

COZEB - Extension

RESULTATS ET CONCLUSIONS DE L'ETUDE

Rapport de la tâche 2 – septembre 2015

*Pour le compte du
Département de l'Energie et du Bâtiment durable
SPW-DGO4*



Table des matières

1. Présentation des résultats.....	6
1.1. Les tableaux et les graphiques de résultats	6
1.2. Le tableau des conclusions.....	10
2. Conclusions pour le résidentiel unifamilial	12
2.1. Illustrations des conclusions	13
2.1.1. MAISON (1).....	13
2.1.2. MAISON (4).....	16
2.1.3. MAISON (6).....	18
2.1.4. MAISON (8).....	20
2.1.5. MAISON (11).....	23
2.1.6. MAISON (14).....	25
2.1.7. MAISON (15).....	28
2.2. Conclusions en fonction de la date de construction	31
2.3. Conclusions en fonction du type de paroi existante	34
2.3.1. FENETRES.....	34
2.3.2. TOITURE.....	35
2.3.3. MURS.....	36
2.3.4. PLANCHER.....	37
2.4. Prise en compte des consommations réelles.....	38
2.5. Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de bâtiments résidentiels unifamiliaux en Wallonie?	38
3. Conclusions pour les immeubles à appartements	40
3.1. Illustrations des conclusions	41
3.1.1. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 1	41
3.1.2. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 3	44
3.1.3. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 8	46
3.1.4. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 9	52
3.1.5. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 10	54
3.2. Conclusions en fonction de la date de construction	57
3.3. Conclusions en fonction du type de paroi existante	61
3.3.1. FENETRES.....	61
3.3.2. TOITURE.....	62
3.3.3. MURS.....	63

3.3.4.	PLANCHER.....	64
3.4.	Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de logements collectifs en Wallonie?.....	65
4.	Conclusions pour les immeubles de bureaux/services	67
4.1.	Illustrations des conclusions	68
4.1.1.	GB7<45	68
4.1.2.	BE3-70.....	71
4.1.3.	PBI1-84	73
4.1.4.	BC4-96	76
4.2.	Conclusions en fonction de la date de construction	78
4.3.	Conclusions en fonction du type de paroi existante	78
4.4.	Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de bureaux en Wallonie?	79
5.	Conclusions pour les écoles.....	80
5.1.	Illustrations des conclusions	81
5.1.1.	ECOLE 1.....	81
5.1.2.	ECOLE 2.....	83
5.1.3.	ECOLE 3.....	86
5.1.4.	ECOLE 4.....	88
5.2.	Conclusions en fonction de la date de construction	92
5.3.	Conclusions en fonction du type de paroi existante	93
5.3.1.	FENETRES.....	93
5.3.2.	TOITURE.....	94
5.3.3.	MURS.....	95
5.3.4.	PLANCHER.....	95
5.4.	Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de bâtiments scolaires en Wallonie?	95
6.	Conclusions générales	97
6.1.	Conclusions pour les bâtiments résidentiels.....	98
6.2.	Conclusions pour les bâtiments non résidentiels (bureaux et écoles).....	99
6.3.	Points d'attention, opportunités et priorité d'intervention d'une rénovation énergétique	99
6.3.1.	Points d'attention.....	99
6.3.2.	Opportunités et priorités	101
7.	ANNEXES.....	103
	Annexe A : tableau des conclusions pour les maisons unifamiliales	103

Annexe B : tableau des conclusions pour les immeubles à appartements.....	105
Annexe C : tableau des conclusions pour les immeubles de bureaux	107
Annexe D : tableau des conclusions pour les écoles.....	108
Annexe E : résultats de toutes les maisons étudiées sur base de la consommation théorique	110
Maison 1 BIS	110
Maison 2	111
Maison 2 BIS	112
Maison 3	114
Maison 3 BIS	115
Maison 4 BIS	116
Maison 5	118
Maison 5 BIS	119
Maison 6 BIS	120
Maison 7	121
Maison 7 BIS	122
Maison 9	124
Maison 9 BIS	125
Maison 10	126
Maison 12	127
Maison 13	128
Annexe F : résultats de toutes les maisons étudiées sur base de la consommation réelle (consommation théorique * facteur de correction)	130
MAISON (1).....	130
MAISON (4).....	131
MAISON (6).....	132
MAISON (8).....	133
MAISON (11).....	134
MAISON (14).....	136
MAISON (15).....	137
Annexe G : résultats de tous les immeubles à appartements sur base de la consommation théorique.....	139
Immeuble 2.....	139
Immeuble 4.....	140
Immeuble 5.....	141
Immeuble 6.....	143

Immeuble 7.....	144
-----------------	-----

1. Présentation des résultats

L'objectif de l'étude est d'identifier les actions de rénovation énergétique qui peuvent s'avérer économiquement intéressantes sur une période d'évaluation donnée (20 ans pour les bureaux et les écoles, 30 ans pour les logements). Pour une série de bâtiments de référence (maisons unifamiliales, appartements, bureaux et écoles), nous avons observé que le gain de consommation énergétique sur 20 ou 30 ans était supérieur au coût de la rénovation énergétique (investissement au temps 0). Si l'investissement initial est compensé par une diminution des coûts d'exploitation liée à une baisse de la consommation d'énergie finale au cours de la période d'évaluation, la rénovation énergétique considérée est jugée intéressante.

Par ailleurs, nous avons déterminé l'investissement le plus intéressant en terme de Coût Global Actualisé (CGA), soit celui pour lequel la somme actualisée du surcoût d'investissement (CAPEX) et des coûts d'exploitation (OPEX) est la plus faible, sur la période d'évaluation considérée. Dans cette logique, le **Coût Global Actualisé** le plus faible constitue un **optimum économique**.

Les conclusions sont présentées dans la suite selon 3 niveaux de lecture :

1. Dans les tableaux chiffrés, la variante présentant le CGA le plus bas (à l'Euro près) est toujours présentée comme « l'optimum ».
2. Les graphiques permettent de situer les variantes analysées par rapport à la BASE et par rapport à la variante OPTIMUM. Si une variante est proche de l'optimum économique et affiche un niveau de consommation spécifique en énergie primaire plus bas que l'optimum, cette variante est mise en évidence comme une intervention intéressante dans le cadre de la rénovation énergétique du bâti.
3. Des compléments d'information et des particularités du cas (et/ou des variantes) analysé sont donnés dans l'analyse détaillée des graphiques.

Les résultats de l'étude sont présentés sous 2 formes complémentaires :

- Des graphiques présentant l'évolution du cout global actualisé (CGA) au fil du temps, en fonction de la consommation spécifique en énergie primaire (Espec) ;
- Un tableau récapitulatif reprenant les conclusions générales selon la typologie et les caractéristiques des parois de déperdition existantes.

1.1. Les tableaux et les graphiques de résultats

Pour chaque bâtiment de référence, un premier tableau (cf. Tableau 1) reprend les U caractéristiques des parois de déperdition du bâtiment considéré¹, pour la BASE, pour la variante « OPTIMUM » et également pour la variante « FTMS passif ».

¹ Pour des informations plus complètes et plus détaillées concernant les bâtiments de référence, voir les rapports de la tâche 1 « détermination du parc de bâtiments existants en Wallonie »

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 1	Base	4,47	1,76	2,20	0,79	18,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,79	6,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 1 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et « passif » - exemple

Ensuite, un premier graphique (cfr Figure 1) présente l'évolution du coût global actualisé (CGA) en fonction de la consommation spécifique en énergie primaire (par m² de surface plancher chauffé).

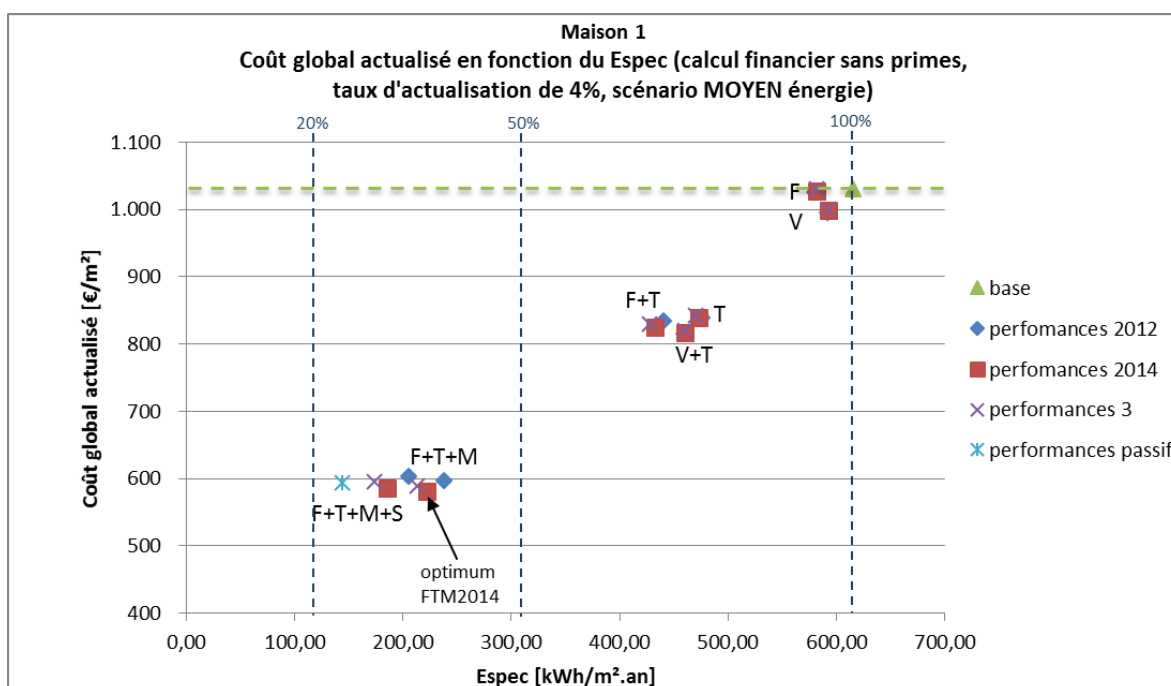


Figure 1 : cout global actualisé (consommation cumulée et investissement) en fonction de la consommation spécifique en énergie primaire (Espec)

Ce graphique permet de comparer le CGA de toutes les variantes étudiées.

Le point situé le plus bas sur l'axe des ordonnées correspond à un optimum économique. La variante la plus intéressante économiquement a donc le CGA le plus faible.

Le CGA de la BASE est représenté par une ligne verte pointillée sur laquelle le Espec de la BASE est symbolisé par un triangle vert.

L'axe des abscisses renseigne la performance énergétique exprimée en consommation spécifique en énergie primaire. Plus la variante est située sur la gauche, plus le bâtiment sera performant au niveau de sa consommation d'énergie primaire. On retrouve logiquement le Espec de la BASE (triangle vert) qui n'a subi aucune rénovation, le plus à droite. En effet, la BASE consomme systématiquement plus d'énergie primaire que les variantes qui ont bénéficié d'une rénovation énergétique. Le Espec qui correspond à la BASE est le plus élevé parmi toutes les variantes étudiées. A l'opposé, le Espec le plus bas correspond généralement à la variante FTMS passif (étoile bleue) ; c'est la variante qui affiche généralement la consommation spécifique en énergie primaire la plus basse parmi toutes les variantes étudiées.

Sur la Figure 1, on observe que, pour cet exemple, l'optimum économique correspond à un carré rouge, il s'agit de la variante FTM 2014.

Toutes les variantes d'isolation situées sous la BASE (ligne pointillée verte) constituent des approches rentables (l'investissement initial sera récupéré au cours de la période d'évaluation par les économies d'énergie engendrées par la rénovation).

Comme indiqué dans le Règlement Délégué, 6(2), lorsque deux variantes affichent des CGA très proches, l'optimum peut être celui dont le Espec est le plus faible.

En plus de déterminer la rénovation correspondant à un optimum économique strict selon les hypothèses de l'étude COZEB originale, nous avons systématiquement analysé la variante « FTMS passif », correspondant généralement à des réductions de consommation d'énergie primaire de plus de 50% par rapport à la BASE. Cette variante permet de s'affranchir au maximum des sources d'énergie conventionnelles et d'être moins dépendant des fluctuations du coût de l'énergie. Dès que le CGA de cette variante se situe sous la ligne pointillée du CGA de la BASE, l'intervention peut conserver un intérêt pour la rénovation énergétique de l'enveloppe, sans forcément représenter un optimum économique.

Un second tableau reprend, pour chaque bâtiment étudié, la consommation en chauffage, le Espec, le surcoût d'investissement par rapport à la BASE et le CGA. Ce Tableau 2 permet de comparer la consommation de chaleur, l'économie en chauffage, la consommation spécifique en énergie primaire, le surcoût d'investissement, le CGA et l'économie (ou la perte) financière des variantes « OPTIMUM » et « FTMS passif » par rapport à la BASE.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 1	Base	157	86.591	552	0	615 (100%)	0 €	0 €	1.031 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)		24.860	158	393	222 (36%)	29.930 €	191 €	579 €	452 €
	FTMS Passif (cas 23)		12.762	81	470	145 (24%)	56.618 €	361 €	593 €	439 €

Tableau 2 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE, optimum et « passif » - exemple

Enfin, un second graphique (cf. Figure 2) présente l'évolution du coût global actualisé + l'investissement initial au fil du temps (sur une période de 20 ou 30 ans).

L'investissement de départ consenti pour chacune des variantes a pour seul effet de déplacer l'origine de la courbe vers le haut sur l'axe des ordonnées. Cette manière de présenter les résultats permet de visualiser après combien d'années l'investissement initial est compensé par la diminution des coûts énergétiques cumulés et actualisés.

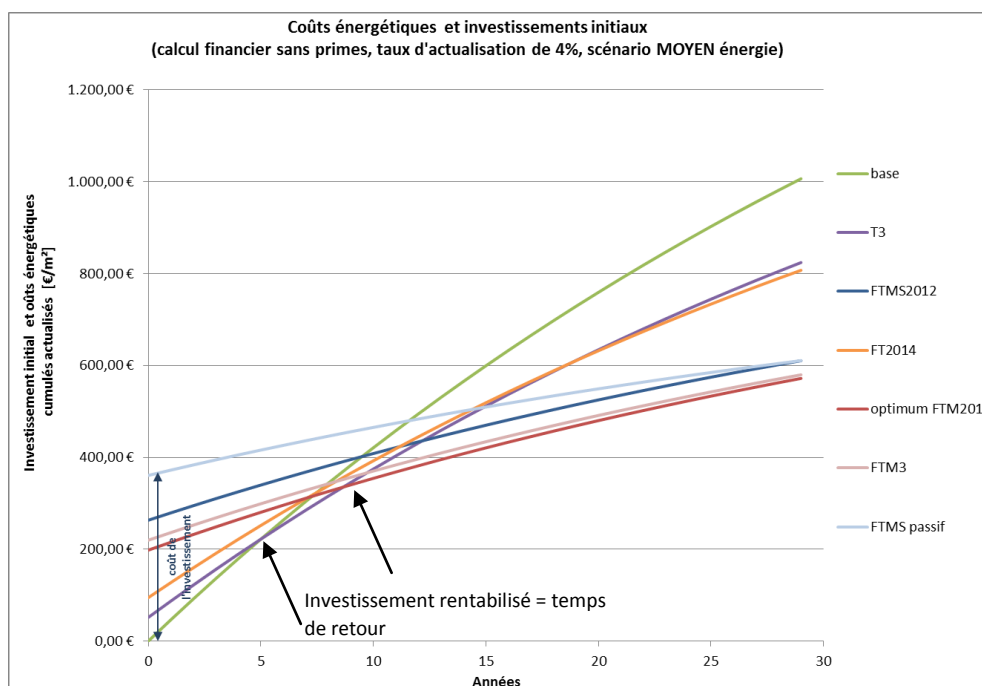


Figure 2: investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - exemple

- La courbe verte représente la maison « base » pour laquelle aucune rénovation n'est réalisée : on observe qu'au temps 0 il n'y a pas d'investissement (coût d'investissement initial = 0); ensuite, au fil du temps, la courbe croît, elle représente le coût de la consommation d'énergie cumulée. Au bout des 30 années, la courbe atteint son maximum.
- Prenons ensuite la courbe mauve « T3 » qui représente la même maison dont on a isolé la toiture en plaçant plus de 20 cm d'isolant ($U=0,20\text{W/m}^2\cdot\text{K}$). Dans ce cas, on observe au temps 0, un coût d'investissement (environ 40€/m²) correspondant à l'isolation de la toiture. Ensuite, au fil du temps, la courbe croît, car chaque année les coûts énergétiques s'ajoutent à ceux de l'année précédente. Au bout des 30 années, on observe que cette courbe mauve atteint son coût maximum, qui reste néanmoins inférieur à celui de la courbe verte « base ». Grâce à l'isolation de la toiture, la consommation annuelle d'énergie a diminué et in fine, le coût global actualisé est plus faible. Le point où la courbe mauve croise la courbe verte indique à partir de quand l'investissement réalisé est rentabilisé. Dans cet exemple, isoler la toiture selon le niveau de performance proposé est rentabilisé après 5 ans seulement.
- Prenons maintenant la courbe bleue claire « FTMS passif » qui représente la même maison dont toutes les parois ont été isolées selon un niveau proche de celui observé dans les bâtiments passifs. Dans ce cas, on observe au temps 0, un surcoût d'environ 400€/m², qui représente l'investissement à consentir pour isoler la maison selon des critères de performance des parois proches de ceux observés dans les bâtiments passifs. Au bout de 30 ans, l'économie de coût cumulé actualisé par rapport à la courbe mauve (maison T3) est encore plus importante. Néanmoins on remarque que d'autres courbes ont un coût global actualisé encore inférieur. Quel est alors l'optimum ? Quelle est la courbe qui donne, au bout de 30 ans, le coût global actualisé le plus faible?
- Rénover les fenêtres, la toiture et les murs de ce bâtiment conformément aux exigences PEB 2014, constitue, au regard des hypothèses prises, le meilleur compromis entre investissement initial et gain énergétique, ceci est matérialisé sur le graphique par la courbe rouge FTM 2014. C'est l'optimum économique. Cette courbe rouge croise la courbe verte « base » aux environs de la 8^{ème} année, cela signifie donc qu'après 8 ans, l'investissement initial est compensé par la diminution des coûts énergétiques.

1.2. Le tableau des conclusions

Ce tableau donne les grandes orientations à suivre en termes de rénovation énergétique pour plusieurs types de bâtiments (logements, bureaux et écoles) construits avant 2008.

		Typologies de bâtiments existants									
année de construction		<1945			1945-1970			1971-1985		1995-2008	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Type d'habitation existante											
Type de paroi	Composition de la paroi existante										
Fenêtres	Simple vitrage										
	Double vitrage non étanche										
	Double vitrage étanche										
Toiture	Toiture inclinée non étanche non isolée										
	Toiture inclinée étanche non isolée										
	Toiture inclinée étanche isolée										
	Plancher du grenier non isolé										
	Plancher du grenier isolé										
	Toiture plate non isolée										
	Toiture plate isolée										
Mur	Mur plein non isolé										
	Mur creux non isolé										
	Mur creux isolé										
	Mur plein isolé										
Plancher	Dalle sur sol non isolée										
	Dalle sur cave non isolée										
	Dalle sur sol isolée										
	Dalle sur cave isolée										
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE D'HABITATION EXISTANTE ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION		Isoler toutes les parois			Isoler toutes les parois			Isoler toutes les parois		Isoler F +T	

Tableau 3 : tableau des conclusions – exemple

Tout d'abord il faut choisir une typologie, une colonne (lecture verticale). S'il l'on veut connaître la rénovation la plus intéressante à appliquer à l'entière du bâtiment existant, il faut descendre en bas de la colonne pour trouver la conclusion qui s'applique à la typologie choisie. Par exemple, il pourrait être rentable d'isoler toutes les parois du bâtiment.

Pour obtenir des informations plus détaillées, on peut analyser individuellement chaque paroi de déperdition. Une fois la paroi de déperdition choisie, une ligne (lecture horizontale), il faut suivre la ligne correspondante dans le tableau; l'intersection avec la colonne de la typologie choisie indique la meilleure manière de rénover la paroi en question.

Légende		
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques du "passif"
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques '3'
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2014
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2012
		rentable (mais pas optimum) de rénover la paroi
		pas rentable de rénover la paroi
		conclusion difficile à donner car d'autres parois déjà isolées interviennent dans le CGA

Tableau 4 : explication du code couleur utilisé dans le tableau des conclusions

Le code couleur permet de voir directement s'il est intéressant d'agir ou non (et jusqu'à quel niveau d'exigences : PEB 2012, PEB 2014, 3 ou « passif ») sur la paroi en question.

- Si la case est verte, c'est qu'il est rentable et OPTIMUM de rénover la paroi. Et en fonction du niveau de vert, cela donnera une indication sur le niveau d'exigence à atteindre : soit 2012, soit 2014, soit '3' ou encore « passif » ;
- si la case est jaune, c'est qu'il est intéressant mais pas optimum de rénover la paroi ;
- si la case est rouge, isoler la paroi n'est pas rentable ;
- Si la case est grise, les conclusions sont difficiles à tirer pour cette paroi car la présence d'autres parois déjà isolées peut "fausser" la conclusion spécifique à la paroi analysée. En effet, le surcoût lié au placement d'une nouvelle isolation sur les parois déjà isolées est important et pèse lourd dans la balance du cout global de rénovation. Dans cette étude, nous n'avons pas étudié de variante qui consisterait à ne rénover que le sol ou à ne rénover qu'une partie des murs extérieurs.

2. Conclusions pour le résidentiel unifamilial

Nous avons déterminé, dans le cadre de la tâche 1, 15 géométries-type de maisons unifamiliales qui couvrent une majorité de typologies de maisons récentes ou plus anciennes rencontrées en Wallonie.

Une époque de construction permettant de déterminer les performances thermiques de l'enveloppe est associée à chaque type de géométrie.

Ces 15 typologies sont classées en fonction de leur date de construction et de leur nombre de façades (4 façades, 3 façades ou mitoyenne).

En outre, 8 maisons Base bis ont été ajoutées, respectivement pour les maisons 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 9. Pour ces maisons Base Bis, nous avons considéré des améliorations de l'enveloppe du bâtiment, soit la présence d'une fenêtre plus récente, soit la présence d'isolation dans la toiture, dans les murs ou encore dans le plancher. Des informations plus détaillées concernant chaque typologie se trouvent dans le rapport de la tâche 1 « Détermination synthétique du parc de bâtiments résidentiels existants en Wallonie ».

La présente étude portant sur des bâtiments types de référence, les conclusions doivent être adaptées au cas par cas.

Dans la suite de ce rapport, nous analysons en détail les résultats de 7 des 15 maisons unifamiliales représentant le parc immobilier wallon. Les résultats des autres maisons se trouvent en annexe.

- La maison 1 : maison de type vernaculaire 4 façades construite avant 1945. Elle possède encore des fenêtres simple vitrage et présente des murs pleins non isolés, une toiture et un plancher également non isolés.
- La maison 4 : maison 4 façades de l'entre-deux guerres. Elle possède encore des fenêtres simple vitrage et présente des murs pleins non isolés, une toiture et un plancher également non isolés.
- La maison 6 : villa des premières extensions urbaines 4 façades construite entre 1946 et 1970. Elle possède encore des fenêtres simple vitrage et présente des murs creux non isolés, une toiture et un plancher également non isolés.
- La maison 8 : maison mitoyenne de type bel-étage construite entre 1946 et 1970. Elle possède des caractéristiques identiques à la maison 6 datant de la même époque : fenêtres simple vitrage, murs creux non isolés, plancher du grenier et plancher sur garage non isolés.
- La maison 11 : villa 4 façades construite en banlieue des villes entre 1985 et 1995 et respectant la réglementation K70. Elle possède des fenêtres double vitrage et présente des murs creux isolés avec 5cm de laine minérale, une toiture isolée avec 8cm de laine minérale et un plancher isolé avec 2cm de polyuréthane.
- La maison 14 : villa 4 façades de type lotissement construite entre 1996 et 2008 et respectant la réglementation K55. Elle possède des fenêtres double vitrage et présente des murs creux isolés avec 6cm de laine minérale, une toiture isolée avec 18cm de laine minérale et un plancher isolé avec 4cm de polyuréthane.
- La maison 15 : maison mitoyenne construite entre 1996 et 2008 dans un quartier de maisons groupées proche du centre-ville. Cette maison répond à la réglementation K55, elle possède des fenêtres double vitrage et présente des murs à ossature bois isolés avec 6cm de laine minérale, une toiture isolée avec 10cm de laine minérale et un plancher isolé avec 2cm de polyuréthane. Les parois mitoyennes ne sont pas des parois de déperdition.

Nous avons également étudié la variante de rénovation « passive » permettant de réaliser les plus grandes économies d'énergie possibles et de s'affranchir au maximum de l'énergie (pour préserver les ressources, être « indépendant » du coût de l'énergie, ...). Cela signifie que, outre l'identification du niveau optimum, nous avons mis en avant la variante « FTMS passif » si celle-ci présente un CGA plus faible que celui de la maison « base », c'est-à-dire si cette variante est rentable.

2.1. Illustrations des conclusions

Les conclusions relatives à 7 des maisons étudiées sont illustrées ci-dessous. Les résultats des 8 autres maisons (et les maisons Base Bis) sont placés à l'annexe E.

2.1.1. MAISON (1)

Tout d'abord, nous analysons les résultats de la maison de type vernaculaire 4 façades construite avant 1945. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette maison unifamiliale BASE (dans son état d'origine) sont indiquées dans le Tableau 5. L'optimum économique pour cette maison correspond à la variante FTM 2014, les U de parois correspondant à ces performances sont également repris dans le Tableau 5.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 1	Base	4,47	1,76	2,20	0,79	18,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,79	6,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 5 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et « passif » - maison 1

Sur le graphique de la Figure 3, nous pouvons observer que le point qui présente le CGA le plus faible est la variante FTM 2014. Isoler les fenêtres, la toiture et les murs selon les caractéristiques thermiques reprises dans la ligne optimum du Tableau 5 correspond à l'optimum économique.

D'autres variantes permettent d'atteindre un CGA inférieur à celui de la BASE (ligne pointillée verte sur le graphique). De manière générale, toutes les variantes étudiées sont plus intéressantes que le cas BASE consistant à ne rien faire.

On observe également sur ce graphique que les variantes qui combinent une isolation FTMS sont assez proches, en terme de CGA, des variantes FTM (sans l'isolation du sol donc).

Grâce aux lignes pointillées bleues verticales placées sur le graphique, on peut voir en un coup d'œil, quelles sont les variantes qui permettent d'atteindre un Espec réduit à 50% ou à 20% de la valeur Espec de la BASE. Dans le cas de cette maison vernaculaire, aucune variante ne permet de réduire à 20% la consommation spécifique en énergie primaire de la maison BASE. Mais les variantes FTM et FTMS permettent de réduire de plus de 50% ce Espec.

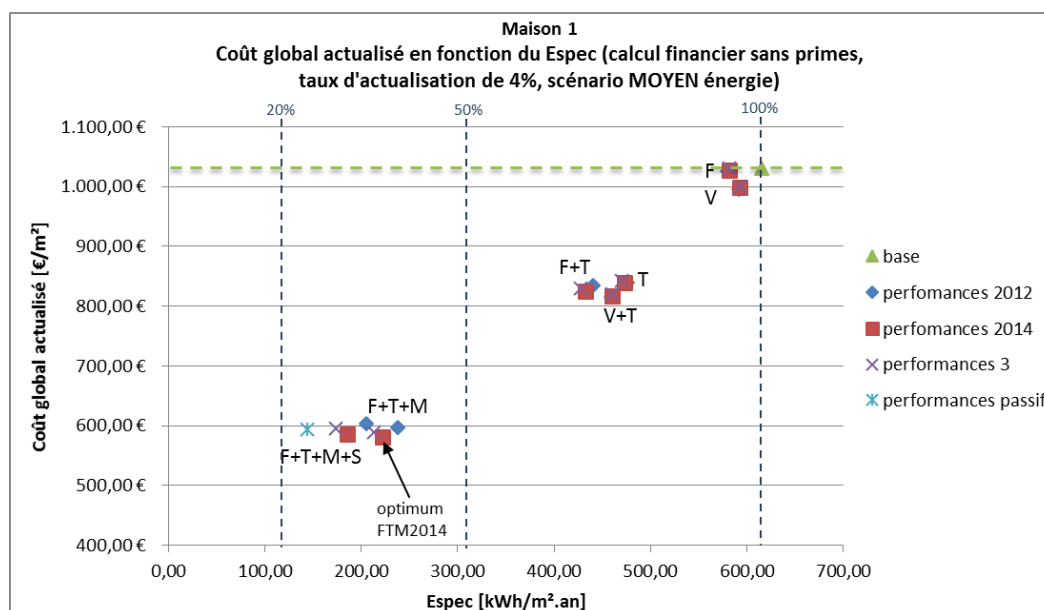


Figure 3 : coût global actualisé en fonction du Espec - maison (1)

Si on réalise la rénovation optimale (FTM 2014), le Espec est réduit à 36% de la valeur au Espec de la maison BASE qui n'a subi aucune rénovation énergétique, voir dans le Tableau 6 ci-dessous.

La consommation d'énergie en chauffage passe de 552 kWh/m².an à 158 kWh/m².an, soit une diminution d'environ 400 kWh/m².an. Les consommations d'énergie pour la production d'eau chaude sanitaire et pour le fonctionnement des auxiliaires restent identiques étant donné que les systèmes sont inchangés.

Le surcoût d'investissement à consentir au moment de la rénovation FTM 2014 est de 191 €/m² ; soit +/- 30.000 € (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) pour cette maison 4 façades.

Sur la période d'évaluation de 30 ans, cette variante optimale FTM 2014 présente un CGA de 579€/m² tandis que la maison BASE affiche un CGA de 1031 €/m² avec un investissement initial nul.

Cela signifie que la diminution des coûts d'exploitation (facture énergétique) résultant de l'isolation optimale de cette maison compense largement l'investissement initial consenti.

Si on regarde les résultats de la variante qui consiste à tout isoler jusqu'au « passif » (FTMS passif), celle-ci présente un CGA de 593 €/m², assez proche du CGA optimum de 579 €/m².

Le fait d'isoler jusqu'au « passif » est également rentabilisé sur une période de 30 ans, mais cela ne correspond pas à l'optimum économique. Si on décide d'appliquer cette stratégie d'isolation plus poussée (FTMS passif) alors on pourra réduire la consommation énergétique de 76% par rapport à la maison BASE.

L'investissement nécessaire pour atteindre une isolation « FTMS passif » est presque doublé par rapport à la variante optimale. En effet, l'investissement initial qui devra être réalisé pour une isolation « passive » de toute l'habitation est 361€/m², soit près de 57.000 euros.

Telle que reprise dans le Tableau 6 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 64 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 393 kWh/m².an ;

- Un surcout d'investissement de 191 € / m², soit 29.930 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cette maison (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 76 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 12% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 470 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 361 € / m², soit 56.618 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²	EUR/m ²
Maison 1	Base		86.591	552	0	615 (100%)	0 €	0 €	1.031 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	157	24.860	158	393	222 (36%)	29.930 €	191 €	579 €	452 €
	FTMS Passif (cas 23)		12.762	81	470	145 (24%)	56.618 €	361 €	593 €	439 €

Tableau 6 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE, optimum et « passif »- maison 1

Sur le graphique de la

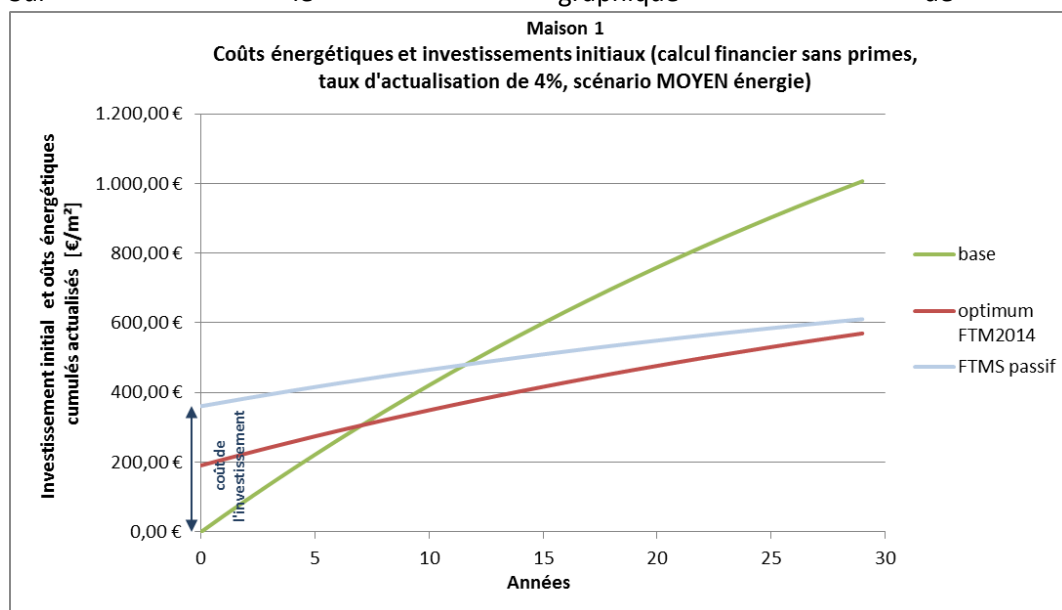


Figure 4, on observe que les courbes FTMS passif et FTM 2014 se rejoignent quasiment au bout de la période de calcul de 30 ans même si l'investissement au temps 0 est quasiment double. En considérant un taux d'actualisation de 4% et une hausse moyenne du prix de l'énergie, le CGA de ces deux variantes ne diffère que très peu : seulement 10€/m² supplémentaires pour la variante FTMS passif.

La rénovation énergétique de la maison selon un optimum économique (soit FTM 2014) est « amortie » après +/- 7 ans (croisement de la courbe verte BASE et de la courbe rouge FTM 2014

optimum). Le temps de retour sur investissement d'une rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche du standard passif est, quant à lui, un peu plus long : environ 12 ans.

Dès lors, tant qu'à réaliser des travaux et ne connaissant pas avec certitude l'évolution du prix de l'énergie, il est clairement rentable de pousser l'isolation de cette maison jusqu'à atteindre une isolation « passive » de toutes les parois de l'enveloppe. De plus, cela améliorera le confort thermique des occupants.

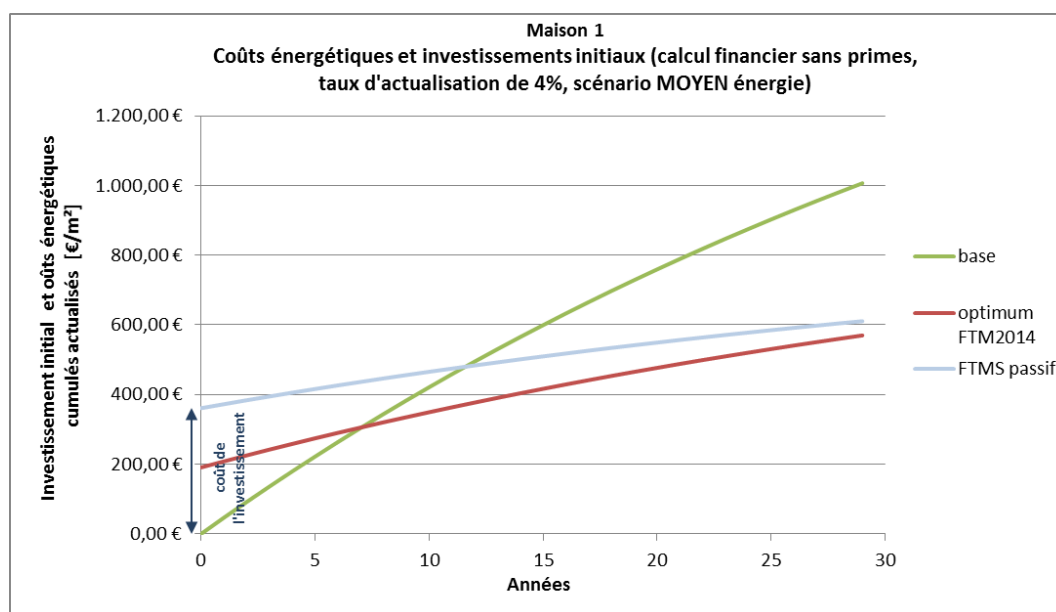


Figure 4: investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - maison (1)

2.1.2. MAISON (4)

Nous analysons ici les résultats d'une maison 4 façades datant de l'entre-deux guerres. Le Tableau 7 reprend les performances énergétiques de l'enveloppe :

- de la maison BASE (dans son état d'origine)
- de la maison rénovée selon l'optimum économique, qui correspond pour cette habitation à la variante FTMS passif.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 4	Base	4,47	1,77	1,41	1,24	18,0
	Optimum - FTMS passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 7 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE et optimum - maison 4

Sur le graphique de la Figure 5 nous observons que la variante FTMS passif correspond à l'optimum économique. C'est cette variante qui présente le CGA le plus faible parmi tous les scénarii de rénovation étudiés.

De manière générale, toutes les variantes étudiées sont plus intéressantes que le cas BASE consistant à ne rien faire. En effet, on observe que tous les points de combinaisons de mesures se situent sous le CGA BASE (ligne verte pointillée).

Cette variante « optimum » FTMS passif permet d'obtenir le CGA le plus faible (soit 387 €/m²) et permet également d'avoir la consommation spécifique en énergie primaire la plus petite de 137 kWh/m².an ; soit une réduction de près de 80% par rapport au Espec de la maison BASE.

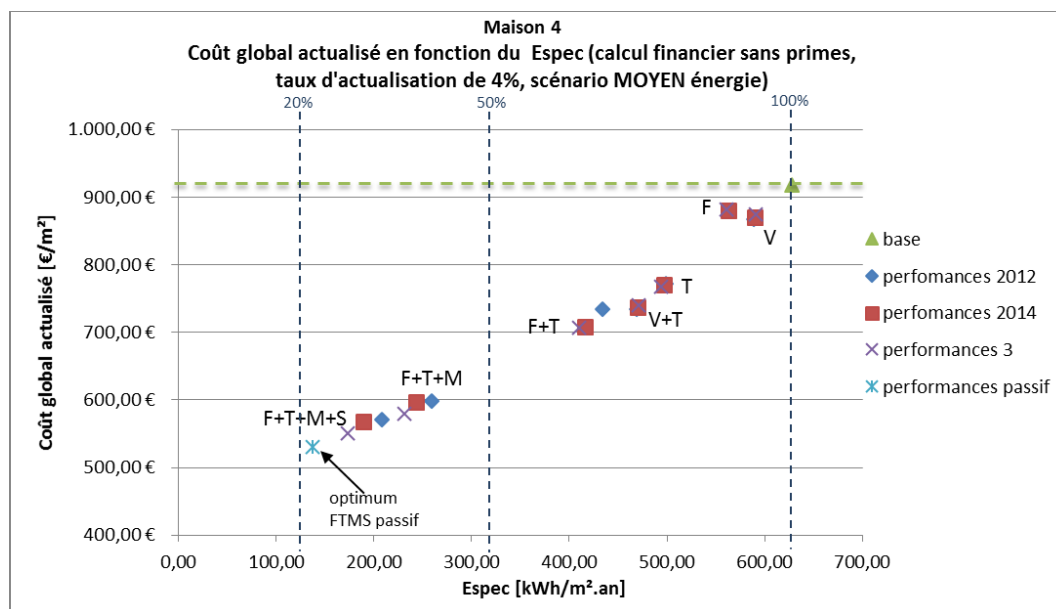


Figure 5 : coût global actualisé en fonction du Espec - maison (4)

On remarque également qu'au plus on réalise une rénovation énergétique performante de cette habitation, au plus celle-ci est rentable économiquement.

L'investissement initial à réaliser est très important, environ 80.000€ (ou 345€/m²), pour isoler toutes les parois de déperdition jusqu'aux caractéristiques proches du standard passif. Mais étant donné que la consommation d'énergie passe de 628 kWh/m².an (pour la maison BASE) à 137 kWh/m².an (pour la variante FTMS passif), la facture énergétique de l'habitation diminue fortement et cette stratégie de rénovation compense donc l'investissement réalisé.

Telle que reprise dans le Tableau 8 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison correspondant à l'optimum économique mais également à la rénovation énergétique maximale se traduit par :

- Une réduction de 78 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 490 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 345 € / m², soit 78.550 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			kWh/an	kWh/m ² .an						
Maison 4	Base	228	132.694	582	0	628 (100%)	0 €	0 €	918 €	0 €
	Optimum - FTMS passif (cas 23)		20.865	92	490	137 (22%)	78.550 €	345 €	531 €	387 €

Tableau 8 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE et optimum – maison 4

La Figure 6 nous montre que l'investissement initial est rentabilisé après 12 ans seulement (croisement de la courbe bleue et de la courbe verte). Et au bout de 30 ans, le CGA de la variante optimale (531 €/m²) est environ 40% plus petit que le CGA de la maison BASE qui n'aurait subi aucune rénovation énergétique (918 €/m²).

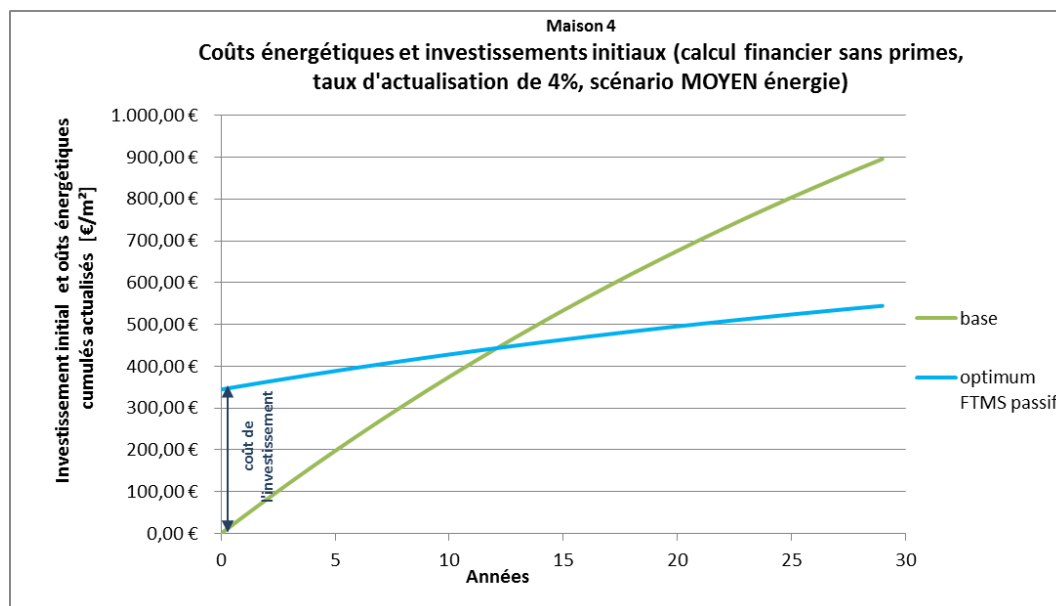


Figure 6 : coût de la consommation cumulée en fonction du temps - maison (4)

2.1.3. MAISON (6)

Nous analysons les résultats d'une villa des premières extensions urbaines 4 façades construite dans les années 60. Cette maison a été construite avant le premier choc pétrolier et présente des murs creux non isolés.

Le Tableau 9 reprend les performances énergétiques de l'enveloppe :

- de la maison BASE (dans son état d'origine)
- de la maison rénovée selon l'optimum économique, qui correspond pour cette habitation à la variante FTMS passif.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	m ³ /h.m ²
Maison 6	Base	4,47	1,71	1,53	1,66	18,0
	Optimum - FTMS passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 9 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE et optimum - maison 6

Sur le graphique de la Figure 7, on observe que la variante FTMS passif présente le CGA le plus petit et correspond donc à l'optimum économique.

