

# 11\_ Coût global

Cette analyse présente un retour sur les simulations du coût global des maisons de Hunsbach et de Ludwigswinkel.

édition 2014

ÉCO-RÉNOVER UNE MAISON TRADITIONNELLE



Le projet est cofinancé par l'Union Européenne - Fonds européen de développement régional (FEDER) - dans le cadre du programme INTERREG IV Poas. Bénéficiaire: Opérateur de l'initiative, projet écoprojet.



Rheinland-Pfalz  
MINISTERIUM DER FINANZEN



Rheinland-Pfalz  
MINISTERIUM FÜR  
WIRTSCHAFT, KLIMASCHUTZ,  
ENERGIE UND  
LANDESPLANUNG



Région  
Alsace

La Région  
Lorraine





# PANOPTIQUE

*Porter un regard global sur l'Edifice*

## Sommaire

1. Introduction.....	2
2. Maison Hunsbach.....	4
2.1 Rénovation de base.....	4
2.2 Rénovation énergétique.....	5
2.2.1 Consommation énergétique et bouquet de travaux de rénovation .....	5
2.2.2 Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance .....	7
2.3. Etude du temps du retour sur investissement.....	11
2.4. Evaluation des impacts environnementaux.....	12
3. Maison Ludwigswinkel.....	15
3.1 Rénovation de base.....	15
3.2 Rénovation énergétique.....	16
3.2.1 Consommation énergétique et bouquet de travaux de rénovation .....	16
3.2.2 Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance .....	17
3.3 Etude du temps du retour sur investissement.....	20
3.4. Evaluation des impacts environnementaux.....	22
4. Conclusion.....	24

## 1. Introduction

L'étude et l'analyse du coût global du projet de rénovation seront effectuées pour les deux maisons de Hunspach et de Lundwingswinkel d'une part avec les données et prix français, d'autre part avec les allemands. Dans les deux cas, les hypothèses suivantes sont émises :

1. La durée de simulation est de 20 ans. Au-delà, certaines interventions telles que le remplacement de la chaudière, la grosse maintenance, des ravalements sont probablement nécessaires.

2. Le calcul du coût global est calculé pour une rénovation complète qui intègre des améliorations énergétiques telles que l'isolation de l'enveloppe, le remplacement des fenêtres, une très bonne étanchéité à l'air ainsi que le remplacement de la chaudière. Il est ensuite comparé avec le coût global d'une rénovation de base qui ne considère que le ravalement des façades, des revêtements intérieurs neufs, une nouvelle installation électrique, une révision de la toiture et des réparations structurelle minimales.

La comparaison de ces deux hypothèses permet d'évaluer le temps de retour sur l'investissement.

3. Pour le prix d'investissement, sont pris en compte le coût des travaux, le coût des études d'architecte et maîtrise d'œuvre, le coût du bureau de contrôle et le coût de la mission l'OPC.

5. Pour le prix du système de maintenance, nous prenons en compte le prix d'entretien de chaudière et le changement des filtres du système de ventilation.

6. Pour le coût des énergies, ce sont les prix actuels de Juin 2012 en France, en euros TTC/kWh qui sont retenus. Le prochain tableau montre les prix en euros TTC par kWh d'énergie finale.

TYPE D'ENERGIE	PRIX DU kwh en euros TTC
Bois granulé	0,06
Gaz	0,072
Electricité (option base)	0,119

Tableau 1 : prix des énergies exprimés en euros TTC/kWh d'énergie finale

Le taux d'inflation sur la consommation d'énergie varie entre 3%, 6%, 9% et 12%. Le scénario de 3% est par contre peu réaliste aujourd'hui puisqu'il est constaté une forte augmentation des prix des énergies fossiles. Le calcul du prix du coût d'exploitation sera ainsi simulé pour un taux d'inflation qui varie entre 6%, 9% et 12%. Les prochains diagrammes montrent l'évolution des prix en 20 ans en fonction ces différents taux d'inflation.

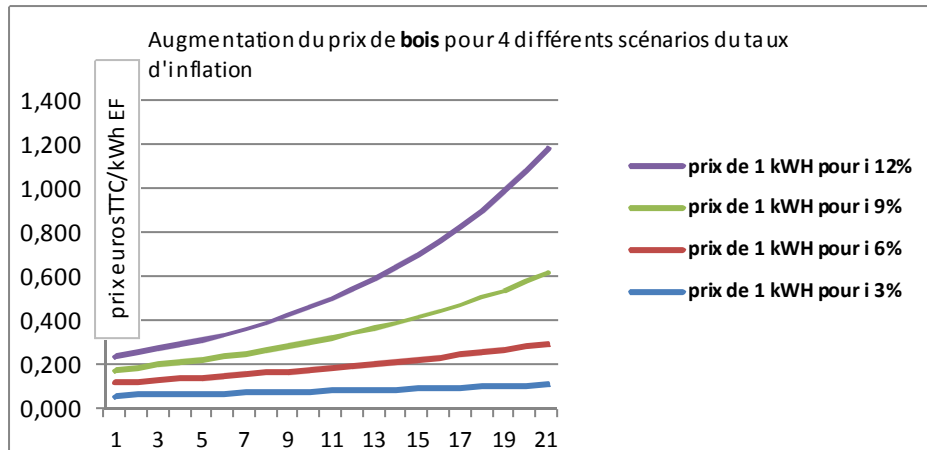


Figure 1 : Evolution du prix du **BOIS** en 20 ans, pour 4 scénarios du taux d'inflation. L'année 0 considéré est l'année 2012

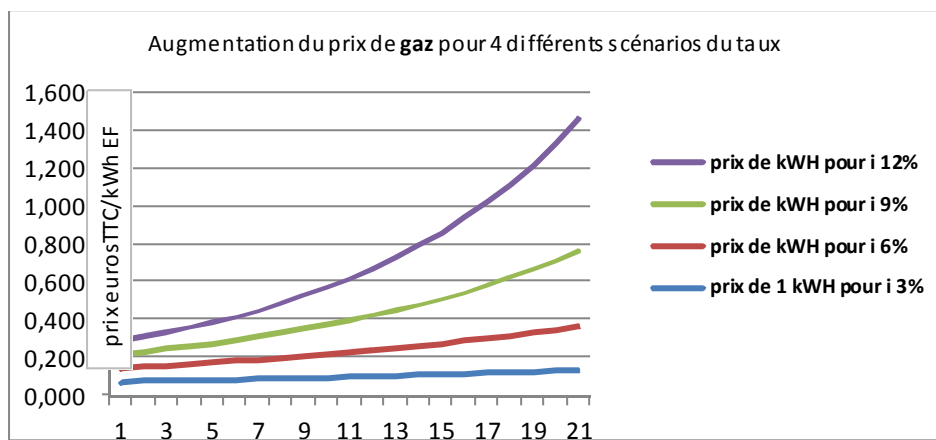


Figure 2 : Evolution du prix du **GAZ** en 20 ans, pour 4 scénarios du taux d'inflation. L'année 0 considéré est l'année 2012

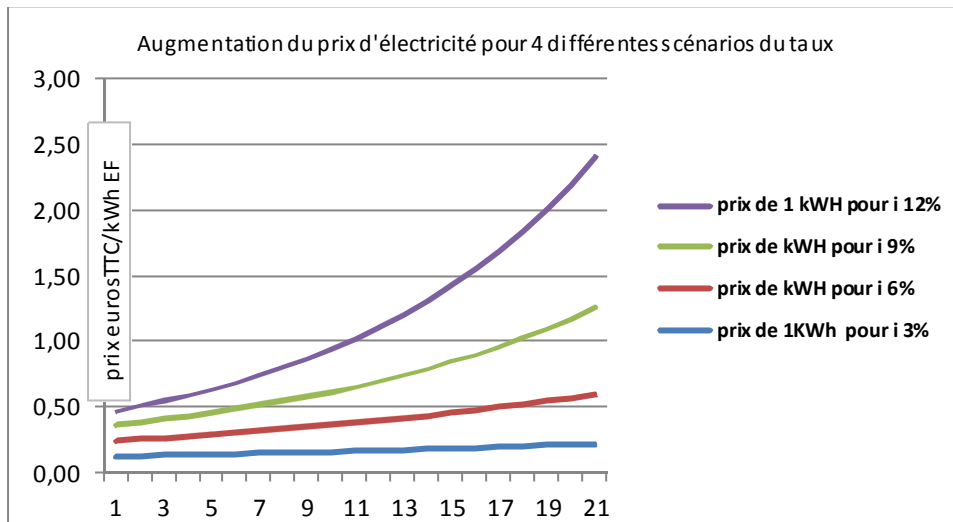


Figure 3 : Evolution du prix de l'**ELECTRICITE** en 20 ans, pour 4 scénarios du taux d'inflation. L'année 0 considéré est l'année 2012

## 2. Maison Hunspach

### 2.1 Rénovation de base

La rénovation de base n'intègre que le ravalement de façades, la révision de la toiture, les revêtements des murs et cloisons, des planchers et des plafonds sans isolation de l'enveloppe. Une installation électrique neuve est également prévue mais sans aucun système de ventilation mécanique ; la ventilation demeure naturelle par ouvrant des fenêtres et défauts constructifs. Les consommations énergétiques vont ainsi rester les mêmes qu'à l'état initial.

