2 851,85	12 975,12
----------	----------	-----------	-----------	----------	-----------

228,25	5 812,74
151,25	1 469,77
	7 282,51

<b>Coût</b>	<b>582,60 €</b>
-------------	-----------------

### CALCUL DES PERTES ET GAINS (SOLUTION 8+9)

A <sub>hab</sub> (m <sup>2</sup> )	124,96	A <sub>s ouest</sub> (m <sup>2</sup> )	2,77
V (m <sup>3</sup> )	312,40	A <sub>s est</sub> (m <sup>2</sup> )	7,85
I <sub>i</sub> (W.m <sup>-2</sup> )	4,00	Taux ra (h <sup>-1</sup> )	0,50
H <sub>t</sub> (W.K <sup>-1</sup> )	404,61	Q <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	156,20
T <sub>ai</sub> (°C)	20,00	T <sub>ai</sub> (°C)	16,00
T <sub>ai</sub> + 1 (°C)	21,00	T <sub>ai</sub> + 1 (°C)	17,00
h pleines	16,00	h creuses	8,00

<b>Electricité</b>	
Prix du kWh	0,08 €
<b>Solution 8</b>	
Prix	460,00 €
<b>Solution 9</b>	
Prix	77,00 €

<b>Coût initial</b>
2 343,38 €

<b>Coût 8+9</b>
1 594,65 €

<b>Coût de la solution 8</b>	460,00 €
<b>Coût de la solution 9</b>	77,00 €
<b>Total solution 8+9</b>	537,00 €
<b>Temps d'amortissement</b>	0,72 ans

Mois	Q <sub>s m</sub> (kWh)	Q <sub>i m</sub> (kWh)	Q <sub>g m</sub> (kWh)	Q <sub>t m</sub> (kWh)	Q <sub>ra m</sub> (kWh)	Q <sub>p m</sub> (kWh)	γ <sub>m</sub>	T <sub>sc m</sub> (°C)	Q <sub>ch m ini</sub> (kWh)	Période de chauffe	n <sub>chauffe m</sub>	Q <sub>ch m final</sub> (kWh)
Janvier	196,11	247,92	444,03	3 291,26	432,00	3 723,26	0,12	5,56	3 279,23	du 1 au 31	31	3 279,23
	98,05	123,96	222,01	1 244,26	163,32	1 407,57	0,16	5,56	1 185,56	du 1 au 31	31	1 185,56
Février	272,75	225,92	498,67	2 231,18	292,86	2 524,04	0,20	10,21	2 025,37	du 1 au 28,25	28,25	2 025,37
	136,37	112,96	249,33	749,82	98,42	848,24	0,29	10,21	598,91	du 1 au 28,25	28,25	598,91
Mars	415,64	247,92	663,55	2 287,83	300,29	2 588,12	0,26	11,52	1 924,57	du 1 au 31	31	1 924,57
	207,82	123,96	331,78	742,54	97,46	840,00	0,39	11,52	508,23	du 1 au 31	31	508,23
Avril	522,95	239,92	762,87	1 864,44	244,72	2 109,16	0,36	13,87	1 346,29	du 1 au 30	30	1 346,29
	261,48	119,96	381,44	543,80	71,38	615,17	0,62	13,87	233,74	du 1 au 30	30	233,74
Mai	572,72	247,92	820,64	1 244,26	163,32	1 407,57	0,58	17,41	586,94	du 1 au 31	31	586,94
	286,36	123,96	410,32	220,76	28,98	249,73	1,64	17,41	-160,59	pas de chauffage	0	0,00
Juin	668,47	239,92	908,39	524,38	68,83	593,20	1,53	21,43	-315,19	pas de chauffage	0	0,00
	334,24	119,96	454,20	-126,24	-16,57	-142,81	-3,18	21,43	-597,00	pas de chauffage	0	0,00
Juillet	733,58	247,92	981,50	-140,48	-18,44	-158,92	-6,18	25,02	-1 140,42	pas de chauffage	0	0,00
	366,79	123,96	490,75	-471,61	-61,90	-533,52	-0,92	25,02	-1 024,27	pas de chauffage	0	0,00
Août	705,83	247,92	953,75	200,69	26,34	227,03	4,20	23,20	-726,72	pas de chauffage	0	0,00
	352,92	123,96	476,88	-301,03	-39,51	-340,54	-1,40	23,20	-817,42	pas de chauffage	0	0,00
Septembre	434,18	239,92	674,10	621,48	81,57	703,05	0,96	19,87	28,95	du 1 au 30	30	28,95
	217,09	119,96	337,05	-77,69	-10,20	-87,88	-3,84	19,87	-424,93	pas de chauffage	0	0,00
Octobre	273,33	247,92	521,25	1 404,81	184,39	1 589,20	0,33	15,30	1 067,95	du 1 au 31	31	1 067,95
	136,67	123,96	260,63	301,03	39,51	340,54	0,77	15,30	79,92	du 1 au 31	31	79,92
Novembre	213,22	239,92	453,14	2 583,03	339,04	2 922,07	0,16	8,76	2 468,93	du 1 au 30	30	2 468,93
	106,61	119,96	226,57	903,09	118,54	1 021,63	0,22	8,76	795,05	du 1 au 30	30	795,05
Décembre	137,47	247,92	385,39	2 849,75	374,05	3 223,80	0,12	7,50	2 838,41	du 1 au 31	31	2 838,41
	68,73	123,96	192,69	1 023,50	134,34	1 157,84	0,17	7,50	965,15	du 1 au 31	31	965,15

<b>Total</b>	7 650,66	4 257,59	11 908,24	22 691,36	2 978,37	25 669,73
--------------	----------	----------	-----------	-----------	----------	-----------