Encore une fois, toutes les combinaisons de mesure étudiées sont rentables, elles ont un CGA inférieur au CGA de la BASE. En effet, tous les points se situent sous la ligne pointillée verte.

En appliquant la stratégie de rénovation optimale à cette habitation, soit la variante FTMS passif, le Espec sera réduit de plus de 80% par rapport au Espec de la BASE.

La maison BASE consomme environ 802 kWh/m².an tandis que la maison dont toutes les parois sont isolées jusqu'au « passif » ne consomme que 154 kWh/m².an.

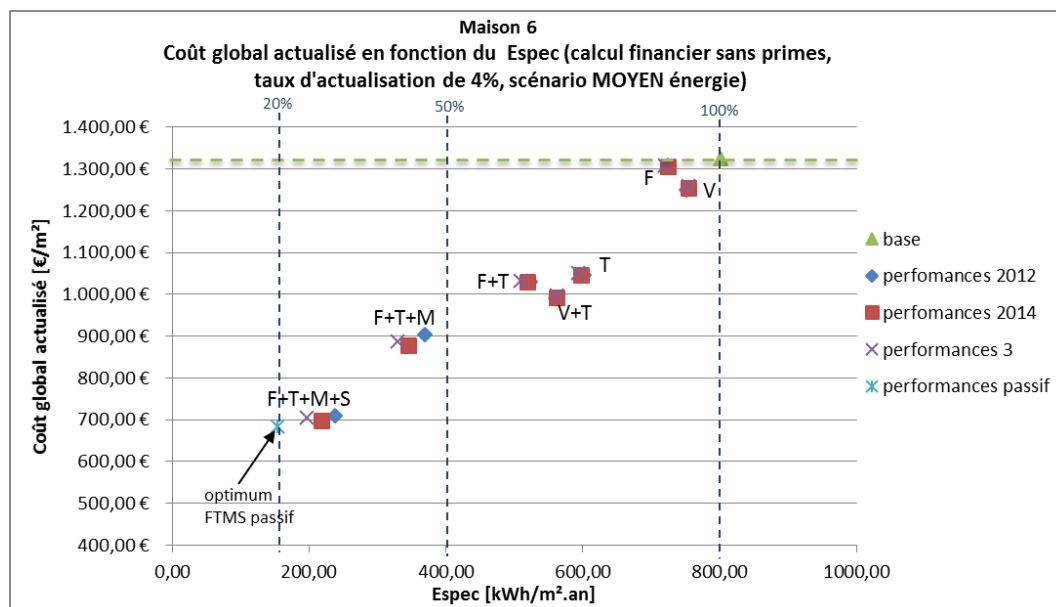


Figure 7 : coût global actualisé en fonction du Espec - maison (6)

L'investissement initial de 441 €/m² (soit plus de 60.000€) est compensé par la réduction de la consommation d'énergie pendant les 30 années de la période de calcul. Au bout de 30 ans, le CGA de la variante optimale est de 640 €/m², soit environ 50% plus petit que le CGA de la maison BASE (1300€/m²).

Dès lors, il est clair que pour cette habitation, la meilleure rénovation énergétique à appliquer est de pousser l'isolation jusqu'à atteindre une isolation « passive » de toutes les parois de l'enveloppe. Cela permettra de réduire le coût global actualisé sur 30 ans et de plus, cela améliorera grandement le confort thermique des occupants.

Telle que reprise dans le Tableau 10 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 81 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 648 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 441 € / m², soit 61.752 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			kWh/an	kWh/m ² .an						
Maison 6	Base		106.109	758	0	802 (100%)	0 €	0 €	1.324 €	0 €
	Optimum - FTMS passif (cas 23)	140	15.354	110	648	154 (19%)	61.752 €	441 €	684 €	640 €

Tableau 10 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE et optimum – maison 6

La Figure 8 montre que l'investissement initial est rentabilisé après 10 ans environ seulement (croisement de la courbe bleue et de la courbe verte).

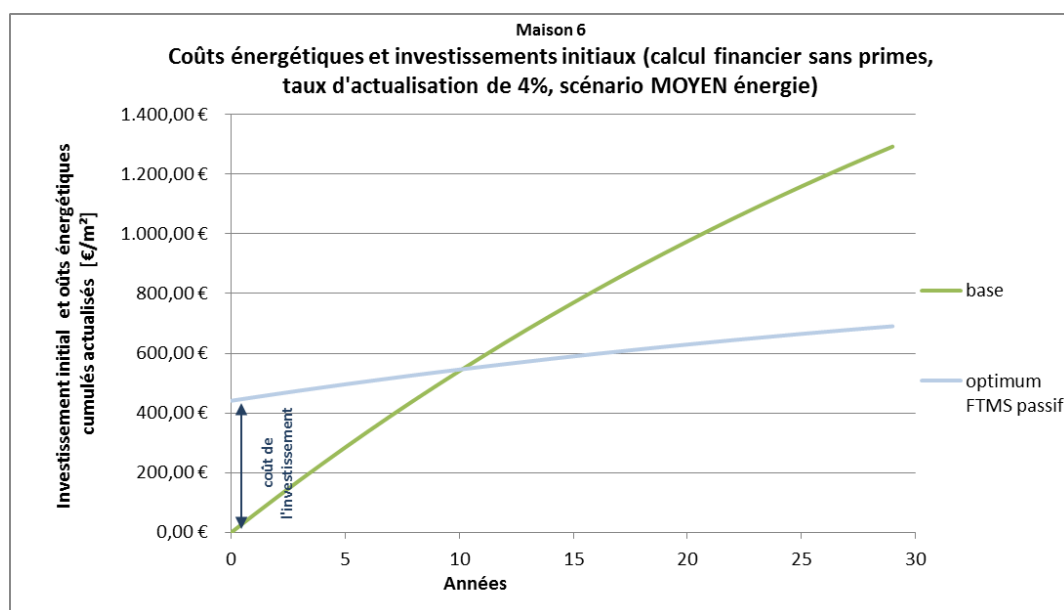


Figure 8 : investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - maison (6)

2.1.4. MAISON (8)

Le Tableau 11 reprend les caractéristiques thermiques de l'enveloppe de la maison mitoyenne construite entre 1946 et 1970, dans son état d'origine. L'optimum économique pour cette maison correspond à la variante FTMS 2014, les U de parois correspondant à ces performances sont également repris dans le Tableau 11.

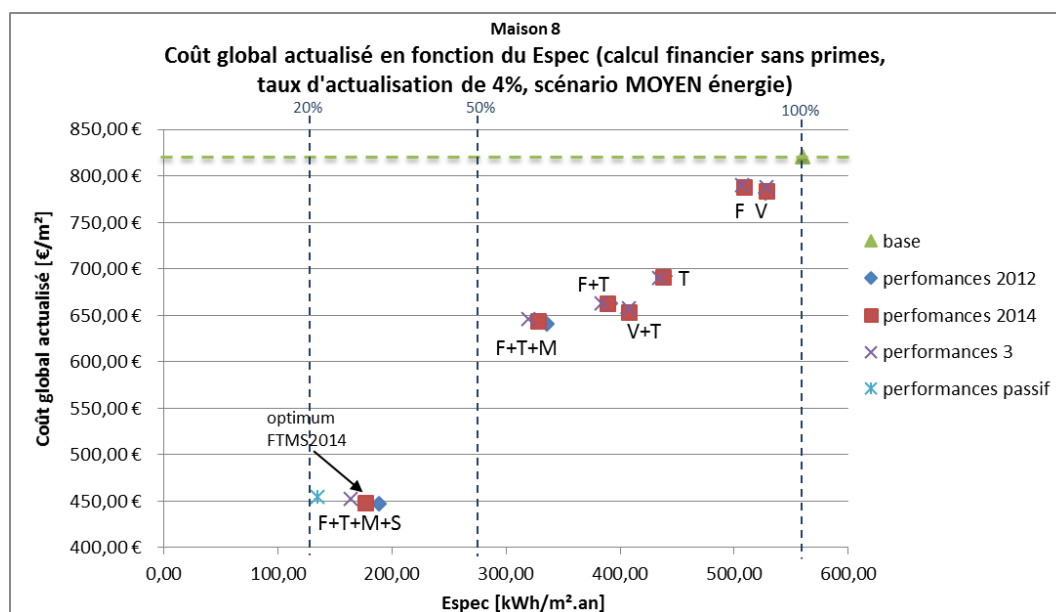
		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 8	Base	4,47	1,77	1,05	2,28	15,0
	Optimum - FTMS 2014 (cas19)	1,80	0,24	0,24	0,30	4,5
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 11 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et « passif » - maison 8

Sur le graphique de la Figure 9, on observe que le point qui présente le CGA le plus faible est la variante FTMS 2014, c'est l'optimum économique.

Toutes les variantes étudiées permettent d'atteindre un CGA inférieur à celui de la BASE et sont donc plus intéressantes que le cas BASE consistant à ne rien faire.

On remarque, toujours sur la Figure 9, que la variante FTMS passif permet de réduire la consommation spécifique en énergie primaire de cette maison mitoyenne d'environ 80% par rapport à la consommation de la maison BASE tandis que l'optimum (FTMS 2014) ne permet pas de réduire autant ce Espec.



Si on réalise la rénovation optimale (FTMS 2014), le Espec est réduit à 32% de la valeur Espec de la maison BASE qui n'a subi aucune rénovation énergétique.

La consommation d'énergie en chauffage passe de 511 kWh/m².an à 139 kWh/m².an, soit une diminution d'environ 370 kWh/m².an. Les consommations d'énergie pour la production de l'eau chaude sanitaire et pour le fonctionnement des auxiliaires restent identiques étant donné que les systèmes sont inchangés.

Sur la période d'évaluation de 30 ans, cette variante optimale FTMS 2014 présente un CGA de 448€/m² tandis que la maison BASE affiche un CGA de 821 €/m² avec un investissement initial nul. Cela signifie que la diminution des coûts d'exploitation (facture énergétique) résultant de l'isolation optimale de cette maison compense largement l'investissement initial consenti.

Si on regarde les résultats de la variante qui consiste à tout isoler jusqu'au « passif » (FTMS passif), celle-ci présente un CGA de 455 €/m², assez proche du CGA optimum de 448 €/m².

Le fait d'isoler jusqu'au « passif » est également rentabilisé sur une période de 30 ans, mais cela ne correspond pas à l'optimum économique. Si on décide d'appliquer cette stratégie d'isolation plus poussée (FTMS passif) alors on pourra réduire la consommation énergétique de 76% par rapport à la maison BASE.

Telle que reprise dans le Tableau 12 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison mitoyenne correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 68 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 371 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 172 € / m², soit 21.800 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cette maison (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 76 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 8% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 425 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 265 €/m², donc un supplément de 100€/m² par rapport à la variante optimum mais cet investissement sera rentabilisé par une plus grande diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²	EUR/m ²
Maison 8	Base	127	64.837	511	0	560 (100%)	0 €	0 €	821 €	0 €
	Optimum - FTMS 2014 (cas19)		17.677	139	371	177 (32%)	21.799 €	172 €	448 €	374 €
	FTMS Passif (cas 24)		10.875	86	425	135 (24%)	33.660 €	265 €	455 €	366 €

Tableau 12 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE, optimum et « passif » – maison 8

Sur le graphique de la Figure 10

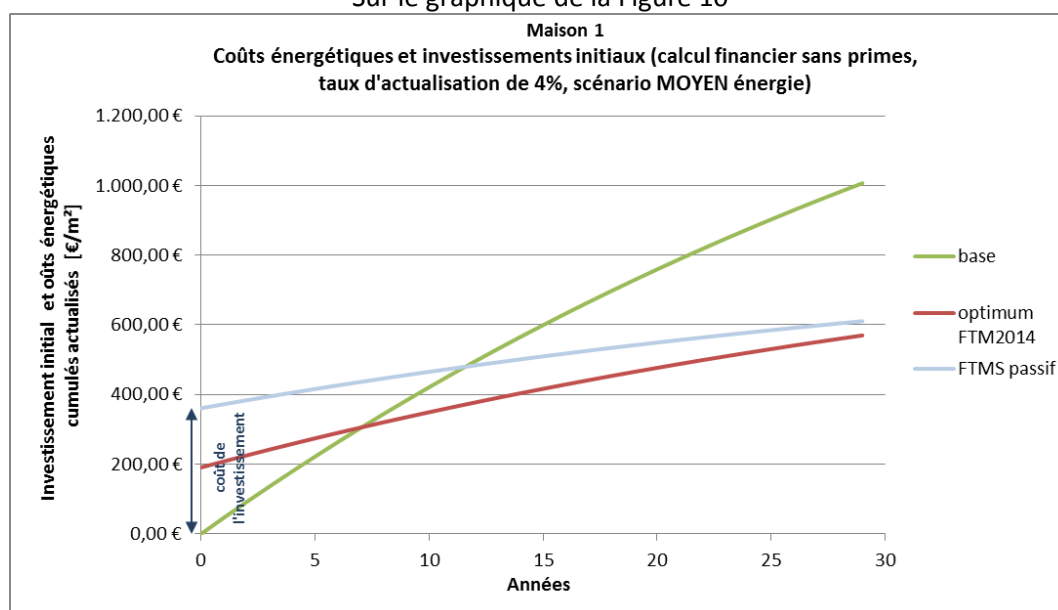


Figure 4, on observe que les courbes FTMS passif et FTMS 2014 se rejoignent quasiment au bout de la période de calcul de 30 ans même si l'investissement au temps 0 est plus important de 100€/m² pour la variante FTMS passif. En considérant un taux d'actualisation de 4% et une hausse moyenne du prix de l'énergie, le CGA de ces deux variantes ne diffère que très peu : seulement 7€/m² supplémentaires pour la variante FTMS passif.

La rénovation énergétique de la maison selon un optimum économique (soit FTMS 2014) est « amortie » après +/- 8 ans. Le temps de retour sur investissement d'une rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche du standard passif est, quant à lui, un peu plus long : environ 12 ans.

Dès lors, tant qu'à réaliser des travaux et ne connaissant pas avec certitude l'évolution du prix de l'énergie, il est clairement rentable de pousser l'isolation de cette maison jusqu'à atteindre une isolation « passive » de toutes les parois de l'enveloppe, qui permettra également d'améliorer le confort thermique des occupants.

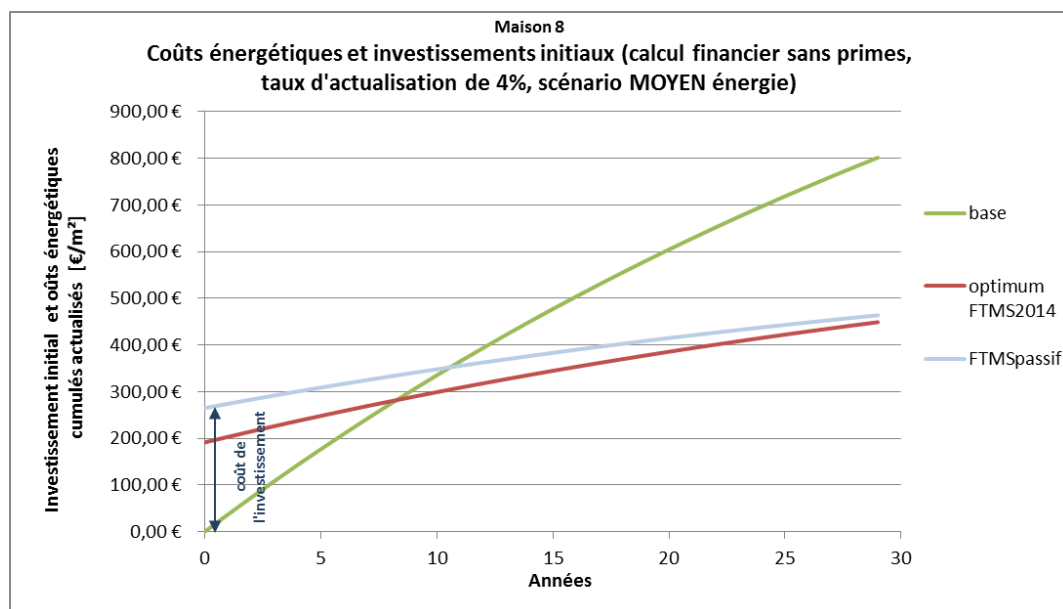


Figure 10 : investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - maison (8)

2.1.5. MAISON (11)

Nous analysons les résultats d'une maison 4 façades de type lotissement construite entre 1985 et 1995 et qui respecte la réglementation K70. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette maison unifamiliale sont indiquées dans le Tableau 13. L'optimum économique pour cette maison correspond à la variante V2014, c'est-à-dire au remplacement uniquement du vitrage par un nouveau double vitrage (avec un $U_g=1,1$ W/m².K). Les U de parois correspondant à la variante optimum et à la variante FTMS passif sont également repris dans le Tableau 13.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	m ³ /h.m ²
Maison 11	Base	2,40	0,53	0,68	0,76	12,0
	Optimum - V2014 (cas 2)	$U_g=1,1$	0,53	0,68	0,76	11,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 13 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et passif - maison 11

Sur le graphique de la Figure 11, on observe que la plupart des variantes ont un CGA plus élevé que celui de la BASE. La plupart des points se situent au-dessus de la ligne pointillée verte qui représente le CGA BASE. Seules les variantes correspondant au remplacement du vitrage seul (V) se situent sous cette ligne. Seules les variantes V2012, V2014 et V3 sont rentables.

Nous rappelons que pour la toiture de cette habitation, nous avons considéré une isolation de type « sarking » étant donné que les chambres sont situées dans les combles et qu'il est difficilement imaginable de casser toutes les finitions intérieures afin de placer un complément d'isolation. De

plus, cela prendrait de la place côté intérieur et réduirait la surface des chambres. Ce type d'isolation « sarking » implique un investissement initial plus élevé qu'une isolation par l'intérieur. Toutes les variantes qui comprennent une nouvelle isolation de la toiture présentent un CGA relativement élevé dû au coût de l'isolation de type « sarking ».

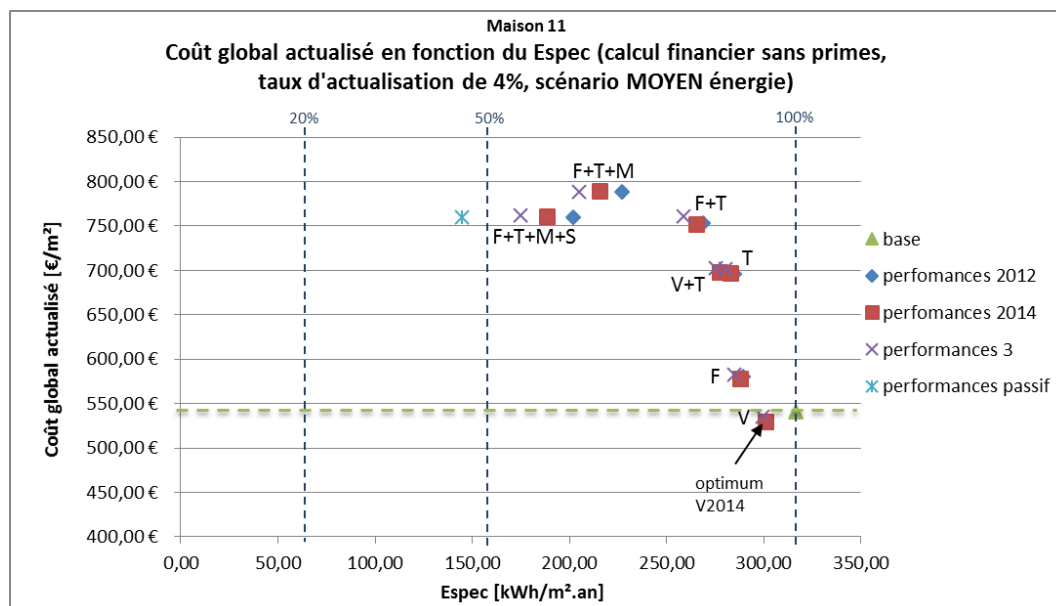


Figure 11 : coût global actualisé en fonction du Espec - maison (11)

Le CGA de la BASE est de 541€/m² tandis que le CGA de la variante optimum (V2014) est de 530€/m², soit un gain de 10 €/m². Le CGA de la variante V2012 est très proche (531€/m²) et le CGA de la variante V3 est également proche (535€/m²). En terme de gain sur la consommation d'énergie, ces 3 variantes « Vseul » permettent de réduire le Espec de 15kWh/m².an.

« V2014 » est donc l'optimum économique pour cette habitation mais cette stratégie de rénovation ne permet de réduire la consommation en énergie que de 5% par rapport à la BASE.

Toutes les autres variantes (F, T, VT, FT, FTM et FTMS) ne sont pas rentables. La variante FTMS passif présente un CGA de 760 €/m², soit une augmentation d'environ 220 €/m² par rapport à la même maison qui n'aurait subi aucune rénovation énergétique. Mais il faut quand même noter qu'isoler toute l'enveloppe du bâtiment jusqu'aux caractéristiques du passif permet de réduire la consommation en énergie de plus de 50%.

Telle que reprise dans le Tableau 14 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 5 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 15 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 15 € / m², soit 2.667 € pour le bâtiment. Cet investissement sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans. En effet le CGA de cette variante est de 530€/m², soit 10€/m² de moins que le CGA de la BASE.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cette maison (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 54 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 50% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 172 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 513 €/m², soit 90.857 € pour le bâtiment. Cet investissement initial ne sera pas rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans. Le CGA de cette variante FTMS passif est de 760€/m², soit 219€/m² plus élevé que le CGA de la BASE.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²	EUR/m ²
Maison 11	Base	177	44.000	249	0	315 (100%)	0 €	0 €	541 €	0 €
	Optimum - V2014 (cas 2)		41.260	233	15	300 (95%)	2.667 €	15 €	530 €	10 €
	FTMS Passif (cas 23)		13.577	77	172	144 (46%)	90.857 €	513 €	760 €	-219 €

Tableau 14 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE, optimum et « passif » – maison 11

Le temps de retour sur investissement pour la variante optimum V2014 est d'environ 15 ans (cfr Figure 12). La courbe rouge V2014 est quasiment collée à la courbe verte BASE. Au temps 0 la courbe rouge présente un léger investissement (15 €/m²), supérieur donc à l'investissement nul de la courbe verte BASE mais au bout de la période de calcul la courbe rouge arrive sous la courbe verte. La variante V2014 est donc bien l'optimum économique.

Quant à la courbe bleue qui représente la variante FTMS passif, on voit que l'investissement initial est tellement important (513 €/m²), que celui-ci n'est pas rentabilisé sur une période de 30 ans (voire plus).

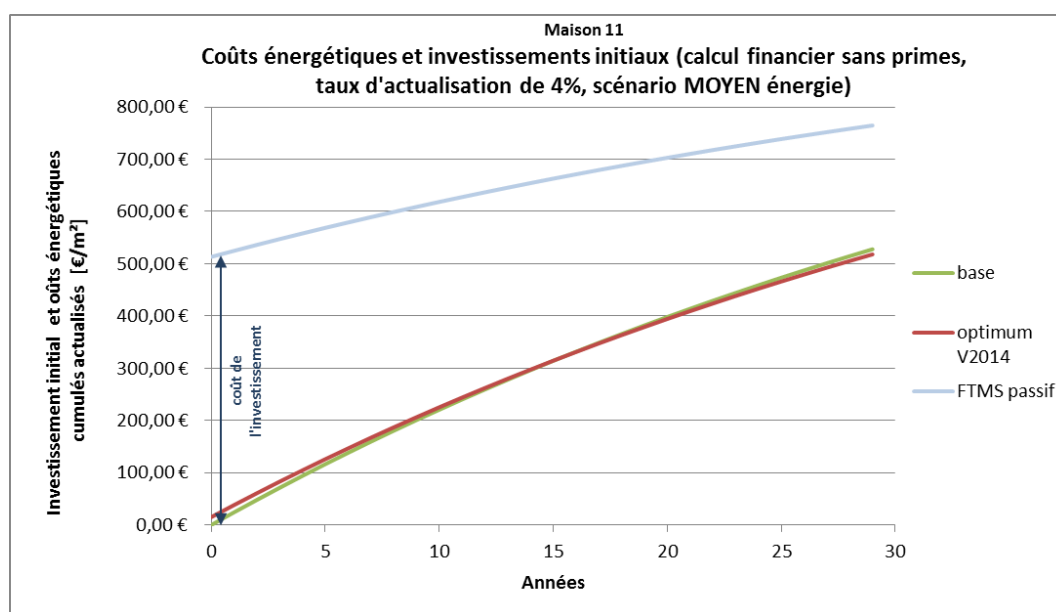


Figure 12 : investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - maison (11)

2.1.6. MAISON (14)

La maison analysée dans ce paragraphe est une maison 4 façades construite entre 1996 et 2008. Cette maison de type lotissement construite en banlieue de la ville respecte la réglementation K55, ses parois de déperdition possèdent un peu d'isolation. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette maison unifamiliale assez récente sont indiquées dans le Tableau 15.

L'optimum économique pour cette maison correspond à la variante T2014, c'est-à-dire à l'isolation de la toiture jusqu'à atteindre un $U=0,24 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	m ³ /h.m ²
Maison 14	Base	1,98	0,29 et 0,32	0,54	0,49	9,0
	Optimum - T2014 (cas 8)	1,98	0,24	0,54	0,49	7,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 15 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et passif - maison 14

Sur le graphique de la Figure 13, on observe que la plupart des variantes ont un CGA plus élevé que celui de la BASE. La plupart des points se situent au-dessus de la ligne pointillée verte qui représente le CGA BASE. Seules les variantes correspondant à l'isolation de la toiture seule (T) présentent un CGA identique quasiment au CGA de la base et sont donc quasiment rentables.

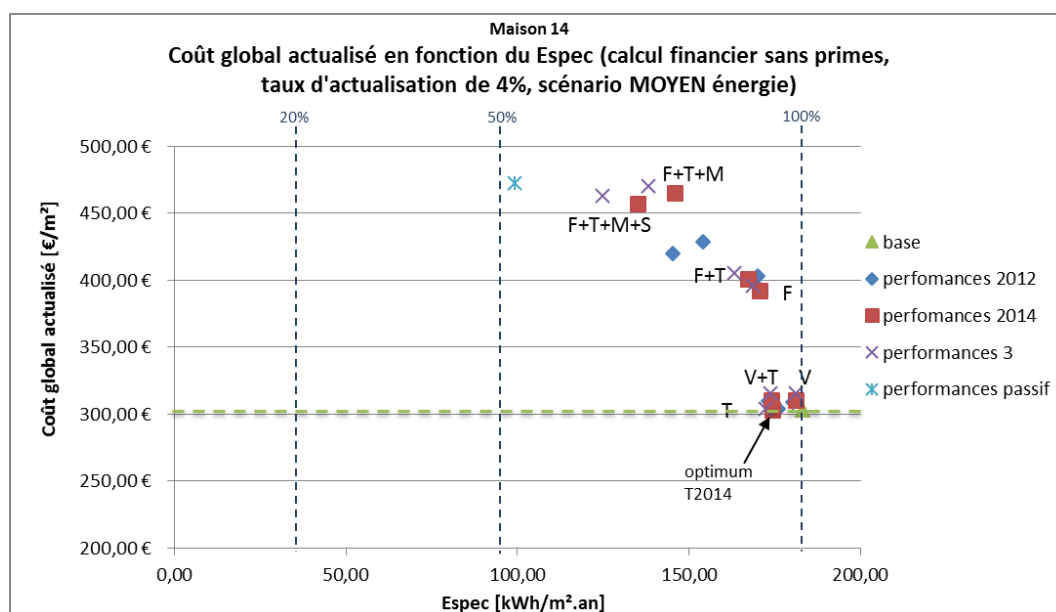


Figure 13 : coût global actualisé en fonction du Espec - maison (14)

Le CGA de la BASE est de 303 €/m² et le CGA de la variante T2014 est également de 303 €/m². Pour un même CGA, on consomme moins d'énergie avec la variante T2014. Cette stratégie d'isolation est donc à privilégier.

En effet, malgré un investissement initial de 14 €/m² pour isoler la toiture (T2014) et étant donné que la consommation spécifique en énergie primaire a diminué de 9 kWh/m².an ; au bout de 30 ans, le CGA est identique à celui de la BASE.

Le CGA de la variante T2012 est de 304 €/m² pour un Espec de 176 kWh/m².an.

Le CGA de la variante T2014 est de 303 €/m² pour un Espec de 174 kWh/m².an.

Le CGA de la variante T3 est de 304 €/m² pour un Espec de 172 kWh/m².an.

En terme de CGA ces 3 variantes sont très proches, ainsi qu'en terme de gain sur la consommation d'énergie également.

« T2014 » est l'optimum économique pour cette habitation mais cette stratégie de rénovation ne permet de réduire la consommation en énergie que de 5% par rapport à la BASE.

Toutes les autres variantes (F, V, VT, FT, FTM et FTMS) ne sont pas rentables. La variante FTMS passif présente un CGA de 473 €/m², soit une augmentation d'environ 170 €/m² par rapport à la même maison qui n'aurait subi aucune rénovation énergétique.

Telle que reprise dans le Tableau 16 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 5 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 9 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 14 € / m², soit 2.504 € pour le bâtiment. Cet investissement sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique au bout de 30 ans. En effet le CGA de cette variante optimum est identique au CGA de la variante BASE, soit 303€/m².

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cette maison (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 46 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 40% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 84 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 315 €/m², soit 55.038 € pour le bâtiment. Mais cet investissement initial ne sera pas rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans. Le CGA de cette variante FTMS passif est de 473€/m², soit 169€/m² plus élevé que le CGA de la BASE.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 14	Base	175	24.916	142	0	183 (100%)	0 €	0 €	303 €	0 €
	Optimum - T2014 (cas 8)		23.397	134	9	174 (95%)	2.504 €	14 €	303 €	0 €
	FTMS Passif (cas 23)		10.294	59	84	99 (54%)	55.038 €	315 €	473 €	-169 €

Tableau 16 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE, optimum et passif – maison 14

Le temps de retour sur investissement pour la variante optimum T2014 est de 30 ans (cfr Figure 14). La courbe rouge T2014 rejoint la courbe verte BASE au bout de 30 ans. Au temps 0 la courbe rouge présente un léger investissement (14 €/m²).

Quant à la courbe bleue qui représente la variante FTMS passif, on voit que l'investissement initial est tellement important (315 €/m²), que celui-ci n'est pas rentabilisé sur une période de 30 ans (voire plus).

Dès lors, il est clair que pour cette habitation, la meilleure rénovation énergétique à appliquer est de ré-isoler la toiture. Pour un coût global actualisé identique, le confort thermique des occupants sera amélioré.

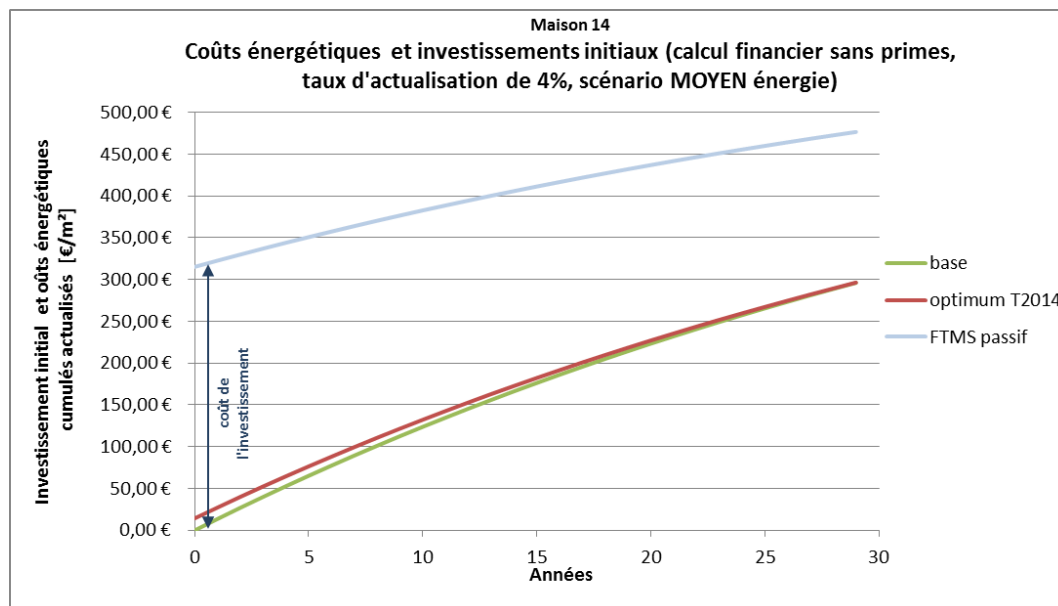


Figure 14 : investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - maison (14)

2.1.7. MAISON (15)

La dernière maison analysée dans le corps de ce rapport est une maison mitoyenne construite entre 1996 et 2008. Cette maison appartenant à un « quartier groupé d'habitations » respecte la réglementation K55, ses parois de déperdition possèdent de l'isolation. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette maison unifamiliale assez récente sont indiquées dans le Tableau 17.

L'optimum économique pour cette maison correspond à la variante BASE, c'est-à-dire qu'aucune des variantes étudiées n'est intéressante d'un point de vue économique. L'investissement initial réalisé ne sera pas rentabilisé sur la période de calcul de 30 ans.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 15	Base - Optimum	2,01	0,45	0,43	0,61	7,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 17 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et passif - maison 15

Sur le graphique de la Figure 15, on observe que toutes les variantes ont un CGA plus élevé que celui de la BASE. Tous les points se situent au-dessus de la ligne pointillée verte qui représente le CGA BASE.

Aucune variante étudiée ne permet de réduire la consommation spécifique en énergie primaire de plus de 50% par rapport à la maison BASE (ligne pointillée verticale bleue).

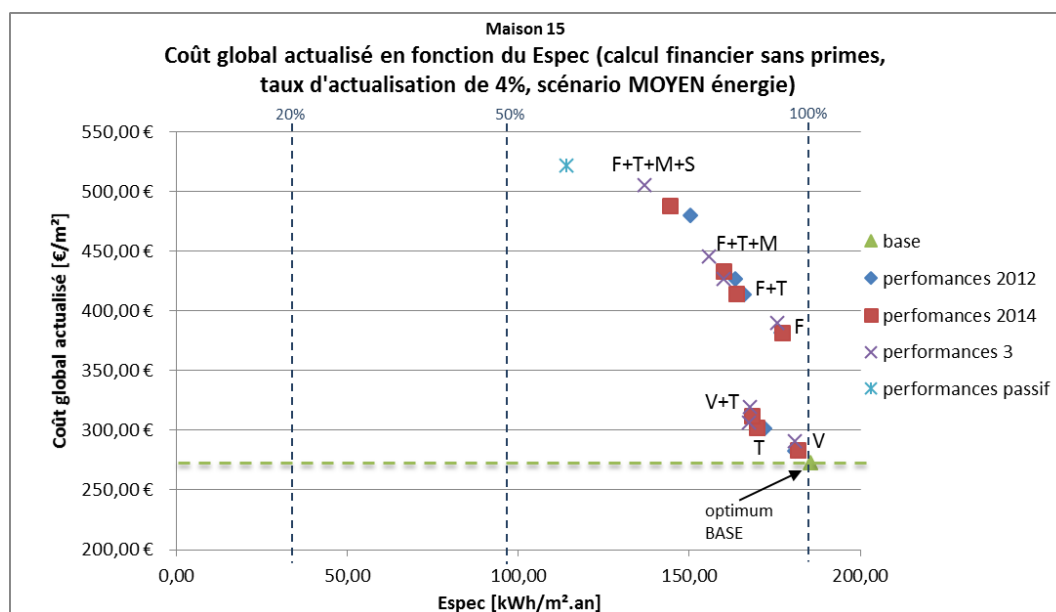


Figure 15 : coût global actualisé en fonction du Espec - maison (15)

Telle que reprise dans le Tableau 18 ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette maison correspondant à l'optimum économique (qui est la maison BASE) se traduit par :

- Une consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire de 185 kWh/m².an;
- Un surcoût d'investissement de 0 €/m² étant donné que l'optimum correspond à la maison BASE sur laquelle aucune rénovation énergétique n'est réalisée.
- Un CGA de 273 €/m².

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cette maison (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 44 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) par rapport à la maison BASE ;
- Une économie d'énergie en chauffage de 71 kWh/m².an ;
- Un surcoût d'investissement de 382 €/m², soit 42.000€ pour le bâtiment. Mais cet investissement initial ne sera pas rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans. Le CGA de cette variante FTMS passif est de 522€/m², soit 250€/m² plus élevé que le CGA de la BASE.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 15	Base - Optimum	110	15.092	137	0	185 (100%)	0 €	0 €	273 €	0 €
	FTMS Passif (cas 24)		7.252	66	71	114 (62%)	42.021 €	382 €	522 €	-249 €

Tableau 18 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas BASE, optimum et passif – maison 15

Sur le graphique de la Figure 16, on observe qu'aucune courbe ne se croise. La courbe verte BASE présente, tout au long de la période de calcul, un coût inférieur à celui de toutes les autres variantes. Aucun investissement réalisé pour améliorer l'enveloppe de ce bâtiment ne pourra être rentabilisé avant 30 ans (et plus). On ne connaît pas le temps de retour sur investissement des variantes étudiées.

Dès lors, selon les hypothèses choisies dans cette étude, il n'est pas rentable d'entreprendre des travaux de rénovation énergétique de l'enveloppe de cette habitation.

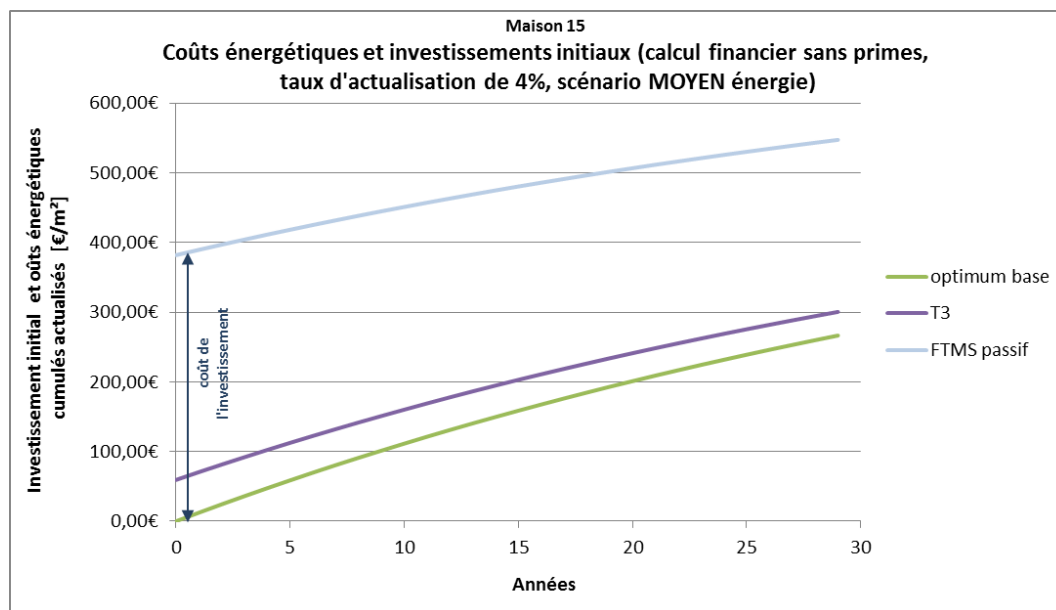


Figure 16 : investissement initial et coûts énergétiques cumulés en fonction du temps - maison (15)

2.2. Conclusions en fonction de la date de construction

Suite à l'analyse des résultats des habitations une par une, nous avons pu soulever des conclusions assez similaires en fonction de la date de construction (ou de rénovation) de l'habitation. Nous avons donc repris dans un tableau général les optima économiques pour chaque maison et certaines grandes conclusions se dégagent.

Le Tableau 19 reprend les optima économiques tandis que le Tableau 21 reprend la variante FTMS passif si celle-ci présente un CGA plus faible que celui de la base.

année de construction		Maisons unifamiliales existantes																											
		<1945										entre 1946 et 1970					entre 1971 et 1984			entre 1985 et 1995			entre 1996 et 2008						
Type d'habitation existante		1	1BIS	2	2BIS	3	3BIS	4	4BIS	5	5BIS	6	6BIS	7	7BIS	8	9	9BIS	10	11	12	13	14	15					
Type de paroi	Composition de la paroi existante																												
Fenêtres	Simple vitrage	F2014		F2014		F2014		F2012		Fpassif		Fpassif		F2014			V2012		Fpassif		V2014	V2012							
	Double vitrage non étanche		F2014																										
	Double vitrage étanche																												
Toiture	Toiture inclinée non étanche non isolée	T2014	T2014									Tpassif																	
	Toiture inclinée étanche non isolée																												
	Toiture inclinée étanche isolée - 4cm LM																												
	Toiture inclinée étanche isolée - 8cm LM																T2012												
	Toiture inclinée étanche isolée - 10cm LM																												
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM																												
	Toiture inclinée étanche isolée - 18cm LM																T3												
	Plancher du grenier non isolé		T2014		T2014		T2012		Spassif	Tpassif	Tpassif			Tpassif		T2014		T2012											
	Plancher du grenier isolé - 4cm LM				T2014																								
	Plancher du grenier isolé - 6cm LM																												
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM																												
	Mur	Plancher du grenier isolé - 15cm LM																											
Plancher du grenier isolé - 18cm LM																													
Toiture plate non isolée			T2014	T2014	T2014		T2012				Tpassif					T2014								T2014					
Toiture plate isolée - 4cm verre cellulaire																			Tpassif										
Mur plein non isolé		M2014	M2014	M2014	M2014	M2014	M2012	Mpassif	Mpassif	Mpassif																			
Mur creux non isolé																													
Mur creux isolé - 3cm LM																													
Mur creux isolé - 4cm LM																													
Plancher	Mur creux isolé - 5cm LM																												
	Mur creux isolé - 6cm LM																												
	Mur creux isolé - 6cm PUR																												
	Mur creux isolé - 5cm EPS																												
	Mur plein isolé - 3cm LM																												
	Structure bois isolé - 6cm LM																												
	Dalle sur sol non isolée																												
Plancher	Dalle sur cave non isolée																												
	Dalle sur sol isolée - 3cm PUR									Spassif	Spassif		Spassif			S2014			Spassif	Spassif									
	Dalle sur vide ventilé isolée - 2cm PUR																												
	Dalle sur vide ventilé isolée - 4cm PUR																												
	Dalle sur cave isolée - 4cm PUR																												
Dalle sur cave isolée - 4cm EPS																													
CONCLUSIONS GÉNÉRALES EN FONCTION DU TYPE D'HABITATION EXISTANTE ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION		Isoler toutes les parois															Isoler toutes les parois (sauf si déjà rénovées)					Isoler toutes les parois (sauf si déjà rénovées)			Isoler la toiture (surtout si c'est facile) et remplacer le vitrage			Ne rien faire ou isoler la toiture (surtout si c'est facile)	

Tableau 19 : tableau des résultats correspondant à l'optimum économique pour le résidentiel unifamilial

Légende	
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques du "passif"
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques '3'
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2014
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2012
	rentable (mais pas optimum) de rénover la paroi
	pas rentable de rénover la paroi
	conclusion difficile à donner car d'autres parois déjà isolées interviennent dans le CGA

Tableau 20 : légende code couleur utilisé dans le tableau des résultats

année de construction		<1945										Maisons unifamiliales existantes																
		1	1BIS	2	2BIS	3	3BIS	4	4BIS	5	5BIS	entre 1946 et 1970					entre 1971 et 1984			entre 1985 et 1995			entre 1996 et 2008					
Type d'habitation existante																												
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	fortement rénovée	non rénovée	fortement rénovée	non rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Double vitrage non étanche	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Double vitrage étanche	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture inclinée étanche non isolée	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture inclinée étanche isolée - 4cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture inclinée étanche isolée - 8cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture inclinée étanche isolée - 10cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture inclinée étanche isolée - 18cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Plancher du grenier non isolé	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Plancher du grenier isolé - 4cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Plancher du grenier isolé - 6cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
Mur	Plancher du grenier isolé - 15cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Plancher du grenier isolé - 18cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture plate non isolée	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Toiture plate isolée - 4cm laine cellulaire	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur plein non isolé	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur creux non isolé	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur creux isolé - 3cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur creux isolé - 4cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur creux isolé - 5cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur creux isolé - 6cm PUR	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Mur creux isolé - 5cm EPS	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
Plancher	Mur plein isolé - 3cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Structure bois isolé - 6cm LM	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur sol non isolée	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur cave non isolée	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur sol isolée - 3cm PUR	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur vide ventilé isolée - 2cm PUR	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE D'HABITATION EXISTANTE ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION	Dalle sur vide ventilé isolée - 4cm PUR	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur cave isolée - 4cm PUR	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur cave isolée - 4cm EPS	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
	Dalle sur cave isolée - 4cm EPS	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif	Passif
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE D'HABITATION EXISTANTE ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION		Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif										Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif					Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif			Isoler la toiture (surtout si c'est facile) et éventuellement remplacer le vitrage			Ne rien faire ou isoler la toiture (surtout si c'est facile)					

Tableau 21 : tableau des résultats correspondant à la variante FTMS passif si celle-ci est rentable par rapport à la BASE pour le résidentiel unifamilial

Pour les maisons d'avant 1945

Les maisons construites avant 1945 et qui n'ont pas encore été rénovées, présentent la plupart du temps, des parois non isolées et parfois même encore du simple vitrage. Dans ces cas, toute intervention de rénovation énergétique est la bienvenue afin de réduire la consommation énergétique et de gagner en confort.