Coût de travaux prise en compte : **330 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON (400 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB)**.

#### ETAT INITIAL

	EF (kWh/an)	EP (kWh/an)
Chauffage Bois	91.308	99.018
Chauffage Elec	17.144	
ECS Elec	4.570	11.792
Eclairage	760	1.963
<b>TOTAL</b>	<b>113.783</b>	<b>112.772</b>

Tableau 2: Consommation énergétique annuelle sur les différents postes

- **Coût des consommations annuelles par poste –rénovation de base**

Coût annuel en euros ttc, pour tous les postes de consommation d'énergie					
CHAUFFAGE	ECLAIRAGE	AUXILIAIRES	VMC	ECS	TOTAL
7.519	168	0,00	0,00	545	<b>8.240</b>

Tableau 3: Les prix de la consommation énergétique annuelle sur les différents postes

- **Dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance cumulées en 20 ans**

Le coût de maintenance est considéré négligeable pour la rénovation de base puisque il n'y pas un système de ventilation mécanique contrôlé qui nécessite le changement des filtres. En outre, le poêle à bois ne nécessite pas de maintenance annuelle. Mais le prix de ramonage (environ 100.-/an) a été pris en compte.

	Taux d'inflation 6%	Taux d'inflation 9%	Taux d'inflation 12%
coût d'investissement en euros TTC	88.000	88.000	88.000
coût d'exploitation en euros TTC	205.269	287.000	<b>397.120</b>
coût de maintenance en euros TTC	1.400	1.400	<b>1.400</b>
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>293.600</b>	<b>376.400</b>	<b>504.300</b>

Tableau 4: Coût d'investissement, coût d'exploitation et coût de maintenance pour la rénovation de base

## 2.2 Rénovation énergétique

En sus des travaux de ravalement et de rafraîchissement précédents, la rénovation énergétique intègre l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, le remplacement des menuiseries, un traitement de l'étanchéité à l'air globale, la mise en place d'une VMC et le changement de production de chaleur.

Pris de travaux **612 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (757 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **GAZ**

**680 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (797 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **BOIS**

**700 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (850 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **PAC**

**590 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (730 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **ELECTRICITE**

Soit respectivement un surcoût d'environ 250.- et 400.- Euros TTC/m<sup>2</sup> par rapport à la solution de « base ». Les travaux « énergétiques » représentent environ l'équivalent des travaux de rénovation.

### 2.2.1 Consommation énergétique et bouquet de travaux de rénovation

- Les consommations en énergie finale prises en compte pour calculer le coût d'exploitation en 20 ans sont les suivants :

#### ETAT RENOVE

GAZ			BOIS PELLETS		
	EF (kWh/an)	EP (kWh/an)		EF (kWh/an)	EP (kWh/an)
Chauffage	19.946	19.948	Chauffage	19.158	11.494
ECS	5.255	5.255	ECS	5.463	3.278
Eclairage	760	1.963	Eclairage	760	1.963
Auxiliaires	319	822	Auxiliaires	278	718
Ventilation	175	453	Ventilation	175	453
<b>TOTAL</b>	<b>26.456</b>	<b>28.440</b>	<b>TOTAL</b>	<b>25.834</b>	<b>17.906</b>
PAC			ELECTRICITE		
	EF (kWh/an)	EP (kWh/an)		EF (kWh/an)	EP (kWh/an)
Chauffage	6.648	17.153	Chauffage	20.700	53.406
ECS	2.628	6.779	ECS	5.818	1.010
Eclairage	760	1.963	Eclairage	760	1.963
Auxiliaires	630	1.548	Auxiliaires	-	-
Ventilation	175	453	Ventilation	175	453
<b>TOTAL</b>	<b>11.011</b>	<b>27.892</b>	<b>TOTAL</b>	<b>27.453</b>	<b>70.828</b>

Tableau 5 : consommations d'énergie finale prises en compte pour calculer le coût d'exploitation en 20 ans

Pour la solution PAC, l'évaluation a été réalisée sans le calcul réglementaire, du fait de limites du logiciel pour produire de l'eau chaude sanitaire avec la PAC. Un COP moyen de 3 a ainsi été pris en compte pour les consommations de chauffage et un COP de 2 pour l'ECS.

- **Bouquets de travaux pour les 4 solutions**

<p><b>Solution gaz</b></p> <p>Etat rénové considéré :</p> <p>Isolation des murs - R = 2,5 Isolation des planchers bas - R = 2,5 Isolation du plancher des combles non chauffés - R = 5 Etanchéité <math>n_{50} = 10</math> (<math>I_4 = 4</math>) Ventilation simple flux Hygro B Chaudière gaz à condensation pour le chauffage et l'ECS accumulée (ballon de 300L) Remplacement des fenêtres par du double vitrage</p>	<p><b>Solution bois</b></p> <p>Etat rénové considéré :</p> <p>Isolation des murs - R = 2,5 Isolation des planchers bas - R = 2,5 Isolation du plancher combles non chauffés - R = 7. 5 Etanchéité <math>n_{50} = 9</math> (<math>I_4 = 2.7</math>) Ventilation simple flux Hygro B Chaudière à pellets pour le chauffage et l'ECS accumulée (ballon de 300L) Remplacement des fenêtres par du double vitrage.</p>
<p><b>Solution pac</b></p> <p>Etat rénové considéré :</p> <p>Isolation des murs - R = 2,5 Isolation des planchers bas - R = 2,5 Isolation du plancher des combles non chauffés - R = 5 Etanchéité <math>n_{50} = 10</math> (<math>I_4 = 4</math>) Ventilation simple flux Hygro B</p>	<p><b>Solution électricité :</b></p> <p>Etat rénové considéré :</p> <p>Isolation des murs - R = 2,5 Isolation des planchers bas - R = 2,5 Isolation du plancher des combles non chauffés - R = 5 Remplacement des fenêtres par du double vitrage Etanchéité <math>n_{50} = 10</math> (<math>I_4 = 4</math>) Ventilation simple flux Hygro B</p>

Le coût d'investissement et le temps de retour calculés ci-après ne prennent pas en compte les aides et les subventions régionales sur les chaudières bois et la pompe à chaleur. Cependant si le client fait réaliser ses travaux par une entreprise, il pourra bénéficier du crédit d'impôts majoré pour les bouquets de travaux (<http://ecocitoyens.ademe.fr/financer-mon-projet/renovation/credit-dimpot-developpement-durable>).

## 2.2.2 Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance

- **Coût des consommations annuelles par poste**

4 différentes sources d'énergies sont évaluées : bois pellets et gaz par chaudières centrales, pompe à chaleur eau/eau et effet joule électrique (convecteurs). Les prix de la consommation énergétique annuelle sur les différents postes de consommations sont montrés ci-dessous.

Coût annuel en euros ttc, pour tous les postes de consommation d'énergie						
	CHAUFFAGE	ECLAIRAGE	AUXILIAIRES	VMC	ECS	total
GAZ	1.451	168	38	21	382	<b>2.062</b>
BOIS	1.149	168	33	21	328	<b>1.700</b>
ELEC	2.467	168	0,00	21	691	<b>3.348</b>
PAC	788	168	71	21	311	<b>1.361</b>

Tableau 6 : Les prix de la consommation énergétique annuelle sur les différents postes

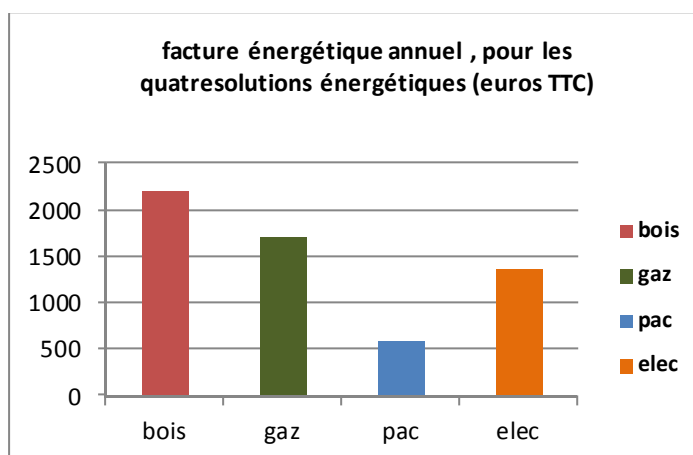


Figure 4 : facture énergétique annuelle pour le bois, le gaz, la pompe à chaleur et l'électricité

- **Dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance cumulées en 20 ans**

Les prochains tableaux montrent les valeurs des trois éléments du coût global, exprimées en euros TTC, pour les deux solutions énergétiques.