273,25	15 566,63
212,25	4 366,55
	19 933,18

<b>Coût</b>	1 594,65 €
-------------	------------

### CALCUL DES PERTES ET GAINS (SOLUTION 1,8,9)

$A_{hab}$ (m <sup>2</sup> )	119,65	$A_{s\ ouest}$ (m <sup>2</sup> )	2,77
V (m <sup>3</sup> )	299,13	$A_{s\ est}$ (m <sup>2</sup> )	7,85
$I_i$ (W.m <sup>-2</sup> )	4,00	Taux ra (h <sup>-1</sup> )	0,50
$H_i$ (W.K <sup>-1</sup> )	276,47	$Q_v$ (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	149,56
$T_{ai}$ (°C)	20,00	$T_{ai}$ (°C)	16,00
$T_{ai} + 1$ (°C)	21,00	$T_{ai} + 1$ (°C)	17,00
h pleines	16,00	h creuses	8,00

<b>Solution 1</b>	
Prix du m <sup>2</sup>	22,00 €
<b>Solution 8</b>	
Prix	460,00 €
<b>Solution 9</b>	
Prix	77,00 €

<b>Coût initial</b>
2 343,38 €
<b>Coût 1,8,9</b>
1 010,20 €

Murs extérieurs (m <sup>2</sup> )	122,11
Coût de la solution 1	2 686,31 €
Coût de la solution 8	460,00 €
Coût de la solution 9	77,00 €
<b>Total solution 1,8,9</b>	<b>3 223,31 €</b>
<b>Temps d'amortissement</b>	<b>2,42 ans</b>

Mois	$Q_{s\ m}$ (kWh)	$Q_{i\ m}$ (kWh)	$Q_{g\ m}$ (kWh)	$Q_{t\ m}$ (kWh)	$Q_{ra\ m}$ (kWh)	$Q_{p\ m}$ (kWh)	$\gamma_m$	$T_{sc\ m}$ (°C)	$Q_{ch\ m\ ini}$ (kWh)	Période de chauffe	$n_{chauffe\ m}$	$Q_{ch\ m\ final}$ (kWh)
Janvier	196,11	237,39	433,49	2 248,94	413,65	2 662,59	0,16	6,27	2 229,09	du 1 au 31	31	2 229,09
	98,05	118,69	216,75	850,21	156,38	1 006,59	0,22	6,27	789,84	du 1 au 31	31	789,84
Février	272,75	216,33	489,07	1 524,58	280,41	1 805,00	0,27	11,11	1 315,93	du 1 au 28,25	28,25	1 315,93
	136,37	108,16	244,54	512,36	94,24	606,60	0,40	11,11	362,06	du 1 au 28,25	28,25	362,06
Mars	415,64	237,39	653,02	1 563,29	287,53	1 850,82	0,35	12,62	1 197,80	du 1 au 31	31	1 197,80
	207,82	118,69	326,51	507,38	93,32	600,71	0,54	12,62	274,19	du 1 au 31	31	274,19
Avril	522,95	229,73	752,68	1 273,99	234,32	1 508,31	0,50	15,19	755,63	du 1 au 30	30	755,63
	261,48	114,86	376,34	371,58	68,34	439,92	0,86	15,19	63,58	du 1 au 30	30	63,58
Mai	572,72	237,39	810,11	850,21	156,38	1 006,59	0,80	18,79	196,48	du 1 au 31	31	196,48
	286,36	118,69	405,05	150,84	27,74	178,59	2,27	18,79	-226,46	pas de chauffage	0	0,00
Juin	668,47	229,73	898,20	358,31	65,90	424,21	2,12	23,02	-473,99	pas de chauffage	0	0,00
	334,24	114,86	449,10	-86,26	-15,87	-102,13	-4,40	23,02	-551,23	pas de chauffage	0	0,00
Juillet	733,58	237,39	970,97	-95,99	-17,66	-113,65	-8,54	26,68	-1 084,62	pas de chauffage	0	0,00
	366,79	118,69	485,49	-322,26	-59,27	-381,53	-1,27	26,68	-867,01	pas de chauffage	0	0,00
Août	705,83	237,39	943,22	137,13	25,22	162,35	5,81	24,81	-780,87	pas de chauffage	0	0,00
	352,92	118,69	471,61	-205,70	-37,83	-243,53	-1,94	24,81	-715,14	pas de chauffage	0	0,00
Septembre	434,18	229,73	663,91	424,66	78,11	502,77	1,32	21,03	-161,14	pas de chauffage	0	0,00
	217,09	114,86	331,96	-53,08	-9,76	-62,85	-5,28	21,03	-394,80	pas de chauffage	0	0,00
Octobre	273,33	237,39	510,72	959,91	176,56	1 136,47	0,45	16,15	625,75	du 1 au 31	31	625,75
	136,67	118,69	255,36	205,70	37,83	243,53	1,05	16,15	-11,83	du 10 au 31	22	90,16
Novembre	213,22	229,73	442,95	1 765,00	324,64	2 089,64	0,21	9,52	1 646,69	du 1 au 30	30	1 646,69
	106,61	114,86	221,48	617,09	113,50	730,59	0,30	9,52	509,11	du 1 au 30	30	509,11
Décembre	137,47	237,39	374,85	1 947,26	358,16	2 305,41	0,16	8,11	1 930,56	du 1 au 31	31	1 930,56
	68,73	118,69	187,43	699,37	128,63	828,00	0,23	8,11	640,57	du 1 au 31	31	640,57

<b>Total</b>	7 650,66	4 076,73	11 727,38	15 505,17	2 851,85	18 357,01
--------------	----------	----------	-----------	-----------	----------	-----------

243,25	9 897,93
203,25	2 729,53
	12 627,46

<b>Coût</b>	<b>1 010,20 €</b>
-------------	-------------------