L'optimum économique pour ces habitations varie entre FTM 2012, FTM 2014 et FTMS passif. Isoler le sol n'est pas toujours optimum mais cela reste rentable (case jaune) (cfr Tableau 19).

Et si on « pousse » les conclusions, on observe dans le Tableau 21 que la variante FTMS passif constitue quasiment toujours une approche rentable et permet surtout de réduire de près de 80% la consommation d'énergie par rapport à la maison BASE. Dans ce cas, le coût d'investissement initial lors de la rénovation est très important mais il sera intégralement récupéré au bout de 15 ans environ. Cela signifie que la diminution des coûts d'exploitation (facture énergétique) résultant de l'isolation optimale de cette maison compense largement l'investissement initial consenti.

Si certaines parois ont déjà subi une rénovation légère, telle que l'isolation d'un mur (par exemple, 3 cm de laine minérale sur le mur arrière de la maison 5BIS), alors il est rentable mais pas optimum de ré-isoler ces éléments plus récents et présentant une performance énergétique relativement bonne. En effet, les travaux connexes au placement d'une nouvelle isolation (coût de l'enlèvement de la finition existante, de l'isolant, nettoyage de la surface...) représentent un coût assez important par rapport au gain énergétique escompté.

Pour les maisons construites entre 1946 et 1970

Pour les maisons construites entre 1946 et 1970 qui n'ont pas été rénovées (maisons 6, 7 et 8), l'optimum économique correspond à la variante FTMS passif ou FTMS 2014 (pour la maison 8).

Pour les maisons construites à cette époque et qui ont déjà subi une rénovation énergétique (6 BIS et 7 BIS), l'optimum économique correspond à la maison BASE. Les éléments de bâtiment plus récents et présentant une performance énergétique relativement bonne, ne doivent plus bénéficier de rénovations énergétiques. En effet, les travaux connexes au placement d'une nouvelle isolation représentent un coût trop important par rapport au gain énergétique escompté.

A une exception près, si on peut sur-isoler facilement la toiture, c'est-à-dire si celle-ci ne présente pas de finitions intérieures ou si on prévoit de changer les tuiles/ardoises, alors il est intéressant de placer une isolation supplémentaire (jusqu'à obtenir au minimum un $U=0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Si on « pousse » les conclusions, on observe dans le Tableau 21 que la variante FTMS passif constitue toujours, pour les maisons non rénovées, une approche rentable.

Pour les maisons construites entre 1971 et 1984

L'optimum varie pour les 3 maisons construites à cette époque :

- La maison 9 : optimum VT2012
- La maison 9BIS (déjà rénovée) : optimum T3
- La maison 10 : optimum FTMS passif

Mais si on « pousse » les conclusions, on observe dans le Tableau 21 que la variante FTMS passif constitue une approche rentable sauf pour la maison 9 BIS qui est déjà rénovée et pour laquelle il n'est pas rentable de ré-isoler toutes les parois. Néanmoins, ré-isoler la toiture en vue d'atteindre un $U=0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ reste une opération rentable pour cette habitation 9 BIS et cela permettra également de réduire sa consommation en énergie et de gagner en confort thermique.

Pour les maisons construites entre 1985 et 1995

Si la maison respecte les exigences en vigueur au moment de la construction (à savoir K70), rénover les parois de déperdition ne se justifie pas sous l'angle du coût global actualisé. Etant donné qu'elles possèdent déjà quelques centimètres d'isolation, il n'est pas rentable de les ré-isoler car, encore une fois, le coût des travaux connexes (démolition des finitions, nouveau support éventuel pour l'isolant, placement d'un pare-vapeur, nouvelles finitions...) ne sera pas compensé par le gain énergétique sur 30 ans.

A une exception près, si on peut sur-isoler facilement la toiture, c'est-à-dire si celle-ci ne présente pas de finitions intérieures ou si on prévoit de changer les tuiles/ardoises, alors il est intéressant de placer une isolation supplémentaire (jusqu'à obtenir au minimum un $U=0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Pour les maisons 11 et 12, on observe qu'il est quand même intéressant de remplacer les fenêtres assez anciennes et non étanches par de nouvelles fenêtres plus étanches et avec du double vitrage performant.

Et il n'est pas intéressant de pousser l'isolation de ces habitations jusqu'à FTMS passif, cela n'est pas rentable (cfr Tableau 21). L'investissement nécessaire pour atteindre cette variante ne sera pas compensé par les économies d'énergie réalisées pendant la période de calcul.

Pour les maisons construites entre 1996 et 2008

Les conclusions sont similaires aux maisons construites entre 1985 et 1995. Si la maison respecte les exigences en vigueur au moment de la construction (à savoir K55), rénover les parois de déperdition ne se justifie pas sous l'angle du coût global actualisé.

Mais si on peut sur-isoler facilement la toiture, c'est-à-dire si celle-ci ne présente pas de finitions intérieures ou si on prévoit de changer les tuiles/ardoises, alors il est intéressant de placer une isolation supplémentaire.

Les conclusions dépendent donc des caractéristiques des parois existantes de l'habitation, leur état (neuf, à rénover, dans leur état initial, « intouchable ou inaccessible »...) et leur éventuelle rénovation (double vitrage, isolation de quelques centimètres, ...).

2.3. Conclusions en fonction du type de paroi existante

2.3.1. FENETRES

Pour les fenêtres simple vitrage

Dans tous les cas, si l'habitation possède encore du simple vitrage, il est rentable de remplacer toutes les fenêtres par des nouveaux châssis performants avec du double vitrage. Le nouveau raccord entre les nouvelles fenêtres et les murs existants est également rendu plus étanche.

Pour les fenêtres double vitrage (assez anciennes et peu étanches)

Pour ces fenêtres, les conclusions peuvent varier, soit il est intéressant de les remplacer par des nouveaux châssis performants avec du double vitrage, soit de remplacer uniquement le vitrage (notamment si le châssis est encore en bon état, dans les maisons plus récentes).

Pour les fenêtres double vitrage (plus récentes et étanches)

Il est rarement rentable de remplacer les fenêtres qui possèdent du double vitrage et qui ont été placées récemment ($U_w < 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$). Comme pour les fenêtres double vitrage peu étanches, il est soit rentable de les remplacer par des nouveaux châssis performants avec du double vitrage, soit rentable de remplacer uniquement le vitrage.

Même s'il existe aujourd'hui des châssis et des vitrages plus performants, l'investissement à consentir pour changer ces fenêtres ne sera jamais rentabilisé. En effet, les gains énergétiques cumulés sur 30 ans seront assez faibles (+/- 5 % sur le Espec).

Lorsque toute la fenêtre est remplacée, le raccord entre les nouvelles fenêtres et les murs est plus étanche ce qui permet de diminuer les pertes d'énergie par ces raccords. Il faudra également dans ce cas veiller à prévoir des amenées d'air dans les châssis et/ou placer un système de ventilation pour

garantir un climat sain dans le bâtiment et éviter tout problème lié à l'humidité (les coûts additionnels de cette intervention ne sont pas comptabilisés dans le CGA).

2.3.2. TOITURE

Pour la toiture inclinée non isolée

Il est toujours intéressant et rentable d'isoler les toitures inclinées qui ne possèdent pas d'isolant. Le temps de retour sur investissement de ce type d'intervention est souvent très court, moins de 10 ans.

Si l'on ré-isole la toiture, il faut d'abord s'assurer que la structure puisse supporter la surcharge due au poids de l'isolant et des éventuelles nouvelles finitions. De plus, si on le souhaite, il faut veiller à maintenir un espace fonctionnel (grenier aménageable...) et donc à ne pas placer une épaisseur d'isolant trop importante qui générerait l'utilisation de l'espace sous toiture.

Il faut également placer une sous toiture coté extérieur et un pare vapeur coté intérieur afin de protéger l'isolant des dégradations liées à l'eau et à l'humidité.

Pour le plancher du grenier non isolé

Si c'est le plancher du grenier qui délimite le volume protégé de l'habitation et s'il ne présente pas d'isolation, alors il est très vite rentable de l'isoler. En effet, il est souvent très facile et peu coûteux d'isoler le plancher du grenier (simplement en posant l'isolant sur la finition supérieure du plancher, ou en plaçant/injectant de l'isolant dans la structure...). Dans tous les cas, il est intéressant d'atteindre un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Pour la toiture plate non isolée

Il est rentable d'isoler les toitures plates qui ne possèdent pas d'isolant, l'investissement réalisé est très vite rentabilisé.

Atteindre un $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (T 2014) est souvent l'optimum économique (selon les combinaisons de mesures étudiées). Et pousser l'isolation de cette toiture plate jusqu'à atteindre un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (T passif) reste rentable dans la plupart des cas.

Dans le cas d'une nouvelle isolation de toiture plate, il faut s'assurer que le poids du nouveau lestage pourra être supporté par la structure de la toiture existante. Il faudra également remonter les acrotères si cela s'avère nécessaire.

Pour la toiture inclinée isolée

Isoler une toiture qui présente déjà quelques centimètres d'isolant (selon notre étude, jusqu'à 18cm) est, la plupart du temps, rentable. S'il est facile d'accéder à la toiture et si celle-ci ne présente pas de finition intérieure ou extérieure à démolir, alors, on peut pousser l'isolation de la toiture jusqu'à obtenir un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ (T passif) (selon les combinaisons de mesures étudiées).

Il reste rentable de ré-isoler une toiture qui possède déjà 18cm d'isolant (maison 14) présentant un U de $0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour atteindre un $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (T 2014).

Pour le plancher du grenier isolé

Il en va de même que pour la toiture inclinée : isoler un plancher de grenier qui présente déjà quelques centimètres d'isolant (selon notre étude, jusqu'à 18cm) est rentable.

Il n'est pas toujours optimum de pousser l'isolation du plancher du grenier jusqu'à obtenir un $U=0,15W/m^2.K$ (T passif) mais cela reste, dans tous les cas, intéressant économiquement.

Pour la toiture plate isolée

Tout dépend de l'épaisseur présente, si l'épaisseur d'isolant est inférieure à 4cm, alors ré isoler est rentable².

Si l'épaisseur est supérieure à 4cm, il est difficile de dire si la rénovation énergétique qui sera réalisée au niveau de cette toiture plate sera rentable ou non car aucun cas similaire n'a été étudié dans le cadre de cette étude.

2.3.3. MURS

Pour les murs pleins non isolés

Concernant les murs pleins qui ne possèdent pas d'isolant : il est tout à fait rentable de les isoler. Dans tous les cas, il est rentable de pousser l'isolation de ces murs jusqu'à obtenir un $U=0,15W/m^2.K$ mais cela ne correspond pas toujours à l'optimum économique (cfr Tableau 19).

L'isolation par l'extérieur est à privilégier, afin d'éviter les ponts thermiques et les éventuels problèmes de condensation et de moisissures. Il faut également prévoir une nouvelle finition extérieure, comme un crépi sur isolant.

Pour les murs creux non isolés

Il en va de même pour les murs creux, il est tout à fait rentable de les isoler et atteindre un $U=0,15W/m^2.K$. Remplir la coulisse en y injectant une mousse isolante n'est souvent pas suffisant, il faut alors isoler au-delà de la brique de parement et ajouter une nouvelle finition extérieure. Cela coûte assez cher mais l'investissement est rentabilisé en moins de 30 ans.

Pour les murs pleins isolés

Il est rentable, mais pas optimum (cfr Tableau 19), de ré-isoler les murs pleins présentant une isolation de 3cm² (exemple : isolation extérieure de 3cm de laine minérale dans un lattage protégé par un bardage, maison 5 BIS). Si on souhaite « pousser » cette isolation pour atteindre un $U=0,15W/m^2.K$ (M passif), cela reste encore rentable mais ça ne correspond pas à l'optimum économique.

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas étudié de bâtiment existant qui possède des murs pleins et plus de 3cm d'isolation. Nous ne pouvons donc pas tirer de conclusions au-delà de 3cm d'isolant.

Tant que l'on touche à une paroi pour d'autres raisons que des raisons énergétiques (finition intérieure ou extérieure abîmée et donc à refaire), autant en profiter pour ré-isoler car, dans ce cas, le coût supplémentaire induit par l'isolation est très faible et l'investissement très vite rentabilisé.

² L'épaisseur d'isolant est à nuancer car l'échantillon analysé ne présente que peu de cas

Pour les murs creux isolés

Si on ré-isole les murs creux qui possèdent déjà 3cm d'isolant² dans leur coulisse, cela est rentable. La sur-isolation de la paroi jusqu'à obtenir un $U=0,15\text{W/m}^2\text{K}$ sera généralement intéressante, rentable mais pas optimum.

Mais si l'épaisseur d'isolation existante est supérieure à 3 cm, alors, selon les combinaisons de mesures étudiées, il n'est pas rentable de sur isoler la paroi à cause du coût des travaux connexes.

2.3.4. PLANCHER

Pour la dalle de sol non isolée

Dans la plupart des cas, il est intéressant et rentable d'isoler la dalle de sol jusqu'à obtenir un $U=0,15\text{W/m}^2\text{K}$ mais cela ne correspond pas à l'optimum économique. En effet, les travaux connexes au placement d'une isolation de sol comme la démolition du revêtement de sol existant, la réalisation d'une nouvelle chape et la pose d'un nouveau revêtement présentent un coût important, ce qui ne permet pas à cette rénovation énergétique d'être l'optimum économique.

Pour la dalle sur cave non isolée

Dans tous les cas, il est intéressant d'isoler le plancher sur cave jusqu'à obtenir un $U=0,15\text{W/m}^2\text{K}$, cela correspond même à l'optimum économique (dans nos combinaisons de mesures).

Il est souvent facile et peu coûteux d'isoler ce type de plancher par le dessous en collant ou en fixant des panneaux d'isolants rigides. Il faut néanmoins prêter attention à ce que la hauteur sous plafond en cave restante soit suffisante si l'on souhaite conserver une cave fonctionnelle.

Pour la dalle de sol isolée

Il n'est pas rentable de ré-isoler les dalles sur sol qui présentent déjà quelques centimètres d'isolant. En effet, les travaux connexes au placement d'une isolation de sol présentent un coût important et ces interventions ne sont alors pas rentables.

Pour la dalle sur vide ventilé ou sur cave isolée

Selon les combinaisons des mesures que nous avons étudiées, il n'est pas rentable de ré isoler les planchers sur cave ou sur vide ventilé présentant une isolation existante supérieure² à 2cm. Le coût de l'isolant complémentaire placé ne sera pas rentabilisé avant 30 ans.

2.4. Prise en compte des consommations réelles

Il est à remarquer que nos conclusions reposent sur des consommations théoriques issues du logiciel PEB (version 5). Ces consommations surestiment souvent les consommations réelles d'une habitation.

Il est difficile de connaître précisément les consommations réelles de chaque habitation, celles-ci dépendent de nombreux facteurs et notamment du comportement des habitants.

Les conclusions tirées sur base des consommations réelles d'un échantillon limité de bâtiments pourraient être quelque peu différentes des conclusions présentées dans le cadre de cette étude.

Dans le rapport de la tâche 1 « comparaison consommation réelle VS consommation théorique » nous avons déterminé un facteur de correction à appliquer à la consommation théorique afin de s'approcher de la consommation réelle.

Les résultats basés sur cette « consommation réelle » pour les maisons 1, 4, 6, 8, 11, 14 et 15 sont repris à l'annexe F. Il faut noter que, pour réaliser ces graphiques, le même facteur de correction (0,50 ou 0,52 ou ...) a été appliqué à toutes les variantes étant donné que nous ne connaissons pas le facteur de correction à appliquer aux variantes rénovées.

2.5. Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de bâtiments résidentiels unifamiliaux en Wallonie?

Pour les maisons plus anciennes, construites avant 1984, une rénovation énergétique de l'ensemble des parois de déperdition jusqu'à un niveau de performances proches du passif est dans la plupart des cas rentabilisé sur 30 ans. Cette stratégie d'isolation ne correspond pas toujours à l'optimum économique mais c'est la stratégie qui permet de réduire le plus fortement la consommation spécifique en énergie primaire. Pour ces maisons, l'optimum économique permet bien souvent de réduire la consommation de 50-60% tandis que la variante FTMS « passif » permet de réduire la consommation de près de 80% (selon les cas) par rapport à la maison BASE.

Pour les maisons plus récentes, construites entre 1985 et 2008 et respectant donc déjà une réglementation thermique (K70 ou K55), une rénovation énergétique de l'ensemble des parois de déperdition n'est jamais intéressante économiquement (l'investissement n'est pas rentabilisé sur la période de calcul de 30 ans). Pour ces habitations, il est éventuellement rentable de ré-isoler la toiture jusqu'à obtenir un $U=0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ou encore de remplacer le vitrage si celui-ci présente un $U_g > 2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il en va de même pour les maisons qui ont déjà subi des rénovations énergétiques et possèdent déjà des fenêtres double vitrage ou une isolation en toiture.

Par conséquent, vu la proportion (80%) de maisons unifamiliales construites avant 1984 sur le territoire wallon, il semble logique de soutenir en priorité l'amélioration de l'intégralité de l'enveloppe de ces bâtiments, au besoin en soutenant cette rénovation énergétique par des primes ciblées afin de rapprocher ces bâtiments du niveau de performance typique des bâtiments « passifs ».

Une seconde orientation à prendre par l'administration wallonne serait de s'attaquer à la rénovation énergétique des toitures de toutes les habitations (même les plus récentes donc), de manière à

relever leur niveau de performance à un niveau $U_{\text{Toit}} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Un subside spécifique calculé sur base du surcout d'investissement spécifique pourrait être accordé pour l'isolation de ces toitures.

La priorité n°1 est donc d'améliorer la performance énergétique de l'enveloppe. Et ensuite, afin de réduire de manière plus encore importante la consommation énergétique, la seconde priorité est d'améliorer la performance des systèmes (chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation..) afin d'atteindre des objectifs plus ambitieux tels qu'une réduction de 80% de la consommation d'énergie primaire de ce parc de bâtiments résidentiels.

3. Conclusions pour les immeubles à appartements

Dans le cadre de la tâche 1 nous avons sélectionné dix géométries-type d'immeubles représentant une majorité de typologies des bâtiments récents ou plus anciens rencontrés en Wallonie. Une époque de construction permettant de déterminer les performances thermiques de l'enveloppe est associée à chaque type de géométrie.

Sur base de l'étude de ces 10 immeubles de référence, nous tirons des conclusions selon les typologies d'immeubles et selon les caractéristiques des parois. Ces conclusions générales sont reprises dans le tableau de synthèse regroupant ces dix immeubles à appartements de référence ainsi que leurs caractéristiques, repris à l'annexe C.

L'étude différencie les maisons d'habitation unifamiliale transformées en quelques appartements des immeubles construits avec la destination d'appartement directement et comprenant généralement un nombre plus important d'appartements. La division d'une maison d'habitation en plusieurs unités de logement se fait généralement dans des anciennes constructions (datant d'avant 1970) et s'accompagne parfois de la construction d'une extension. Cette dernière est donc généralement plus récente, et est parfois composée de parois parfois déjà isolées. Cette présence d'isolation dans certaines parois influence la rentabilité des travaux envisagés sur ces types de parois (vitrages, fenêtres, toitures, murs ou sols), y compris les parties plus anciennes, et cela en fonction de leur proportion dans l'ensemble du bâtiment. La présente étude portant sur l'ensemble du bâtiment, les conclusions doivent être adaptées au cas par cas, selon le niveau d'isolation du bâtiment dans son état initial.

Des informations plus détaillées concernant chaque typologie se trouvent dans le rapport de la tâche 1 « Détermination synthétique du parc de bâtiments résidentiels existants en Wallonie ».

Dans la suite de ce rapport, nous analysons en détail les résultats de 5 des 10 immeubles représentant le parc immobilier wallon. Les résultats des 5 autres immeubles se trouvent en annexe.

- L'immeuble 1 : immeuble construit avant 1919 constitué de 5 niveaux comprend chacun deux logements. Le rez-de-chaussée abrite en plus un garage ainsi que la chaufferie. La façade arrière est partiellement mitoyenne. Les châssis sont en bois et possèdent du double vitrage mais sont déjà assez anciens, aucune paroi n'est isolée.
- L'immeuble 3 : ancienne maison d'habitation construite avant 1919 comportant 4 niveaux chauffés. Le rez-de-chaussée est occupé par un service. Les trois étages supérieurs sont respectivement occupés par un appartement, dont le dernier est mansardé. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée.
- L'immeuble 8 : immeuble construit entre 1971 et 1990, de type « barre de logements ». L'immeuble est composé de 3 groupes de 36 appartements chacun. Le lot d'appartements situé au centre de l'immeuble est donc entouré par les lots situés aux extrémités. Les châssis sont en pvc équipés de double vitrage, aucune paroi n'est isolée.
- L'immeuble 9 : immeuble construit après 1990 comprenant 5 appartements. Les parois sont donc légèrement isolées, les châssis sont en bois avec double vitrage.
- L'immeuble 10 : immeuble construit après 1990 comprenant 10 appartements. Les parois sont donc également légèrement isolées, les châssis sont en aluminium avec double vitrage.

En plus de déterminer la rénovation correspondant à un optimum économique strict selon les hypothèses de l'étude COZEB originale, nous avons systématiquement analysé la variante « FTMS passif », correspondant généralement à des réductions de consommation d'énergie primaire de plus

de 50% par rapport à l'immeuble de référence. Cette variante permet de s'affranchir au maximum des sources d'énergie conventionnelles et d'être moins dépendant des fluctuations du coût de l'énergie. Dès que le CGA de cette variante se situe sous la ligne pointillée du CGA de la base, l'intervention peut conserver un intérêt pour la rénovation énergétique de l'enveloppe, sans forcément représenter un optimum économique.

A noter également, que sans intervention adéquate au niveau des systèmes (ventilation intensive...) ainsi que de l'ombrage (protections solaires,...), la rénovation énergétique de l'enveloppe seule entraîne un risque de surchauffe dans certains appartements. Ce facteur de risque n'a pas été analysé précisément dans la présente étude. En effet, les deux paramètres influençant fortement la surchauffe sont la surface de fenêtres ouvrantes et l'ombrage réel de chaque ouverture. N'étant liés ni à la typologie ni à l'époque de construction et pouvant varier énormément d'un bâtiment à l'autre, ces paramètres n'ont pas été encodés en détail pour ne pas fausser les résultats. Les fenêtres sont toutes considérées comme fixes et l'ombrage pris en compte est celui par défaut. La consommation pour les besoins de refroidissement est donc bien prise en compte dans les calculs et correspond au cas le plus défavorable en termes de surchauffe.

3.1. Illustrations des conclusions

Nous allons illustrer ci-dessous les conclusions relatives à 5 des immeubles à appartements étudiés. Les résultats des cinq autres immeubles sont placés en annexe.

3.1.1. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 1

Il s'agit d'un bâtiment construit avant 1919 avec la destination d'immeuble à appartements dès sa création. Il est constitué de 5 niveaux comprenant chacun deux logements. Le rez-de-chaussée abrite en plus un garage ainsi que la chaufferie, situés hors du volume protégé. La façade arrière est partiellement mitoyenne. Les châssis sont en bois et possèdent du double vitrage mais sont déjà assez anciens, aucune paroi n'est isolée. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cet immeuble (dans son état d'origine) sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour cet immeuble de référence correspond à la variante FT2014+M2012, et se traduit par les interventions suivantes :

- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences PEB 2014 ($U_w = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures par l'extérieur selon les exigences PEB 2014 ($U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des murs par l'intérieur selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h.m}^2$
Immeuble 1	Base	3,85	3,00	2,15	0,51	15,0
	Optimum FT2014+M2012 (cas17)	1,80	0,24	0,32	0,51	5,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 22 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - immeuble 1

Sur le graphique de la Figure 17 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à un optimum économique est la variante FT2014 + M2012. Tous les points présentent un CGA inférieur à

celui de la base (en pointillés verts sur le graphique), à l'exception de la variante « remplacement des fenêtres ».

Seules les combinaisons de mesures FTM et FTMS permettent de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cet immeuble (Espec), mais aucune rénovation ne permet de la réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

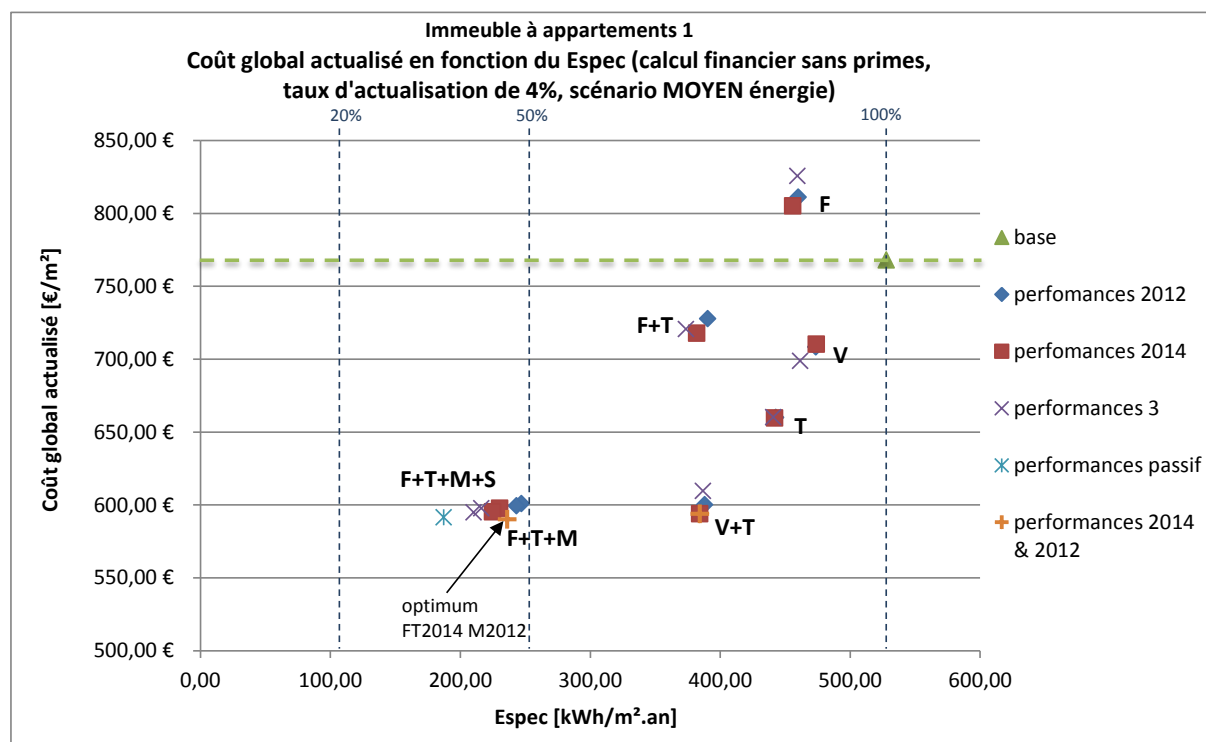


Figure 17 : coût global actualisé en fonction du Espec – immeuble 1

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cet immeuble de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 55 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 300 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 258 € / m², soit 234.874 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 65 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 10% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 356 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 344 € / m², soit 313.747 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 591,4€/m² alors que le CGA de la variante optimum est de 590,1€/m², soit une différence minime de 1,3€/m². La surface de plancher chauffé de cet immeuble étant de 911,8 m², la différence financière totale entre les deux variantes de rénovation est de 1185€

sur 30 ans. Le surcoût d'investissement de cette variante passive par rapport à la variante optimum qui est de 78.873 €, est donc rentabilisé à 98,5% par l'économie d'énergie supplémentaire.

Immeuble 1		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²	EUR/m ²
Immeuble 1	Base	912	406.001	445	0	528 (100%)	0 €	0 €	768 €	0 €
	Optimum FT2014+M2012 (cas17)		132.859	146	300	236 (45%)	234.874 €	258 €	590 €	178 €
	Passif (cas23)		81.102	89	356	187 (35%)	313.747 €	344 €	591 €	177 €

Tableau 23 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et passif immeuble 1

Sur le graphique de la figure 18, on observe que les courbes des variantes optimum et passif se rejoignent quasiment au bout de la période de calcul de 30 ans; et cela même si l'investissement initial est plus important. En considérant, un taux d'actualisation de 4% et une hausse moyenne du prix de l'énergie, le CGA de ces deux variantes ne diffère que très peu ; seulement 1,3 €/m² supplémentaire pour la variante FTMS passif.

Les temps de retour sur investissements des deux scénarii de rénovation sont assez proches : 15 ans pour la rénovation correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude (FT2014 + M2012) et 17 ans pour la rénovation énergétique maximale de l'enveloppe (FTMS passif).

La rénovation d'un bâtiment selon les caractéristiques du passif a l'avantage de s'affranchir au maximum de l'énergie dont nous ne connaissons pas avec certitude l'évolution de prix, et permet d'améliorer le confort thermique des occupants.

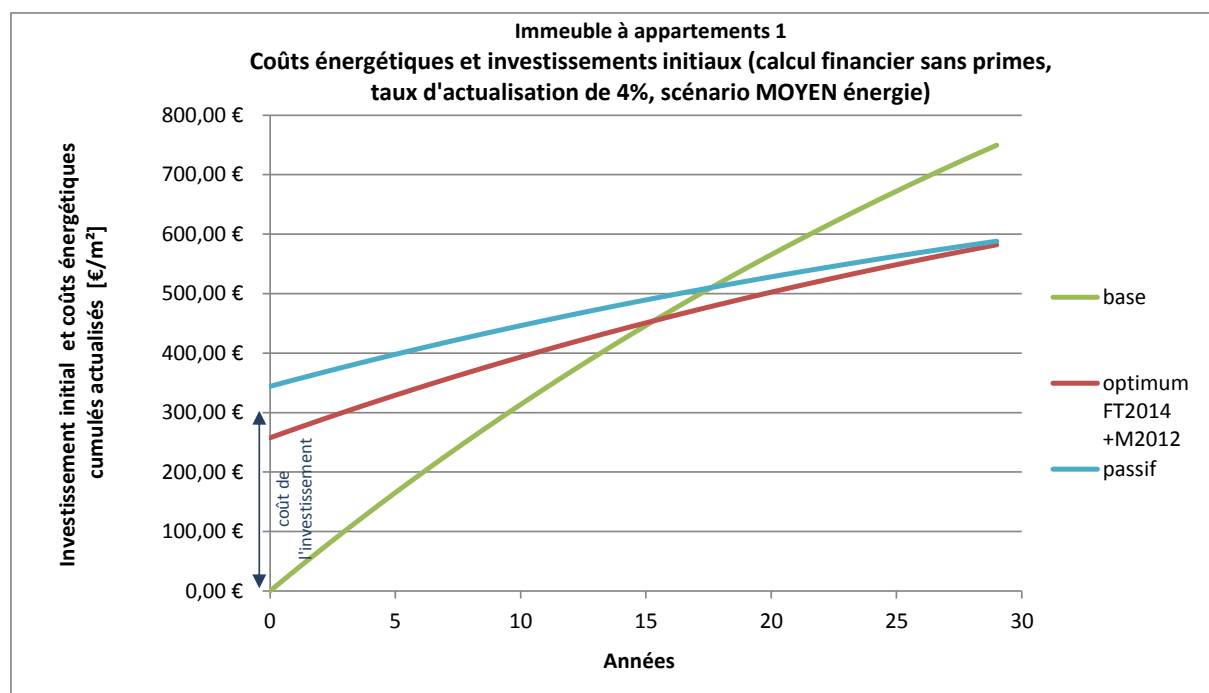


Figure 18 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – immeuble 1

3.1.2. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 3

Il s'agit d'une ancienne maison d'habitation construite avant 1919 et divisée ultérieurement en 3 appartements et 1 surface de service située au rez-de-chaussée. Les trois étages supérieurs sont respectivement occupés par un appartement, dont le dernier est mansardé. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cet immeuble (dans son état d'origine) sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour cet immeuble de référence correspond à la variante FT2014 + M2012, et se traduit par les interventions suivantes :

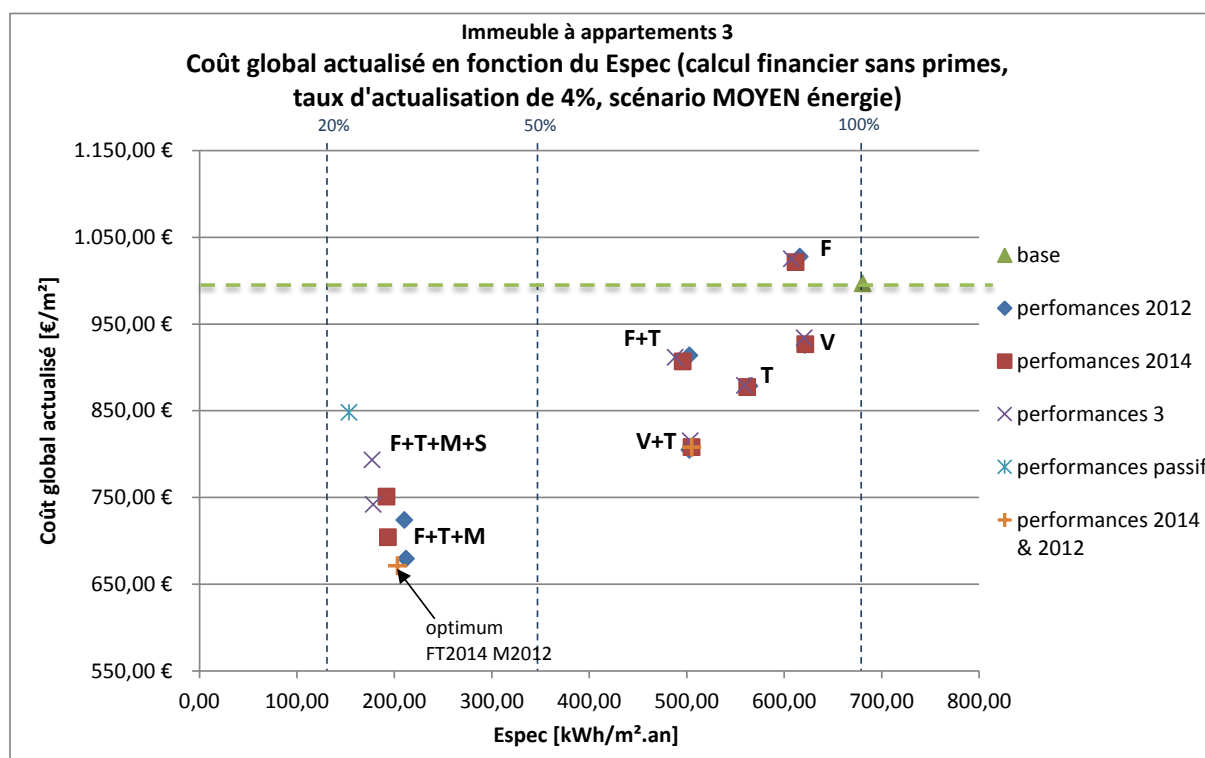
- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences PEB 2014 ($U_w = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures par l'intérieur selon les exigences PEB 2014 ($U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des murs par l'intérieur en façade à rue et par l'extérieur en façades arrières selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h.m}^2$
Immeuble 3	Base	5,07	1,70	2,30	1,39	15,0
	Optimum FT2014+M2012 (cas17)	1,80	0,24	0,32	1,39	5,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 24 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - immeuble 3

Sur le graphique de la Figure 19 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à un optimum économique est la variante FT2014 + M2012. Tous les points présentent un CGA inférieur à celui de la base (en pointillés verts sur le graphique), à l'exception de la variante « remplacement des fenêtres ».

Seules les combinaisons de mesures FTM et FTMS permettent de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cet immeuble (E_{spec}), mais aucune rénovation ne permet de la réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).



Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cet immeuble de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 70 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 479 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 371 € / m², soit 86.014 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 77 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 7% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 533 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 644 € / m², soit 149.294 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 848 €/m² alors que le CGA de la variante optimum est de 671 €/m², soit une différence de 177 €/m². Le CGA de la base est de 996 €/m², isoler tous le bâtiment jusqu'au « passif » est donc rentable sur une période de 30 ans, mais ne correspond pas à l'optimum économique.

Immeuble 3		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espece	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
		m²								
Immeuble 3	Base	232	144.983	625	0	681 (100%)	0 €	0 €	996 €	0 €
	Optimum FT2014+M2012 (cas17)		33.935	146	479	203 (30%)	86.014 €	371 €	671 €	325 €
	Passif (cas23)		21.305	92	533	154 (23%)	149.294 €	644 €	848 €	149 €

Tableau 25 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » immeuble 3

Sur le graphique de la figure 20, on observe que les courbes des variantes optimum (économique) et passif ont une évolution semblable sur 30 ans. Dans les deux cas, la rénovation est rentabilisée dans ce délai par la diminution de la consommation énergétique. Toutefois, l'investissement initial de la rénovation passive étant plus important, le retour sur investissement ne se fera qu'après 24 ans, alors que la rénovation selon l'optimum économique est rentabilisée après 14 ans.

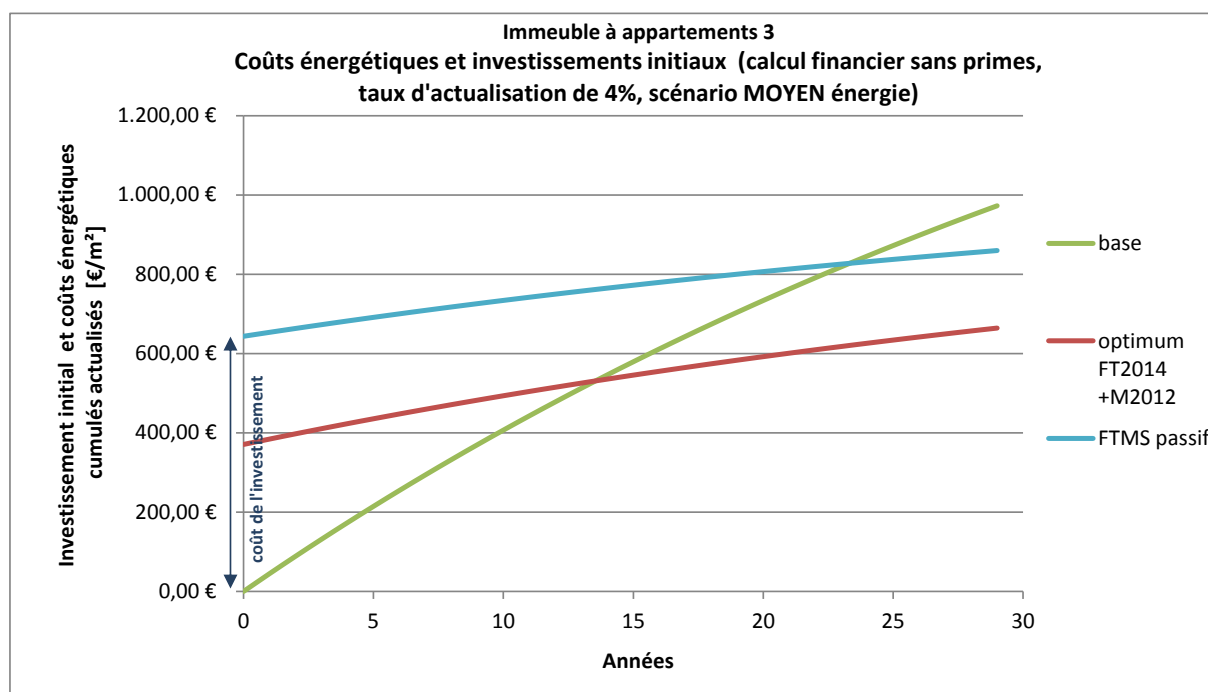


Figure 20 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – immeuble 3

3.1.3. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 8

Il s'agit d'un immeuble construit entre 1971 et 1990, de type « barre de logements ». L'immeuble est composé de 3 bâtiments de 36 appartements chacun. Le lot d'appartements situé au centre de l'immeuble est donc entouré par les lots situés aux extrémités. Les châssis sont en pvc équipés de double vitrage, aucune paroi n'est isolée.

Dans le but de déterminer la rénovation correspondant à un optimum économique la plus précise et maximiser l'étude de cas possibles pour cette époque de construction, nous avons distingué l'étude du bâtiment central de celles des bâtiments latéraux.

Les performances énergétiques de l'enveloppe des lots situés aux extrémités (dans leurs états d'origine) sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour les bâtiments latéraux correspond à la variante FTMS passif, et se traduit par les interventions suivantes :

- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences passives ($U_w = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation de la toiture par l'extérieur selon les exigences passives ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des murs par l'extérieur selon les exigences passives ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation du sol par le bas selon les exigences passives ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Immeuble 8A		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h.m}^2$
	Base	2,75	1,10	2,72	0,72	14,0
	Optimum FTMS Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 26 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum passif - immeuble 8A

Sur le graphique de la Figure 21 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à un optimum économique est la variante FTMS passif.