Taux d'inflation d'énergie annuel : 6%

	BOIS	GAZ	PAC	ELECTRICITE
coût d'investissement en euros TTC	182.000	164.000	188.000	156.000
coût d'exploitation en euros TTC	40.921	50.696	30.000	81.442
coût de maintenance en euros TTC	5.700	4.000	6.694	0
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>228.600</b>	<b>219.000</b>	<b>224.700</b>	<b>237.442</b>

Tableau 7 : Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance en 20 ans. Taux d'inflation d'énergie annuel : 6%

Taux d'inflation d'énergie annuel : 9%

	BOIS	GAZ	PAC	ELECTRICITE
coût d'investissement en euros TTC	182.000	164.000	188.000	156.000
coût d'exploitation en euros TTC	56.361	69.200	49.000	112.354
coût de maintenance en euros TTC	5.700	4.000	6.694	0
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>244.000</b>	<b>237.200</b>	<b>243.700</b>	<b>268.400</b>

Tableau 8 : Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance en 20 ans. Taux d'inflation d'énergie annuel : 9%

Taux d'inflation d'énergie annuel : 12%

	BOIS	GAZ	PAC	ELECTRICITE
coût d'investissement en euros TTC	182.000	164.000	188.000	156.000
coût d'exploitation en euros TTC	84.462	102.704	68.053	169.582
coût de maintenance en euros TTC	5.700	5.020	6.694	0
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>272.200</b>	<b>271.720</b>	<b>262.750</b>	<b>325.600</b>

Tableau 9 : Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance en 20 ans. Taux d'inflation d'énergie annuel : 12%

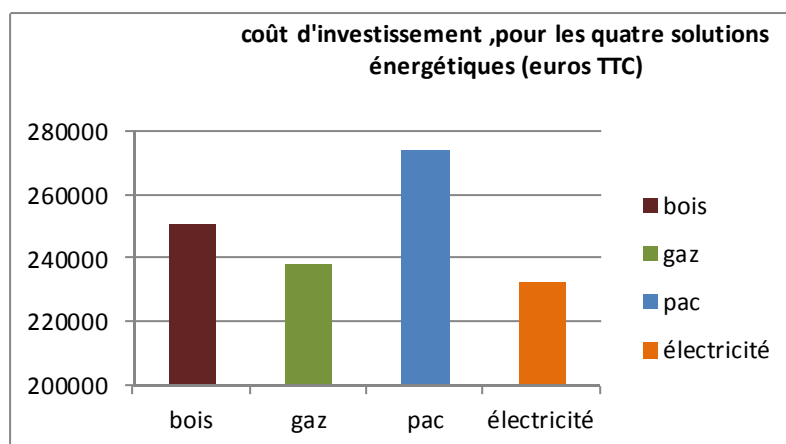


Figure 5 : Coût d'investissement pour les 4 solutions énergétiques

- Le coût d'investissement est plus important pour la solution PAC du fait de prix élevé des équipements techniques. Plus précisément, le coût des équipements est 90% supérieur à l'installation de chaudière bois et plus que 100% supérieure à l'installation de chaudière gaz à condensation. D'autre part, quant à la solution PAC, le bouquet de travaux n'implique que l'isolation de l'enveloppe sans le remplacement des fenêtres. Le changement des menuiseries par du double vitrage a un prix très important, ce qui augmente, le coût d'investissement des 3 autres solutions. Le coût d'investissement pour la solution électrique est le plus bas du fait de l'absence d'une chaudière ou d'une installation spécifique.

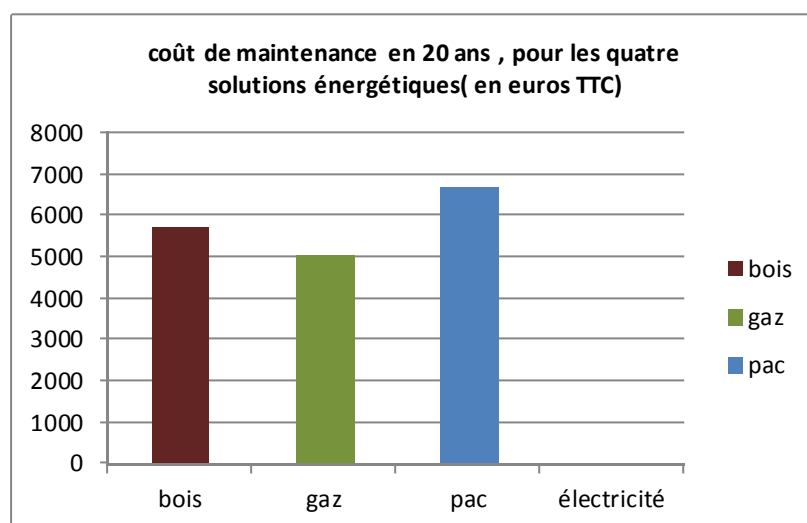


Figure 6 : Coût de maintenance en 20 ans pour les 4 solutions énergétiques

- Dans les trois cas, le coût de maintenance reste le plus élevé pour la solution PAC. Ensuite, le coût de maintenance du bois est 30% plus important par rapport au coût d'entretien du système au gaz. Pour la solution électrique, le coût de maintenance des équipements est nul du fait de l'absence d'une chaudière ou d'une pompe.

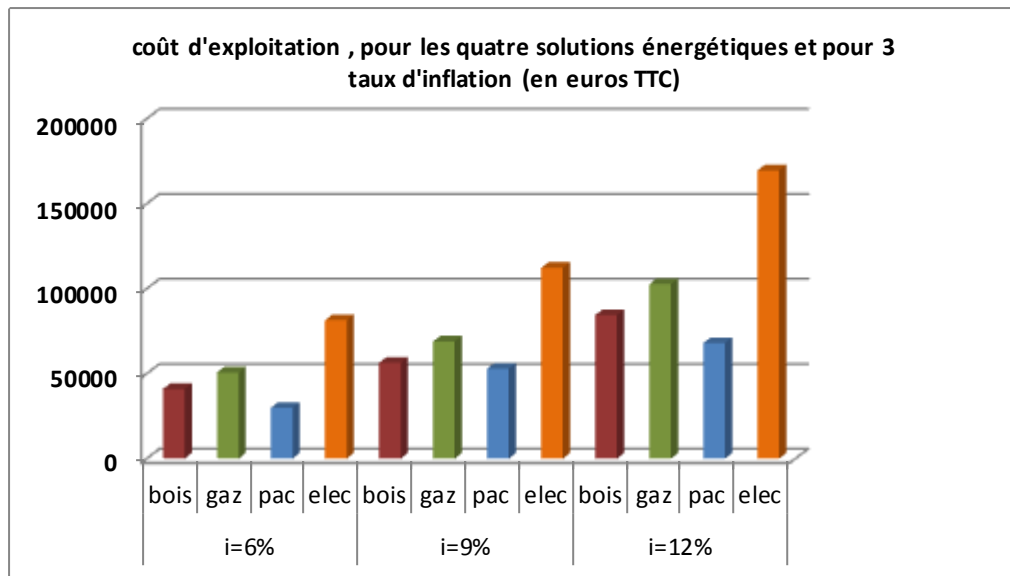


Figure 7 : Coût d'exploitation en 20 ans pour les 3 solutions énergétiques et pour 3 différents taux d'inflation

- Le coût d'exploitation est significativement inférieur pour la solution PAC du fait de la plus faible consommation en énergie finale. D'autre part, la solution électrique amène à un coût d'exploitation significativement élevé par rapport aux autres cas. Ensuite, l'utilisation des granulés bois pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire amène à un coût d'exploitation inférieur au gaz de l'ordre de 20 à 23%.