Seules les combinaisons de mesures FTMS performance 3 et FTMS passif permettent de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cet immeuble (E_{spec}), aucune rénovation ne permet de la réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

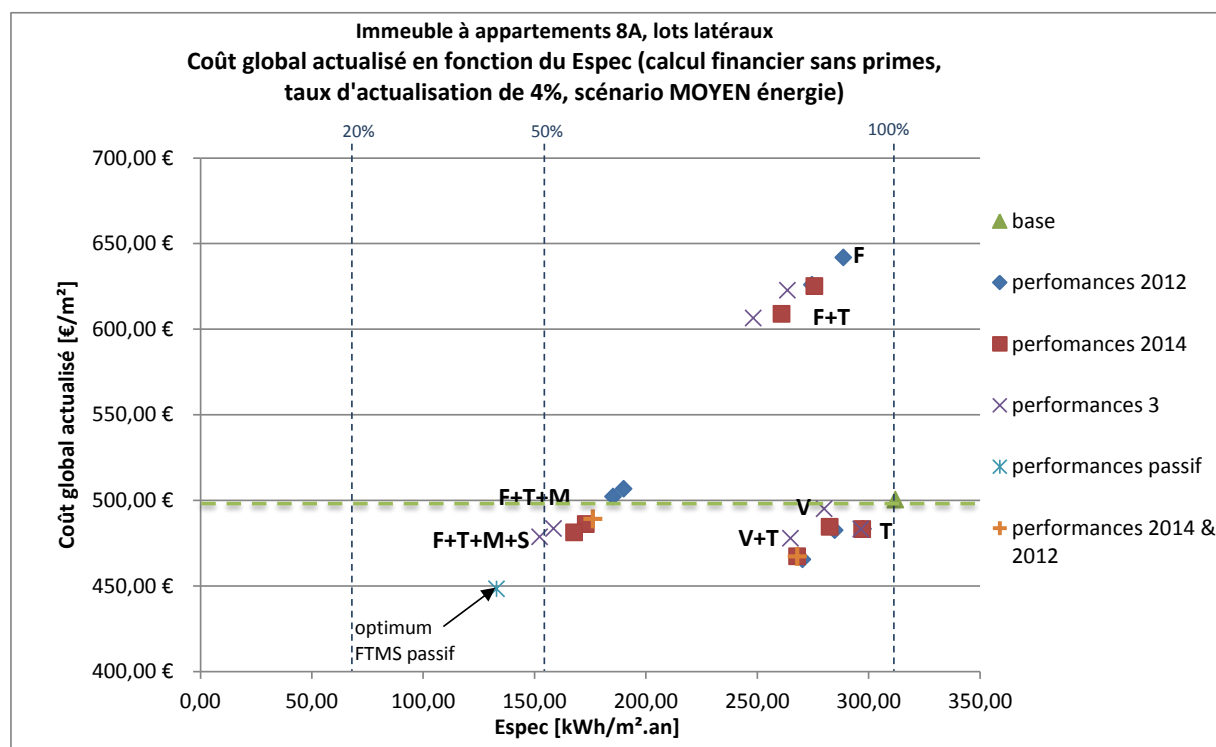


Figure 21 : coût global actualisé en fonction du Espec – immeuble 8A

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de ces bâtiments de référence correspondant à l'optimum économique, étant la variante passive dans ce cas, se traduit par :

- Une réduction de 57 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 192 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 266 € / m², soit 683.443 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La variante « passif » présente un CGA de 448 €/m² alors que le CGA de la base est de 500 €/m², isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » est donc rentable sur une période de 30 ans, et correspond à l'optimum économique.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 8A	Base	2566	668.352	260	0	312 (100%)	0 €	0 €	500 €	0 €
	Optimum FTMS Passif (cas23)		176.386	69	192	133 (43%)	683.443 €	266 €	448 €	52 €

Tableau 27 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base et optimum passif immeuble 8A

La Figure 22 montre que l'investissement initial correspondant à la rénovation optimum est rentabilisé après 24 ans et permet, au bout de 30 ans, de diminuer le CGA d'environ 10%.

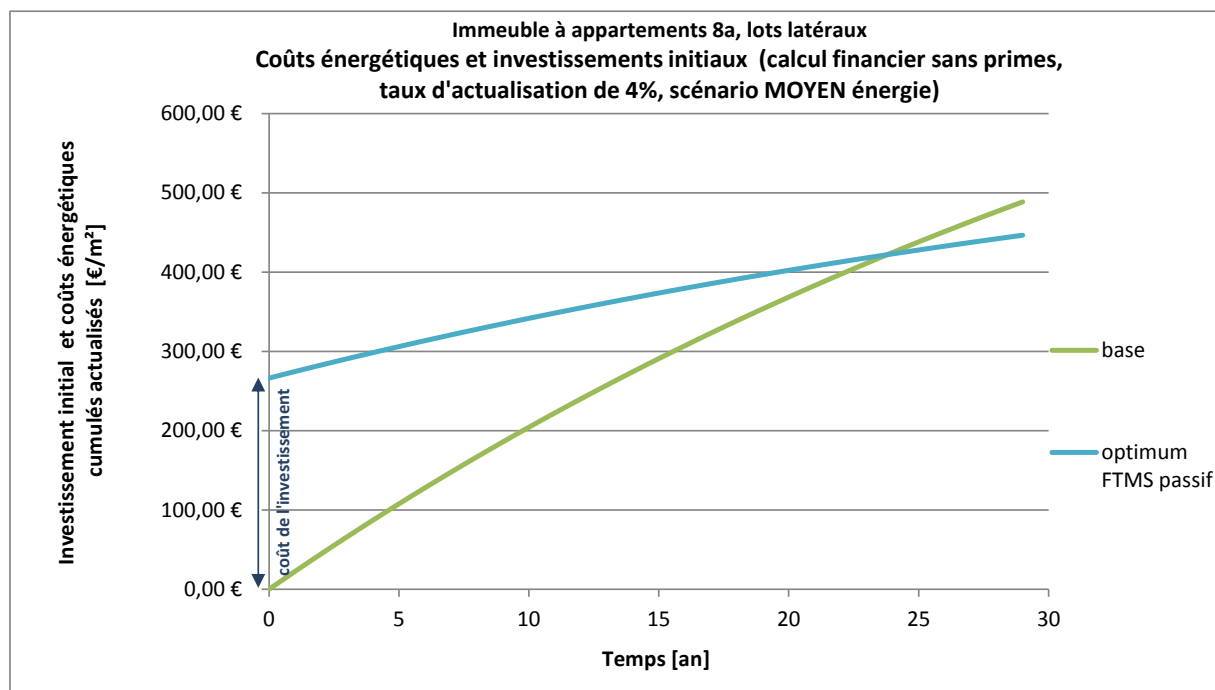


Figure 22 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – immeuble 8A

Les performances énergétiques de l'enveloppe du lot central (dans son état d'origine) sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour le bâtiment central correspond à la variante VT2012, c'est-à-dire :

- Remplacement du vitrage répondant à l'exigence PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)

- Isolation de la toiture par l'extérieur selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	m ³ /h.m ²
Immeuble 8B	Base	2,75	1,10	2,72	0,72	14,0
	Optimum VT2012 (cas10)	Ug=1,3	0,27	2,72	0,72	11,5
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 28 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - immeuble 8B

Sur le graphique de la Figure 23 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à un optimum économique est la variante VT2012. Seuls les travaux liés à la rénovation du vitrage et de la toiture présentent un CGA inférieur à celui de la base (en pointillés verts sur le graphique). En effet, vu l'architecture particulière de ce lot entouré d'appartements chauffés et présentant des superficies vitrées importantes, de nombreuses interventions ne sont pas rentables.

Seule la combinaison de mesures FTMS selon les caractéristiques du passif permettent de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cet immeuble (Espec). Aucune rénovation ne permet de le réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

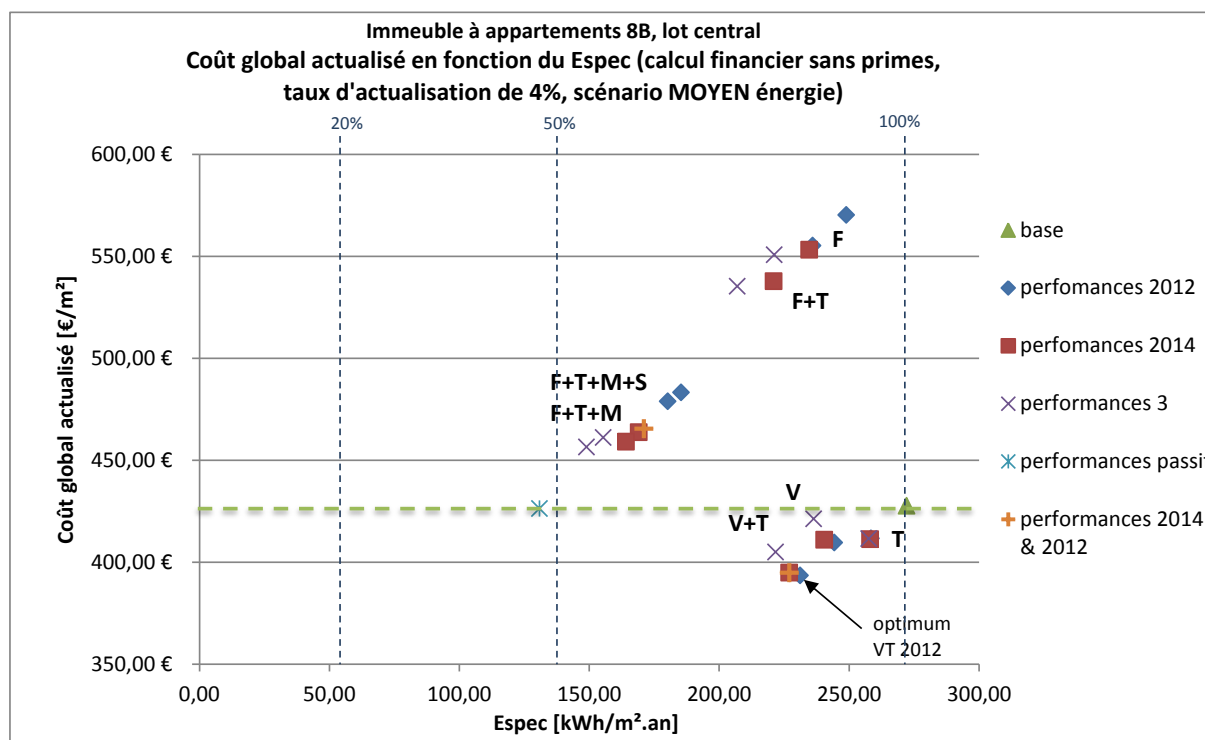


Figure 23 : coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 8B

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cet immeuble de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 15 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),

- Une économie d'énergie en chauffage de 39 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 30 € / m², soit 77.910 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 52 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 37% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 150 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 249 € / m², soit 637.777 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 426€/m² alors que le CGA de la base est de 428€/m², soit une différence de 2€/m². La rénovation selon les caractéristiques passive de ce bâtiment sera tout juste rentabilisé au bout des 30 ans. Du point de vue économique uniquement, un tel investissement n'est donc pas justifié.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 8B	Base	2566	554.869	216	0	272 (100%)	0 €	0 €	428 €	0 €
	Optimum VT2012 (cas10)		454.428	177	39	231 (85%)	77.910 €	30 €	393 €	35 €
	Passif (cas23)		169.765	66	150	131 (48%)	637.777 €	249 €	426 €	2 €

Tableau 29 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » Immeuble 8B

Sur le graphique de la figure 24, on observe que les courbes du bâtiment de base et de la variante passif se rejoignent quasiment au bout de la période de calcul de 30 ans; Comme dit plus haut, l'investissement n'est donc pas justifiable du point de vue économique. Cependant, la rénovation d'un bâtiment selon les caractéristiques du passif a l'avantage de s'affranchir au maximum de l'énergie dont nous ne connaissons pas avec certitude l'évolution de prix, et permet d'améliorer le confort thermique des occupants.

L'investissement correspondant à la rénovation selon l'optimum économique est rentabilisé après 12 ans seulement.

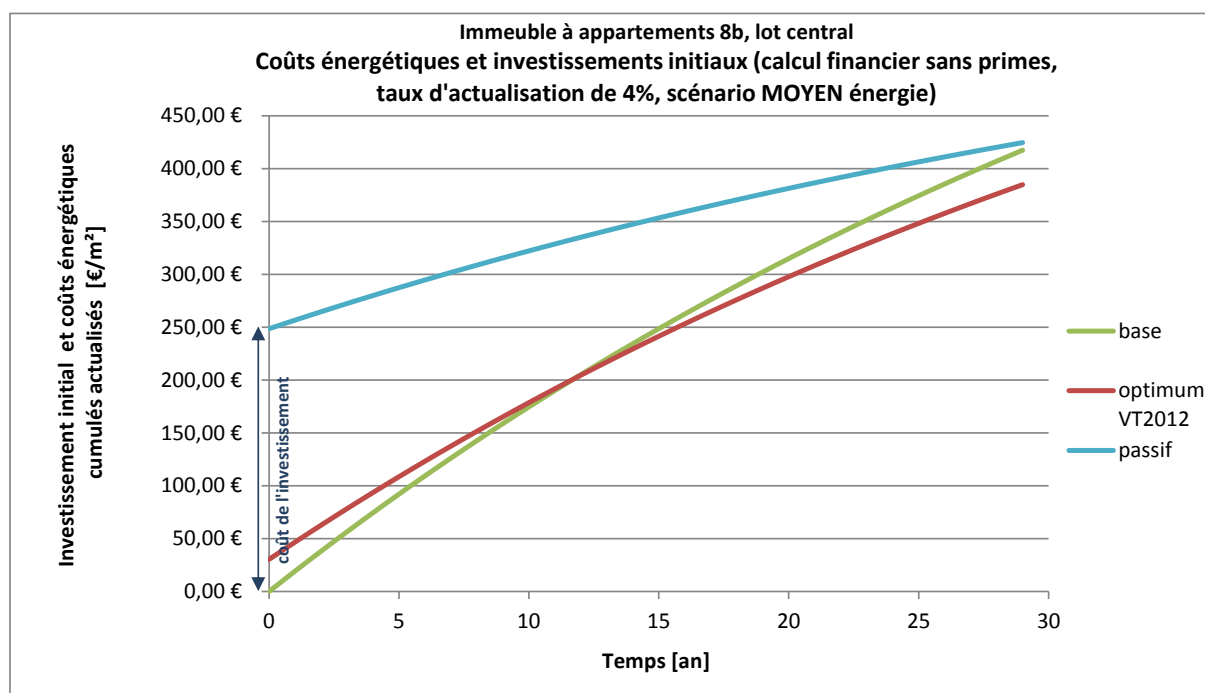


Figure 24 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 8b

La figure 25 nous montre que malgré un investissement important sur les bâtiments situés aux extrémités de l'immeuble, le CGA reste supérieur à celui du bâtiment situé au centre, même non rénové. Par leur mitoyenneté, les appartements du lot central présentent une consommation énergétique théorique inférieure à celle des lots latéraux.

Le temps de retour sur investissement est plus rapide pour le lot central que pour les lots aux extrémités. En effet, l'optimum économique du lot central nécessite des travaux moins coûteux. Si la rénovation de la barre de logements entière est envisagée, l'optimum économique pour l'ensemble des 3 bâtiments devrait certainement se situer entre les courbes optimum de chaque bâtiment.

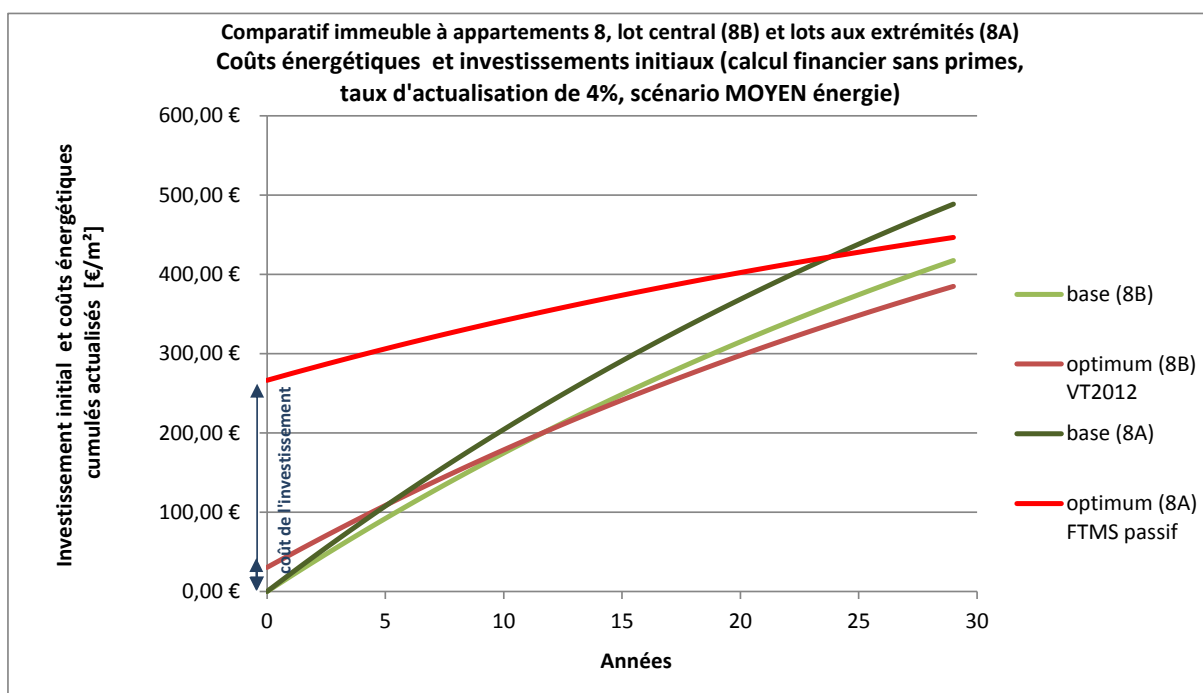


Figure 25 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - comparaison entre les lots aux extrémités (8A) et le lot central (8B) de l'immeuble 8

3.1.4. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 9

Il s'agit d'un immeuble 4 façades construit après 1990 comprenant 5 appartements. Les parois sont donc légèrement isolées, les châssis sont en bois avec double vitrage. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cet immeuble (dans son état d'origine) sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour cet immeuble de référence correspond à la variante VT2012, et se traduit par les interventions suivantes :

- Remplacement du vitrage répondant à l'exigence PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation de la toiture par l'extérieur selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Immeuble 9	Base	3,05	0,50	0,89	0,43	10,0
	Optimum VT2012 (cas10)	$U_g=1,3$	0,27	0,89	0,43	8,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 30 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - immeuble 9

La figure 26 montre que la variante optimum de rénovation est VT 2012. L'isolation des murs et des sols présentant déjà quelques centimètres d'isolant n'est pas rentabilisée en 30 ans.

Sur le graphique de la Figure 26 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à un optimum économique est la variante VT 2012. Seuls les travaux liés à la rénovation énergétique du vitrage et de la toiture présentent un CGA inférieur à celui de la base (en pointillés verts sur le graphique).

Seule la combinaison de mesures FTMS selon les caractéristiques du passif permet de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cet immeuble (Espec). Aucune rénovation ne permet de le réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

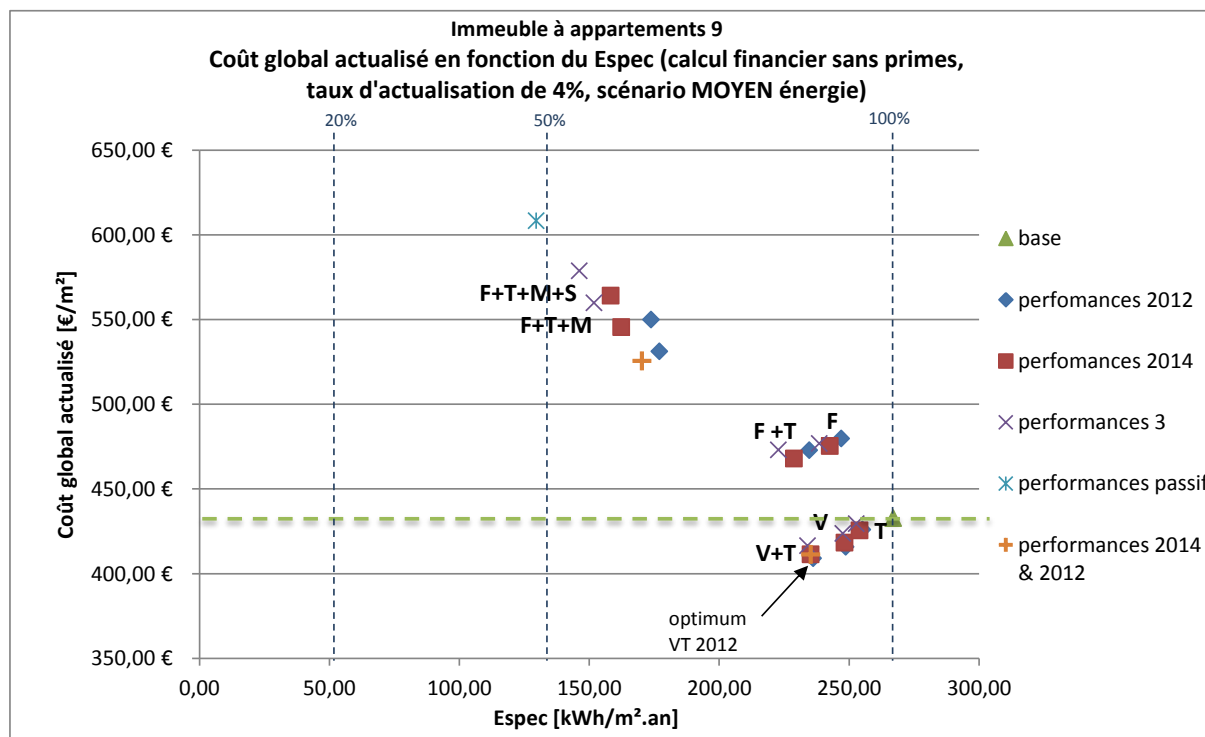


Figure 26 : coût global actualisé en fonction du E_{spec} - immeuble 9

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cet immeuble de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 12 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 16 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 25 € / m², soit 9815 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 53 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 41% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 147 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 427 € / m², soit 165.896 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 608 €/m² alors que le CGA du bâtiment de base est de 433 €/m². Isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » ne sera donc pas rentabilisé par la diminution de la consommation, et entraîne une perte de 176 €/m² sur 30 ans.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espece	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 9	Base	389	86.088	221	0	267	0 €	0 €	433 €	0 €
	Optimum VT2012 (cas10)		79.872	205	16	236 (88%)	9.815 €	25 €	409 €	24 €
	Passif (cas23)		29.109	75	147	130 (49%)	165.896 €	427 €	608 €	-176 €

Tableau 31 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » immeuble 9

Sur le graphique de la figure 27, on observe que le CGA de la variante optimum ne diminue que légèrement malgré l'investissement dans l'isolation de la toiture et le remplacement du vitrage. Toutefois, l'investissement initial pour ces travaux est assez faible (25€/m²) et est rentabilisé en moins de 12 ans par la diminution des consommations. De plus, cet investissement permet d'améliorer le confort thermique des occupants.

Quant à la variante FTMS passif, on voit que l'investissement initial est tellement important (427 €/m²), que celui-ci n'est pas rentabilisé sur une période de 30 ans (voire plus).

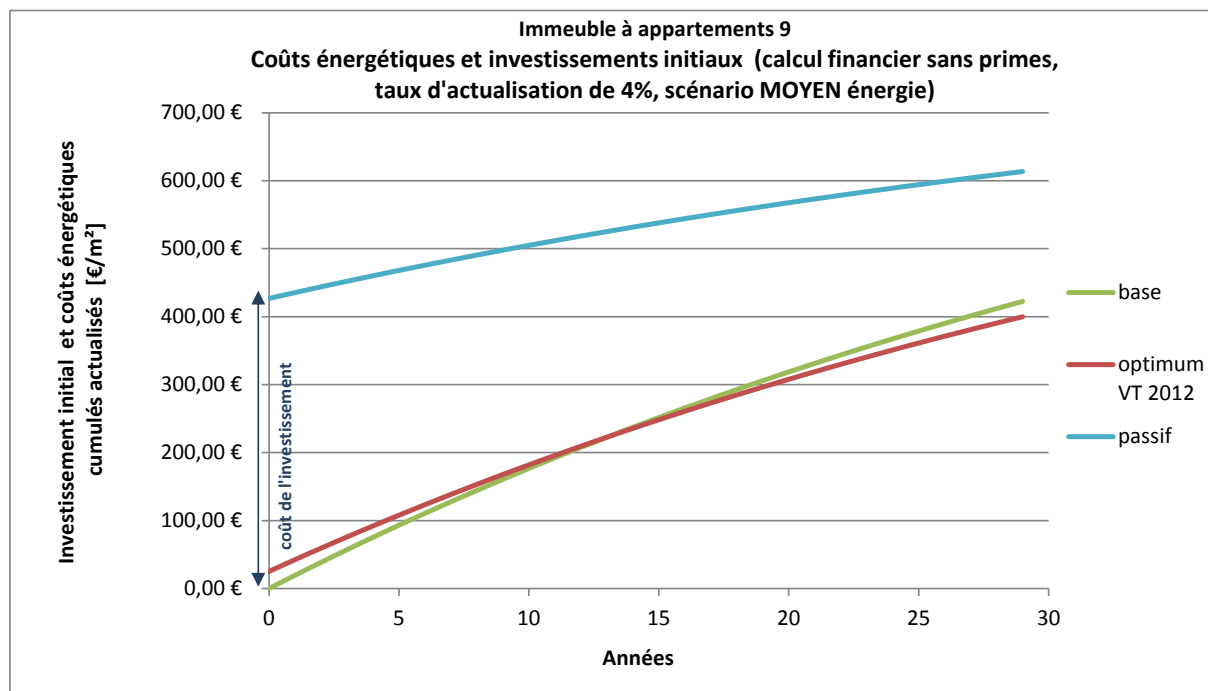


Figure 27 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 9

3.1.5. IMMEUBLE A APPARTEMENTS 10

Il s'agit d'un immeuble construit après 1990 comprenant 10 appartements. Les parois sont partiellement isolées, les châssis sont en aluminium avec double vitrage. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cet immeuble (dans son état d'origine) sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour cet immeuble de référence correspond à la variante V2014, et se traduit par les interventions suivantes :

- Remplacement du vitrage selon les exigences PEB 2014 ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Immeuble 10	Base	3,69	0,34	1,54	0,90	10,0
	Optimum V2014 (cas2)	Ug=1,1	0,34	1,54	0,90	10,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 32 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - immeuble 10

Sur le graphique de la Figure 28, nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à l'optimum économique est la variante V2014. Seules deux variantes consistant à rénover le vitrage ou le vitrage et la toiture présentent un CGA inférieur à celui de la base (en pointillés verts sur le graphique).

Seule la combinaison de mesures FTMS selon les caractéristiques du passif permet de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cet immeuble (E_{spec}). Aucune rénovation ne permet de le réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

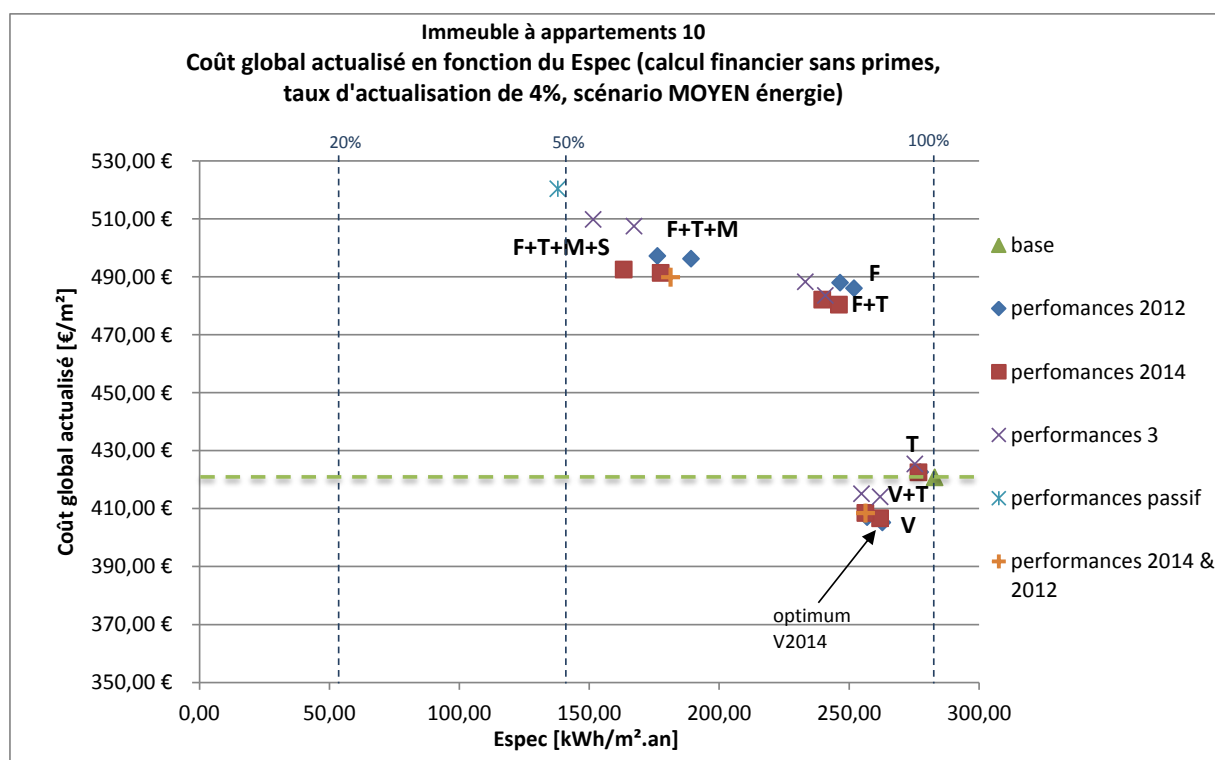


Figure 28 : coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 10

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cet immeuble de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 8 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 20 kWh/m².an

- Un surcoût d'investissement de 14 € / m², soit 13.556 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 51 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 43% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 159 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 341 € / m², soit 319.826 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 520 €/m² alors que le CGA du bâtiment de base est de 421€/m². Isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » ne sera donc pas rentabilisé par la diminution de la consommation, et entraîne une perte de 100 €/m² sur 30 ans.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 10	Base	938	204.172	218	0	283 (100%)	0 €	0 €	421 €	0 €
	Optimum V2014 (cas2)		185.726	198	20	262 (93%)	13.556 €	14 €	405 €	16 €
	Passif (cas23)		54.928	59	159	138 (49%)	319.826 €	341 €	520 €	-100 €

Tableau 33 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » immeuble 10

Sur le graphique de la figure 29, on observe que le CGA de la variante optimum ne diminue que légèrement malgré l'investissement dans le remplacement du vitrage. Toutefois, l'investissement initial pour ces travaux est assez faible (14€/m²) et est rentabilisé en moins de 12 ans par la diminution des consommations. De plus, cet investissement permet d'améliorer le confort thermique des occupants.

Quant à la variante FTMS passif, on voit que l'investissement initial pour la rénovation étant assez important (341 €/m²), il n'est pas rentabilisé sur une période de 30 ans (voire plus).

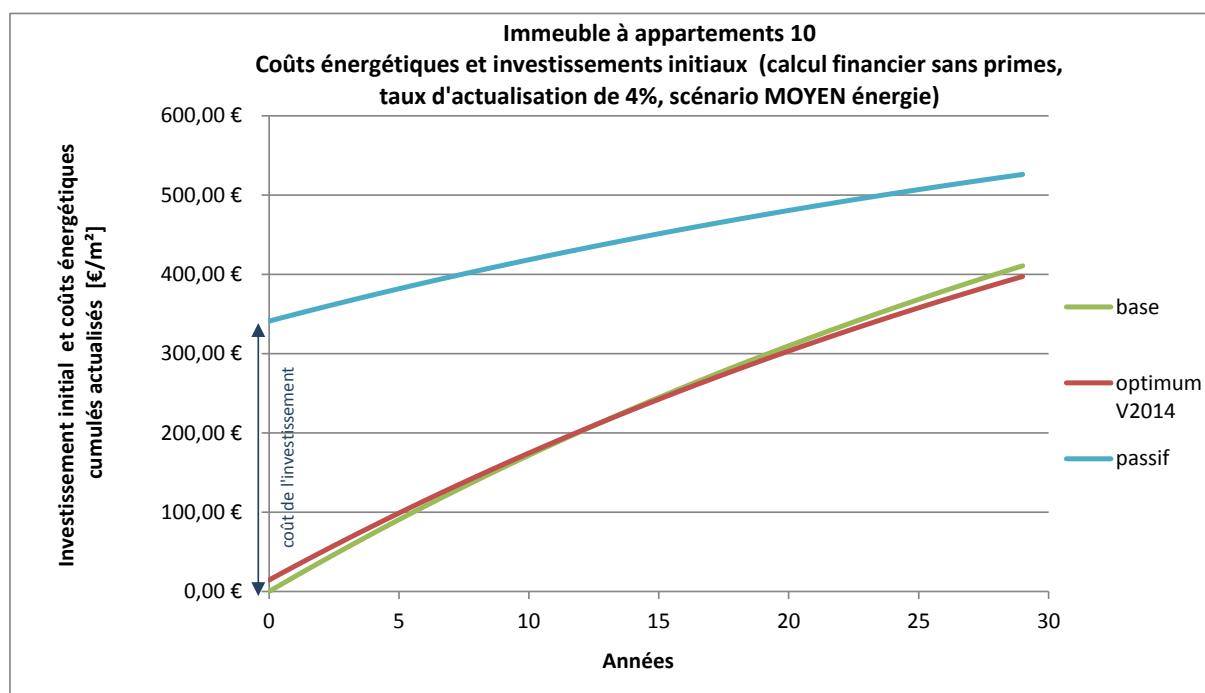


Figure 29 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 10

3.2. Conclusions en fonction de la date de construction

Suite à l'analyse des résultats des immeubles un par un, nous avons pu soulever des conclusions assez similaires en fonction de la date de construction (ou de rénovation) du bâtiment. Nous avons donc repris dans un tableau général les optima économiques pour chaque immeuble et certaines grandes conclusions qui se dégagent.

Le tableau 34 reprend les optima économiques tandis que le tableau 36 reprend la variante FTMS passif si celle-ci présente un CGA plus faible que celui de la base.

Appartements											
Année de construction		Avant 1919			Entre 1919 et 1945	Entre 1946 et 1970			Entre 1971 et 1990		Après 1990
Type de bâtiment existant		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Type de paroi		Immeuble de 10 appartements			Habitation divisée en 3 appartements + annexe plus récente	Immeuble de 16 appartements	Immeuble de 20 appartements	Maison divisée en 3 appartements avec annexe	Immeuble comprenant 3 bâtiments de 8 niveaux, 32 appartements par bâtiment	Immeuble de 5 appartements	Immeuble de 10 appartements
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée et plus récente	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée, K70	non rénovée, K55
Fenêtres	Simple vitrage										
	Double vitrage non étanche	F 2014	F 2014	F 2014	V 2012	T passif	T passif	V 2012	T passif		
	Double vitrage étanche									V 2012	V 2014
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée										
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM										
	Toiture inclinée étanche isolée - 15cm LM										
	Plancher du grenier non isolé										
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM										
	Plancher du grenier isolé - 15cm LM										
	Toiture plate massive non isolée										
Mur	Toiture plate légère non isolée										
	Toiture plate légère isolée - 12cm LM										
	Mur plein non isolé	M 2012	M 2014	M 2012		M passif	M passif		M passif		
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite										
	Mur creux isolé - 4cm LM										
	Mur plein isolé - 4cm LM										
	Structure bois isolée - 15cm LM										
Plancher	Dalle sur sol non isolée										
	Dalle sur cave non isolée										
	Dalle sur cave isolée - 4cm EPS										
	Dalle sur sol isolée - 4cm EPS										
	Dalle sur sol isolée - 4cm XPS										
	Dalle sur cave isolée - 2cm XPS										
	Dalle sur cave isolée - 4cm XPS										
CONCLUSIONS GÉNÉRALES EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PÉRIODE DE CONSTRUCTION		Isoler toute les toitures et murs, remplacer les fenêtres			Isoler les toitures, remplacer le vitrage	Isoler toutes les parois			Isoler les toitures, remplacer le vitrage	Augmenter l'isolation en toitures, remplacer le vitrage	

Tableau 34 : tableau des résultats correspondant à l'optimum économique pour les immeubles à appartements

Légende	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques du "passif"
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques '3'
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2014
	rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2012
	rentable (mais pas optimum) de rénover la paroi
	pas rentable de rénover la paroi
	conclusion difficile à donner car d'autres parois déjà isolées interviennent dans le CGA

Tableau 35 : légende code couleur utilisé dans le tableau des résultats

Appartements											
Année de construction		<1919			entre 1919 et 1945	entre 1946 et 1970			entre 1971 et 1990	Après 1990	
Type de bâtiment existant		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Type de paroi		Immeuble de 10 appartements			Habitation divisée en 3 appartements + annexe plus récente	Immeuble de 16 appartements	Immeuble de 20 appartements	Maison divisée en 3 appartements avec annexe	Immeuble comprenant 3 bâtiments de 8 niveaux, 32 appartements par bâtiment	Immeuble de 5 appartements	Immeuble de 10 appartements
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage										
	Double vitrage non étanche	T passif	T passif	T passif	T passif	T passif	T passif	T passif	T passif		
	Double vitrage étanche									V 2012	V 2014
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée										
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM										
	Toiture inclinée étanche isolée - 15cm LM										
	Plancher du grenier non isolé										
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM										
	Plancher du grenier isolé - 15cm LM										
	Toiture plate massive non isolée										
Mur	Toiture plate légère non isolée										
	Toiture plate légère isolée - 12cm LM										
	Mur plein non isolé	M passif	M passif	M passif	M passif	M passif	M passif	M passif	M passif		
	Mur creux non isolé										
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite										
	Mur creux isolé - 4cm LM										
	Mur plein isolé - 4cm LM										
Plancher	Structure bois isolée - 15cm LM										
	Dalle sur sol non isolée										
	Dalle sur cave non isolée										
	Dalle sur cave isolée - 4cm EPS										
	Dalle sur sol isolée - 4cm EPS										
	Dalle sur sol isolée - 4cm XPS										
	Dalle sur cave isolée - 2cm XPS										
CONCLUSIONS GÉNÉRALES EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PÉRIODE DE CONSTRUCTION		Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif			Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif	Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif			Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif	Augmenter l'isolation en toitures, remplacer le vitrage	

Tableau 36 : tableau des résultats correspondant à l'optimum énergétique (passif) pour les immeubles à appartements

Les immeubles construits avant 1919

Les constructions d'avant 1919 présentent souvent des parois non isolées et du simple vitrage. S'il y a du double vitrage, il s'agit d'anciens châssis peu étanches.

Dans le cas d'habitations transformées en quelques appartements ou d'immeubles plus importants, la rénovation correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à isoler les murs, les toitures et à remplacer les châssis en respectant les critères suivants :

- Isolation des murs répondant aux exigences PEB 2012 ($U = 0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures répondant aux exigences PEB 2014 ($U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences PEB 2014 ($U_w = 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)

L'isolation du sol est rentable également, mais ne correspond pas à l'optimum économique. En effet, lorsqu'une partie du plancher est construite directement sur le sol, les travaux connexes au placement d'une isolation de sol comme la démolition du revêtement de sol existant, la réalisation d'une nouvelle chape et la pose d'un nouveau revêtement présentent un coût plus important. Par contre, si tout le plancher peut être isolé par le bas (cave, vide-ventilé, espace adjacent non chauffé) alors l'intervention énergétique sera plus rapidement rentabilisée car il n'y a pas de travaux connexes.

Pour les immeubles ayant une destination d'appartements depuis leur construction avant 1919, l'intervention la plus rentable est celle décrite ci-dessus. Cependant, la rénovation énergétique du bâtiment en suivant les caractéristiques du passif permet d'obtenir un CGA presque identique à cette dernière, mais aura l'avantage de s'affranchir au maximum de l'énergie. Pour ce faire, la rénovation du bâtiment doit être réalisée en respectant les critères suivants :

- Isolation des murs répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des planchers répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences du standard passif ($U_w = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Le coût d'investissement initial lors de la rénovation sera très important mais sera rentabilisé en moins de 20 ans (selon la consommation théorique). En effet, grâce à ces travaux d'isolation, le coût annuel de la consommation énergétique sera fortement réduit.

Les immeubles construits entre 1919 et 1945

Les habitations construites entre 1919 et 1945 et transformées en quelques appartements par la suite ont généralement fait l'objet de rénovation, et/ou ont été agrandies par la construction d'une annexe plus récente et énergétiquement plus performante.

Cette étude étant réalisée sur le bâtiment entier et non sur la partie ancienne uniquement, la présence éventuelle d'isolation dans certaines parois de cette annexe peut influencer la rentabilité des travaux envisagés sur ces types de parois (vitrages, fenêtres, toitures, murs ou sols), y compris les parties plus anciennes, et cela en fonction de leur proportion dans l'ensemble du bâtiment.

Dans de tels cas, la rénovation correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à isoler la toiture et à remplacer le vitrage en respectant les critères suivants :

- Isolation des toitures répondant aux exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Remplacement du vitrage répondant aux exigences PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Si le profilé est en mauvais état, il est nécessaire de le remplacer également malgré l'augmentation du coût d'investissement.

La rentabilité de l'isolation des murs et du sol dépend de l'état initial de la paroi. Si les travaux connexes au placement d'une nouvelle isolation (coût de la démolition de la finition existante, des réparations, nettoyage de la surface...) sont importants, ils représentent un coût supérieur au gain énergétique engendré. Mais si l'isolation d'une paroi ne nécessite pas de travaux trop importants, le travail sera rapidement rentabilisé.

Les immeubles construits entre 1946 et 1970

Les immeubles érigés entre 1946 et 1970 ayant une destination d'appartements depuis leur construction présentent également des parois non isolées, du simple ou double vitrage. S'il y a du double vitrage, il s'agit généralement d'anciens châssis peu étanches.

Pour ces immeubles, l'intervention de rénovation énergétique la plus rentable est d'isoler toutes les parois de déperditions jusqu'aux caractéristiques du passif. La rénovation du bâtiment doit être réalisée en respectant les critères suivants :

- Isolation des murs répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des planchers répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences du standard passif ($U_w = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Le coût d'investissement initial lors de la rénovation sera important mais rentabilisé en moins de 20 ans (selon la consommation théorique). En effet, grâce à ces travaux d'isolation, le coût annuel de la consommation énergétique sera fortement réduit.

Les habitations construites entre 1946 et 1970 et transformées en appartements ensuite présentent également des parois non isolées et du simple vitrage. La rénovation de ces bâtiments correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à isoler la toiture et à remplacer le vitrage en respectant les critères suivants :

- Isolation des toitures répondant aux exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Remplacement du vitrage répondant aux exigences PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Si le profilé est en mauvais état, il est conseillé de le remplacer également malgré l'augmentation du coût d'investissement initial.

L'isolation du sol et des murs ne font pas partie de l'optimum économique, mais seront rentabilisés par la diminution du coût de consommation s'ils sont isolés.

Les immeubles construits entre 1971 et 1990

Les constructions de cette époque sont généralement des grandes « barres » d'appartements fortement vitrés en façade avant et arrière et divisées en plusieurs bâtiments. Les interventions les plus rentables sur ces immeubles varient selon la position du lot ; centrale ou à une extrémité.

Pour les lots situés aux extrémités, l'intervention de rénovation énergétique la plus rentable est d'isoler toutes les parois de déperditions jusqu'aux caractéristiques du passif. La rénovation du bâtiment doit être réalisée en respectant les critères suivants :

- Isolation des murs répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des planchers répondant aux exigences du standard passif ($U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$)

- Remplacement des fenêtres répondant aux exigences du standard passif ($U_w = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Le coût d'investissement initial lors de la rénovation sera important mais rentabilisé en moins de 25 ans (selon la consommation théorique). En effet, grâce à ces travaux d'isolation, le coût annuel de la consommation énergétique sera fortement réduit.

Pour les lots situés au centre, la rénovation correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à isoler la toiture et à remplacer le vitrage en respectant les critères suivants :

- Isolation des toitures répondant aux exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)
 - Remplacement du vitrage répondant aux exigences PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Si le profilé est en mauvais état, il est conseillé de le remplacer également malgré l'augmentation du coût d'investissement initial.

Le pourcentage de mur et de plancher étant relativement faible par rapport à l'ensemble de l'enveloppe pour ces lots centraux, et leur rénovation nécessitant des travaux plus complexes, il n'est pas rentable de les isoler.

Les immeubles après 1990

Les immeubles construits au début des années 90 sont soumis aux premières réglementations thermiques. Ces derniers présentent donc généralement des parois isolées et du double vitrage. La rénovation correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à renforcer l'isolation en toiture selon l'épaisseur d'isolation déjà présente (et les travaux connexes liés à la rénovation) et de remplacer le vitrage en respectant les valeurs suivantes :

- Isolation des toitures répondant aux exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)
 - Remplacement du vitrage répondant aux exigences PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) ou 2014 ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) selon les cas.
- Si le profilé est en mauvais état, il est conseillé de le remplacer également malgré l'augmentation du coût d'investissement initial.