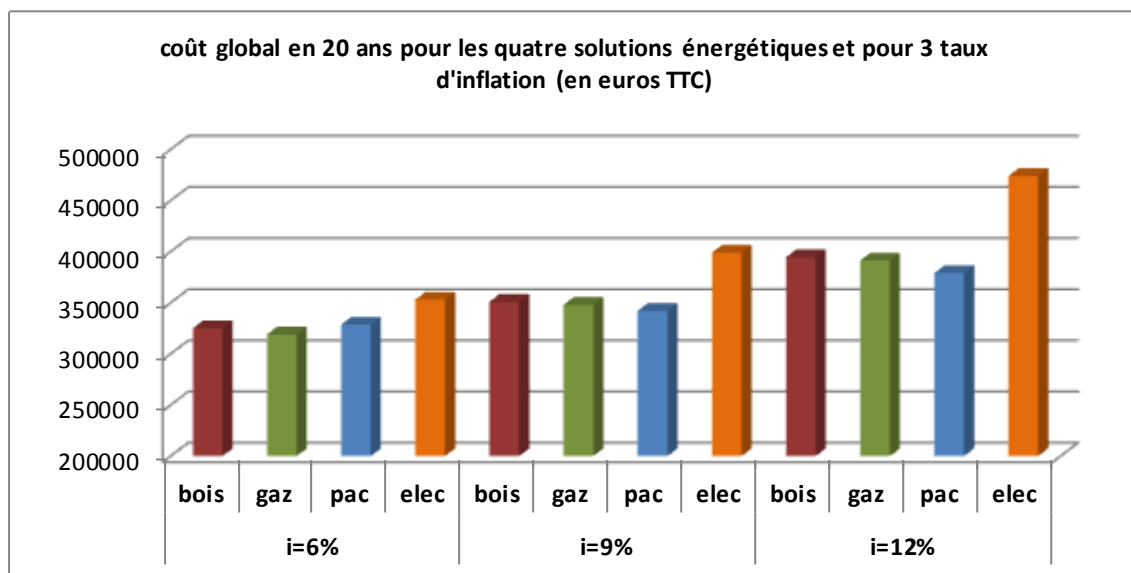


Figure 8 : Coût global en 20 ans pour les 3 solutions énergétiques et pour 3 différents taux d'inflation

- Le coût global en 20 ans est quasiment équivalent pour les cas de bois et de gaz, pour les trois taux d'inflation. Le coût global pour la solution électrique est toujours supérieur aux autres solutions du fait du prix d'une consommation énergétique très élevée.

## 2.3. Etude du temps du retour sur investissement

Selon l'article 3 du décret n° 2010-1664 du 29 décembre 2010, le calcul du « temps de retour sur investissement » est effectué sur les bases suivantes :

1. Le surcoût d'investissement par rapport à la situation de référence établie (rénovation base)
2. La valorisation monétaire des économies d'énergie.

Le temps de retour est alors défini comme :  $n = \ln[1 - (1-r) * (C_{inv}/C_{éco})] / \ln(r)$

n = temps de retour en années,

C<sub>inv</sub> = Cout d'investissement ou surcoût,

C<sub>éco</sub> = économies annuelles réalisées,

r = rapport du taux d'inflation (i) sur le taux d'actualisation (a) :  $r = (1+i)/(1+a)$ ,

i = inflation des prix (augmentation de l'énergie),

a = taux d'actualisation

Aucun dispositif n'est évalué avec un recours à une subvention ou prêt bonifié.

Pour un taux d'actualisation de 4%, nous obtenons les résultats suivants :

### Solution gaz

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	76.000	6.250	11
9%	76.000	6.250	10
12%	76.000	6.250	9

Tableau 10: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation –GAZ  
Temps de retour calculés sans subventions

### Solution bois

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	93.500	6.500	13
9%	93.500	6.500	11
12%	93.500	6.500	10

Tableau 11: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation –BOIS

**Solution électricité**

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	67.500	4.890	13
9%	67.500	4.890	12
12%	67.500	4.890	11

Tableau 12: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation – Electricité

**Solution pompe à chaleur**

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	100.000	6.880	13
9%	100.000	6.880	11
12%	100.000	6.880	10

Tableau 13: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation – PAC

Le temps de retour en tenant compte la subvention de Région Alsace (23% du bouquet de travaux du remplacement de la chaudière bois et 23% du bouquet de travaux pour la PAC) sera plus courte de l'ordre de 5 à 8 mois.

**2.4. Evaluation des impacts environnementaux**

Pour les combustibles fossiles et fissiles, les données disponibles et relatives aux émissions de CO<sup>2</sup> sont proportionnelles à la consommation d'énergie finale et non primaire (facteurs des émissions CO<sup>2</sup> selon l'arrêté du 15/09/2006 et le document de Certivéa / Cible 4). Elles varient en fonction du type de combustible de la façon suivante :

- Gaz naturel : Chauffage 0.234 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF
- Électricité : Chauffage (hiver) 0.180 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF
- Eclairage 0.080 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF
- Auxiliaires 0.052 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF

Pour les émissions de NO<sub>x</sub> :

- Bois : 0.32 g NO<sub>x</sub>/kWh EF
- Gaz naturel : 0.17 g NO<sub>x</sub>/kWh EF
- Électricité : 0.27 g NO<sub>x</sub>/kWh EF

Pour les émissions de SO<sup>2</sup> :

- Gaz naturel : -
- Electricité : 0.32g SO<sup>2</sup> /KWh EF

Pour les déchets radioactifs :

- Gaz naturel : -
- Electricité : 0.05 gRA/KWh EF

Le tableau suivant exprime les valeurs de diverses émissions polluantes :

<i>émissions CO<sup>2</sup> en 20 ans</i>		
	émissions en Kg CO <sup>2</sup> /an	émissions en KgCO <sup>2</sup> en 20 ans
GAZ	5.983	119.670
BOIS	84	1.680
ELEC	4.840	96.437
PAC	1770	35.415

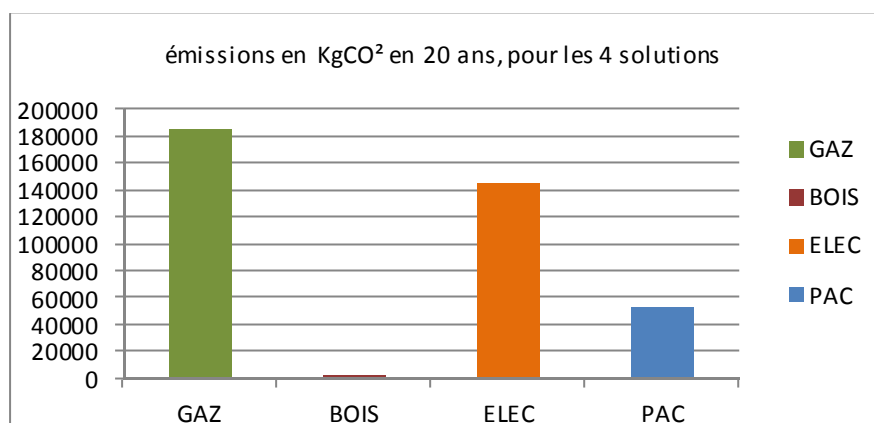
<i>émissions Nox en 20 ans</i>		
	émissions en g NOx/an	émissions en g NOx en 20 ans
GAZ	4.622	92.455
BOIS	8.206	164.124
ELEC	7.412	148.240
PAC	2.919	58.380

<i>émissions SO<sup>2</sup> en 20 ans</i>		
	émissions en g SO <sup>2</sup> /an	émissions en g SO <sup>2</sup> en 20 ans
GAZ	401	8.025
BOIS	388	7.763
ELEC	8.785	175.699
PAC	3.459	69.190

<i>émissions déchets radioactifs en 20 ans</i>		
	émissions en g déchets radioactifs/an	émissions en g déchets radioactifs en 20 ans
GAZ	62.7	1.254
BOIS	60.7	1.213
ELEC	1.372	27.453
PAC	540	10.811

Tableau 14: émissions de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Déchets radioactifs et de NO<sub>x</sub> en 20 ans

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont significativement supérieures pour la solution gaz, alors qu'elles sont faibles pour la solution bois. Ensuite, la solution électricité favorise la production des émissions en SO<sub>2</sub>, ce qui reste plus fiable pour le gaz et le bois.

Figure 9: Emissions en KgCO<sub>2</sub> en 20 ans, pour les 4 solutions énergétiques

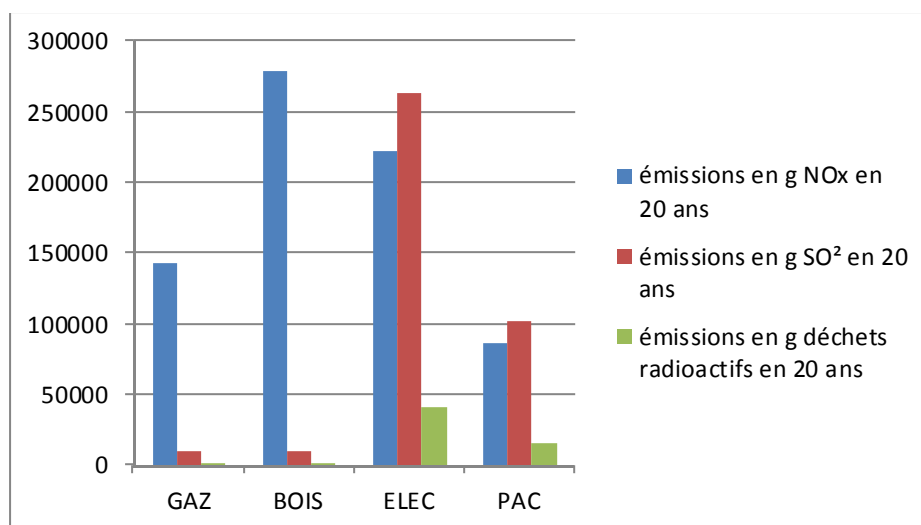


Figure 9: Emissions de gaz à effet de serre en 20 ans, pour les 4 solutions énergétiques

### 3. Maison Ludwigswinkel

#### 3.1 Rénovation de base

Tel qu'évoqué précédemment, la rénovation de base implique le ravalement de façades, de planchers et de plafonds sans isolation de l'enveloppe. Les consommations énergétiques vont ainsi rester les mêmes qu'à l'état initial. Coût de travaux pris en compte : **380 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (450 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB).

#### ETAT INITIAL

	EF (kWh/an)	EP (kWh/an)
Chauffage Bois	175.753	188.777
Chauffage Elec	32.297	
ECS Elec	4.139	10.680
Eclairage	968	2.496
<b>TOTAL</b>	<b>213.157</b>	<b>201.953</b>

Tableau 15: Consommation énergétique annuelle sur les différents postes

- **Coût des consommations annuelles par poste – rénovation de base**

Coût annuel en euros ttc, pour tous les postes de consommation d'énergie					
CHAUFFAGE	ECLAIRAGE	AUXILIAIRES	VMC	ECS	TOTAL
14.407	193	0,00	0,00	492	<b>15.000</b>

Tableau 16: Prix de consommation énergétique annuelle sur les différents postes

Les dépenses annuelles de chauffage sont significativement supérieures par rapport à la maison de Hunspach. Cet écart est expliqué au vu de la « perméabilité » de l'enveloppe, surtout au niveau de la toiture qui est en mauvais état. Les déperditions thermiques sont très importantes, augmentant ainsi les besoins en chauffage et par conséquent, le coût annuel.

- **Dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance cumulées en 20 ans**

Le tableau suivant montre le coût global évalué en 20 ans.

	Taux d'inflation 6%	Taux d'inflation 9%	Taux d'inflation 12%
coût d'investissement en euros TTC	122.360	122.360	122.360
coût d'exploitation en euros TTC	372.000	520.616	730.387
coût de maintenance en euros TTC	1.400	1.400	1.400
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>495.760</b>	<b>644.400</b>	<b>854.147</b>

Tableau 17: Coût d'investissement, coût d'exploitation et coût de maintenance pour la rénovation de base



Le coût d'investissement est 28% supérieur au coût calculé pour la maison Hunspach et est essentiellement lié aux travaux de toiture. Cette toiture est la paroi la plus déperditive et a un impact direct sur la consommation d'énergie de chauffage, son coût d'exploitation.

### 3.2 Rénovation énergétique

En sus des travaux de ravalement et de rafraîchissement précédents, la rénovation énergétique intègre l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, le remplacement des menuiseries, un traitement de l'étanchéité à l'air globale, la mise en place d'une VMC et le changement du mode de production de chaleur.

Prix de travaux : **740 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (870 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **GAZ**

**780 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (900 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **BOIS**

**722 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (849 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **ELECTRICITE**

**850 euros TTC/m<sup>2</sup> SHON** (1000 euros TTC/m<sup>2</sup> SHAB) pour la solution **PAC**

Soit respectivement un surcoût d'environ 350.- et 480.- Euros TTC/m<sup>2</sup> par rapport à la solution de « base ». Les travaux « énergétiques » représentent environ l'équivalent des travaux de rénovation.

#### 3.2.1 Consommation énergétique et bouquet de travaux de rénovation

- Les consommations d'énergie finale prises en compte pour calculer le coût d'exploitation en 20 ans sont les suivantes :

##### ETAT RENOVE

GAZ			BOIS PELLETS		
	EF (kWh/an)	EP (kWh/an)		EF (kWh/an)	EP (kWh/an)
Chauffage	33.786	33.786	Chauffage	36.392	21.835
ECS	5.701	5.702	ECS	5.861	3.516
Eclairage	968	2.496	Eclairage	968	2.496
Auxiliaires	485	1.252	Auxiliaires	471	1.216
Ventilation	175	453	Ventilation	175	453
<b>TOTAL</b>	<b>41.114</b>	<b>43.689</b>	<b>TOTAL</b>	<b>43.867</b>	<b>29.515</b>

PAC			ELECTRICITE		
	EF (kWh/an)	EP (kWh/an)		EF (kWh/an)	EP (kWh/an)
Chauffage	11.262	29.055	Chauffage	35.633	91.933
ECS	2.850	7.353	ECS	4.139	10.678
Eclairage	968	2.496	Eclairage	967	2.494

<b>Auxiliaires</b>	800	2.064	<b>Auxiliaires</b>	-	-
<b>Ventilation</b>	175	453	<b>Ventilation</b>	175	453
<b>TOTAL</b>	<b>16.055</b>	<b>41.480</b>	<b>TOTAL</b>	<b>41.192</b>	<b>105.558</b>

Tableau 18 : consommations d'énergie finale prises en compte pour calculer le coût d'exploitation en 20 ans

<p><b>Solution GAZ</b> Etat rénové considéré :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolation des murs - R = 2,5</li> <li>- Isolation des planchers bas - R = 2,5</li> <li>- Isolation de la toiture et du plancher des combles non chauffés - R = 5</li> <li>- Etanchéité <math>n_{50} = 10</math> (<math>I_4 = 4</math>)</li> <li>- Ventilation simple flux Hygro B</li> <li>- Chaudière gaz à condensation pour le chauffage et l'ECS accumulée (ballon de 300L)</li> </ul>	<p><b>Solution BOIS</b> Etat rénové considéré :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolation des murs - R = 2,5</li> <li>- Isolation des planchers bas - R = 2,5</li> <li>- Isolation de la toiture et du plancher combles non chauffés - R = 5</li> <li>=&gt; Etanchéité <math>n_{50} = 9</math> (<math>I_4 = 2.7</math>)</li> <li>- Ventilation simple flux Hygro B</li> <li>- Chaudière à pellets pour le chauffage et l'ECS accumulée (ballon de 300L)</li> </ul>
<p><b>Solution PAC</b> Etat rénové considéré :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolation des murs - R = 2,5</li> <li>- Isolation des planchers bas - R = 2,5</li> <li>- Isolation de la toiture et du plancher des combles non chauffés - R = 5</li> <li>- Etanchéité <math>n_{50} = 10</math> (<math>I_4 = 4</math>)</li> <li>- Ventilation simple flux Hygro B</li> </ul>	<p><b>Solution ELEC</b> Etat rénové considéré :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Isolation des murs - R = 2,5</li> <li>- Isolation des planchers bas - R = 2,5</li> <li>- Isolation de la toiture et du plancher combles non chauffés - R = 5</li> <li>=&gt; Etanchéité <math>n_{50} = 9</math> (<math>I_4 = 2.7</math>)</li> <li>- Ventilation simple flux Hygro B</li> </ul>

### 3.2.2 Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance

- **Coût des consommations annuelles par poste**

Pour les quatre différentes sources d'énergie, sont évalués ci-dessous les prix de la consommation énergétique annuelle sur les différents postes de consommations :

Coût annuel en euros ttc, pour tous les postes de consommation d'énergie						
	CHAUFFAGE	ECLAIRAGE	AUXILIAIRES	VMC	ECS	TOTAL
<b>GAZ</b>	2.459	193	58	21	415	<b>3.147</b>
<b>BOIS</b>	2.184	193	56	21	352	<b>2.800</b>
<b>ELEC</b>	4.220	193	0,00	21	492	<b>4.936</b>
<b>PAC</b>	1.329	193	97	20,77	343	<b>1.983</b>

Tableau 19 : Les prix de la consommation énergétique annuelle sur les différents postes

- **Dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance cumulées en 20 ans**

Les prochains tableaux expriment les valeurs des trois composants du coût global, exprimées en euros TTC, pour les quatre solutions énergétiques.