Si augmenter l'isolation d'une toiture est assez simple, augmenter celle des murs ou du sol nécessite des travaux plus complexes et coûteux. L'investissement n'est donc généralement pas rentable.

3.3. Conclusions en fonction du type de paroi existante

3.3.1. FENETRES

Le remplacement de la fenêtre complète sans réaliser la rénovation énergétique d'autres parois ne sera jamais rentabilisé en 30 ans. Soit le profilé est en bon état et le remplacement du vitrage seul est envisageable et dès lors rentable sans combiner la rénovation à d'autres travaux, soit il n'est pas possible de le conserver, alors la rénovation correspondant à l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude combinerait la rénovation de plusieurs parois.

Les fenêtres simple vitrage et ancien double vitrage

Pour ces fenêtres, les conclusions peuvent varier, soit l'optimum économique consiste à les remplacer par des nouveaux châssis performants avec du double vitrage, soit à remplacer uniquement le vitrage (notamment si le châssis est encore en bon état).

Si le profilé est en mauvais état, il est conseillé de le remplacer également malgré l'augmentation du coût d'investissement initial.

Lorsque le profilé et le vitrage sont remplacés, les nouveaux châssis respecteront au minimum les performances PEB 2014 pour répondre à l'optimum économique, sauf lorsque la rénovation la plus rentable est une rénovation complète selon les critères du passif. Dans ce cas, les châssis respecteront les performances du standard passif.

Lorsque l'optimum économique consiste à remplacer uniquement le vitrage, ce dernier respectera les critères PEB 2012 ou PEB 2014 selon la configuration du bâtiment.

Lorsque toute la fenêtre est remplacée, le raccord entre les nouvelles fenêtres et les murs est plus étanche ce qui permet de diminuer les pertes d'énergie par ces raccords. Veillez à prévoir des amenées d'air dans les châssis et/ou placer un système de ventilation pour garantir un climat sain dans le bâtiment et éviter tout problème lié à l'humidité (couts additionnels de cette intervention non comptabilisés dans le CGA).

Les fenêtres double vitrage plus récentes et étanches

A l'exception des fenêtres très récentes dont le remplacement ne serait pas rentabilisé en 30 ans, il est conseillé de placer un nouveau vitrage performant tout en conservant le profilé existant. Pour être la plus rentable, la rénovation du vitrage correspondra aux critères PEB 2014.

Même s'il existe aujourd'hui des châssis et des vitrages plus performants, le remplacement des fenêtres possédant du double vitrage récent n'est pas recommandé d'un point de vue économique. En effet, l'investissement à réaliser pour améliorer ces fenêtres ne sera pas rentabilisé en 30 ans par la diminution des consommations énergétiques liées à la rénovation.

3.3.2. TOITURE

La toiture inclinée non isolée

Il est toujours rentable d'isoler les toitures inclinées qui ne le sont pas encore. Le retour sur investissement de cette intervention est souvent très rapide. Le coût de l'isolation d'une toiture inclinée se situe plus dans le renforcement de la structure pour augmenter son épaisseur que dans l'isolant en lui-même. C'est pourquoi, si l'épaisseur de la structure existante est importante, il est rentable de combler totalement cette épaisseur avec l'isolant.

Attention, il faut placer une sous toiture coté extérieur et un pare vapeur coté intérieur afin de protéger le complexe de toiture des dégradations liées à l'eau et à l'humidité.

Le plancher du grenier non isolé

Si le plancher du grenier délimite le volume protégé de l'immeuble, son isolation est très vite rentabilisée par la diminution importante de la consommation énergétique. Isoler cette paroi est généralement assez simple et peu coûteux (poser l'isolant sur la finition supérieure du plancher, ou placer/injecter de l'isolant dans la structure,...), il est donc intéressant de prévoir 20 voire 30 cm d'isolant pour atteindre un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Comme pour la toiture, il faut installer un pare vapeur coté chaud de l'isolant afin de protéger le plancher et l'isolant des dégradations liées à l'eau et à l'humidité.

La toiture plate non isolée

Il en va de même pour les toitures plates non isolées. Que ce soit par l'intérieur ou par l'extérieur, et malgré les travaux connexes (nouvelle membrane d'étanchéité, pare vapeur, ...) l'isolation sera assez vite rentabilisée par la diminution importante de la consommation énergétique. Si la structure le permet, il est intéressant de prévoir 20 voire 30 cm d'isolant pour atteindre un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La toiture inclinée isolée

Si la toiture présente moins de 15 cm d'isolant de type laine minérale, l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à renforcer l'isolation existante jusqu'à obtenir une paroi ayant un $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$, soit environ 15 cm de laine minérale. Le coût de l'isolation se situe plus dans le renforcement de la structure pour augmenter son épaisseur que dans l'isolant en lui-même. C'est pourquoi, si l'épaisseur de la structure existante est importante, combler totalement cette épaisseur avec l'isolant permettra de réaliser de plus grandes économies d'énergie sans augmenter énormément le coût d'investissement.

Le nouvel isolant doit être compatible avec celui qui est déjà présent. S'il n'y en a pas, il faut placer une sous toiture coté extérieur et un pare vapeur coté intérieur afin de protéger le complexe de toiture des dégradations liées à l'eau et à l'humidité. Si la couche d'isolation existante est en mauvais état il est conseillé de la remplacer.

Le plancher du grenier isolé

Si le plancher du grenier présente une isolation inférieure à 15cm de type laine minérale, l'optimum économique selon les hypothèses de l'étude consiste à renforcer l'isolation jusqu'à obtenir une paroi ayant un $U= 0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$, soit environ 15 cm de laine minérale. Le coût de l'isolation se situe plus dans le renforcement de la structure pour augmenter son épaisseur que dans l'isolant en lui-même. C'est pourquoi, si l'épaisseur de la structure existante est importante, combler totalement cette épaisseur avec l'isolant permettra de réaliser de plus grandes économies d'énergie sans augmenter énormément le coût d'investissement.

Le nouvel isolant doit être compatible avec celui qui est déjà présent. Il faut placer un pare vapeur coté intérieur afin de protéger le plancher et l'isolant des dégradations liées à l'eau et à l'humidité. Si la couche d'isolation existante est en mauvais état il est conseillé de la remplacer.

3.3.3. MURS

Les murs pleins non isolés

En fonction de la superficie de murs non isolés par rapport à l'ensemble des parois de déperdition, il sera plus ou moins rentable d'isoler ce type de murs. En effet, l'étude nous montre que pour un bâtiment mitoyen de part et d'autre (bâtiment 2 façades) et possédant beaucoup de fenêtres (immeuble à appartements fortement vitré en façade avant et arrière par exemple), l'isolation des murs pleins n'est pas rentabilisée en 30 ans. Dès que les murs non isolés représentent plus de 33 % de la surface de déperdition, l'isolation de ceux-ci jusqu'à l'obtention d'un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ est rentabilisée en 30 ans.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude se limite dans certains cas à l'isolation permettant d'obtenir un $U=0.32 \text{ W/m}^2\text{K}$, soit environ 11 cm de polystyrène.

L'isolation par l'extérieur est à privilégier afin d'éviter les ponts thermiques et les éventuels problèmes de condensation et de moisissure. Dans ce cas, il faut ajouter une finition extérieure. Que les murs soient isolés par l'intérieur ou par l'extérieur, il faut assurer la compatibilité entre le support et l'isolant afin d'éviter la dégradation du mur existant. Une brique peinte fera l'objet d'une attention particulière par exemple.

Les murs creux non isolés

Il en va de même pour les murs creux. Si la surface de murs creux non isolés représente plus de 33 % de la surface de déperdition, il est tout à fait rentable de les isoler jusqu'à l'obtention d'un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Remplir la coulisse en y injectant une mousse isolante n'est souvent pas suffisant, il faut alors isoler au-delà de la brique de parement et ajouter une nouvelle finition extérieure. Cela coûte assez cher, mais l'investissement est rentabilisé en moins de 30 ans. Notez qu'il faut assurer la compatibilité entre le support et l'isolant afin d'éviter la dégradation du mur existant.

Les murs pleins isolés

D'un point de vue purement économique, les murs pleins présentant une isolation supérieure à 4cm de type laine minérale ou polystyrène ne doivent pas subir de rénovation énergétique. En effet, le coût des travaux connexes (démolition des finitions, nouveau support éventuel pour l'isolant, placement d'un pare-vapeur, nouvelles finitions...) ne sera pas compensé par la diminution des consommations énergétiques sur 30 ans. En dessous de cette épaisseur d'isolation, les conclusions sont identiques à celles des murs pleins non isolés.

Les murs creux isolés

D'un point de vue purement économique, les murs creux présentant une isolation supérieure à 4cm de type laine minérale ou polystyrène ne doivent pas subir de rénovation énergétique. En effet, le coût des travaux connexes (démolition des finitions, nouveau support éventuel pour l'isolant, placement d'un pare-vapeur, nouvelles finitions...) ne sera pas compensé par la diminution des consommations énergétiques sur 30 ans. En dessous de cette épaisseur d'isolation, les conclusions sont identiques à celles des murs creux non isolés.

Les murs en structure bois isolés

Le gain énergétique lié à l'ajout d'isolation sur cette paroi ne compense pas le coût des travaux qui peut être élevé face à l'importance de ceux-ci (démolition des finitions, nouveau support éventuel pour l'isolant, placement d'un pare-vapeur, nouvelles finitions...). Augmenter l'épaisseur de l'isolation ne sera donc pas rentabilisée en 30 ans.

3.3.4. PLANCHER

La dalle sur sol non isolée

La réalisation d'une isolation sur ce type de plancher est rentable pour tous les bâtiments construits avant 1990, mais ne correspond à l'optimum économique qu'en cas de rénovation énergétique importante du bâtiment (rénovation permettant d'atteindre les critères passifs).

Dans les autres cas, cette intervention ne fait pas partie de l'optimum économique car les travaux liés au placement d'une isolation sur la dalle comme la démolition du revêtement de sol existant, la réalisation d'une nouvelle chape et la pose d'un nouveau revêtement présentent un coût important.

La dalle sur vide ventilé ou sur cave non isolée

Isoler le plancher par le bas est rentable pour tous les bâtiments construits avant 1990, mais ne correspond à l'optimum économique qu'en cas de rénovation énergétique importante du bâtiment (rénovation permettant d'atteindre les critères passifs).

Notons qu'il est intéressant de placer l'épaisseur la plus importante possible car ce travail n'entraîne pas de coût supplémentaire à celui de l'isolant.

La dalle sur sol isolée

D'un point de vue économique, il n'est pas rentable de rénover les planchers qui présentent déjà quelques centimètres d'isolant afin d'augmenter la performance énergétique de ce dernier car le coût des travaux liés à cette rénovation ne sera pas compensé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

La dalle sur vide ventilé ou sur cave isolée

D'un point de vue économique, il n'est pas rentable de rénover les planchers qui présentent déjà quelques centimètres d'isolant afin d'augmenter la performance de ce dernier car le coût des travaux liés à cette rénovation ne sera pas compensé par la diminution de la consommation énergétique sur 30 ans.

3.4. Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de logements collectifs en Wallonie?

La rénovation énergétique de l'ensemble des parois des immeubles construits avant 1984 permettrait d'amener ces bâtiments à un niveau de performance proche du passif, avec pour conséquence une diminution importante de la consommation énergétique. L'investissement initial est compensé par cette économie sur les coûts d'exploitation en moins de 30 ans. Cette stratégie de rénovation ne correspond pas toujours à l'optimum économique, mais permet de réduire le plus fortement la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}). En effet, les variantes envisagées permettent de réduire le Espec d'environ 70% (jusqu'à 77% pour les bâtiments les plus anciens). Les rénovations énergétiques correspondant à un optimum économique entraînent, à quelques exceptions près, une diminution d'environ 64% du Espec.

Les exceptions concernent les habitations transformées en appartements et comprenant une annexe plus récente ou les habitations mitoyennes (bâtiments 2 façades) offrant peu de surfaces de déperdition par rapport à leur volume. La rénovation énergétique correspondant à l'optimum économique ne permet de réduire la consommation que de 30% dans ces unités de logement.

Au niveau du parc de bâtiments construits à partir de 1984 (entrée en vigueur de la première réglementation thermique) qui possèdent déjà quelques parois isolées, la rénovation énergétique de l'enveloppe complète n'engendre pas une économie d'énergie suffisante pour rentabiliser l'investissement initial. Pour ces immeubles, seuls le remplacement du vitrage et éventuellement l'ajout d'isolation en toiture (si cette intervention ne nécessite aucun travail connexe complémentaire) sont rentables.

Par conséquent, vu la proportion (plus de 80%) d'immeubles construits avant 1984 sur le territoire wallon, il semble logique de soutenir en priorité l'amélioration de l'intégralité de l'enveloppe de ces bâtiments, au besoin en les soutenant avec des primes ciblées afin de les rapprocher du niveau de performance typique des bâtiments « passifs ».

Une seconde orientation à prendre par l'administration wallonne serait de s'attaquer à la rénovation énergétique des toitures de tous les immeubles (même les plus récents donc), de manière à relever

leur niveau de performance à un niveau U Toit le plus élevé possible. Un subside spécifique calculé sur base du surcout d'investissement spécifique pourrait être accordé pour l'isolation de ces toitures.

La priorité est donc d'améliorer la performance énergétique de l'enveloppe. Et ensuite, afin de réduire de manière plus encore importante la consommation énergétique, la seconde priorité est d'améliorer la performance des systèmes (chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation..) afin d'atteindre des objectifs plus ambitieux telle qu'une réduction de 80% de la consommation d'énergie de ce parc de bâtiments résidentiels.

4. Conclusions pour les immeubles de bureaux/services

Les conclusions générales de cette étude sont tirées du tableau de synthèse reprenant les 4 immeubles de bureaux de référence ainsi que leurs caractéristiques, repris à l'annexe D. Les conclusions dépendent des typologies d'immeubles et des caractéristiques des parois.

Les quatre géométries-type de bâtiments de bureaux qui se dégagent de l'analyse³ couvrent une majorité de typologies des bâtiments récents ou plus anciens rencontrés en Wallonie.

Une époque de construction permettant de déterminer les performances thermiques de l'enveloppe est associée à chaque type de géométrie.

Pour rappel, l'étude COZEB originale distinguait 2 typologies de bureaux existants du point de vue de leur géométrie et de leur performance énergétique.

- Un Grand bâtiment de Bureaux de 7 étages, mitoyen, représentatif des grands immeubles de bureaux d'avant 1945, dont le niveau à rue est occupé par un parking. [GB7<45]
- Un 'petit' Bureau relativement Etendu mais peu élevé, comportant 3 niveaux, représentatif des immeubles de bureaux, construit dans les années 70. [BE3-70]

Le choix de deux immeubles de référence complémentaires s'est porté sur des unités de plus petite taille et de construction plus récente :

- Un Petit Bureau Indépendant, occupant un rez-de-chaussée d'immeuble à appartements, situé en ville, construit durant la période 1984-1996. [PBI1-84]
- Un Bureau Compact, libre sur ses quatre façades, comportant 4 niveaux, dont la surface au sol est d'environ 500 m², situé en zone périurbaine et construit entre 1996 et 2008. [BC4-96]

En outre, deux BASES bis ont été ajoutées respectivement pour GB7<45 et pour BE3-70. Aucune amélioration de l'enveloppe n'est réalisée au niveau des BASES bis mais une économie de 30% sur la consommation finale en électricité est obtenue en:

- Diminuant la puissance d'éclairage considérée
ET/OU en
- Remplaçant le producteur de froid par un autre, plus performant

³ COZEB – Extension. Détermination synthétique du parc existant de bureaux et services et établissements de soins de santé Wallon, 3E, Juillet 2014.

4.1. Illustrations des conclusions

4.1.1. GB7<45

Les performances énergétiques de l'enveloppe du bureau de référence (base) sont indiquées dans le tableau ci-dessous. L'optimum de coût pour ce grand bureau mitoyen d'avant 1945 correspond à un bâtiment dont :

- les fenêtres sont remplacées par un vitrage répondant aux exigences PEB 2014,
- la toiture plate est isolée selon le niveau d'exigence PEB 2014
- les murs sont isolés par l'intérieur selon le niveau d'exigence PEB 2014
- la dalle de sol est isolée par l'extérieur au niveau du plafond du parking selon le niveau d'exigence PEB 2014

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
Bureau GB7_45	Base	Uw 5,0 W/m²K	2,90 W/m²K	2,13 W/m²K	0,125 W/m²K	15,0
	Optimum FTMS 2014 (cas 18)	F2014	Utoit 2014	Umur 2014 int	Usol 2014 ext	4,5
	FTMS Passif (cas 29)	Fpas	Utoit pas	Umur pas ext	Usol pas ext	2,5

Tableau 37 : U caractéristiques des parois selon le niveau d'isolation de l'enveloppe pour les cas « optimum » et « passif »

Le graphique ci-dessous illustre que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à un optimum en terme de coût global actualisé (CGA) s'obtient en isolant l'ensemble des parois (opaques et transparentes) ainsi que la dalle de sol et le toit plat selon le niveau de performance exigé par le PEB 2014 en Wallonie.

D'autres combinaisons de mesures permettent d'atteindre un CGA inférieur à celui de la référence (en pointillé vert sur le graphique) mais pour un E_{spec} nettement plus élevé.

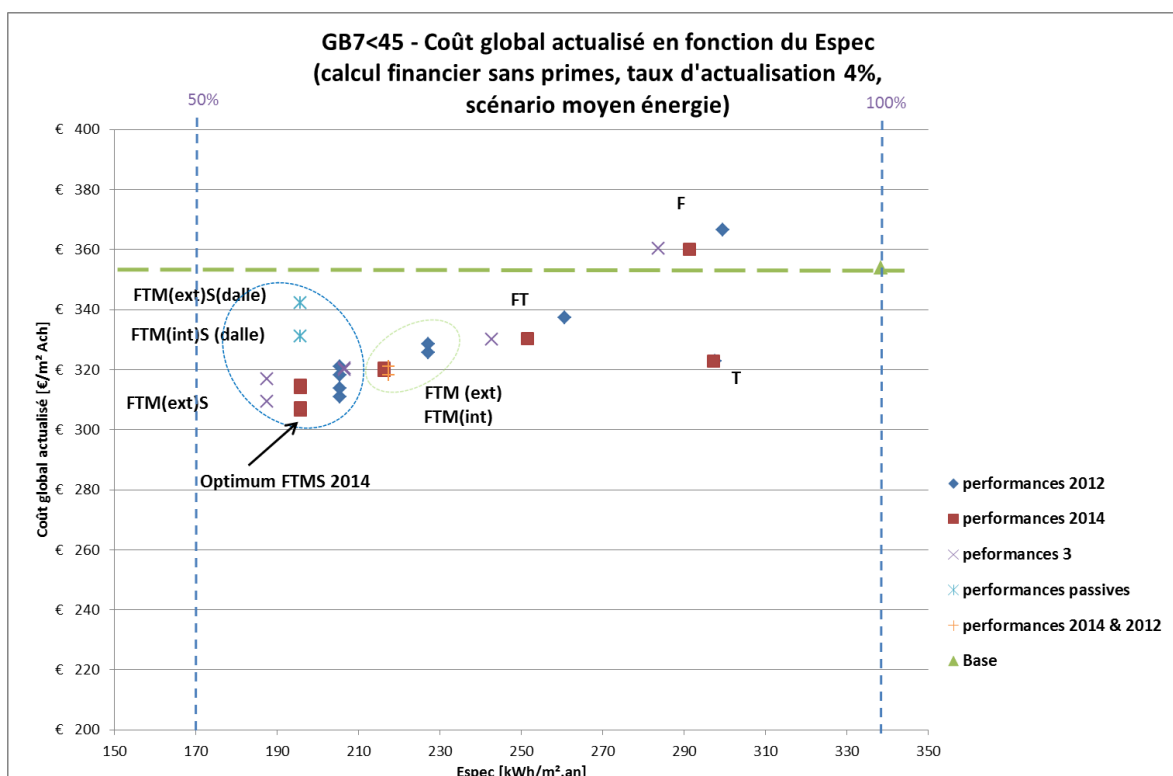


Figure 30 : coût global actualisé en fonction du E_{spec} – GB7<45

La rénovation énergétique optimale de l'enveloppe se traduit par :

- une réduction de près de 42% de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- une économie de consommation en énergie primaire de 815 MWh par an pour le bâtiment considéré

	Ach	Conso primaire en chaleur, froid, E_{aux} , Elec			E_{spec}	Economie d'énergie par rapport au cas de base	Surcoût d'investissement Enveloppe	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 20 ans par rapport au cas de base
		m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	%	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²	EUR/m ²
Bureau GB7_45	Base		1.936.391	338	100%	0	0 €	0 €	354 €	0 €
	Optimum FTMS 2014 (cas 18)	5725	1.120.624	196	58%	142	641.496 €	112 €	307 €	47 €
	FTMS Passif (cas 29)		1.120.302	196	58%	143	802.048 €	140 €	331 €	23 €

Tableau 38 : consommation d'énergie primaire, surcoût d'investissement et coût global actualisé des cas « optimum » et « passif »

Le bâtiment de référence affiche un CGA de 354 €/m² sur une période d'évaluation de 20 ans.

Le surcoût d'investissement à consentir au moment de la rénovation s'élève à environ 112 €/m² ; soit ± 641.500 € (taxes, TVA et redevances comprises, hors subsides) pour le bâtiment considéré.

Sur 20 ans, la diminution des coûts d'exploitation (facture énergétique) résultant de l'isolation optimale de l'enveloppe s'élève à près de 50 €/m². Cette stratégie de rénovation compense donc largement l'investissement initial consenti, comme l'illustre le graphique ci-dessous.

Une isolation des parois de l'enveloppe qui correspondrait aux exigences du standard passif se traduit par un surcoût d'investissement significativement plus élevé que l'optimum (+28 €/m²) qui n'est pas compensé par une diminution de la consommation d'énergie primaire (E_{spec} = 196 kWh/m².an). En cause, l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe qui se traduit ici par une explosion (+ 150%) des besoins en froid du bâtiment.

Ce qui résulte in fine en un CGA du cas « passif » (331 €/m²), supérieur de 7% au CGA de l'optimum (307 €/m²).

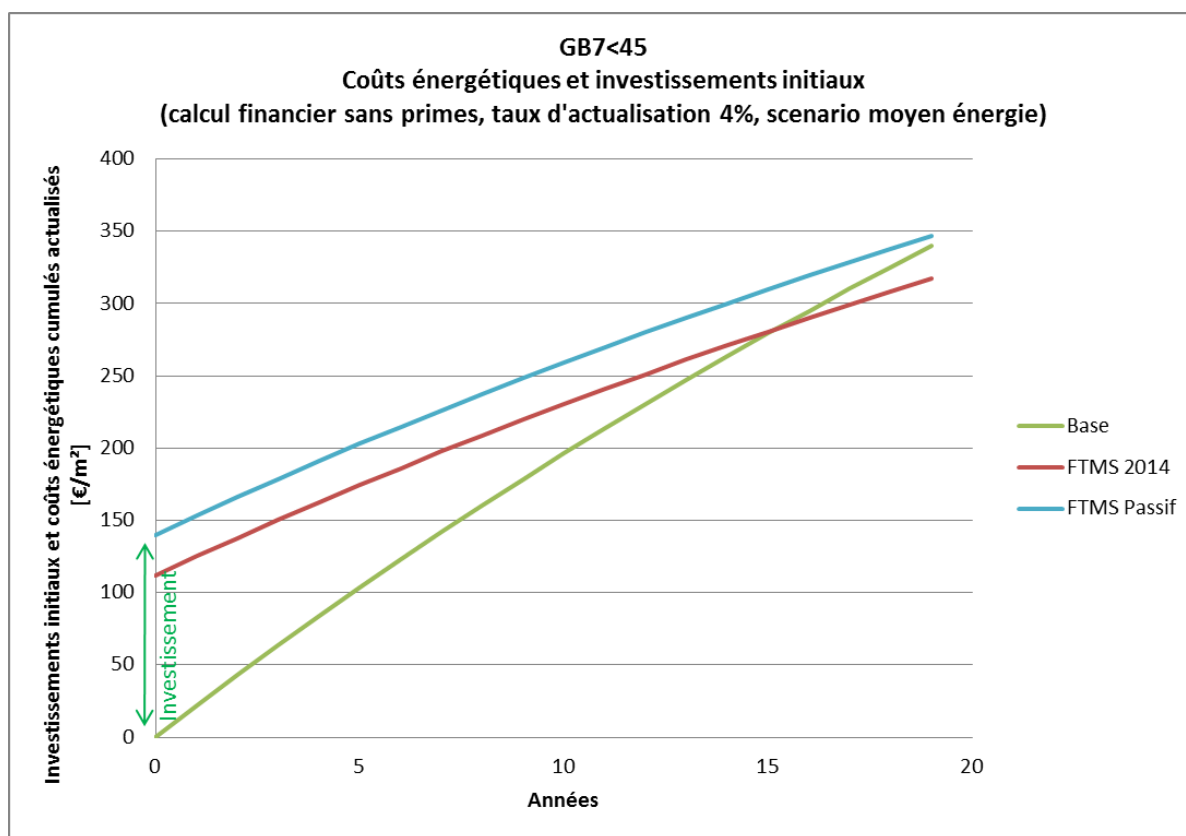


Figure 31 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – GB7<45

La rénovation énergétique du bâtiment selon un niveau de performance correspondant aux exigences PEB 2014 est 'amortie' après une quinzaine d'années (lorsque la courbe bleue croise la courbe rouge).

En considérant un taux d'actualisation de 4% et une hausse moyenne du prix des énergies: 15 ans après l'investissement, le bâtiment de référence commence à coûter plus cher au gestionnaire que le bâtiment optimum.

On observe que le CGA d'une rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche des exigences du passif rejoint celui du cas de base, utilisé comme la référence, après une vingtaine d'années.

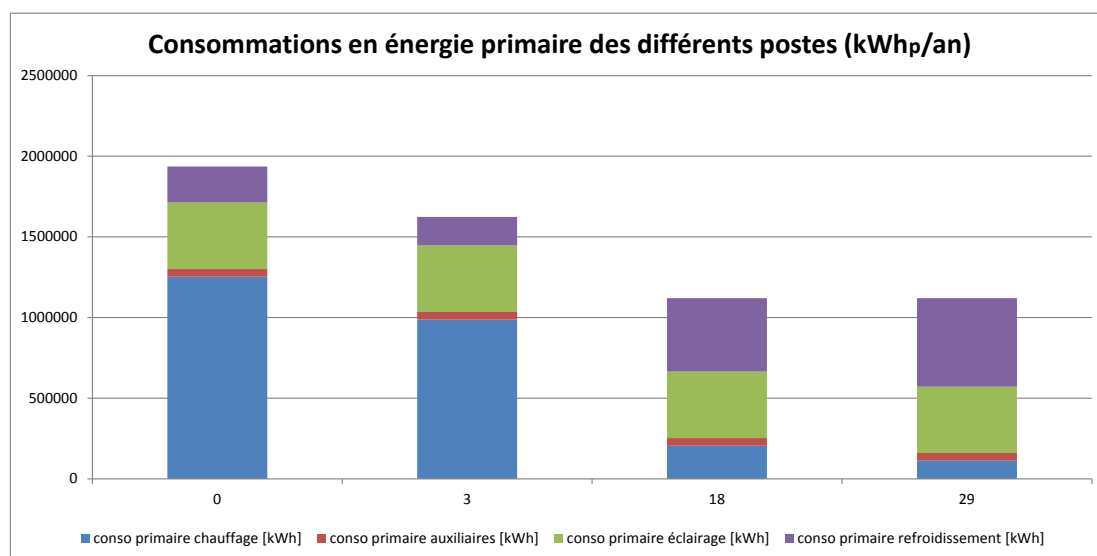


Figure 32 Consommations en énergie primaire – cas de base – calcul macro-économique, taux d'actualisation 4%, scénario moyen énergie

La figure ci-dessus montre qu'une action sur l'isolation de l'enveloppe a un impact important sur l'accroissement des besoins en froid ; d'où l'importance de prévoir un producteur de froid performant dans ce type d'immeuble de bureau nécessitant un refroidissement actif.

On observe également qu'une isolation performante ne suffit pas à réduire significativement la consommation globale du bâtiment: la part des besoins/consommations primaires dues à l'éclairage et au refroidissement montre toute l'importance d'agir simultanément sur l'éclairage et la production de froid.

4.1.2. BE3-70

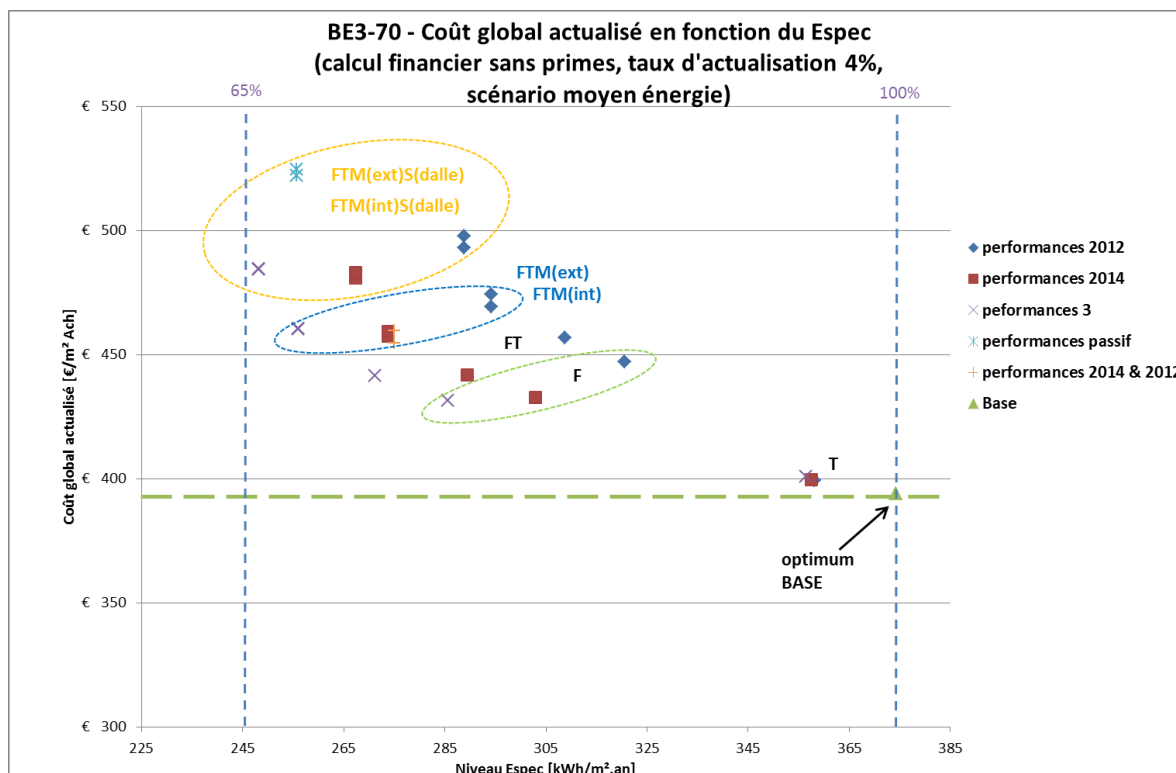
Les performances énergétiques de l'enveloppe du bureau de référence (base) - de compacité moyenne, construit dans les années 70, typique des implantations rencontrées dans les zones d'activités économiques en périphérie urbaine - sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Stricto sensu, l'optimum de coût pour ce bureau est la référence, ce qui signifie que dans un tel bâtiment, aucune mesure d'amélioration de l'enveloppe thermique ne justifie à elle seule une rénovation énergétique.

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
Bureau BE3_70	Base	Uw 4,3 W/m ² K	0,81 W/m ² K	0,95 W/m ² K	0,57 W/m ² K	9,5
	CGA le plus bas - T2012 (cas 4)	Uw 4,3 W/m ² K	Utoit 2012	0,95 W/m ² K	0,57 W/m ² K	8,0
	FTMS Passif (cas 25)	Fpas	Utoit pas	Umur pas ext	Usol pas int	2,5

Tableau 39 : U caractéristiques des parois selon le niveau d'isolation de l'enveloppe pour le CGA le plus bas et le cas « passif »

En observant à une autre échelle le graphique ci-dessous, on constaterait que l'isolation de la toiture plate (1.600 m²) de l'immeuble à un niveau correspondant aux exigences PEB 2012 est « quasi » optimum. En effet, bien que disposant déjà d'une épaisseur d'isolant de 4 cm (R=0,89 m²K/W), l'isolation par l'extérieur - la plus aisée pour ce type de structure, et permettant de

conserver l'étanchéité existante qui joue alors le rôle de pare-vapeur – n'entraîne pas de hausse significative du CGA (5 €/m²) par rapport au cas de base.



A noter :

- aucune (combinaison de) mesure(s) ne permet d'atteindre un CGA inférieur à celui de la référence (en pointillé vert sur le graphique).
- Aucune (combinaison de) mesure(s) ne permet de réduire la consommation caractéristique d'énergie primaire de plus de 35% comparé à la BASE
- Les symboles T 2012, T2014 et T performances 3 se chevauchent. Ce qui illustre le fait que l'isolation de cette toiture au niveau PEB 2014 (0,24 W/m²K) ou U3 (0,20 W/m²K) n'occasionne qu'un surcoût très limité (de l'ordre de 1 à 2 Euros par m²) comparé à l'isolation selon le niveau d'exigence de la PEB 2012 (U 0,27 W/m²K). Dès lors, tant qu'à réaliser les travaux, et sans certitude quant à une évolution douce et régulière des prix de l'énergie, l'isolation de la toiture à un niveau PEB 2014, voire U3, semble se justifier (d'autant plus si des aides à l'isolation de la toiture sont accessibles).

Comme illustré dans le tableau ci-dessous, un investissement supplémentaire d'à peine 25 €/m² n'entraîne pas de hausse significative du coût global actualisé par rapport à la référence mais une légère baisse de la consommation spécifique d'énergie primaire, vraisemblablement accompagnée d'une (nette) amélioration du confort thermique des occupants du niveau supérieur sous toiture.

Le tableau montre clairement qu'une isolation de l'ensemble des parois à un niveau proche de celui du passif ne se justifie pas, le surcoût d'investissement (239 €/m²) n'est pas compensé par l'économie en chauffage sur la période d'évaluation de 20 ans (voir graphique ci-après), le CGA d'une telle opération est de 30% supérieur à celui de la seule isolation du toit au niveau PEB 2014.

		Ach	Conso chaleur, froid, E _{aux} , Elec		E _{spec}	Economie d'énergie par rapport au cas de base	Surcoût d'investissement Enveloppe	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 20 ans par rapport au cas de base
			m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	%	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²
Bureau BE3_70	Base	4953		1.853.320	374	100%	0	0 €	0 €	394 €
	CGA le plus bas - T2012 (cas 4)			1.773.939	358	96%	16	121.997 €	25 €	399 €
	FTMS Passif (cas 25)			1.266.585	256	68%	118	1.184.740 €	239 €	522 €

Tableau 40 : consommation d'énergie primaire, surcoût d'investissement et coût global actualisé du CGA le plus bas et du cas « passif »

Le graphique ci-dessous illustre l'intérêt d'un investissement limité dans l'isolation des toitures étendues de cette typologie de bâtiment. Les effets d'une telle mesure se feront sentir pendant une quarantaine d'année, alors que les économies d'énergies cumulées actualisées compensent à peu près l'investissement après une vingtaine d'années, dans l'hypothèse d'une hausse moyenne des prix de l'énergie.

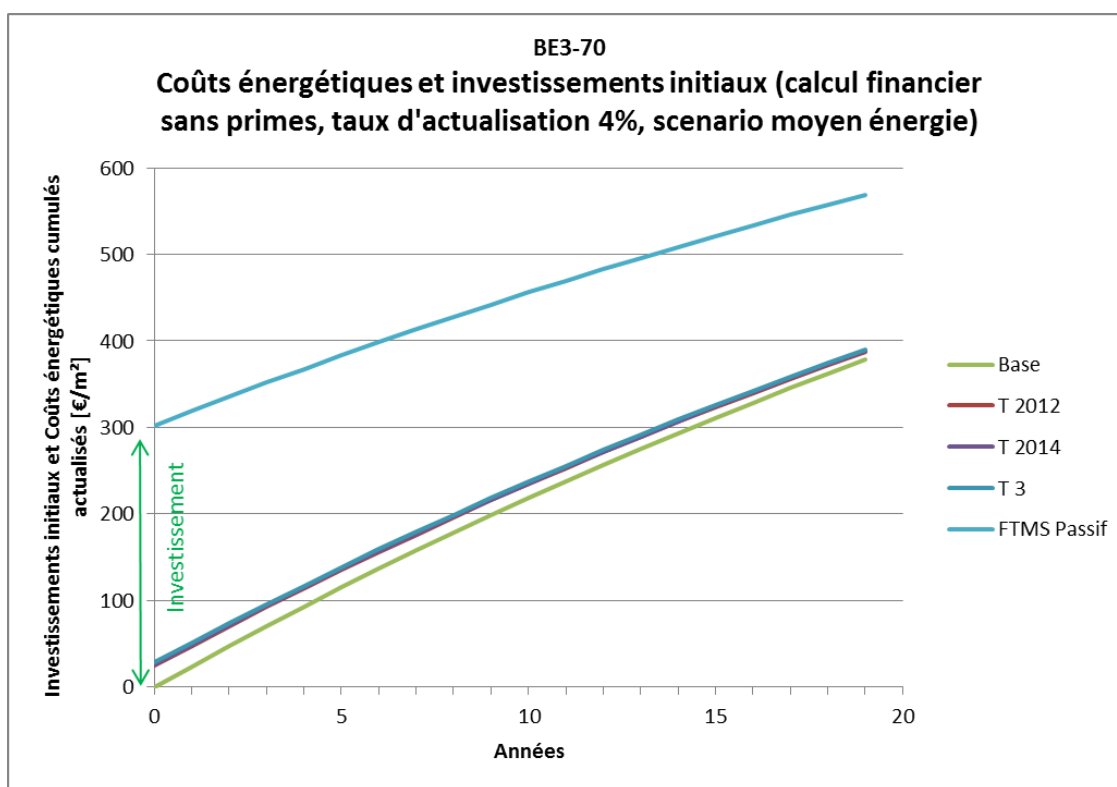


Figure 34 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – BE3-70

4.1.3. PBI1-84

Les performances énergétiques de l'enveloppe du bureau de référence (base) - typique d'une activité libérale exercée au niveau du rez-commercial de certains immeubles de logement - sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Dans un tel volume (<350 m³), la situation de référence correspond à un optimum de coût. Du point de vue de la seule amélioration de la performance énergétique de l'enveloppe, le remplacement des

Le tableau ci-dessous montre que dans un scénario moyen d'augmentation du prix des énergies et sans intervention sur les systèmes⁴, le cas de base reste le plus intéressant en terme de CGA (± 200 €/m²).

	Ach	Conso chaleur, froid, E _{aux} , Elec	E _{spec}	Economie d'énergie par rapport au cas de base	Surcoût d'investissement Enveloppe	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 20 ans par rapport au cas de base
	m ²	kWh/an	kWh/m ² .an	%	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²
Bureau PBI1_84	Base	20.146	191	100%	0	0 €	0 €	201 €
	CGA le plus bas - F2014 (cas 2)	17.910	170	89%	21	7.847 €	74 €	242 €
	FTMS Passif (cas 26)	11.036	105	55%	86	26.876 €	255 €	280 €

Tableau 42 : consommation d'énergie primaire, surcoût d'investissement et coût global actualisé du CGA le plus bas et du cas « passif »

Les courbes « Base » et « F2014 » ci-dessous ont sensiblement la même allure. Ce qui signifie que le remplacement des fenêtres « 2005 » par des éléments plus performants ne sera probablement jamais amorti, et certainement pas sur la durée de vie escomptée de ce composant (20 ans).

L'isolation de ce petit espace de bureau au standard passif occasionnerait un surcoût d'investissement prohibitif de plus de 250 €/m², jamais récupéré sur la période d'évaluation. Le CGA du cas « passif » augmente de près de 40% par rapport à la référence.

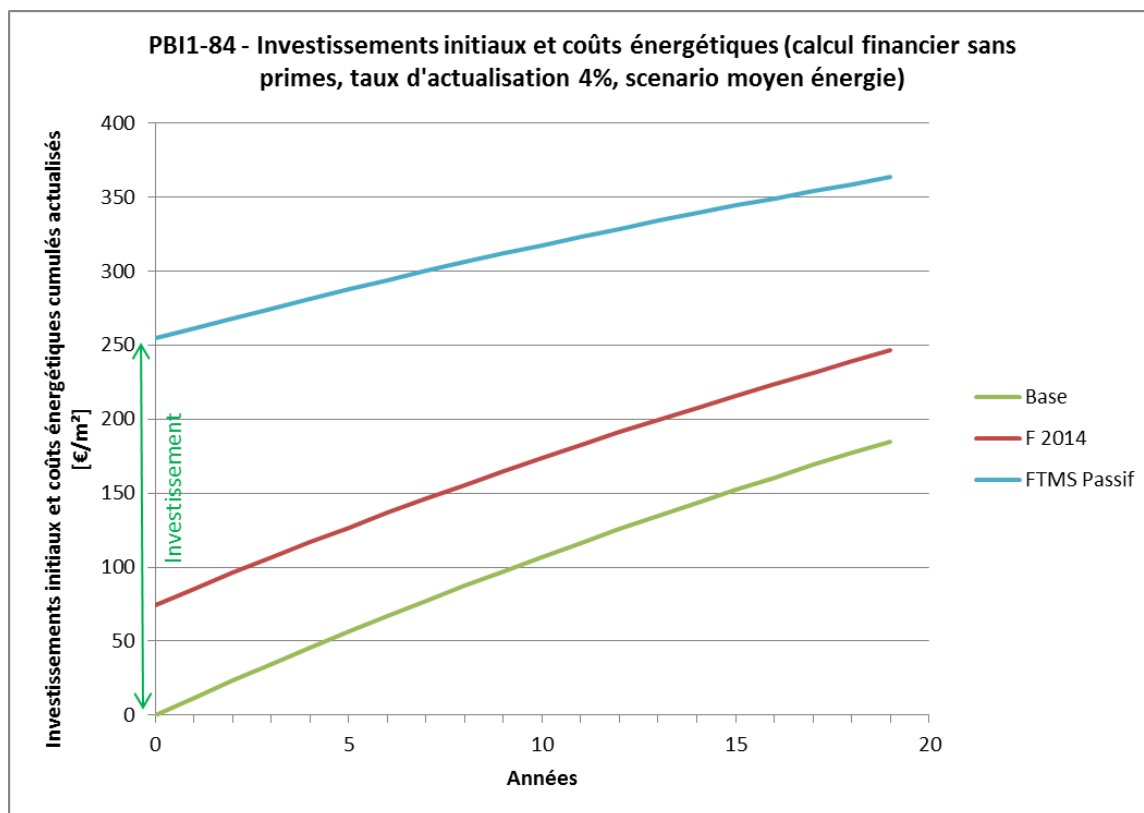


Figure 36 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – PBI1-84

⁴ On considère que la chaudière présente en base a été remplacée en 2005

4.1.4. BC4-96

Les performances énergétiques de l'enveloppe du bureau de référence (base) sont indiquées dans le tableau ci-dessous. L'optimum de coût pour ce bâtiment de bureaux compact de 4 étages construit dans les années 1996 à 2008 est à nouveau la référence (Base).

La mesure (Utoit 3) affichant le CGA le plus bas (après la référence) consiste à isoler par l'extérieur (sarking) les versants de toiture inclinés, à un niveau intermédiaire ($U_{\max} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$) entre les exigences PEB 2014 et le niveau d'isolation correspondant à celui d'un bâtiment de bureau passif.