Taux d'inflation d'énergie annuel : 6%

	BOIS	GAZ	PAC	ELECTRICITE
coût d'investissement en euros TTC	251.200	238.280	274.000	232.500
coût d'exploitation en euros TTC	68.103	76.475	47.872	120.451
coût de maintenance en euros TTC	5.700	4.000	6.694	0
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>325.000</b>	<b>319.000</b>	<b>328.600</b>	<b>353.000</b>

Tableau 20: Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance en 20 ans. Taux d'inflation d'énergie annuel : 6%

Taux d'inflation d'énergie annuel : 9%

	BOIS	GAZ	PAC	ELECTRICITE
coût d'investissement en euros TTC	251.200	238.280	274.000	232.500
coût d'exploitation en euros TTC	94.000	105.491	61.471	166.255
coût de maintenance en euros TTC	5.700	4.000	6.694	0
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>351.000</b>	<b>348.000</b>	<b>342.200</b>	<b>399.000</b>

Tableau 21 : Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance en 20 ans. Taux d'inflation d'énergie annuel : 9%

Taux d'inflation d'énergie annuel : 12%

	BOIS	GAZ	PAC	ELECTRICITE
coût d'investissement en euros TTC	251.200	238.280	274.000	232.500
coût d'exploitation en euros TTC	137.578	155.000	98.197	241.577
coût de maintenance en euros TTC	5.700	4.000	6.694	0
<b>TOTAL DEPENSES EN 20 ANS</b>	<b>394.500</b>	<b>391.300</b>	<b>379.000</b>	<b>474.100</b>

Tableau 22: Répartition du coût d'investissement, du coût d'exploitation et du coût de maintenance en 20 ans. Taux d'inflation d'énergie annuel : 12%

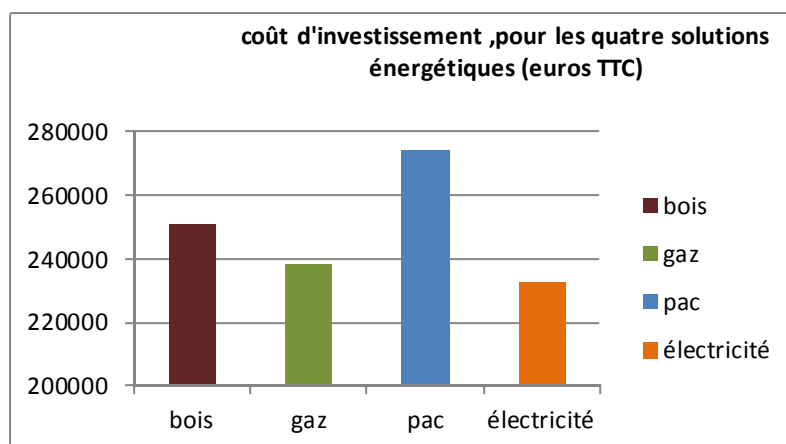


Figure 10: Coût d'investissement pour les 4 solutions énergétiques

- Le coût d'investissement est plus important pour la solution PAC du fait du prix élevé des équipements techniques. Plus précisément, le coût des équipements est supérieur de 95% à celui de l'installation d'une chaudière bois et plus que 100% supérieure à l'installation d'une chaudière gaz à condensation. Le coût d'investissement de la solution tout électrique est le plus bas du fait de l'absence d'une chaudière ou d'une installation spécifique.
- Comme évoqué pour la maison alsacienne, le coût de maintenance reste plus élevé pour la solution PAC. Le coût de maintenance du bois reste 30% plus important par rapport à celui du système au gaz. Pour la solution électrique, le coût de maintenance des équipements est nul du fait de l'absence d'une chaudière ou d'une pompe.

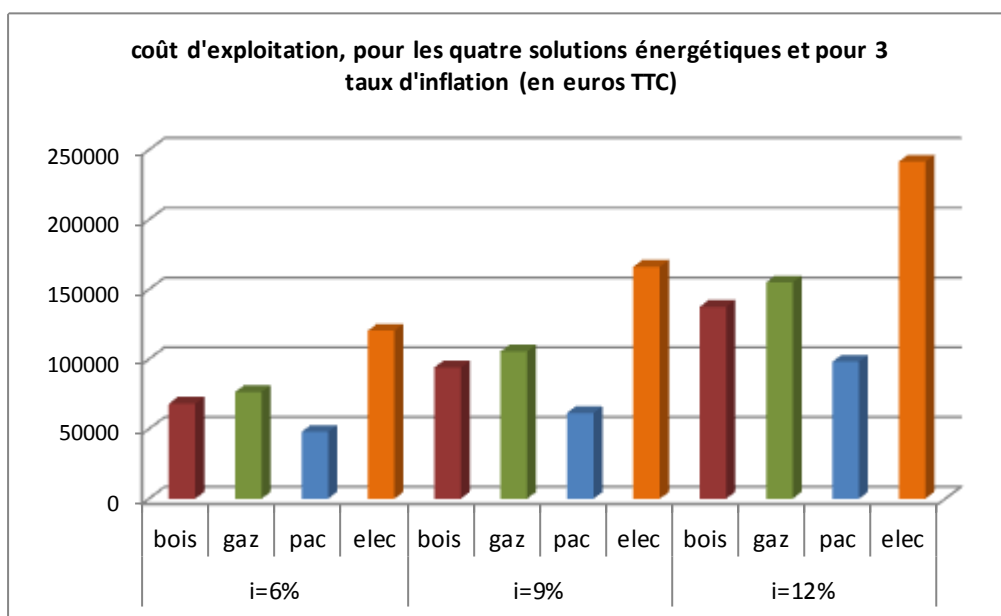


Figure 11: Coût d'exploitation pour les 4 solutions énergétiques et pour trois taux d'inflation

- Comme pour la maison de Hunspach, le coût d'exploitation est significativement inférieur pour la solution PAC en raison de la plus faible consommation en énergie finale. D'autre part, la solution électrique entraîne un coût d'exploitation significativement supérieur aux autres cas. Ensuite, le coût d'exploitation du gaz est 20-23 % supérieur au coût d'exploitation du bois

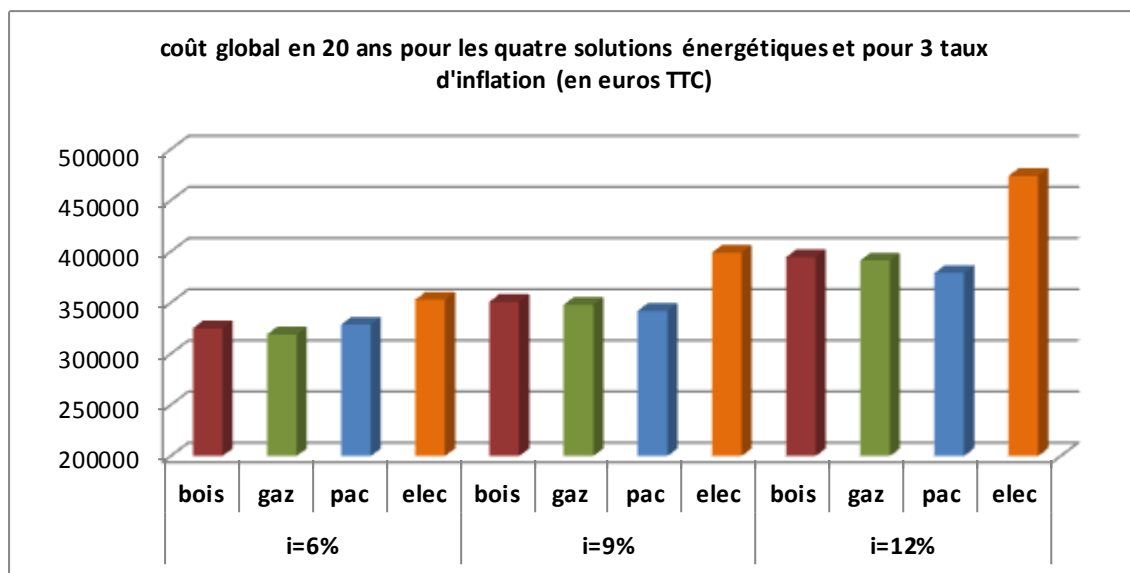


Figure 12: Coût global en 20 ans pour les 4 solutions énergétiques et pour trois taux d'inflation

- Le coût global en 20 ans est quasiment équivalent pour le bois et le gaz, et ce pour les trois taux d'inflation. Pour la solution PAC, les dépenses cumulées en 20 ans restent inférieures par rapport aux autres cas analysés, pour un taux d'inflation de 9% et de 12%. Ensuite, le coût global pour la solution électrique est toujours supérieur aux autres solutions du fait du prix de consommation énergétique très élevé.