Bureau BC4_96						
	Base	Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		Uw 3,55 W/m ² K	0,48 W/m ² K	0,50 W/m ² K	1,008 W/m ² K	7,0
	CGA le plus bas - T3 (cas 6)	Uw 3,55 W/m ² K	Utoit 3	0,50 W/m ² K	1,008 W/m ² K	6,5
Bureau BC4_96	FTMS Passif (cas 17)	Fpas	Utoit pas	Umur pas ext	Usol pas ext	2,5

Tableau 43 : U caractéristiques des parois selon le niveau d'isolation de l'enveloppe pour le CGA le plus bas et le cas « passif »

Le graphique ci-dessous montre que dans l'hypothèse d'un scénario d'augmentation moyen des prix de l'énergie et sans intervention au niveau des systèmes HVAC, la seule amélioration de l'enveloppe thermique du bâtiment ne se justifie pas d'un point de vue économique.

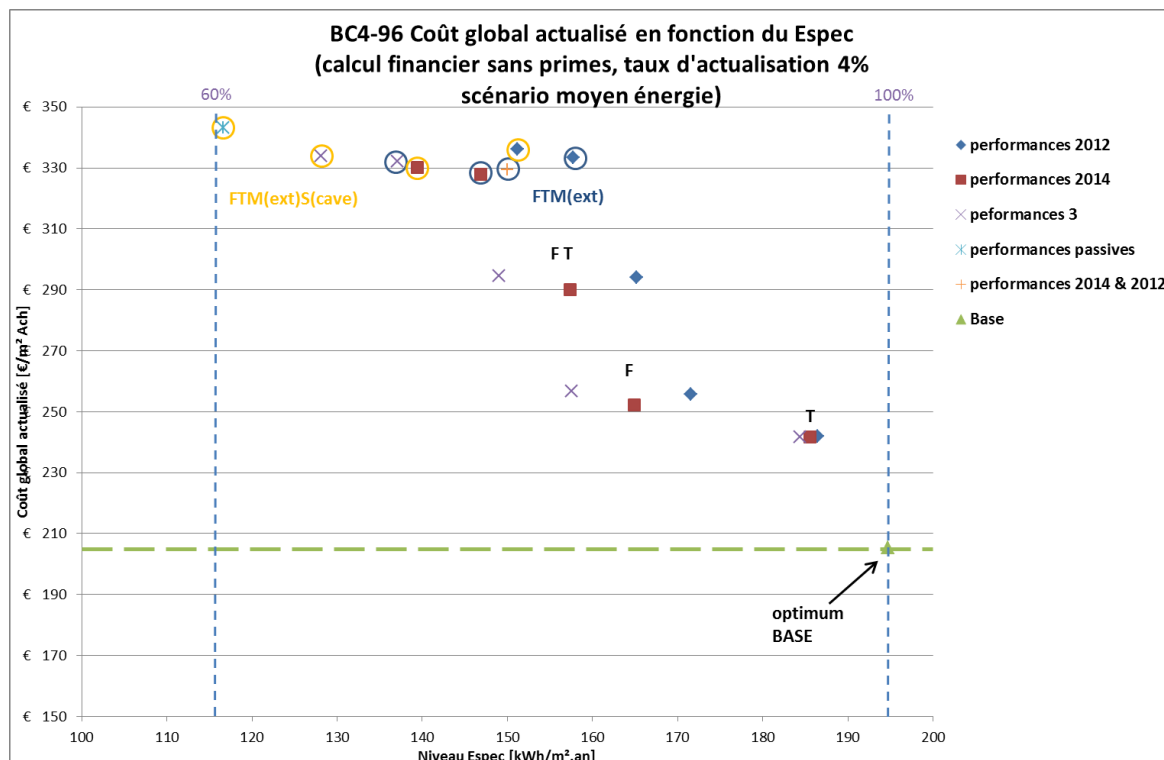


Figure 37 : coût global actualisé en fonction du Espec – BC4-96

Comme illustré dans le tableau ci-dessous, une économie de 10 kWh/m² par an dans cet immeuble de 2300 m² entraîne un surcoût d'investissement spécifique de 55 €/m² et une augmentation du CGA de l'ordre de 18%. En cause (si l'on peut dire) la relativement bonne performance du bâtiment de référence construit à l'époque de la mise en œuvre de la seconde réglementation thermique (K65,

U_{\max}), imposant certaines exigences au niveau de la ventilation, et l'absence de toute amélioration au niveau des systèmes parmi les mesures considérées dans l'étude.

A noter :

- l'amélioration de l'enveloppe pour atteindre un niveau de performance proche du standard passif permettrait de réduire la consommation caractéristique d'énergie primaire de l'ordre de 40%. Hélas, dans le même temps le CGA du cas « passif » bondit de 67% par rapport à celui de la référence.
- Aucune combinaison de mesures d'amélioration de l'enveloppe seule ne permet de diminuer la consommation caractéristique d'énergie primaire de plus de 40% comparé à la Base.

		Ach	Conso chaleur, froid, E _{aux} , Elec E _{spec}			Economie d'énergie par rapport au cas de base	Surcoût d'investissement Enveloppe	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 20 ans par rapport au cas de base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	%	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Bureau BC4_96	Base	2308	449.310	195	100%	0	0 €	0 €	205 €	0 €
	CGA le plus bas - T3 (cas 6)		425.452	184	95%	10	126.870 €	55 €	242 €	-36 €
	FTMS Passif (cas 17)		269.164	117	60%	78	599.245 €	260 €	343 €	-138 €

Tableau 44 : consommation d'énergie primaire, surcoût d'investissement et coût global actualisé du CGA le plus bas et du cas « passif »

Dans le graphique ci-dessous, la courbe correspondant à l'isolation de la toiture pour passer d'un niveau de performance $U_{0,49}$ à $U_{0,20}$ (W/m²K) a la même allure et est relativement proche de la courbe de référence. Ce qui signifie que dans les conditions d'augmentation moyenne du prix des énergies, la mesure ne sera vraisemblablement jamais récupérée (en tous cas pas sur la période d'évaluation de 20 ans). Par contre en cas d'augmentation du prix des énergies supérieure à la hausse moyenne considérée dans cette étude (>1,75% par an), cette mesure pourrait se justifier économiquement.

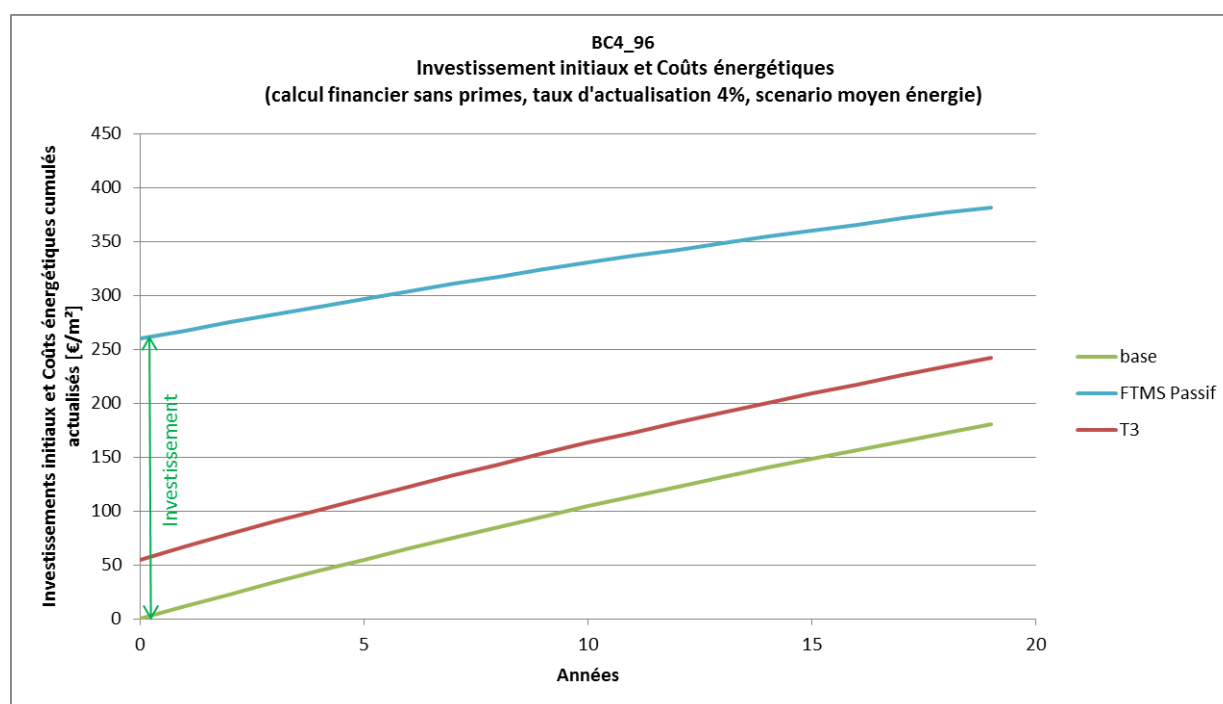


Figure 38 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps – BC4-96

4.2. Conclusions en fonction de la date de construction

La performance énergétique des grands immeubles de bureaux datant d'avant-guerre est telle que l'amélioration de l'enveloppe thermique seule, à un niveau correspondant à celui exigé par la PEB 2014 entraîne déjà une diminution du CGA de l'ordre de 15%, sans toucher aux systèmes HVAC⁵.

La compacité relativement faible des immeubles de bureaux typiques des années 70, combinée à l'absence de réglementation thermique à cette époque justifie l'isolation de la toiture plate de ce type d'édifice (généralement un béton lourd, isolé par quelques cm d'une laine minérale conventionnelle) pour atteindre un niveau de performance avoisinant celui de la PEB 2014.

Les petits espaces commerciaux « à rue » surplombés par des appartements, n'offrent pas de réel potentiel économique pour la rénovation énergétique de l'enveloppe. Dans bien des cas, pour ces immeubles construits dans les années 1986-1996, après l'apparition de la première réglementation thermique en Wallonie, le cas de base utilisé comme référence constitue l'optimum et les améliorations de la performance énergétique sont plutôt à chercher au niveau des systèmes HVAC.

L'isolation des toitures d'immeubles de bureau compacts ne comportant que quelques étages à un niveau intermédiaire entre les exigences de la PEB 2014 et les performances observées dans les bâtiments de bureaux passif ne se justifie économiquement que dans un contexte de hausse soutenue du prix de l'énergie et/ou de forte incertitude sur celui-ci.

Sur le plan de l'amélioration du confort thermiques et de la lutte contre les changements climatiques par contre, une telle mesure d'isolation des toitures prend tout son sens.

4.3. Conclusions en fonction du type de paroi existante

Investir dans l'isolation de l'enveloppe en combinant des mesures dont la durée de vie (à l'exception du remplacement du vitrage) est de l'ordre de 40 ans, s'avère économiquement intéressant après une quinzaine d'années. Une vingtaine d'année si l'on pousse les niveaux d'isolation pour s'approcher de ceux généralement observés dans les immeubles de bureaux passifs. A noter cependant, sans intervention adéquate au niveau des systèmes (protections solaires, amélioration de l'éclairage, débits de ventilation...) la diminution des besoins en chaleur s'accompagne généralement d'une hausse significative des besoins en refroidissement dans ce type d'édifice.

L'isolation de la toiture, plate ou inclinée, seule ou combinée à d'autres mesures se justifie économiquement dans 3 des 4 typologies étudiées (la 4^{ème} correspondant à un petit bureau intégré au rez-de-chaussée d'un logement, sans toiture au niveau du volume protégé du bureau) à un niveau de performance équivalent à celui exigé par la PEB wallonne en 2014.

A noter que les (mêmes) mesures d'amélioration des parois appliquées au niveau des BASES-bis se révèlent (encore) un peu moins intéressantes, étant donné que les références de ces BASES-bis affichent un CGA légèrement inférieur à celui de leurs homologues (GB7<45 et BE3-70).

⁵ Nous considérons que la chaudière installée avant 1945 a été remplacée par une unité plus performante et qu'un groupe de froid a été installé dans les secteurs énergétiques concernés.

4.4. Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de bureaux en Wallonie?

Au niveau du parc de bureaux anciens (construits avant 1945), une rénovation énergétique de l'ensemble des parois permettant d'amener ces bâtiments au niveau de performance exigé par la PEB 2014 se justifie amplement. Une action simultanée au niveau des systèmes améliorerait encore sensiblement le bilan énergétique et économique de l'opération.

Au niveau du parc de bâtiments plus récents, la période de construction et la compacité / géométrie du bâtiment déterminent dans une large mesure le type de rénovation énergétique à considérer :

- Dans les bâtiments peu compacts comprenant moins de 5 niveaux, construits avant l'apparition des premières réglementations sur la thermique du bâtiment, l'isolation (par l'extérieur) de la toiture au niveau d'exigence correspondant à la PEB 2012 ou à la PEB 2014 se révèle généralement 'gagnante', ou sans effet sur le coût global actualisé par rapport au cas de base (l'immeuble de référence). Cette mesure est dès lors à envisager du point de vue environnemental et sur le plan de l'amélioration du confort thermique.
- Dans les bâtiments récents (>1996) affichant une bonne compacité (>2) et comprenant moins de 5 niveaux, l'isolation (par l'extérieur) de la toiture à un niveau intermédiaire ('3') entre celui de la PEB 2014 et les niveaux de performance des parois observés dans les bureaux passifs peut se justifier économiquement dans un contexte de forte hausse ou d'incertitude sur l'évolution des prix de l'énergie.
- Les rez commerciaux typiques des petits immeubles d'appartement construits dans les années 80 présentent généralement en tant que tel peu de potentiel pour la rénovation énergétique de l'enveloppe (faible volume, niveau de performance acceptable,...)

Par conséquent, vu la proportion⁶ (>60%) d'immeuble de bureaux construits avant 1945 sur le territoire wallon, il semble logique de soutenir en priorité l'amélioration de l'enveloppe (et le renouvellement des systèmes) dans ces bâtiments, au besoin avec l'aide (et les capacités de financement) des compagnies de services énergétiques (ESCO), afin de les rapprocher du niveau de performance typique des bâtiments de bureaux dont la demande de permis d'urbanisme date de 2014.

Une seconde orientation à prendre par l'administration wallonne consiste à s'attaquer à la rénovation énergétique des toitures des bureaux peu compacts, typiques de ceux érigés dans les années 70 dans les zones d'activité économique de l'époque, de manière à relever le niveau de performance à un niveau proche de celui exigé par la PEB 2014 ($U_{\text{Toit}} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$). Un subside spécifique calculé sur base du surcoût d'investissement spécifique pourrait être accordé pour l'isolation de ces toitures en particulier.

Nonobstant l'impact sur la consommation énergétique globale d'une rénovation énergétique (même partielle) de l'enveloppe ; dans le cas particulier des bureaux, des actions ciblées visant à améliorer la performance des systèmes (chaud, froid, éclairage...) sont clairement indispensables pour atteindre des objectifs aussi ambitieux qu'une réduction de 50 à 80% de la consommation caractéristique d'énergie primaire de ce parc de bâtiments.

⁶ Cfr. COZEB – Extension. Détermination synthétique du parc existant de bureaux et services et établissements de soins de santé Wallon, 3E, Juillet 2014. (p.15)

5. Conclusions pour les écoles

Dans le cadre de la tâche 1 nous avons sélectionné quatre géométries-type d'école représentant une majorité de typologies des bâtiments récents ou plus anciens rencontrés en Wallonie. Une époque de construction permettant de déterminer les performances thermiques de l'enveloppe est associée à chaque type de géométrie.

Sur base de l'étude de ces 4 bâtiments scolaires de référence, nous tirons des conclusions selon les typologies d'immeubles et selon les caractéristiques des parois. Ces conclusions générales sont reprises dans le tableau de synthèse regroupant ces quatre bâtiments de référence ainsi que leurs caractéristiques, repris à l'annexe E.

Des informations plus détaillées concernant chaque typologie se trouvent dans le rapport de la tâche 1 « Détermination synthétique du parc de bâtiments résidentiels existants en Wallonie ». Voici leurs caractéristiques principales :

- Ecole 1 : Ecole maternelle et primaire de moins de 5000 m². Probablement construite au début du XX^{ème} siècle, elle a été agrandie en 1994. L'école est composée de plusieurs bâtiments reliés entre eux par des volumes secondaires à toiture plate. Seule l'extension est isolée. Les châssis sont en bois et possèdent du double vitrage dans l'extension, et du simple vitrage dans le volume initial.
- Ecole 2 : Ecole maternelle et primaire de moins de 5000 m² construite en 1950. L'école est constituée d'un bâtiment principal de 3 niveaux et d'un bâtiment secondaire de 2 niveaux, accolé perpendiculairement à la façade arrière du bâtiment principal. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée.
- Ecole 3 : Ecole secondaire d'après 1970 d'une surface comprise entre 5000 m² et 10000 m². Il s'agit d'une école type « Athénée », comportant un bloc central de 5 niveaux et deux ailes latérales de 4 niveaux. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée.
- Ecole 4 : Bâtiment universitaire de 1968 ayant une surface d'environ 10000 m². Volume monolithique de 4 niveaux. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée.

En plus de déterminer la rénovation correspondant à un optimum économique strict selon les hypothèses de l'étude COZEB originale, nous avons systématiquement analysé la variante « FTMS passif », correspondant généralement à des réductions de consommation d'énergie primaire de plus de 50% par rapport à la base. Cette variante permet de s'affranchir au maximum des sources d'énergie conventionnelles et d'être moins dépendant des fluctuations du coût de l'énergie. Dès que le CGA de cette variante se situe sous la ligne pointillée du CGA de la base, l'intervention peut conserver un intérêt pour la rénovation énergétique de l'enveloppe, sans forcément représenter un optimum économique.

A noter également, que sans intervention adéquate au niveau des systèmes (ventilation intensive...) ainsi que de l'ombrage (protections solaires,...), la rénovation énergétique de l'enveloppe seule entraîne un risque de surchauffe dans certains bâtiments. Ce facteur de risque n'a pas été analysé précisément dans la présente étude. En effet, les deux paramètres influençant fortement la surchauffe sont la surface de fenêtres ouvrantes et l'ombrage réel de chaque ouverture. N'étant liés ni à la typologie ni à l'époque de construction et pouvant varier énormément d'un bâtiment à l'autre, ces paramètres n'ont pas été encodés en détail. Les fenêtres sont toutes considérées comme

fixes et l'ombrage pris en compte est celui par défaut. La consommation pour les besoins de refroidissement est donc bien prise en compte dans les calculs et correspond au cas le plus défavorable en termes de surchauffe.

5.1. Illustrations des conclusions

Nous allons illustrer ci-dessous les conclusions relatives aux 4 bâtiments scolaires étudiés.

5.1.1. ECOLE 1

Il s'agit d'une école maternelle/primaire d'avant 1945 d'une surface inférieure à 5000 m². Probablement construite au début du XX^{ème} siècle, elle a été agrandie en 1994. L'école est composée de plusieurs bâtiments reliés entre eux par des volumes secondaires à toiture plate. Seule l'extension est isolée. Les châssis sont en bois et possèdent du double vitrage dans l'extension, et du simple vitrage dans le volume initial. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette école sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour ce bâtiment scolaire de référence correspond à la variante V2014 + T2012, c'est-à-dire :

- Remplacement du vitrage en répondant à l'exigence PEB 2014 ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures plates par l'extérieur et des toitures en pente par l'intérieur selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h.m}^2$
Ecole 1	Base	5,38 et 3,13	0,49 et 2,0	1,92 et 0,77	0,44 et 0,82	15,0
	Optimum V2014 + T2012 (cas11)	$U_g=1,1$	0,27	1,92 et 0,77	0,44 et 0,82	12,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 45 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - école 1

Sur le graphique de la Figure 39 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à l'optimum économique est la variante V2014 + T2012.

Les rénovations plus complètes du bâtiment (FTMS et FTM) nécessitent un investissement plus important qui ne sera pas rentabilisé en 20 ans par la diminution des consommations énergétique, à l'exception des variantes FTM 2012 et FT2014 + M2012 dont le CGA est juste inférieur à celui de la base.

Seules les combinaisons de mesures FTM et FTMS permettent de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cette école (E_{spec}), mais aucune rénovation ne permet de la réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

Il faut noter que le bâtiment est composé de plusieurs petits volumes dont certains sont plus récents et comprennent des parois déjà isolées. Cette étude étant réalisée sur le bâtiment entier et non sur la partie ancienne uniquement, la présence éventuelle de cette annexe peut influencer la rentabilité des travaux envisagés sur les parties plus anciennes en fonction de leur proportion dans l'ensemble du bâtiment.

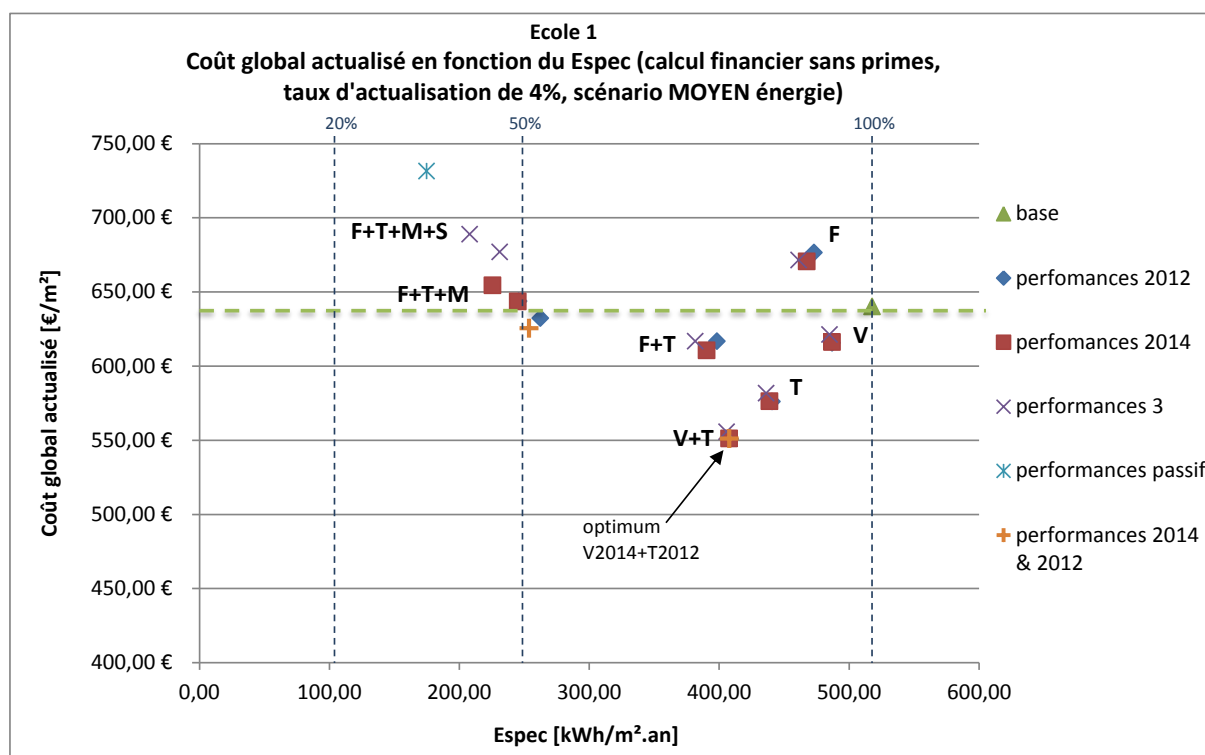


Figure 39 : coût global actualisé en fonction du Espec - école 1

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette école de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 21 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 109 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 51 € / m², soit 56.953 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 20 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 66 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 45% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 345 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 587 € / m², soit 661.042 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 731€/m² alors que le CGA de la base est de 640€/m². Isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » ne sera donc pas rentabilisé par la diminution de la consommation, et entraîne une perte de 91 €/m² sur 20 ans.

Ecole 1		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
		m²								
Ecole 1	Base	1127	488.337	433	0	518	0 €	0 €	640 €	0 €
	Optimum V2014 + T2012 (cas11)		365.890	325	109	408 (79%)	56.953 €	51 €	551 €	90 €
	Passif (cas23)		99.398	88	345	175 (34%)	661.042 €	587 €	731 €	-91 €

Tableau 46 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » - école 1

Sur le graphique de la figure 40, on observe que la rénovation énergétique du bâtiment selon l'optimum économique est 'amortie' après 7 ans. L'investissement initial de cette rénovation sera donc compensé en 7 ans par la diminution de la consommation énergétique.

Nous constatons également qu'avec une variation de la valeur U du vitrage remplacé, les courbes des coûts énergétiques cumulés actualisés sont presque identiques. La variante optimum V2014 ($U=1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$) + T2012 a un CGA de 551€ et la variante V3 ($U=0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$) + T2012 a un CGA de 556€. Placer le vitrage le plus isolant permettra de s'affranchir un peu plus de l'énergie et d'augmenter le confort thermique des occupants pour un investissement à peine plus important.

La rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche des exigences du passif nécessite un investissement plus important qui ne sera pas rentabilisé en 20 ans par la diminution des consommations.

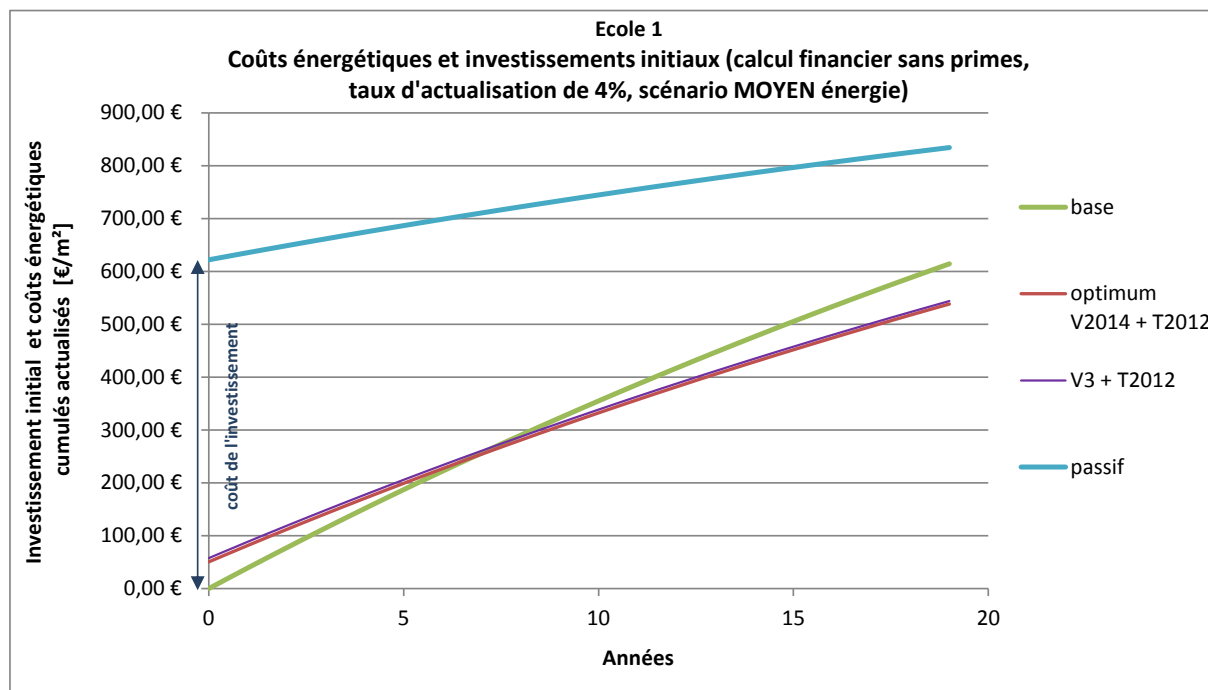


Figure 40 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - école 1

5.1.2. ECOLE 2

Ce bâtiment est une école maternelle et primaire de moins de 5000 m² construite en 1950. L'école est constituée d'un bâtiment principal de 3 niveaux et d'un bâtiment secondaire de 2 niveaux, accolé perpendiculairement à la façade arrière du bâtiment principal. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette école sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour ce bâtiment scolaire de référence correspond à la variante VT2012, c'est-à-dire :

- Remplacement du vitrage en répondant à l'exigence PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation du plancher des combles par l'espace adjacent non chauffé selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h.m}^2$
Ecole 2	Base	5,07	1,02	1,98	1,11	15,0
	Optimum VT2012 (cas10)	$U_g=1,3$	0,27	1,98	1,11	12,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 47 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - école 2

Sur le graphique de la Figure 41, nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à l'optimum économique est la variante VT2012. Tous les points présentent un CGA inférieur à celui de la base (en pointillés verts sur le graphique), à l'exception des variantes « remplacement des fenêtres » et « remplacement des fenêtres avec isolation des toitures »

Seules les combinaisons de mesures FTM et FTMS permettent de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cette école (Espec), mais aucune rénovation ne permet de la réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

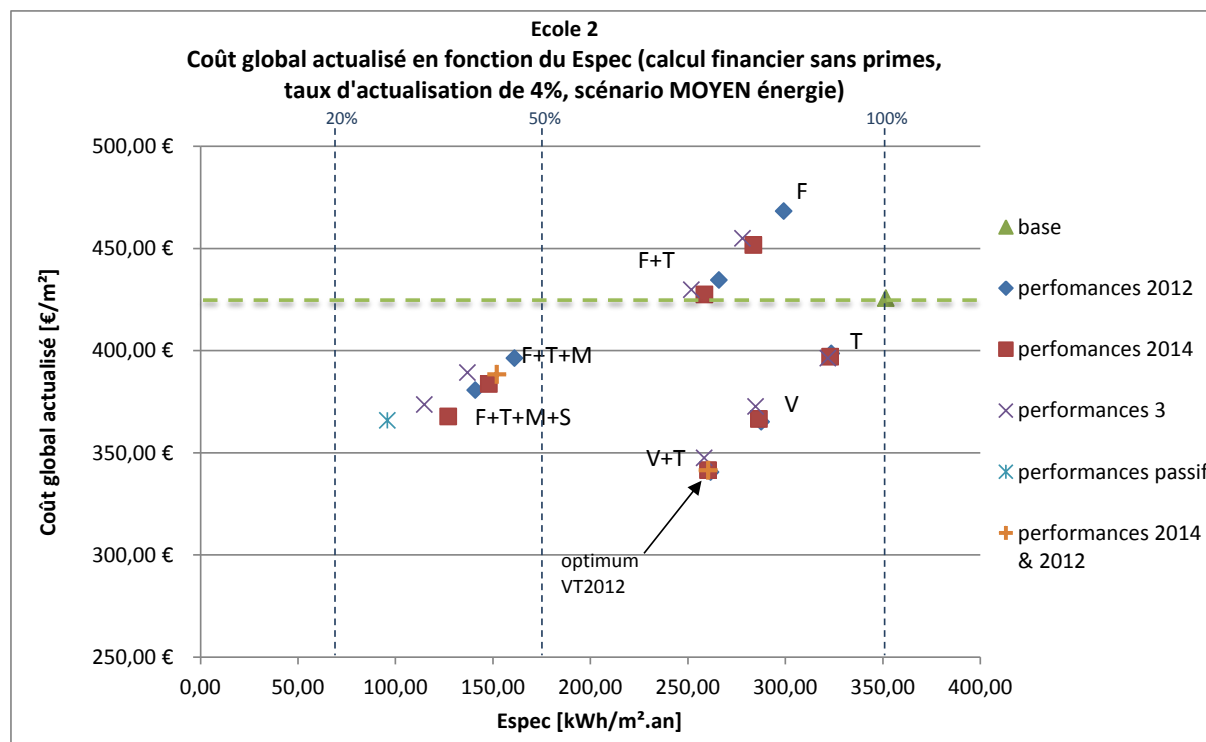


Figure 41 : coût global actualisé en fonction du Espec - école 2

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette école de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 26 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 87 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 23 € / m², soit 46.732 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 20 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 73 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 47% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 256 kWh/m².an
- Un surcoût d'investissement de 304 € / m², soit 605.507 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 366€/m² alors que le CGA de la base est de 426€/m². Isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » sera donc rentabilisé par la diminution de la consommation, et entraîne une économie de 60 €/m² sur 20 ans.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Ecole 2	Base	1995	573.086	287	0	352	0 €	0 €	426 €	0 €
	Optimum VT2012 (cas10)		400.322	201	87	262 (74%)	46.732 €	23 €	340 €	85 €
	Passif (cas23)		61.866	31	256	96 (27%)	605.507 €	304 €	366 €	60 €

Tableau 48 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » - école 2

Sur le graphique de la figure 42, on observe que la rénovation énergétique du bâtiment selon l'optimum économique est 'amortie' moins de 5 ans.

Nous constatons également qu'avec une variation de la valeur U du vitrage remplacé, les courbes des coûts énergétiques cumulés actualisés sont presque identiques. La variante optimum VT2012 a un CGA de 340€, la variante V2014 (U=1.1 W/m²K) + T2012 a un CGA de 342€ et la variante V3 (U=0.8 W/m²K) + T2012 a un CGA de 348€. Placer le vitrage le plus isolant permettra de s'affranchir un peu plus de l'énergie et d'augmenter le confort thermique des occupants pour un investissement à peine plus important.

La rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche des exigences du passif nécessite un investissement plus important mais reste rentable dans ce cas.

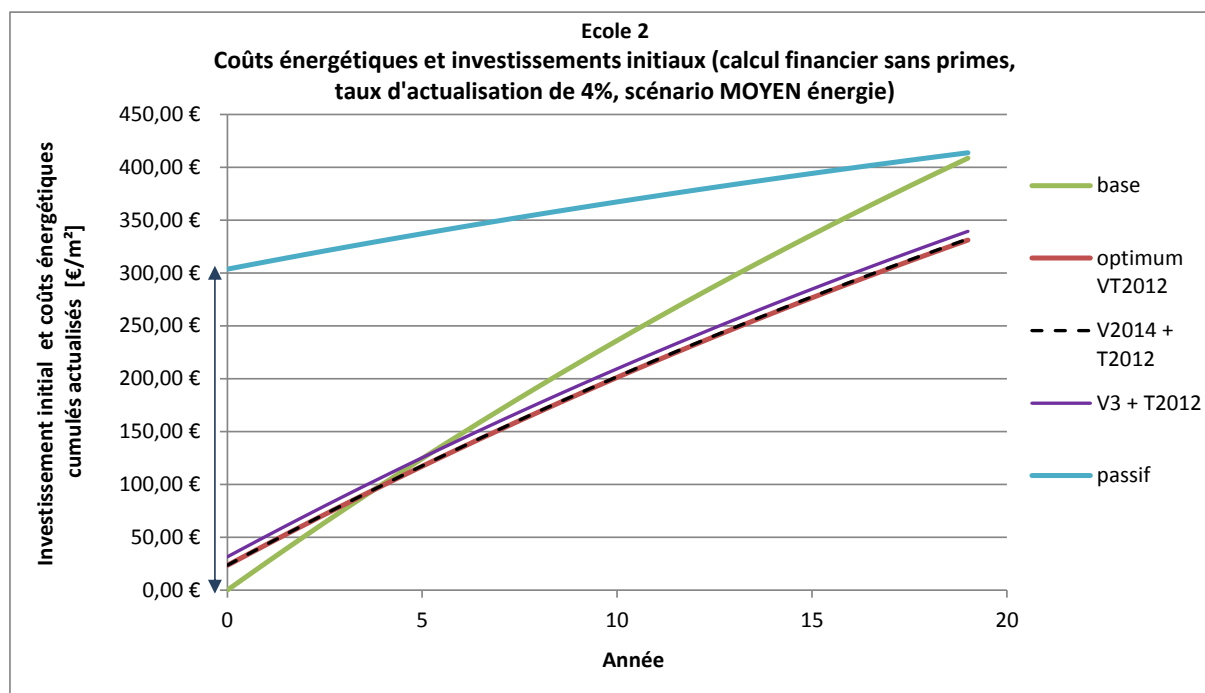


Figure 42 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - école 2

5.1.3. ECOLE 3

Il s'agit d'une école secondaire construite après 1970, d'une surface comprise entre 5000 m² et 10000 m². Il s'agit d'une école type « Athénée », comportant un bloc central de 5 niveaux et deux ailes latérales de 4 niveaux. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage, aucune paroi n'est isolée. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette école sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour ce bâtiment scolaire de référence correspond à la variante VT2012, c'est-à-dire :

- Remplacement du vitrage en répondant à l'exigence PEB 2012 ($U_g = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation de la toiture plate par l'extérieur selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{W/m}^2\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h.m}^2$
Ecole 3	Base	5,38	1,03	1,64	0,64	15,0
	Optimum VT2012 (cas10)	$U_g=1,3$	0,27	1,64	0,64	11,5
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 49 : U caractéristiques des parois pour les cas BASE, optimum et « passif » - école 3

Sur le graphique de la Figure 43 nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à l'optimum économique est la variante VT2012.

Les rénovations plus complètes du bâtiment (FTMS et FTM) nécessitent un investissement plus important qui ne sera pas rentabilisé en 20 ans par la diminution des consommations énergétique. Seules les rénovations énergétiques du vitrage et de la toiture présentent un CGA inférieur à celui de

la base ce qui signifie que seules ces variantes seront rentabilisées en 20 ans par la diminution des consommations.

Seule la combinaison de mesures FTMS permet de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cette école (Espec). Aucune rénovation ne permet de la réduire à 20% (en pointillés bleus sur le graphique).

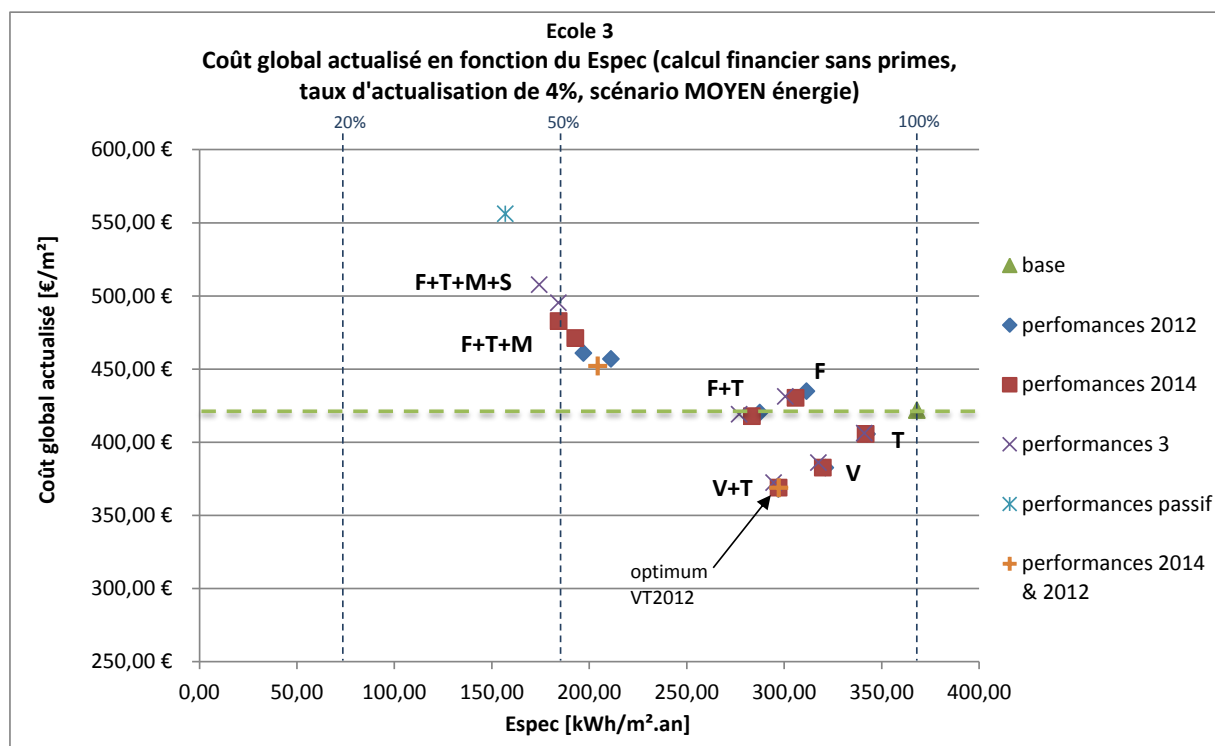


Figure 43 : coût global actualisé en fonction du Espec - école 3

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette école de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 19 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 70 kWh/m².an
- Un surcôt d'investissement de 24 € / m², soit 137.116 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 20 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 57 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 38% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 213 kWh/m².an
- Un surcôt d'investissement de 438 € / m², soit 2.486.545 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 556€/m² alors que le CGA de la base est de 422€/m². Isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » ne sera donc pas rentabilisé par la diminution de la consommation, et entraîne une perte de 134 €/m² sur 20 ans.

Ecole 3		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
	Base	m²								
	Optimum VT2012 (cas10)	5674	1.497.079	264	0	368	0 €	0 €	422 €	0 €
	Passif (cas23)		1.102.407	194	70	297 (81%)	137.116 €	24 €	368 €	54 €
			287.957	51	213	157 (43%)	2.486.545 €	438 €	556 €	-134 €

Tableau 50 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » - école 3

Sur le graphique de la figure 44, on observe que la rénovation énergétique du bâtiment selon l'optimum économique est 'amortie' après 6 ans. L'investissement initial de cette rénovation sera donc compensé en 6 ans par la diminution de la consommation énergétique.

Nous constatons également qu'avec une variation de la valeur U du vitrage remplacé, les courbes des coûts énergétiques cumulés actualisés sont presque identiques. La variante optimum VT2012 a un CGA de 368€, la variante V2014 (U=1.1 W/m²K) + T2012 a un CGA de 369€ et la variante V3 (U=0.8 W/m²K) + T2012 a un CGA de 372€. Placer le vitrage le plus isolant permettra de s'affranchir un peu plus de l'énergie et d'augmenter le confort thermique des occupants pour un investissement à peine plus important.

La rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche des exigences du passif nécessite un investissement plus important qui ne sera pas rentabilisé en 20 ans par la diminution des consommations.

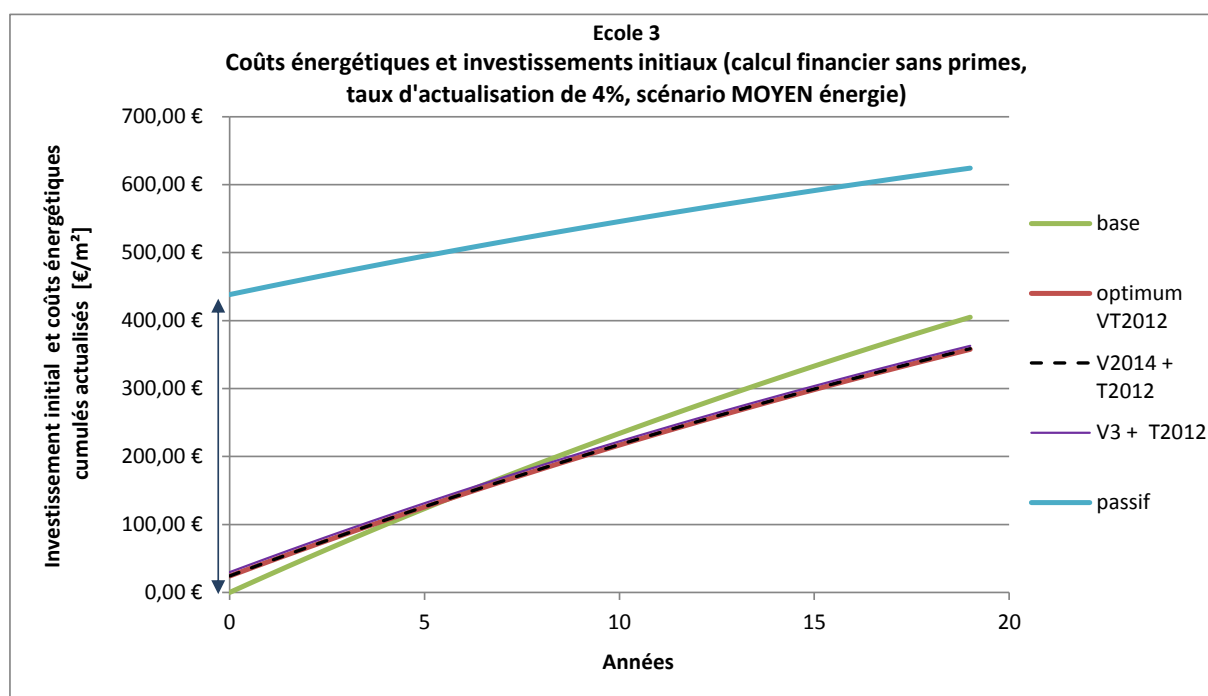


Figure 44 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - école 3

5.1.4. ECOLE 4

Il s'agit d'un bâtiment universitaire de 1968 ayant une surface d'environ 10000 m². Le volume est monolithique et comprend 4 niveaux. Les châssis sont en bois avec du simple vitrage,

aucune paroi n'est isolée. Les performances énergétiques de l'enveloppe de cette école sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

L'optimum économique selon les hypothèses de l'étude pour ce bâtiment scolaire de référence correspond à la variante V2014 + T2012, c'est-à-dire :

- Remplacement du vitrage en répondant à l'exigence PEB 2014 ($U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Isolation des toitures plates par l'extérieur selon les exigences PEB 2012 ($U = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U_w) $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$
Ecole 4	Base	3,13	2,29	2,90	0,72	15,0
	Optimum V2014 + T2012 (cas11)	$U_g=1,1$	0,27	2,90	0,72	12,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 51 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et « passif » - école 4

Sur le graphique de la Figure 45, nous pouvons observer que, si l'on se limite à l'enveloppe du bâtiment, la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (E_{spec}) correspondant à l'optimum économique est la variante V2014 + T2012.

D'autres interventions présentent un CGA très proche de cet optimum économique : F2014 + T2014 + M2012 avec une variante presque identique, FTM 2014, mais, la rénovation étant plus complète, elles ont l'avantage d'entraîner une diminution plus importante de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}) et de s'affranchir un peu plus de l'énergie.

Aucune rénovation ne permet de réduire de plus de 50% (en pointillés bleus sur le graphique) la consommation spécifique en énergie primaire de cette école (E_{spec}).

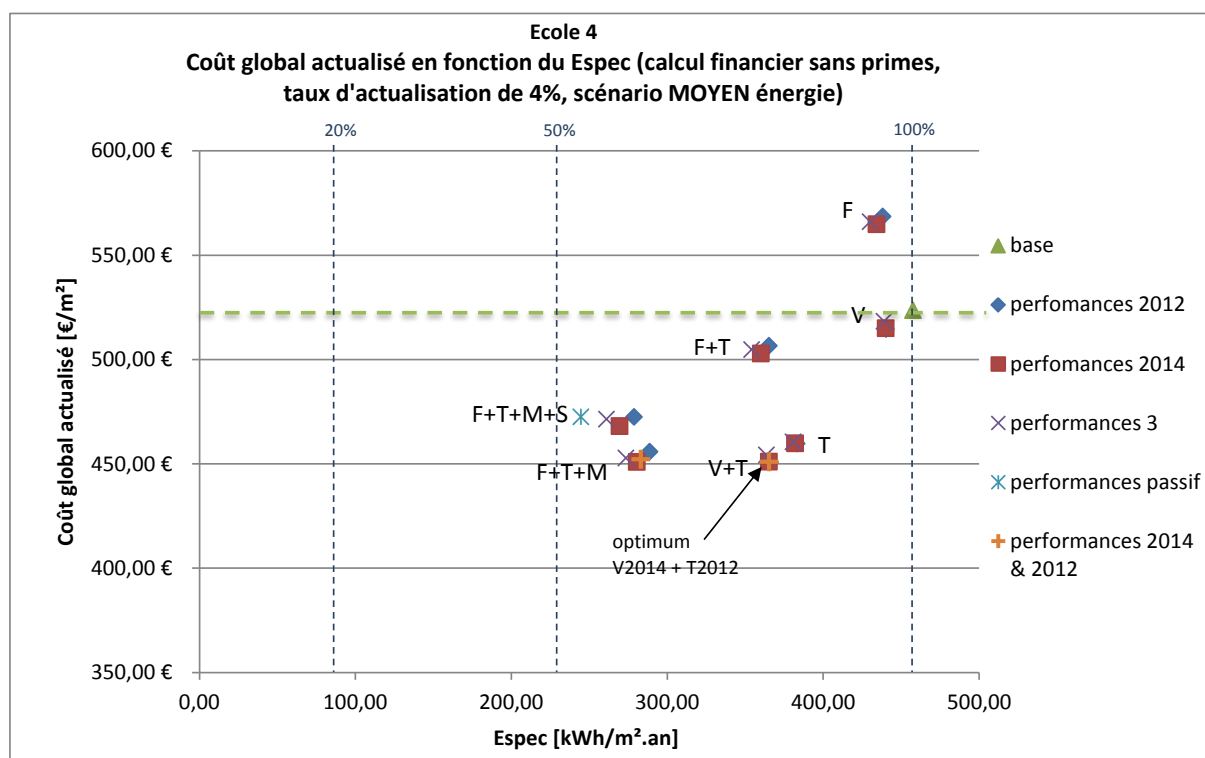


Figure 45 : coût global actualisé en fonction du Espec - école 4

Tel que repris dans le tableau ci-dessous, la rénovation de l'enveloppe de cette école de référence correspondant à l'optimum économique se traduit par :

- Une réduction de 20 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}),
- Une économie d'énergie en chauffage de 92 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 30 € / m², soit 334.861 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides) qui sera rentabilisé par la diminution de la consommation énergétique sur 20 ans.

La rénovation énergétique maximale de l'enveloppe de cet immeuble (FTMS passif) se traduit par :

- Une réduction de 55 % de la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire par unité de surface (E_{spec}), soit 35% de plus que la rénovation correspondant à l'optimum économique
- Une économie d'énergie en chauffage de 215 kWh/m².an
- Un surcout d'investissement de 227 € / m², soit 2.538.584 € pour le bâtiment (taxes, TVA et redevances comprises, mais hors subsides).

La variante « passif » présente un CGA de 472€/m² alors que le CGA de la base est de 524€/m². Isoler tout le bâtiment jusqu'au « passif » sera donc rentabilisé par la diminution de la consommation, et entraîne un gain de 51 €/m² sur 20 ans.

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Ecole 4	Base	11188	3.903.488	349	0	458	0 €	0 €	524 €	0 €
	Optimum V2014 + T2012 (cas11)		2.878.043	257	92	365 (80%)	334.861 €	30 €	451 €	73 €
	Passif (cas23)		1.495.103	134	215	245 (45%)	2.538.584 €	227 €	472 €	51 €

Tableau 52 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et « passif » - école 4

Sur le graphique de la figure 46, on observe que la rénovation énergétique du bâtiment selon l'optimum économique est 'amortie' après 5 ans. L'investissement initial de cette rénovation sera donc compensé en 5 ans par la diminution de la consommation énergétique.

Nous constatons également qu'avec une variation de la valeur U du vitrage remplacé, les courbes des coûts énergétiques cumulés actualisés sont presque identiques. La variante optimum V2014 (U=1.1 W/m²K) + T2012 a un CGA de 451€ et la variante V3 (U=0.8 W/m²K) + T2012 a un CGA de 454€. Placer le vitrage le plus isolant permettra de s'affranchir un peu plus de l'énergie et d'augmenter le confort thermique des occupants pour un investissement à peine plus important.

La rénovation énergétique de l'enveloppe selon un niveau de performance proche des exigences du passif nécessite un investissement plus important mais reste rentable dans ce cas.

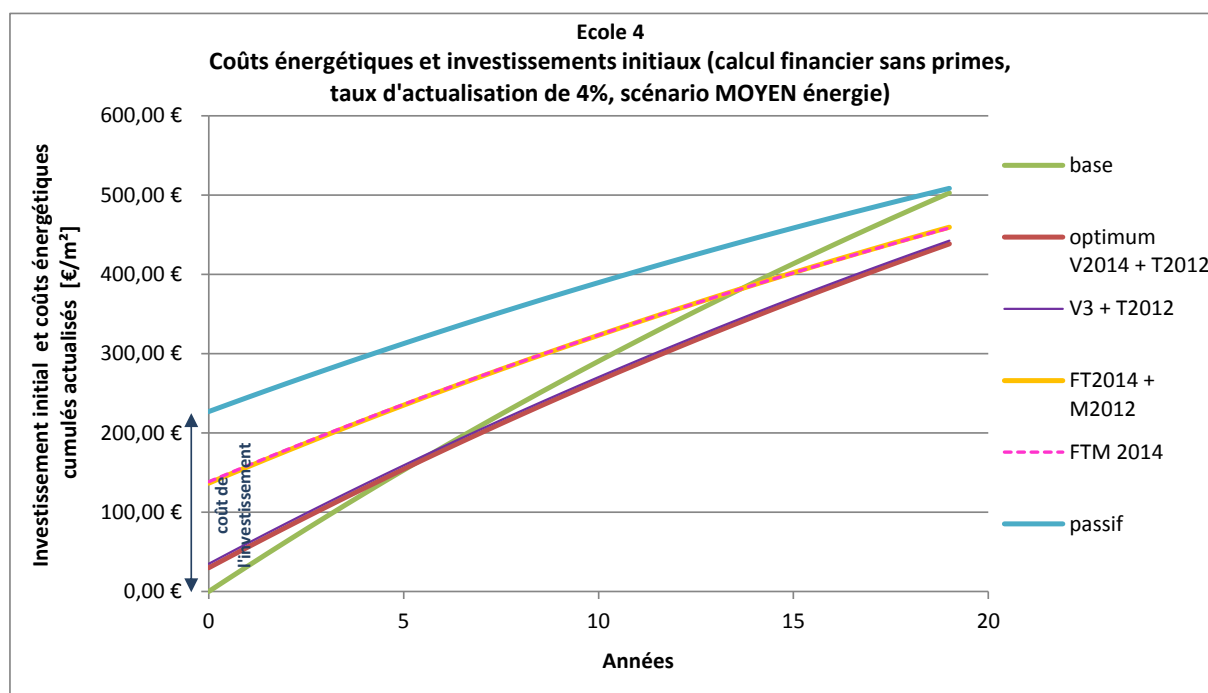


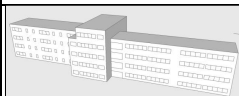



Figure 46 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - école 4



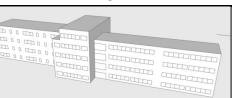

5.2. Conclusions en fonction de la date de construction

Suite à l'analyse des résultats des bâtiments scolaires un par un, nous avons repris dans un tableau général les optima économiques pour chaque école et certaines grandes conclusions qui se dégagent.

Le tableau ci-dessous reprend les optima économiques tandis que le deuxième tableau ci-dessous reprend la variante FTMS passif si celle-ci présente un CGA plus faible que celui de la base.

Ecoles						
Année de construction		<1945, S<5000 M2	1950, S<5000 M2	> 1970, 5000M2<S>10000M2	1968, S=10000M2	
Type de bâtiment existant		1 	2 	3 	4 	
Type de paroi	Composition de la paroi existante	Anciens et nouveaux bâtiments (début 20è et 1994)	non rénovée	non rénovée	non rénovée	
Fenêtres	Simple vitrage	V 2014	V 2012	V 2012	V 2014	
	Double vitrage non étanche	V 2014				
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée	T 2012				
	Toiture inclinée étanche isolée - 06cm LM	T 2012				
	Plancher du grenier non isolé		T 2012			
	Plancher du grenier isolé - 08cm LM	T 2012				
	Toiture plate massive non isolée			T 2012	T 2012	
Mur	Toiture plate massive isolée	T 2012				
	Mur plein non isolé					
	Mur plein non isolé contre terre					
	Mur creux non isolé					
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite					
Plancher	Mur creux isolé - 4cm LM					
	Colonne béton armé					
	Dalle sur sol non isolée					
	Dalle sur cave non isolée					
	Dalle sur eanc non isolée					
Dalle sur sol isolée - 4cm LM						
CONCLUSIONS GENERALES (EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION)		Remplacer le vitrage et isoler la toiture				

Légende:		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques du "passif"
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques '3'
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2014
		rentable et optimum de rénover la paroi jusqu'aux caractéristiques 2012
		rentable (mais pas optimum) de rénover la paroi
		pas rentable de rénover la paroi
		conclusion difficile à donner car d'autres parois déjà isolées interviennent dans le CGA

Ecoles						
Année de construction		<1945, S<5000 M2	1950, S<5000 M2	> 1970, 5000M2<S>10000M2	1968, S=10000M2	
Type de bâtiment existant		1	2	3	4	
						
		Ecole maternelle et primaire	Ecole maternelle et primaire	Ecole secondaire	Bâtiment universitaire	
Type de paroi	Composition de la paroi existante	Anciens et nouveaux bâtiments (début 20è et 1994)	non rénover	non rénover	non rénover	
Fenêtres	Simple vitrage	V 2014	F passif	V 2012	F passif	
	Double vitrage non étanche	V 2014				
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée	T 2012				
	Toiture inclinée étanche isolée - 06cm LM	T 2012				
	Plancher du grenier non isolé		T passif			
	Plancher du grenier isolé - 08cm LM	T 2012				
	Toiture plate massive non isolée			T 2012	T passif	
Mur	Toiture plate massive isolée	T 2012				
	Mur plein non isolé				M passif	
	Mur plein non isolé contre terre				M passif	
	Mur creux non isolé		M passif			
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite					
Plancher	Mur creux isolé - 4cm LM		M passif			
	Colonne béton armé					
	Dalle sur sol non isolée				S passif	
	Dalle sur cave non isolée		S passif			
	Dalle sur eanc non isolée					
CONCLUSIONS GENERALES (EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION)		Remplacer le vitrage et isoler la toiture	Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif	Remplacer le vitrage et isoler la toiture	Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif	

Bien que les 4 bâtiments scolaires étudiés présentent des superficies très différentes (de moins de 5000 m² à plus de 10000m²) et des années de construction variables (avant 1945 pour le premier, et après 1970 pour le plus récent), la conclusion est identique pour chaque école.

La rénovation la plus rentable selon les hypothèses de l'étude consiste à isoler les toitures pour atteindre un $U=0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$ et à remplacer le vitrage par un vitrage plus récent ayant une valeur U de $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ou de $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

L'isolation des planchers et des murs engendre généralement des coûts d'investissement plus importants qui, selon l'état de la paroi existante, sont rentabilisés ou non par les économies d'énergie cumulées réalisées sur 20 ans (voir conclusion en fonction du type de paroi ci-dessous)

Relevons également que la première réglementation thermique, K70, est apparue au début des années 90. Les bâtiments scolaires de cette époque sont peu nombreux en Wallonie. Nous n'avons donc pas étudié ce type de bâtiment.

5.3. Conclusions en fonction du type de paroi existante

5.3.1. FENETRES

Les fenêtres simple vitrage et double vitrage

A l'exception des fenêtres récentes dont le remplacement ne serait pas rentabilisé en 20 ans, il est conseillé de placer un nouveau vitrage performant ayant une valeur $U=1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ou $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ tout en conservant le profilé existant. Le placement de vitrage plus performant, $U= 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, permet de s'affranchir un peu plus de l'énergie tout en conservant un CGA très proche de l'optimum.

Même s'il existe aujourd'hui des châssis plus performants, le remplacement du profilé n'est pas recommandé d'un point de vue économique. En effet, l'investissement ne sera jamais rentabilisé par

les économies d'énergie cumulées réalisées sur 20 ans sauf si cette intervention est réalisée en même temps que l'isolation d'autres parois.

5.3.2. TOITURE

La toiture inclinée non isolée

Il est toujours rentable d'isoler les toitures inclinées qui ne le sont pas encore afin d'atteindre une valeur de paroi $U=0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le retour sur investissement de cette intervention est souvent rapide. Le coût de l'isolation d'une toiture inclinée se situe plus dans le renforcement de la structure pour augmenter son épaisseur que dans l'isolant en lui-même. C'est pourquoi, si l'épaisseur de la structure existante est importante, il est conseillé de combler totalement cette épaisseur avec l'isolant pour s'affranchir au maximum de l'énergie tout en augmentant le confort thermique à l'intérieur.

Attention, il faut placer une sous toiture coté extérieur et un pare vapeur coté intérieur afin de protéger le complexe de toiture des dégradations liées à l'eau et à l'humidité.

Le plancher du grenier non isolé

Si le plancher du grenier délimite le volume protégé de l'immeuble, son isolation est très vite rentabilisée par la diminution importante de la consommation énergétique. Isoler cette paroi est généralement assez simple et peu coûteux (poser l'isolant sur la finition supérieure du plancher, ou placer/injecter de l'isolant dans la structure,...), il est donc intéressant de prévoir 20 voire 30 cm d'isolant pour atteindre un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ et s'affranchir au maximum de l'énergie tout en augmentant le confort thermique à l'intérieur.

Comme pour la toiture, il faut installer un pare vapeur coté chaud de l'isolant afin de protéger le complexe de plancher des dégradations liées à l'eau et à l'humidité.

La toiture plate non isolée

Il en va de même pour les toitures plates non isolées. Que ce soit par l'intérieur ou par l'extérieur, et malgré les travaux connexes (nouvelle membrane d'étanchéité, pare vapeur, ...) l'isolation sera assez vite rentabilisée par la diminution importante de la consommation énergétique.

La toiture inclinée isolée

Si la toiture présente moins de 14 cm d'isolant de type laine minérale, renforcer l'isolation existante jusqu'à obtenir une paroi ayant un $U=0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ sera toujours rentabilisé. Comme détaillé ci-dessus, si l'épaisseur de la structure existante est importante, il est conseillé de combler totalement cette épaisseur avec l'isolant pour s'affranchir au maximum de l'énergie tout en augmentant le confort thermique à l'intérieur.

Le nouvel isolant doit être compatible avec celui qui est déjà présent. S'il n'y en a pas, il faut placer une sous toiture coté extérieur et un pare vapeur coté intérieur afin de protéger l'isolant des dégradations liées à l'eau et à l'humidité. Si la couche d'isolation existante est en mauvais état il est conseillé de la remplacer.

Le plancher du grenier isolé

Si le plancher du grenier présente une isolation inférieure à 14cm de type laine minérale, renforcer l'isolation jusqu'à obtenir une paroi ayant un $U = 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$ sera toujours rentabilisé. Le nouvel isolant doit être compatible avec celui qui est déjà présent. Comme expliqué ci-dessus, l'isolation de cette paroi est généralement assez simple. Il est donc intéressant de prévoir 20 voire 30 cm d'isolant pour atteindre un $U = 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ et s'affranchir au maximum de l'énergie tout en augmentant le confort thermique à l'intérieur.

Il faut placer un pare vapeur coté intérieur afin de protéger l'isolant des dégradations liées à l'eau et à l'humidité. Si la couche existante est en mauvais état il est conseillé de la remplacer.

5.3.3. MURS

Le mur plein ou creux non isolé

L'isolation des murs non isolés nécessite un investissement plus important. Cette intervention n'est donc pas l'optimum économique, mais reste rentable et donc intéressante à envisager.

Le mur creux isolé

L'augmentation de l'isolation des murs déjà isolés engendre généralement des coûts d'investissement importants qui ne sont pas rentabilisés par les économies d'énergie cumulées réalisées sur 20 ans.

5.3.4. PLANCHER

La dalle sur sol non isolée

L'isolation de ce type de plancher n'est rentable que si la paroi représente plus de 30% de la surface de déperdition totale. En effet, l'isolation par le haut entraîne des travaux connexes importants qui augmentent l'investissement.

La dalle sur cave ou vide ventilé non isolée

Si la présence de caves ou de vides-ventilés sous tout le bâtiment permet d'isoler la dalle de sol par le bas, il est intéressant de l'envisager et de placer une épaisseur la plus importante possible pour pouvoir atteindre un $U = 0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$. En effet, ce travail n'entraîne pas de coût supplémentaire à celui de l'isolant et permet de s'affranchir au maximum de l'énergie tout en augmentant le confort thermique à l'intérieur.

La dalle sur sol, sur vide ventilé ou sur cave isolée

Les planchers qui présentent déjà de l'isolant ne doivent pas subir de rénovation énergétique car celle-ci ne sera pas rentable sur 20 ans. En effet, le coût de l'isolant complémentaire placé ne sera pas compensé par la diminution de la consommation énergétique.

5.4. Quelles orientations prendre pour réduire de 50 à 80% la consommation d'énergie du parc de bâtiments scolaires en Wallonie?

La rénovation énergétique de l'ensemble des parois des bâtiments scolaires construits avant 1984 permettrait d'amener ces bâtiments à un niveau de performance proche du passif, avec pour conséquence une diminution importante de la consommation énergétique. Cependant, l'investissement initial nécessaire est conséquent. Aussi, seule la rénovation d'un bâtiment ne possédant aucune paroi isolée permettrait de réaliser des économies d'énergie suffisantes pour que cet investissement soit rentabilisé en 20 ans. Même lorsque l'intervention de rénovation est rentable, cette stratégie de rénovation ne correspond pas à l'optimum économique, mais c'est celle qui permet de réduire le plus fortement la consommation caractéristique annuelle d'énergie primaire (Espec), soit environ 65%, alors que la rénovation énergétique correspondant à l'optimum économique entraîne une diminution d'environ 21% du Espec.

Par conséquent, vu la proportion d'écoles construites avant 1984 sur le territoire wallon (plus de 74%), il semble logique de soutenir en priorité l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments ne possédant aucune paroi isolée afin de les rapprocher du niveau de performance typique des bâtiments «passifs», au besoin en les soutenant avec des primes ciblées.

La seconde orientation à prendre par l'administration wallonne serait de s'attaquer à la rénovation énergétique des toitures et vitrages de toutes les écoles (mêmes les plus récentes donc), de manière à relever leur niveau de performance à un niveau $U_{\text{Toit}} = 0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $U_{\text{vitrage}} 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Un subside spécifique calculé sur base du surcout d'investissement spécifique pourrait être accordé pour l'isolation de ces toitures. Cette seconde rénovation est à favoriser pour les bâtiments ayant fait l'objet d'une extension plus récente avec parois isolées ou comprenant des parois plus isolantes (composées par exemple de terre cuite).

Malgré l'impact sur la consommation globale d'une rénovation énergétique (même partielle) de l'enveloppe, des actions ciblées visant à améliorer la performance des systèmes (chaud, froid, éclairage...) sont indispensables pour atteindre des objectifs aussi ambitieux qu'une réduction de 50 à 80% de la consommation d'énergie du parc de bâtiments scolaires.

6. Conclusions générales

Ce complément à l'étude COZEB originale a permis de mettre en évidence, parmi une série de variantes et combinaisons de variantes, les rénovations énergétiques de l'enveloppe qui présentent un optimum économique dans les maisons unifamiliales, immeubles d'appartements, immeubles de bureaux et établissements scolaires existants. Cet optimum économique varie en fonction de différents éléments : la typologie du bâtiment, la date de construction, l'état et la date de la rénovation antérieure ...

Les conclusions tirées des résultats générés au départ du logiciel PEB ont une portée globale. S'ils sont statistiquement corrects, il faut garder à l'esprit que chaque bâtiment est unique, dès lors, les mesures d'amélioration des performances correspondant à un optimum économique pour une typologie de bâtiment doivent être adaptées au cas par cas. En effet, un bâtiment se compose fréquemment de plusieurs sous-parties présentant des performances énergétiques différentes: un bâtiment principal plus ancien et une extension plus récente ou un bâtiment ancien avec des fenêtres récentes et une nouvelle toiture isolée par exemple. Certaines parois déjà isolées risquent d'influencer la rentabilité des travaux envisagés.

En outre, conformément à l'approche suivie dans la PEB, les mesures envisagées visent à améliorer intrinsèquement la performance d'un bâtiment, en réduisant ses besoins énergétiques, sans considération particulière pour ses occupants (actuels ou futurs).

Dans la réalité d'un bâtiment occupé, en particulier les immeubles de logement, lorsque la facture énergétique diminue sensiblement, la tentation est grande d'augmenter le niveau du thermostat, de chauffer plus de pièces, de multiplier les éclairages ou les appareils domestiques branchés sur le secteur. Cette consommation d'énergie « supplémentaire » dépend de nombreux facteurs tels que: le comportement des occupants, le type de système de chauffage, le type de bâtiment, le coût de l'énergie, le vecteur énergétique utilisé, la qualité thermique de l'enveloppe, la température intérieure souhaitée...

La consommation réelle de ces bâtiments risque alors de dépasser la consommation théorique estimée suite à cet effet REBOND, bien connu des économistes. Si estimer l'amplitude de cet effet rebond sort clairement du cadre de la présente étude, on peut cependant affirmer que, sans mesures d'accompagnement visant à le limiter, les économies d'énergie et la réduction des émissions de CO₂ réalisées sur le terrain suite à la mise en œuvre de stratégies de rénovation globale de type « FTMS passif » risquent d'être (nettement) moins importantes que les gains énergétiques cumulés calculés dans le cadre de la présente étude.

Au-delà de la mise en évidence d'un optimum économique, nous avons systématiquement représenté la variante « FTMS passif » dans les graphiques et tableaux de résultats. Cette variante de rénovation constitue un repère, une borne supérieure, car elle permet généralement de réaliser les économies d'énergie primaire les plus importantes et de s'affranchir au maximum des fluctuations de prix des énergies fossiles. Cette rénovation énergétique « FTMS passif » ne correspond pas forcément à un optimum économique en termes de CGA, mais lorsque le surcoût de l'investissement initial peut être amorti sur 20 ou 30 ans, cette approche de rénovation globale et durable de l'enveloppe peut toujours être envisagée.

A noter qu'une stratégie de rénovation « FTMS passif » à toutes les typologies de bâtiment étudiées en Wallonie, entraînerait une diminution de la consommation spécifique en énergie primaire du parc de bâtiments existants d'environ 60%, par rapport à la consommation caractéristique de ces bâtiments dans leur état actuel.

Fondamentalement, en vertu du Trias Energetica, sur le long terme, la priorité n°1 reste l'amélioration de la performance énergétique de l'enveloppe, seule à même de diminuer les besoins nets en chaleur de ces bâtiments. Stratégiquement, pour réduire la consommation caractéristique d'énergie primaire de l'ensemble du parc de bâtiments wallons actuellement soumis à la PEB (logements, bureaux, établissements scolaires) à un coût supportable et dans un délai raisonnable (de l'ordre d'une vingtaine d'années), une amélioration de la performance des systèmes (chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation..) s'impose, le plus souvent en procédant au remplacement pur et simple de ces équipements. En cas de rénovation combinée (enveloppe/systèmes) la puissance des nouveaux producteurs de chaleur devra être revue à la baisse, sous peine de perdre une partie du bénéfice potentiel de l'amélioration de l'enveloppe ou de grever l'investissement initial.

6.1. Conclusions pour les bâtiments résidentiels

L'étude des bâtiments résidentiels débouche sur les conclusions générales suivantes :

Pour les bâtiments construits avant 1984, soit avant la première réglementation thermique K70, et jamais rénovés, l'amélioration de la performance énergétique jusqu'à un niveau correspondant à des niveaux de performances proches du passif de l'ensemble des parois engendre une diminution importante de la consommation caractéristique d'énergie primaire (jusqu'à 70% pour les immeubles à appartement et 80% pour les habitations).

Une telle stratégie de rénovation s'avère payante dans la mesure où les gains énergétiques cumulés compensent les surcoûts d'investissement initiaux sur la période d'évaluation.

Une stratégie de rénovation globale de type « FTMS passif » appliquée aux maisons construites après 1985 et aux immeubles d'appartements construits dans les années 1990 (il y a moins de 30 ans !) permettrait encore de réduire leur consommation spécifique en énergie primaire de 50%, bien que ces bâtiments atteignent déjà un niveau K70 ou K55. Cependant l'investissement initial à consentir pour une telle rénovation énergétique n'est jamais compensé par les gains énergétiques cumulés actualisés sur 30 ans (selon une hypothèse d'augmentation des prix de l'énergie de 1,75% par an).

Pour ces bâtiments construits dans le respect des premières réglementations thermiques, la rénovation énergétique de l'ensemble des parois de déperditions selon les niveaux de performances proches du passif n'est dès lors pas « rentable » au sens de l'étude. Pour ces bâtiments, l'isolation de la toiture et/ou le remplacement du vitrage correspond à l'optimum économique.

Notons que la rénovation énergétique « FTMS passif » pour les habitations construites après 1985 n'est pas rentabilisé sur la période de calcul de 30 ans.

Les résultats de l'étude mettent en évidence, que même si les bâtiments construits sous la première réglementation thermique ne sont pas efficaces au regard des exigences actuelles; compte tenu de l'investissement réalisé pour isoler les parois de l'enveloppe au moment de leur construction et des hypothèses de l'étude, un investissement qui viserait uniquement à améliorer le niveau de

performance de n'importe laquelle de ces parois de déperdition ne serait jamais compensé par les gains énergétiques cumulés actualisés au cours des 30 années suivant l'investissement.

Les premières réglementations thermiques imposées dans les années 1980-1990 créent un effet de lock-in⁷.

6.2. Conclusions pour les bâtiments non résidentiels (bureaux et écoles)

Pour les bureaux et les écoles, la variante « FTMS passif » permettrait de réduire leur consommation en énergie primaire jusqu'à 50%, sans possibilité de compenser l'investissement initial à consentir sur ces bâtiments au cours de la période d'évaluation de 20 ans.

A noter que dans les immeubles de bureaux, une stratégie de rénovation poussée de type « FTMS passif » devrait s'accompagner d'une modification des systèmes constructifs (protections solaires,...) et des équipements de production de froid. À défaut, la diminution des besoins en chaleur suite à l'isolation renforcée des parois risquerait de se traduire par une augmentation (parfois exponentielle) des besoins en froid.

6.3. Points d'attention, opportunités et priorité d'intervention d'une rénovation énergétique

6.3.1. Points d'attention

Lors de toute rénovation d'un bâtiment, il est important de conserver une vision globale afin d'éviter les conséquences négatives de certains travaux. Pour ce faire, voici une liste non exhaustive de points auxquels il faut porter une attention particulière.

La ventilation et l'étanchéité à l'air

L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment le rend plus étanche à l'air et peut créer des ponts thermiques. Ces deux phénomènes peuvent entraîner l'apparition de condensation, responsable de nombreuses dégradations du bâtiment.

La qualité de l'air intérieur est primordiale non seulement pour la santé des occupants, mais également pour la salubrité du bâtiment et, suivant les équipements de chauffage choisis, pour des raisons de sécurité.

Pour garantir une ventilation efficace d'un logement, il faut veiller à avoir une circulation continue d'air dans tout le logement de manière à renouveler l'air en permanence. L'ouverture intermittente des fenêtres n'est pas suffisante. Outre la ventilation des locaux du volume protégé, il ne faut pas oublier de ventiler les locaux spéciaux tels que garage, chaufferie, combles... Des normes existent en cette matière.

Le remplacement des fenêtres

⁷ Le Lock-in désigne une situation « d'enfermement » provoquée par une trajectoire technologique ou réglementaire particulière.

Il est important d'assurer un raccord étanche entre le mur et le nouveau châssis pour augmenter l'efficacité de la rénovation.

Le nouveau châssis ayant une meilleure performance thermique et améliorant l'étanchéité à l'air, la condensation risque d'apparaître ailleurs dans les locaux. Comme indiqué ci-dessus, il est donc important d'assurer une bonne ventilation dans le bâtiment en profitant notamment de la rénovation pour placer des grilles dans les nouveaux châssis ou vitrages.

Il est important de régler correctement toutes les quincailleries pour assurer l'étanchéité à l'air.

Le remplacement du vitrage

Le profilé existant doit être en bon état et doit pouvoir supporter le poids du nouveau vitrage. Le nouveau vitrage ayant une meilleure performance thermique et améliorant l'étanchéité à l'air, la condensation risque d'apparaître ailleurs dans les locaux. Il est donc important d'assurer une bonne ventilation dans le bâtiment en profitant notamment de la rénovation pour placer des grilles dans les nouveaux vitrages.

L'isolation du plancher des combles

Si elle ne l'est pas déjà, la structure existante doit être traitée préalablement à la pose de l'isolation pour éviter le développement de champignons et d'insectes.

Il est important de placer un pare-vapeur continu du côté intérieur du local afin de protéger le complexe de plancher des dégradations liées à l'eau et à l'humidité. L'éventuel revêtement de finition est placé sans abimer le pare-vapeur.

L'isolation de la toiture par l'intérieur

Si elle ne l'est pas déjà, la structure existante doit être traitée préalablement à la pose de l'isolation pour éviter le développement de champignons et d'insectes.

La sous-toiture doit être en bon état et perméable à la vapeur, l'isolation est placée contre la sous-toiture, le pare-vapeur est installé en continu du côté intérieur du local afin de protéger le complexe de plancher des dégradations liées à l'eau et à l'humidité. L'éventuel revêtement de finition est placé sans abimer le pare-vapeur.

L'isolation de la toiture en pente par l'extérieur

Si elle ne l'est pas déjà, la structure existante doit être traitée préalablement à la pose de l'isolation pour éviter le développement de champignons et d'insectes.

Avant de placer l'isolant, un pare-vapeur est posé en continu. Les panneaux d'isolant sont posés jointifs et, si possible, emboîtés. Sur l'isolant est posée une sous-toiture perméable à la vapeur mais imperméable à l'eau et ensuite la nouvelle couverture.

L'isolation de la toiture plate par l'extérieur

Si l'étanchéité existante est en mauvais état, elle doit être réparée ou remplacée par un pare-vapeur adéquat. Les nouvelles couches sont maintenues par lestage, fixation mécanique ou collage.

Il faut préalablement vérifier la capacité portante de la toiture et l'adhérence de l'étanchéité conservée.

Si la toiture existante est une toiture froide (isolant placé en dessous du support de l'étanchéité avec une lame d'air ventilée interposée), il est important de placer une épaisseur d'isolant suffisante pour éviter les condensations internes.

Enfin, il ne faut pas oublier de contrôler la hauteur des rives pour qu'elles soient suffisantes après pose de l'isolant, et de porter une attention aux détails de réalisation en isolation et étanchéité des rives, cheminées, lanterneaux, évacuations des eaux,...

L'isolation des murs par l'extérieur

L'isolation des murs par l'extérieur nécessite la pose d'un nouveau revêtement imperméable à la pluie, mais perméable à la vapeur. L'adaptation des appuis de fenêtre, des tuyaux de descentes et corniches est à étudier.

Dans le cas d'une modification extérieure d'un bâtiment, une demande de permis d'urbanisme est généralement nécessaire et doit être introduite et accordée préalablement aux travaux.

L'isolation des murs par l'intérieur

Cette rénovation entraîne l'apparition de ponts thermiques parfois impossibles à résoudre. La ventilation du bâtiment doit donc être très efficace pour éviter toute dégradation liée à l'humidité. La masse thermique étant modifiée, le risque de surchauffe augmente et nécessite dans certains cas la pose de protections solaires, la mise en place d'une ventilation efficace (ventilation intensive),...

N'étant plus chauffée, la partie extérieure du mur est soumise à des contraintes thermiques importantes et risque donc de fissurer ou de se dégrader. L'avis d'un professionnel s'impose avant toute intervention de cette nature.

L'isolation des murs creux par la coulisse

L'état de la coulisse doit être étudié par un professionnel afin de garantir l'efficacité de son isolation. Celle-ci doit avoir une largeur de 4 cm minimum, et ne pas être trop obstruée (par des résidus de mortier par exemple).

La maçonnerie extérieure doit être perméable à la vapeur afin d'éviter toute dégradation de l'isolant insufflé et du parement. Une brique peinte ou émaillée ne permet pas d'isoler la coulisse par exemple.

Lorsque des linteaux ou poutres sont réalisés sur la largeur complète du mur creux, ils créent des ponts thermiques importants lors de l'isolation de la coulisse. La ventilation du bâtiment doit donc être très efficace pour éviter toute dégradation liée à l'humidité.

L'ajout d'isolation dans une paroi

Avant d'ajouter de l'isolant dans une paroi déjà isolée, il faut s'assurer que l'isolation présente soit en bon état et compatible avec le nouveau matériau envisagé.

6.3.2. Opportunités et priorités

Il n'est pas toujours faisable ni rentable de ré-isoler une paroi lorsqu'il faut enlever ou casser une finition intérieure ou extérieure et ensuite, à la fin des travaux, placer une nouvelle finition. Cela entraîne une augmentation du coût d'investissement pour la rénovation de la paroi et le CGA peut augmenter fortement à cause de ces travaux connexes. Or lorsque on rénove un bâtiment ancien, on a tendance à placer du nouveau carrelage, à remplacer les tuiles, à déplafonner les murs... Si une paroi est modifiée pour d'autres raisons que des raisons énergétiques, autant en profiter pour ré-isoler la paroi car, dans ce cas, le surcoût induit par l'isolation est très faible et l'investissement plus vite rentabilisé.

Ci-dessous une liste (non exhaustive) d'opportunités de combiner certaines rénovations de paroi avec une rénovation énergétique :

- Remplacement des tuiles ou ardoises abimées → nouvelle isolation de la toiture
- Etanchéité toiture plate à refaire → nouvelle isolation de la toiture plate sous la nouvelle étanchéité
- Remplacement carrelage → nouvelle isolation du plancher
- Bardage ou crépi de façades abimées → (nouvelle) isolation extérieure des murs de façades
- Nettoyage, déplafonnage de murs → nouvelle isolation intérieure des murs avant de placer des plaques de plâtre et un pare-vapeur côté intérieur
- ...

En matière de rénovation des parois de déperdition, il n'y a pas d'ordre de priorité strict, applicable en toutes circonstances. En théorie, sur le plan de l'utilisation rationnelle de l'énergie, l'isolation de la toiture, suivie des murs, du sol et finalement des fenêtres a du sens. En pratique, chaque situation est à examiner au cas par cas en fonction du bâtiment à rénover, des moyens budgétaires, des contraintes urbanistiques et architecturales... La prise en compte des points d'attention mentionnés ci-avant peut aussi influencer significativement l'ordre de priorité des travaux envisagés.