### 3. 3 Etude du temps du retour sur investissement

Selon l'article 3 du décret n° 2010-1664 du 29 décembre 2010, le calcul du « temps de retour sur investissement » est effectué sur les bases suivantes :

1. Le surcoût d'investissement par rapport à la situation de référence établie (rénovation base)
2. La valorisation monétaire des économies d'énergie.

Le temps de retour est alors défini comme :  $n = \ln[1 - (1-r) \cdot (C_{inv}/C_{éco})] / \ln(r)$

n = temps de retour en années,

$C_{inv}$  = Cout d'investissement ou surcoût,

$C_{éco}$  = économies annuelles réalisées,

$r =$  rapport du taux d'inflation ( $i$ ) sur le taux d'actualisation ( $a$ ) :  $r = (1+i)/(1+a)$ ,

$i =$  inflation des prix (augmentation de l'énergie),

$a =$  taux d'actualisation

Pour un taux d'actualisation de 4%, nous obtenons les résultats suivants :

### Solution gaz

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	116.000	11.800	9
9%	116.000	11.800	8
12%	116.000	11.800	8

Tableau 23: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation –GAZ

### Solution bois

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	128.800	12.200	10
9%	128.800	12.200	9
12%	128.800	12.200	8

Tableau 24: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation –BOIS

### Solution électricité

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	110.000	10.070	10
9%	110.000	10.070	9
12%	110.000	10.070	8

Tableau 25: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation –ELECTRICITE

### Solution PAC

Taux d'inflation annuelle	Surcoût d'investissement	Economies annuelles	Temps de retour
6%	152.000	13.000	10
9%	152.000	13.000	9
12%	152.000	13.000	9

Tableau 26: Temps de retour sur investissement pour 3 différents scénarios du taux d'inflation –PAC

Le temps de retour reste quasiment similaire pour les 4 solutions énergétiques. En tenant compte de la subvention de la Région Alsace (23% du bouquet de travaux du remplacement de la chaudière bois et 23% du bouquet de travaux pour la PAC) sera plus court de l'ordre de 5 à 8 mois.

### 3.4. Evaluation des impacts environnementaux

Pour les combustibles fossiles et fissiles, les données disponibles et relatives aux émissions de CO<sup>2</sup> sont proportionnelles à la consommation d'énergie finale et non primaire (facteurs des émissions CO<sup>2</sup> selon l'arrêté du 15/09/2006 et le document de Certivéa / Cible 4). Elles varient en fonction du type de combustible de la façon suivante :

- Gaz naturel : Chauffage 0.234 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF
- Électricité : Chauffage (hiver) 0.180 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF
- Eclairage 0.080 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF
- Auxiliaires 0.052 kg CO<sub>2</sub>/kWh EF

Pour les émissions de NO<sub>x</sub> :

- Bois : 0.32 g NO<sub>x</sub>/kWh EF
- Gaz naturel : 0.17 g NO<sub>x</sub>/kWh EF
- Électricité : 0.27 g NO<sub>x</sub>/kWh EF

Pour les émissions de SO<sup>2</sup> :

- Gaz naturel : -
- Electricité : 0.32g SO<sup>2</sup> /KWh EF

Pour les déchets radioactifs :

- Gaz naturel : -
- Electricité : 0.05 gRA/KWh EF

Le prochain tableau montre les valeurs de diverses émissions polluantes

<i>émissions CO<sup>2</sup> en 20 ans</i>		
	<b>émissions en Kg CO<sup>2</sup>/an</b>	<b>émissions en KgCO<sup>2</sup> en 20 ans</b>
GAZ	9.324	186.492
BOIS	111	2.220
ELEC	7.245	144.908
PAC	2.668	53.366

<i>émissions Nox en 20 ans</i>		
	<b>émissions en g NO<sub>x</sub>/an</b>	<b>émissions en g NO<sub>x</sub> en 20 ans</b>
GAZ	7.152	143.047
BOIS	13.956	279.134
ELEC	11.121	222.436
PAC	4.334	86.697

<i>émissions SO<sup>2</sup> en 20 ans</i>		
	<b>émissions en g SO<sup>2</sup>/an</b>	<b>émissions en gSO<sup>2</sup> en 20 ans</b>
GAZ	521	10.419
BOIS	516	10.320
ELEC	13.181	263.628
PAC	5.137	102.752

émissions déchets radioactifs en 20 ans		
	émissions en g déchets radioactifs/an	émissions en g déchets radioactifs en 20 ans
GAZ	81.4	1.628
BOIS	80.7	1.614
ELEC	2.059	41.192
PAC	802	16.040

Tableau 27: émissions de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Déchets radioactifs et de NO<sub>x</sub> en 20 ans

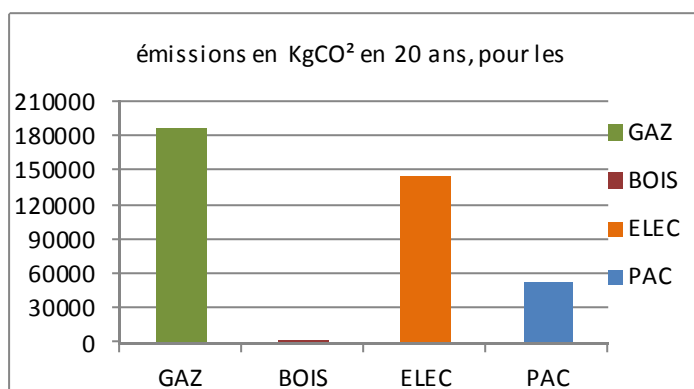


Figure 13: Emissions en KgCO<sub>2</sub> en 20 ans, pour les 4 solutions énergétiques

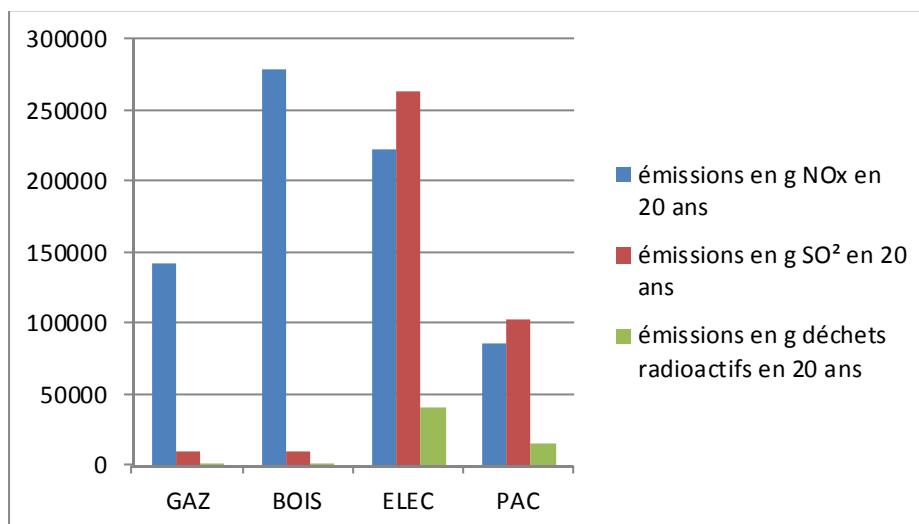


Figure 14: Emissions degaz à effet de serre en 20 ans, pour les 4 solutions énergétiques



## 4. Conclusion

Cette analyse vise à évaluer le coût global en 20 ans pour le projet de rénovation de deux maisons du patrimoine. Dans un premier temps, le coût d'investissement a été évalué pour une rénovation de base et ensuite pour une rénovation énergétique qui implique des améliorations énergétiques de l'enveloppe des bâtiments. Quant à la rénovation énergétique, 4 systèmes de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire ont été analysés : chaudière à bois, chaudière à gaz, pompe à chaleur et énergie électrique. Les éléments suivants ont été évoqués :

Le coût global de rénovation énergétique est toujours inférieur au coût de la rénovation de base. Malgré le fait que le coût d'investissement est plus élevé, le coût d'exploitation reste toujours plus faible, ce qui amène à une rénovation rentable. Il s'avère alors que la mise en place d'une rénovation énergétique est tout à fait rentable et envisageable pour les bâtiments du patrimoine.

Les deux prochains tableaux montrent les coûts globaux en 20 ans pour la rénovation de base et pour les quatre possibilités de la rénovation énergétique.

### Maison Hunsbach

Taux d'inflation	Rénovation base	Facteur 4-bois	Facteur 4-gaz	Facteur 4-pac	Facteur 4-électricité
6%	294.600	228.600	219.000	224.700	237.442
9%	376.400	244.000	237.200	243.700	268.400
12%	504.300	272.200	271.720	262.750	325.600

Tableau 28: coûts globaux en 20 ans pour la rénovation de base et pour les quatre possibilités de la rénovation énergétique

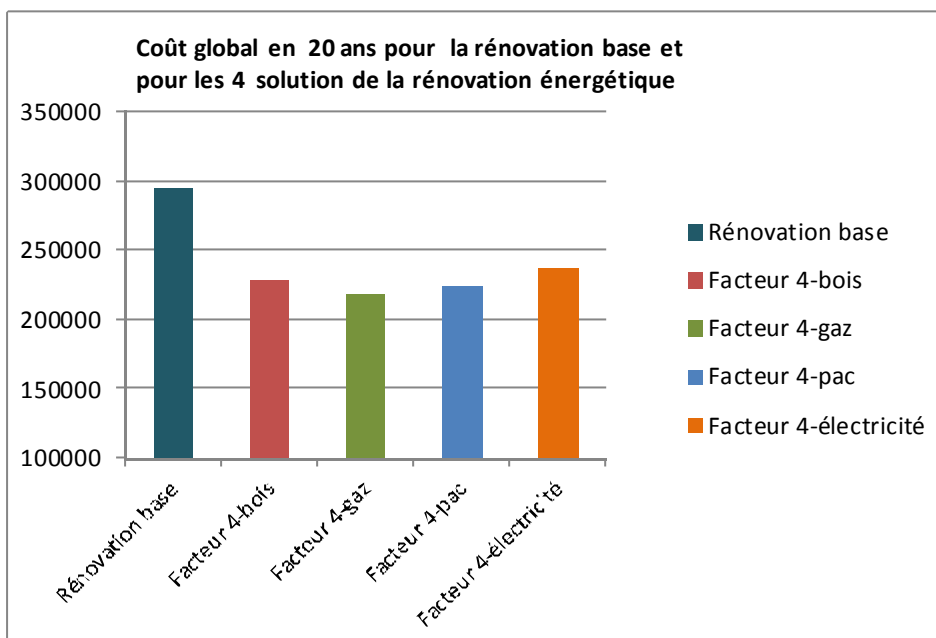


Figure 15: Coût global en 20 ans pour un taux d'inflation 6%, pour la rénovation de base et pour les 4 solutions énergétiques. Maison Hunsbach

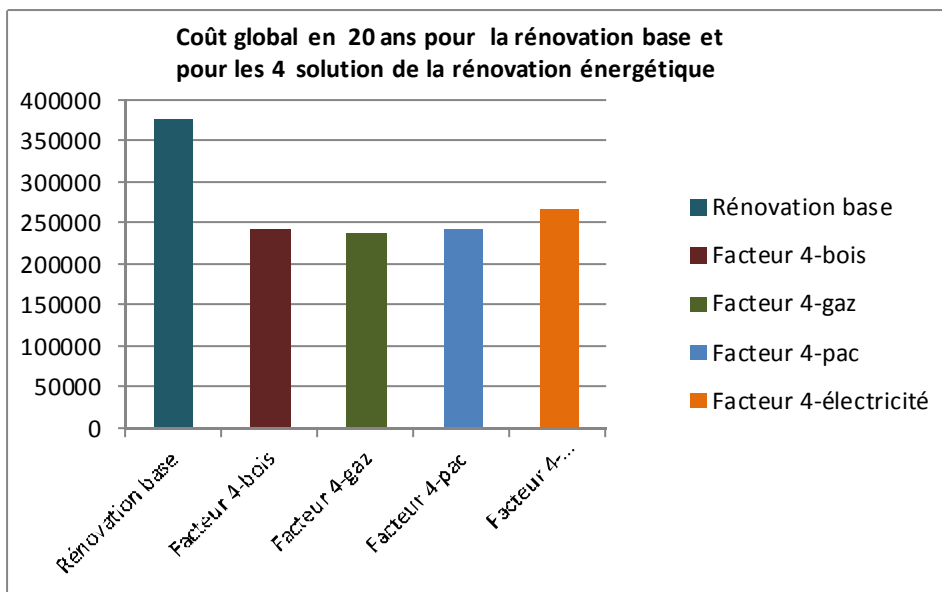


Figure 16: Coût global en 20 ans pour un taux d'inflation 9%, pour la rénovation de base et pour les 4 solutions énergétiques. Maison Hunsbach

### Maison Ludwingswinkel

Taux d'inflation	Rénovation base	Facteur 4-bois	Facteur 4-gaz	Facteur 4-pac	Facteur 4-électricité
6%	495.700	325.000	319.000	328.600	353.000
9%	644.400	351.000	348.000	342.200	399.000
12%	854.100	394.500	391.300	379.000	474.100

Tableau 29: coûts globaux en 20 ans pour la rénovation de base et pour les quatre possibilités de la rénovation énergétique

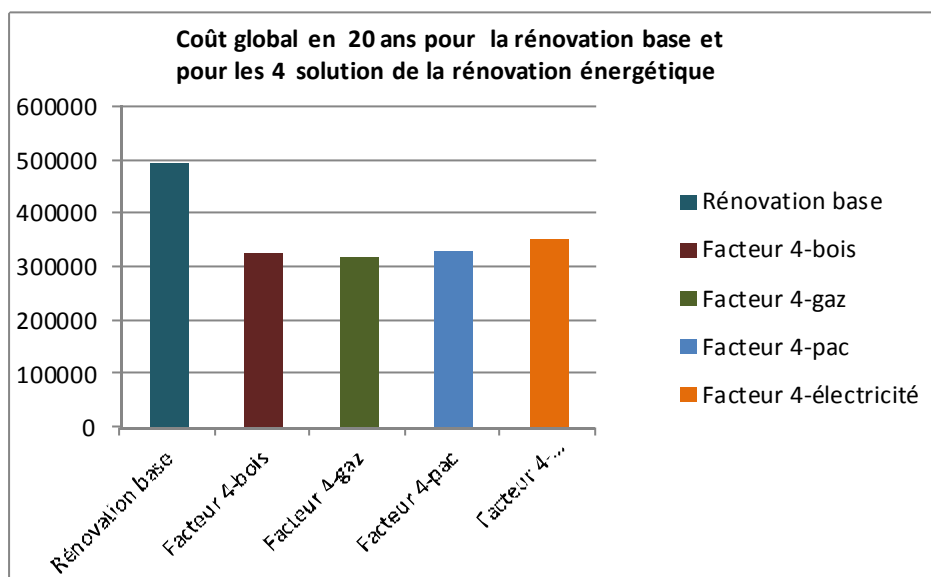


Figure 17: Coût global en 20 ans pour un taux d'inflation 6%, pour la rénovation de base et pour les 4 solutions énergétiques. Maison Ludwingswinkel

La différence entre la rénovation de base et la rénovation énergétique est plus importante pour la maison allemande. Cet écart peut être expliqué en tenant compte la forte diminution des déperditions énergétiques et ainsi des consommations d'énergie, une fois que toutes les interventions ont été mises en place.

- Parmi les solutions énergétiques analysées, le système à énergie électrique présente la plus grande consommation en énergie primaire tandis que solution bois amène à une consommation d'énergie primaire plus faible.
- La solution d'énergie électrique amène à un coût d'exploitation significativement plus élevé par rapport aux autres solutions alors que la solution PAC présente les plus faibles dépenses cumulés en 20 ans. Ensuite, la solution gaz est 11% à 13% plus chère que le bois pour la maison de Ludwingswinkel et 21% à 23% plus chère pour la maison de Hunsbach.
- Pour les deux maisons, la solution gaz amène aux dépenses cumulées inférieures aux autres solutions pour un taux d'inflation de 6% et de 9% alors que pour un taux d'inflation de 12% c'est la solution PAC qui a un coût d'exploitation moins important.
- Cette analyse du coût global n'intègre pas les frais financiers (intérêts bancaires). En fonction de ceux-ci, les solutions les plus chères risquent d'être pénalisées et du coup moins envisageables.
- La rentabilité de la rénovation énergétique est prouvée à un horizon de 10 années en moyenne. Néanmoins, au vu des montants appelés, elle ne pourra pas s'adresser aux foyers modestes qui sont condamnés à s'endetter de plus en plus puisque dans l'incapacité d'investir aujourd'hui et contraints d'honorer des factures énergétiques de plus en plus importantes.