7. ANNEXES

Annexe A : tableau des conclusions pour les maisons unifamiliales

		Maisons unifamiliales existantes																						
année de construction		<1945										entre 1946 et 1970					entre 1971 et 1984			entre 1985 et 1995			entre 1996 et 2008	
Type d'habitation existante		1	1BIS	2	2BIS	3	3BIS	4	4BIS	5	5BIS	6	6BIS	7	7BIS	8	9	9BIS	10	11	12	13	14	15
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	fortement rénovée	non rénovée	fortement rénovée	non rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage	F2014		F2014		F2014		Fpassif		Fpassif		Fpassif		Fpassif		F2014								
	Double vitrage non étanche		F2014		F2014		F2012		Fpassif		V2012						V2012		Fpassif					
	Double vitrage étanche																			V2014	V2012			
Toiture	Toiture inclinée non étanche non isolée	T2014	T2014																					
	Toiture inclinée étanche non isolée											Tpassif												
	Toiture inclinée étanche isolée - 4cm LM																T2012							
	Toiture inclinée étanche isolée - 8cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 10cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 18cm LM																							
	Plancher du grenier non isolé			T2014		T2014		Tpassif	Tpassif	Tpassif				Tpassif		T2014							T2014	
	Plancher du grenier isolé - 4cm LM				T2014		T2012											T2012						
	Plancher du grenier isolé - 6cm LM																							
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM																							
	Plancher du grenier isolé - 15cm LM																							
Plancher du grenier isolé - 18cm LM																					T3		T2014	
Toiture plate non isolée			T2014	T2014	T2014	T2012				Tpassif	T2012					T2014								
Toiture plate isolée - 4cm verre cellulaire																			Tpassif					
Mur	Mur plein non isolé	M2014	M2014	M2014	M2014	M2014	M2012	Mpassif	Mpassif	Mpassif				Mpassif		M2014								
	Mur creux non isolé											Mpassif												
	Mur creux isolé - 3cm LM																							
	Mur creux isolé - 4cm LM																							
	Mur creux isolé - 5cm LM																							
	Mur creux isolé - 6cm LM																							
	Mur creux isolé - 6cm PUR																							
	Mur creux isolé - 5cm EPS																							
	Mur plein isolé - 3cm LM																							
Structure bois isolé - 6cm LM																								
Plancher	Dalle sur sol non isolée																							
	Dalle sur cave non isolée																							
	Dalle sur sol isolée - 3cm PUR																							
	Dalle sur vide ventilé isolée - 2cm PUR																							
	Dalle sur vide ventilé isolée - 4cm PUR																							
	Dalle sur cave isolée - 4cm PUR																							
Dalle sur cave isolée - 4cm EPS																								
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE D'HABITATION EXISTANTE ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION		Isoler toutes les parois										Isoler toutes les parois (sauf si déjà rénovées)					Isoler toutes les parois (sauf si déjà rénovées)			Isoler la toiture (surtout si c'est facile) et remplacer le vitrage			Ne rien faire ou isoler la toiture (surtout si c'est facile)	

Tableau A.1 : **optimum** pour chaque maison de référence








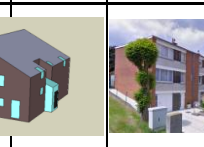



		Maisons unifamiliales existantes																						
année de construction		<1945										entre 1946 et 1970					entre 1971 et 1984			entre 1985 et 1995			entre 1996 et 2008	
		1	1BIS	2	2BIS	3	3BIS	4	4BIS	5	5BIS	6	6BIS	7	7BIS	8	9	9BIS	10	11	12	13	14	15
Type d'habitation existante																								
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	légèrement rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	fortement rénovée	non rénovée	fortement rénovée	non rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage	Fpassif		Fpassif		Fpassif		Fpassif		Fpassif		Fpassif		Fpassif		Fpassif								
	Double vitrage non étanche		Fpassif		Fpassif		F2014		Fpassif		Fpassif						Fpassif		Fpassif					
	Double vitrage étanche																			V2014	V2012			
Toiture	Toiture inclinée non étanche non isolée	Tpassif	Tpassif									Tpassif												
	Toiture inclinée étanche non isolée																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 4cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 8cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 10cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM																							
	Toiture inclinée étanche isolée - 18cm LM																							
	Plancher du grenier non isolé			Tpassif		Tpassif		Tpassif	Tpassif	Tpassif				Tpassif		Tpassif								
	Plancher du grenier isolé - 4cm LM				Tpassif		T2014										Tpassif							
	Plancher du grenier isolé - 6cm LM																							
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM																							
	Mur	Plancher du grenier isolé - 15cm LM																						
Plancher du grenier isolé - 18cm LM																								
Toiture plate non isolée				Tpassif	Tpassif	Tpassif	T2014				Tpassif	Tpassif				Tpassif								
Toiture plate isolée - 4cm verre cellulaire																			Tpassif					
Mur plein non isolé		Mpassif	Mpassif	Mpassif	Mpassif	Mpassif	M2014	Mpassif	Mpassif	Mpassif	Mpassif			Mpassif		Mpassif								
Mur creux non isolé												Mpassif				Mpassif								
Mur creux isolé - 3cm LM																	Mpassif		Mpassif					
Mur creux isolé - 4cm LM																								
Mur creux isolé - 5cm LM																								
Plancher	Mur creux isolé - 6cm LM																							
	Mur creux isolé - 6cm PUR																							
	Mur creux isolé - 5cm EPS																							
	Mur plein isolé - 3cm LM																							
	Structure bois isolé - 6cm LM																							
	Dalle sur sol non isolée	Spassif	Spassif	Spassif	Spassif	Spassif					Spassif	Spassif				Spassif			Spassif					
	Dalle sur cave non isolée																							
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE D'HABITATION EXISTANTE ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION		Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif										Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif					Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif			Isoler la toiture (surtout si c'est facile) et éventuellement remplacer le vitrage			Ne rien faire ou isoler la toiture (surtout si c'est facile)	

Tableau A.2 : tableau des résultats correspondant à la variante FTMS passif si celle-ci est rentable par rapport à la BASE pour le résidentiel unifamilial

Annexe B : tableau des conclusions pour les immeubles à appartements






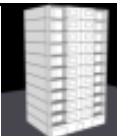

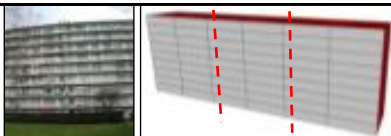


Appartements													
Année de construction			Avant 1919			Entre 1919 et 1945	Entre 1946 et 1970			Entre 1971 et 1990		Après 1990	
Type de bâtiment existant			1	2	3	4	5	6	7	8		9	10
													
			Immeuble de 10 appartements	Habitation divisée en 3 appartements	Habitation divisée en 3 appartements + services	Habitation divisée en 3 appartements + annexe plus récente	Immeuble de 16 appartements	Immeuble de 20 appartements	Maison divisée en 3 appartements avec annexe	Immeuble comprenant 3 bâtiments de 8 niveaux, 32 appartements par bâtiment		Immeuble de 5 appartements,	Immeuble de 10 appartements
Type de paroi	Composition de la paroi existante		non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée et plus récente	non rénovée	non rénovée	non rénovée	Bâtiments latéraux non rénovée		non rénovée, K70	non rénovée, K55
Fenêtres	Simple vitrage				F 2014	V 2012		F passif	V 2012				
	Double vitrage non étanche		F 2014	F 2014						F passif	V 2012		
	Double vitrage étanche											V 2012	V 2014
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée			T 2014	T 2014	T 2012							
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM											T 2012	
	Toiture inclinée étanche isolée - 15cm LM												
	Plancher du grenier non isolé								T 2012				
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM												
	Plancher du grenier isolé - 15cm LM												
	Toiture plate massive non isolée		T 2014				T passif	T passif	T 2012	T passif	T 2012		
	Toiture plate légère non isolée			T 2014	T 2014								
Mur	Toiture plate légère isolée - 12cm LM					T 2012							
	Mur plein non isolé		M 2012	M 2014	M 2012		M passif			M passif			
	Mur creux non isolé							M passif					
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite												
	Mur creux isolé - 4cm LM												
	Mur plein isolé - 4cm LM												
Plancher	Structure bois isolé - 15cm LM												
	Dalle sur sol non isolée							S passif					
	Dalle sur cave non isolée									S passif			
	Dalle sur eanc non isolée						S passif	S passif					
	Dalle sur extérieur non isolée						S passif						
	Dalle sur sol isolée - 4cm EPS												
	Dalle sur sol isolée - 4cm XPS												
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION			Isoler toute les toitures et murs, remplacer les fenêtres			Isoler les toitures, remplacer le vitrage	Isoler toutes les parois		Isoler les toitures, remplacer le vitrage	Isoler toutes les parois	Isoler les toitures, remplacer le vitrage		Augmenter l'isolation en toitures, remplacer le vitrage

Tableau B.1 : tableau des résultats correspondant à l’optimum économique pour les immeubles à appartements




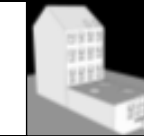

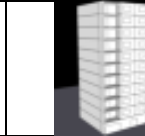




Appartements												
Année de construction		<1919			entre 1919 et 1945	entre 1946 et 1970			entre 1971 et 1990		Après 1990	
Type de bâtiment existant		1	2	3	4	5	6	7	8		9	10
												
		Immeuble de 10 appartements	Habitation divisée en 3 appartements	Habitation divisée en 3 appartements + services	Habitation divisée en 3 appartements + annexe plus récente	Immeuble de 16 appartements	Immeuble de 20 appartements	Maison divisée en 3 appartements avec annexe	Immeuble comprenant 3 bâtiments de 8 niveaux, 32 appartements par bâtiment		Immeuble de 5 appartements	Immeuble de 10 appartements
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	Bâtiments latéraux Bâtiment central		non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage			F passif	F passif							
	Double vitrage non étanche	F passif	F passif			F passif	F passif	F passif	F passif	F passif		
	Double vitrage étanche											
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée											
	Toiture inclinée étanche isolée - 12cm LM											
	Toiture inclinée étanche isolée - 15cm LM											
	Plancher du grenier non isolé											
	Plancher du grenier isolé - 12cm LM											
	Plancher du grenier isolé - 15cm LM											
	Toiture plate massive non isolée	T passif										
	Toiture plate légère non isolée											
Mur	Toiture plate légère isolée - 12cm LM											
	Mur plein non isolé	M passif	M passif	M passif	M passif	M passif		M passif	M passif	M passif		
	Mur creux non isolé											
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite											
	Mur creux isolé - 4cm LM											
	Mur plein isolé - 4cm LM											
Plancher	Structure bois isolé - 15cm LM											
	Dalle sur sol non isolée		S passif	S passif			S passif	S passif				
	Dalle sur cave non isolée	S passif	S passif	S passif	S passif				S passif	S passif		
	Dalle sur eanc non isolée	S passif										
	Dalle sur extérieur non isolée											
	Dalle sur sol isolée - 4cm EPS											
	Dalle sur sol isolée - 4cm XPS											
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION		Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif			Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif	Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif			Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif		Augmenter l'isolation en toitures, remplacer le vitrage	

Tableau B.2 : tableau des résultats correspondant à la variante FTMS passif si celle-ci est rentable par rapport à la BASE pour les immeubles à appartements

Annexe C : tableau des conclusions pour les immeubles de bureaux

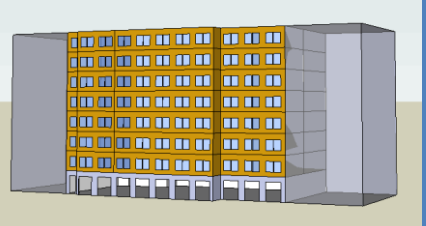

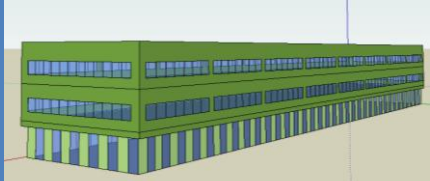
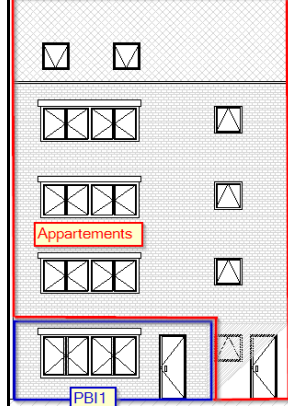
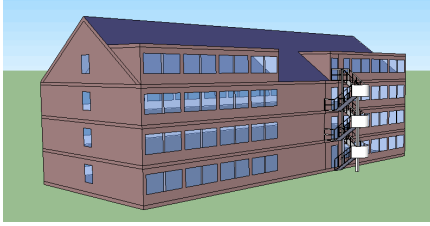
		Immeubles de bureaux existants							
année de construction		<1945		années 70		entre 1985 et 1995		entre 1996 et 2008	
Type de bureau existant		GB7<45	GB7<45 BIS	BE3-70	BE3-70 BIS	PBI1-84		BC4-96	
									
Type de paroi	Composition de la paroi existante	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	non rénovée	rénovée	non rénovée	
Fenêtres	Simple vitrage	F2014	F2014						
	Double vitrage sans coupure thermique								
	Double vitrage avec coupure thermique						F2014		
Toiture	Toiture inclinée étanche isolée - 10cm LM					n.a.		T3	
	Toiture plate non isolée	T2014	T2014			n.a.			
	Toiture plate isolée - 4 cm			T2012/2014		n.a.			
Mur	Mur plein non isolé	M2014	M2014						
	Mur creux isolé - 2cm LM								
	Mur creux isolé - 5cm LM								
	Mur creux isolé - 6cm LM								
Plancher	Dalle de sol non isolée	S2014 Ext	S2014 Ext						
	Dalle sur sol isolée - 2cm (I 0,040)								
	Dalle sur vide ventilé isolée - 4cm (λ 0,040)								
	Dalle sur cave isolée - 2cm (I 0,040)								
CONCLUSIONS GENERALES EN FONCTION DU TYPE DE BUREAUX EXISTANT ET DE LA PERIODE DE CONSTRUCTION		Rénover l'ensemble des parois au niveau PEB 2014		Isoler le cas échéant la toiture plate au niveau PEB 2014		Rénover le cas échéant les fenêtres si châssis d'origine		Surisoler le cas échéant la toiture au niveau U 0,20 W/m²K si Prix E augmente fortement	

Tableau C.1 : tableau des résultats correspondant à l'optimum économique pour les immeubles de bureaux

Annexe D : tableau des conclusions pour les écoles

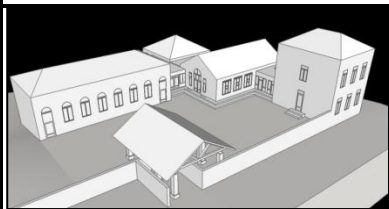

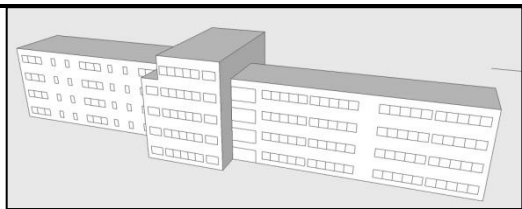

Ecoles						
Année de construction		<1945, S<5000 M2	1950, S<5000 M2	> 1970, 5000M2<S>10000M2	1968, S=10000M2	
Type de bâtiment existant		1	2	3	4	
						
		Ecole maternelle et primaire	Ecole maternelle et primaire	Ecole secondaire	Bâtiment universitaire	
Type de paroi	Composition de la paroi existante		Anciens et nouveaux bâtiments (début 20è et 1994)	non rénovée	non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage	V 2014	V 2012	V 2012		V 2014
	Double vitrage non étanche	V 2014				
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée	T 2012				
	Toiture inclinée étanche isolée - 06cm LM	T 2012				
	Plancher du grenier non isolé		T 2012			
	Plancher du grenier isolé - 08cm LM	T 2012				
	Toiture plate massive non isolée			T 2012	T 2012	
	Toiture plate massive isolée	T 2012				
Mur	Mur plein non isolé					
	Mur plein non isolé contre terre					
	Mur creux non isolé					
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite					
	Mur creux isolé - 4cm LM					
	Colonne béton armé					
Plancher	Dalle sur sol non isolée					
	Dalle sur cave non isolée					
	Dalle sur eanc non isolée					
	Dalle sur sol isolée - 4cm LM					
CONCLUSIONS GENERALES (EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION)		Remplacer le vitrage et isoler la toiture				

Tableau D.1 : tableau des résultats correspondant à l’optimum économique pour les écoles

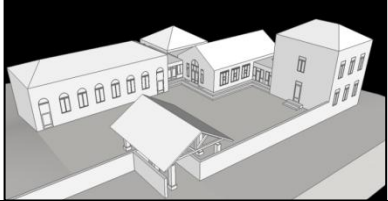

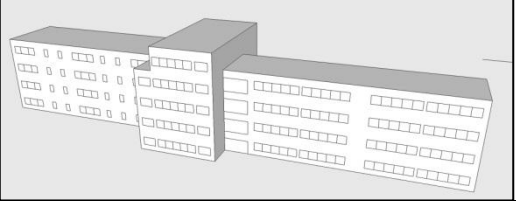

Ecoles					
Année de construction		<1945, S<5000 M2	1950, S<5000 M2	> 1970, 5000M2<S>10000M2	1968, S=10000M2
Type de bâtiment existant		1	2	3	4
					
		Ecole maternelle et primaire	Ecole maternelle et primaire	Ecole secondaire	Bâtiment universitaire
Type de paroi	Composition de la paroi existante	Anciens et nouveaux bâtiments (début 20è et 1994)	non rénovée	non rénovée	non rénovée
Fenêtres	Simple vitrage	V 2014	F passif	V 2012	F passif
	Double vitrage non étanche	V 2014			
Toiture	Toiture inclinée étanche non isolée	T 2012			
	Toiture inclinée étanche isolée - 06cm LM	T 2012			
	Plancher du grenier non isolé		T passif		
	Plancher du grenier isolé - 08cm LM	T 2012			
	Toiture plate massive non isolée			T 2012	T passif
	Toiture plate massive isolée	T 2012			
Mur	Mur plein non isolé				M passif
	Mur plein non isolé contre terre				M passif
	Mur creux non isolé		M passif		
	Mur creux non isolé - bloc terre cuite				
	Mur creux isolé - 4cm LM		M passif		
	Colonne béton armé				
Plancher	Dalle sur sol non isolée				S passif
	Dalle sur cave non isolée				
	Dalle sur eanc non isolée		S passif		
	Dalle sur sol isolée - 4cm LM				
CONCLUSIONS GENERALES (EN FONCTION DU TYPE DE BÂTIMENT EXISTANT ET DE SA PERIODE DE CONSTRUCTION)		Remplacer le vitrage et isoler la toiture	Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif	Remplacer le vitrage et isoler la toiture	Tout isoler jusqu'aux caractéristiques du passif

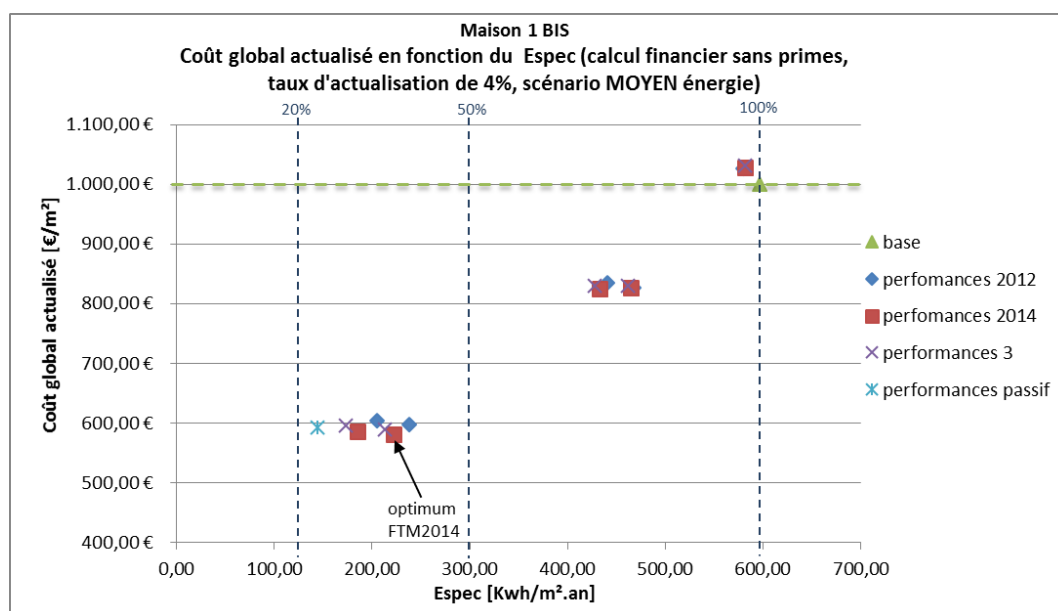
Tableau D.2 : tableau des résultats correspondant à la variante FTMS passif si celle-ci est rentable par rapport à la BASE pour les écoles

Annexe E: résultats de toutes les maisons étudiées sur base de la consommation théorique

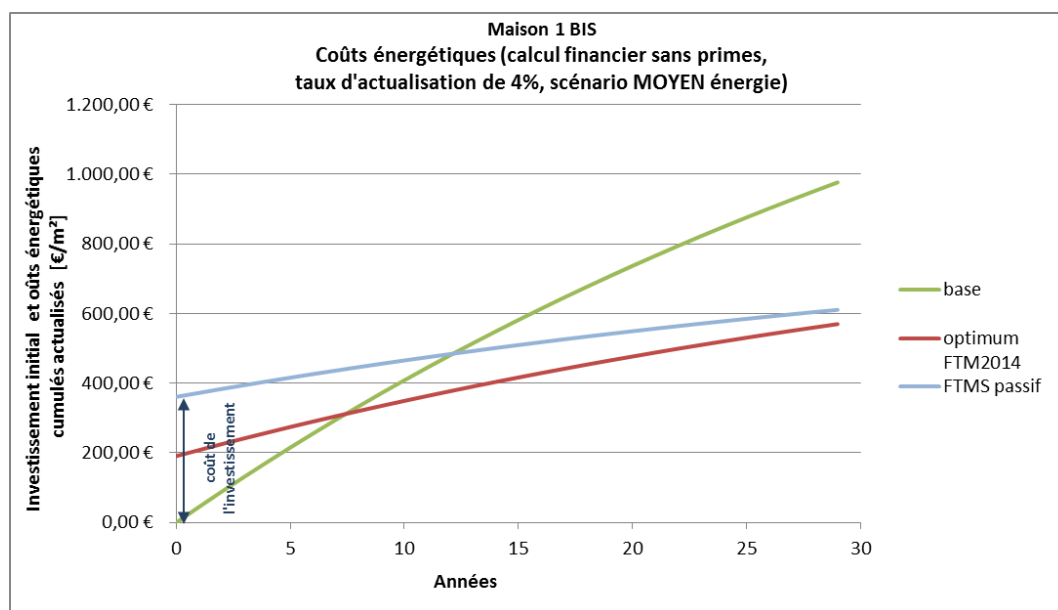
Maison 1 (dans le corps du texte)

Maison 1 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 1 BIS	Base	3,50	1,76	2,20	0,79	15,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,79	6,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

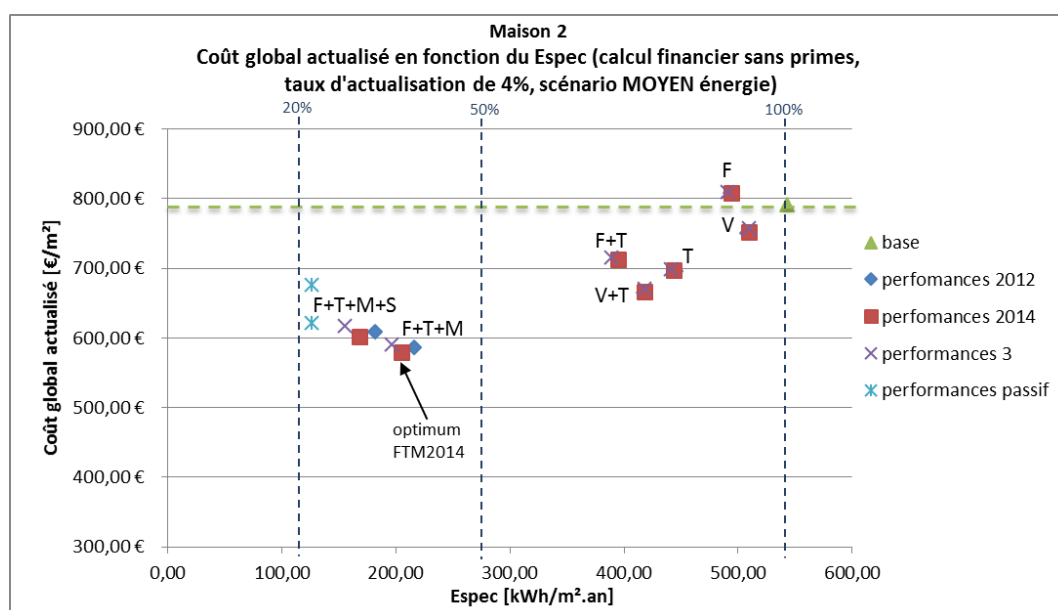


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 1 BIS	Base		83.648	533	0	596 (100%)	0 €	0 €	1.000 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	157	24.860	158	374	222 (37%)	29.930 €	191 €	579 €	421 €
	FTMS Passif (cas 23)		12.762	81	452	145 (24%)	56.618 €	361 €	617 €	384 €

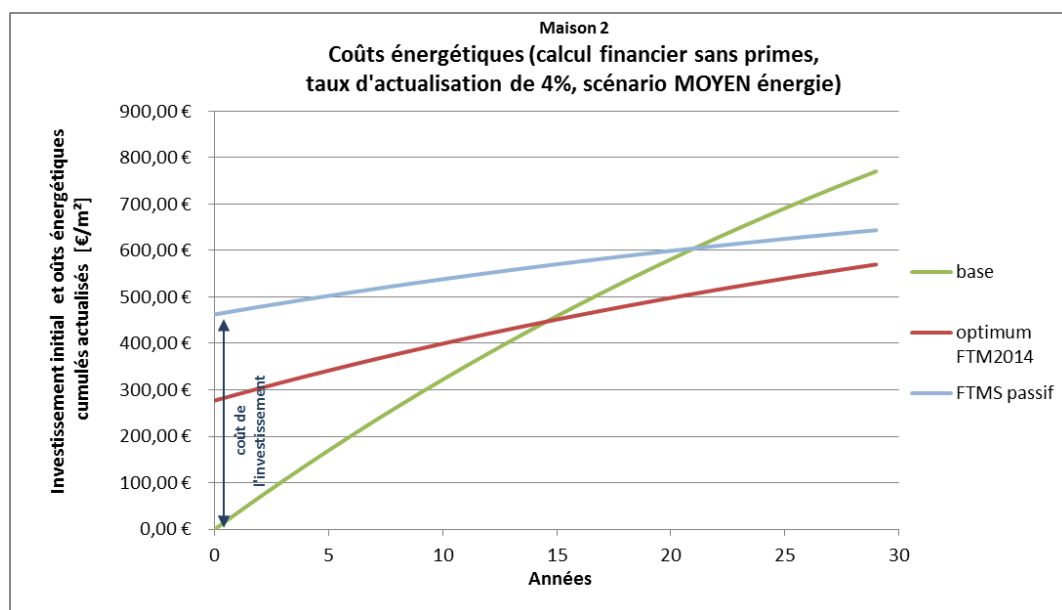


Maison 2

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 2	Base	4,47	1,77	1,88	0,83	18,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,83	6,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

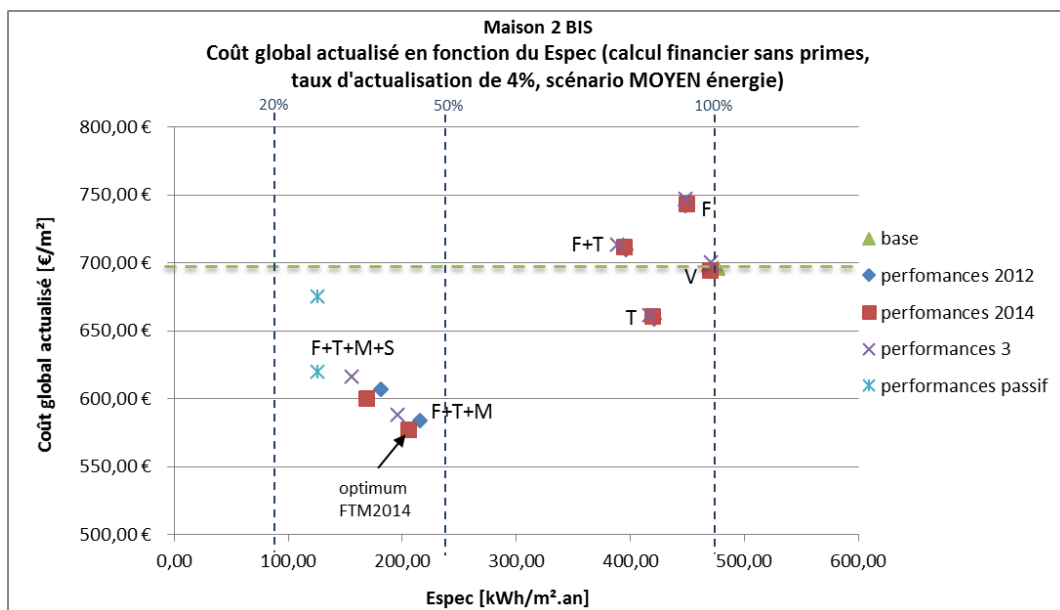


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 2	Base	104	51.875	499	0	543 (100%)	0 €	0 €	792 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)		16.660	160	339	205 (38%)	28.988 €	279 €	579 €	213 €
	FTMS Passif (cas 24)		8.428	81	418	126 (23%)	48.390 €	465 €	622 €	170 €

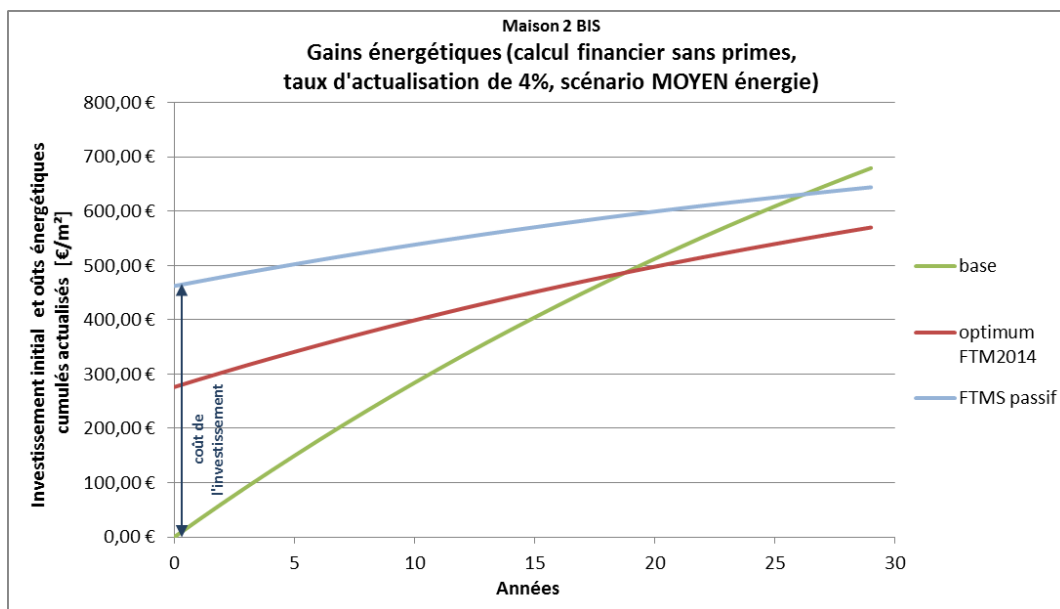


Maison 2 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 2 BIS	Base	3,50	0,84	1,88	0,83	13,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,83	6,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

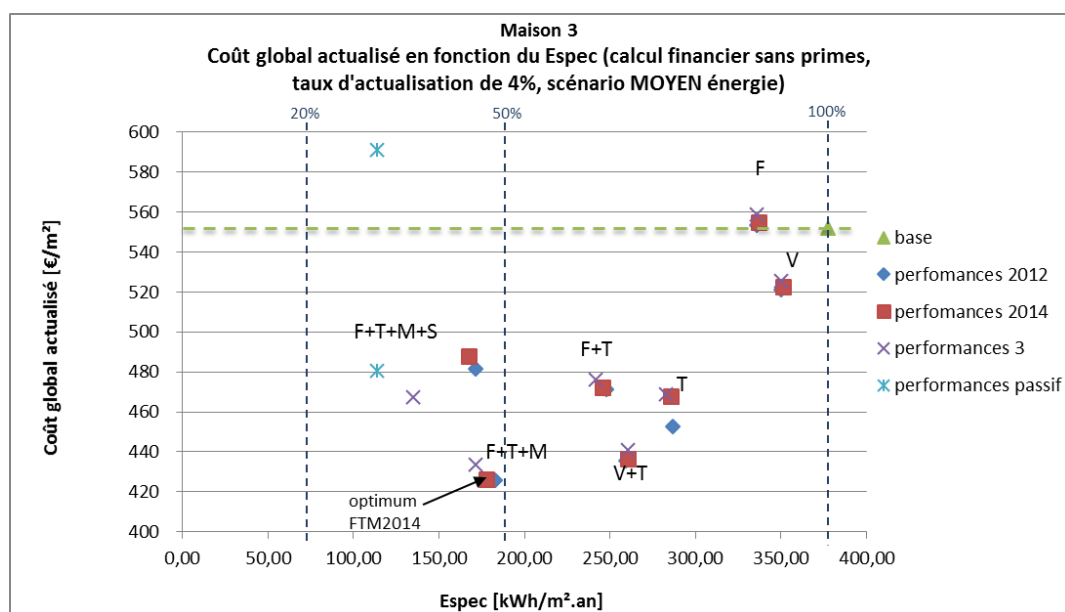


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espece	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 2 BIS	Base	104	44.996	433	0	477 (100%)	0 €	0 €	696 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)		16.660	160	272	205 (43%)	28.815 €	277 €	577 €	119 €
	FTMS Passif (cas 24)		8.428	81	352	126 (26%)	48.216 €	464 €	620 €	76 €

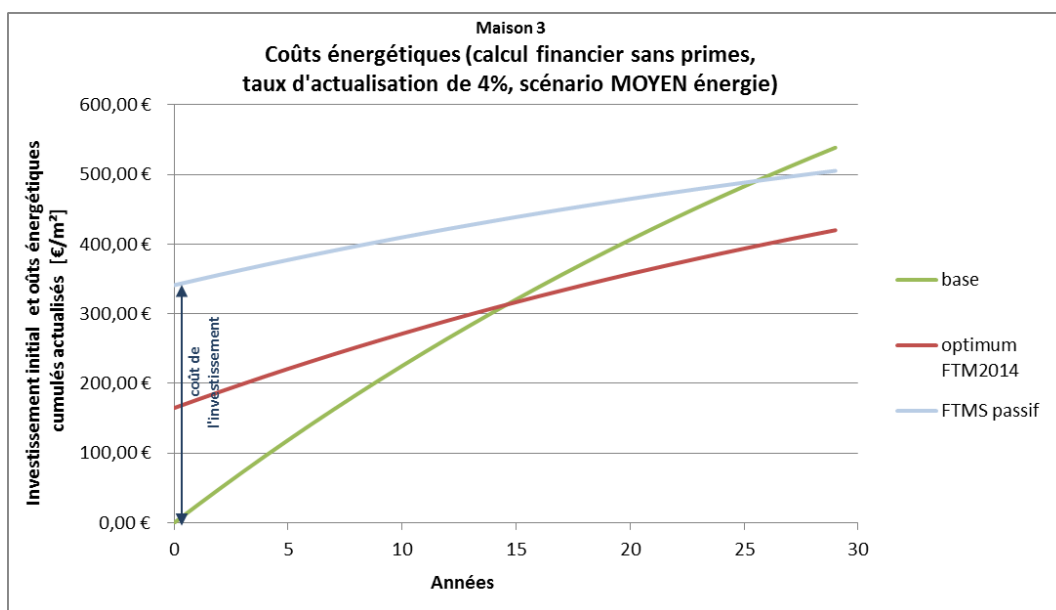


Maison 3

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 3	Base	4,47	1,77	1,88	0,83	15,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,83	5,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

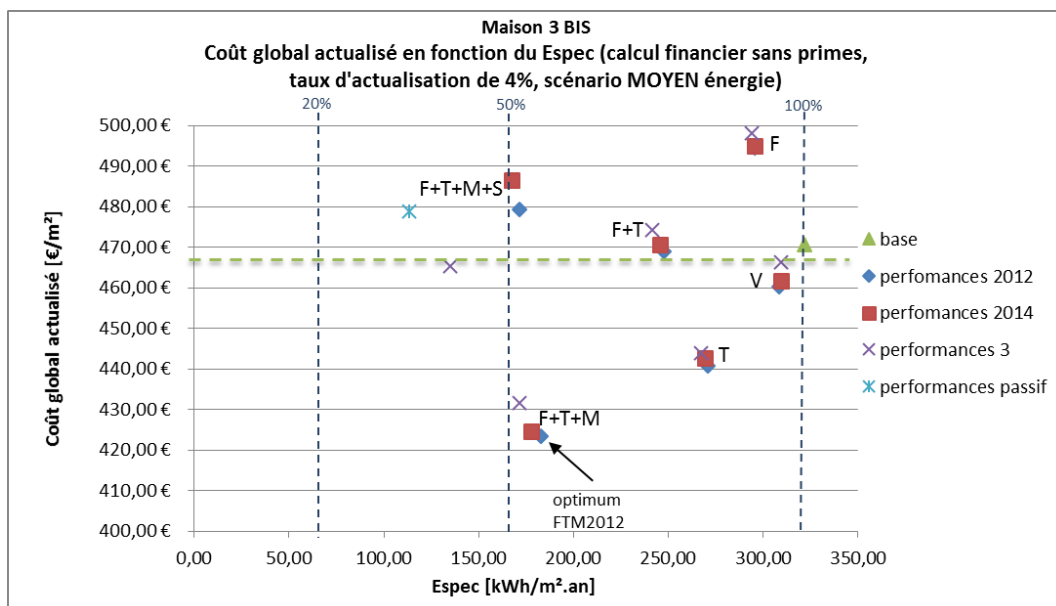


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 3	Base	104	34.647	333	0	377 (100%)	0 €	0 €	552 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)		14.370	138	195	178 (47%)	16.327 €	157 €	426 €	126 €
	FTMS Passif (cas 24)		7.127	69	265	113 (30%)	35.570 €	342 €	480 €	71 €

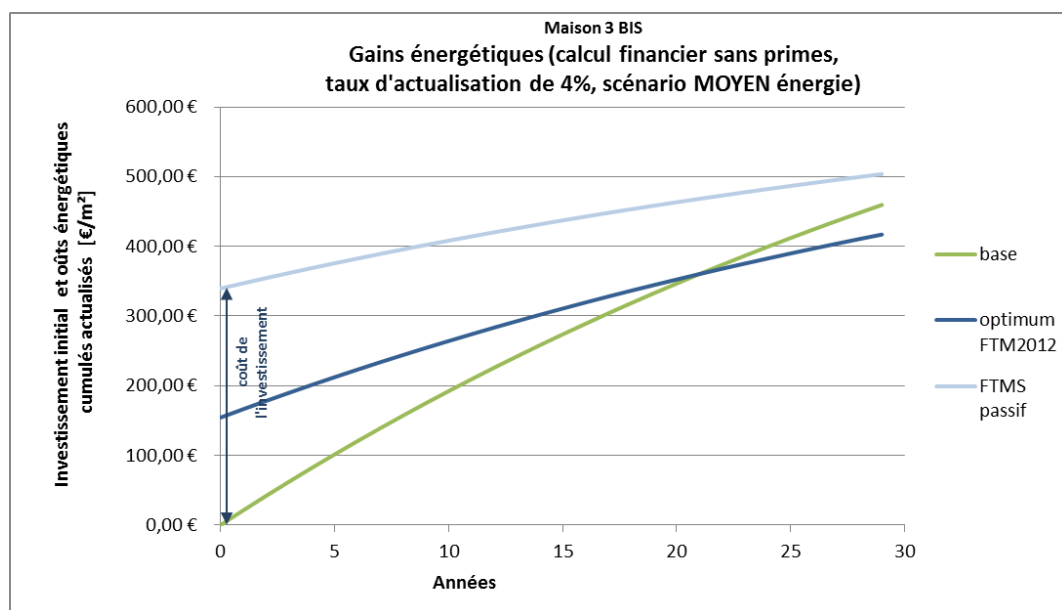


Maison 3 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 3 BIS	Base	3,50	0,84	1,88	0,83	12,0
	Optimum - FTM 2012 (cas 14)	2,20	0,27	0,32	0,83	5,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5



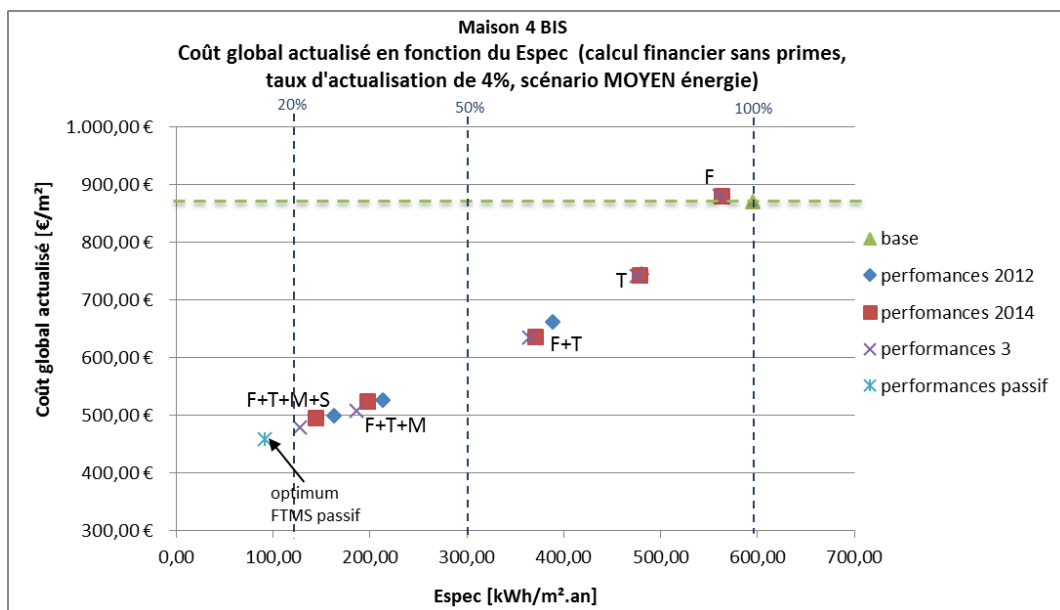
		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 3 BIS	Base	104	28.826	277	0	322 (100%)	0 €	0 €	471 €	0 €
	Optimum - FTM 2012 (cas 14)		14.370	138	139	178 (57%)	16.080 €	155 €	423 €	47 €
	FTMS Passif (cas 24)		7.127	69	209	113 (35%)	35.396 €	340 €	479 €	-8 €



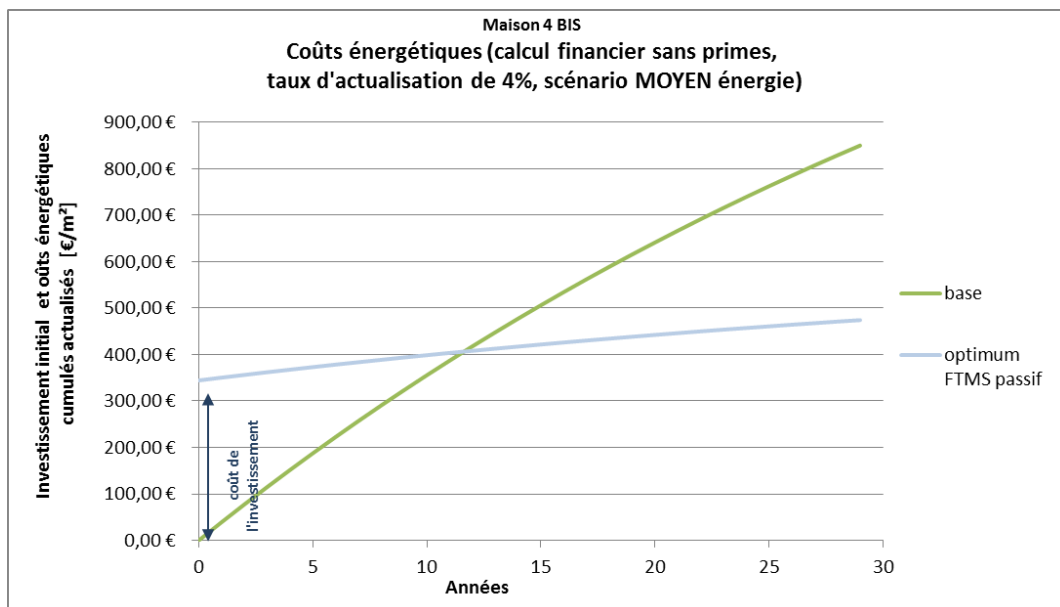
Maison 4 (dans le corps du texte)

Maison 4 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 4 BIS	Base	3,50	1,77	1,41	1,24	15,0
	Optimum - FTMS passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

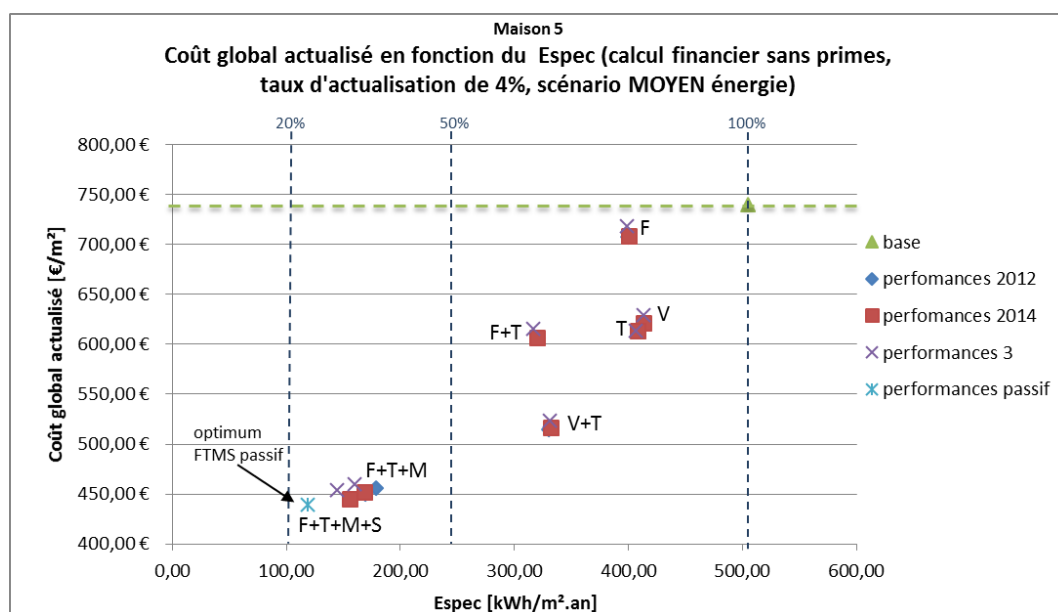


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 4 BIS	Base		125.351	550	0	595 (100%)	0 €	0 €	871 €	0 €
	Optimum - FTMS passif (cas 23)	228	20.865	92	458	137 (23%)	78.550 €	345 €	459 €	412 €

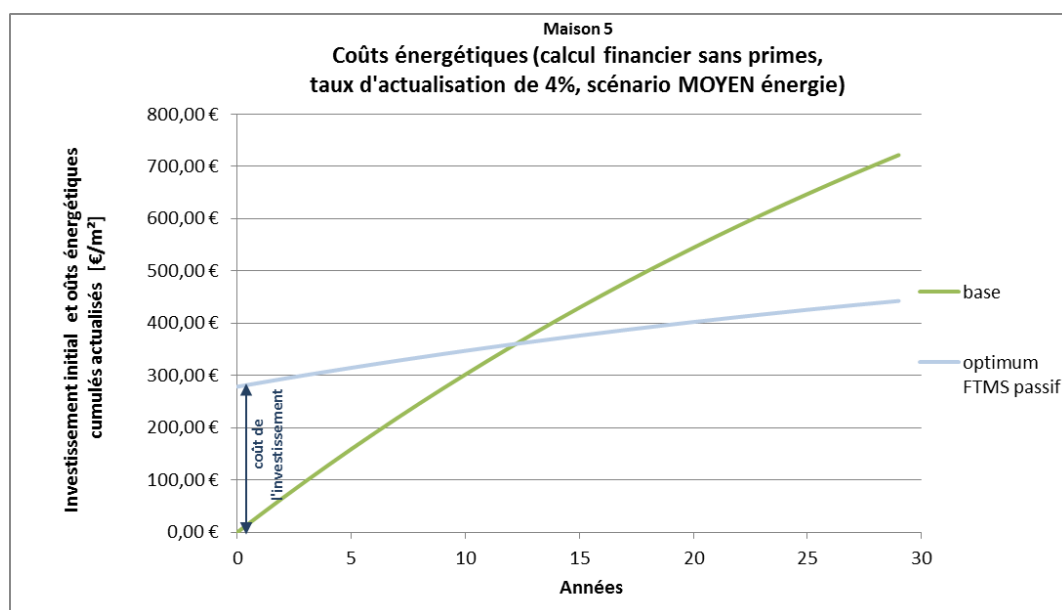


Maison 5

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 5	Base	4,88	1,65	2,31	0,58	15,0
	Optimum - FTMS passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

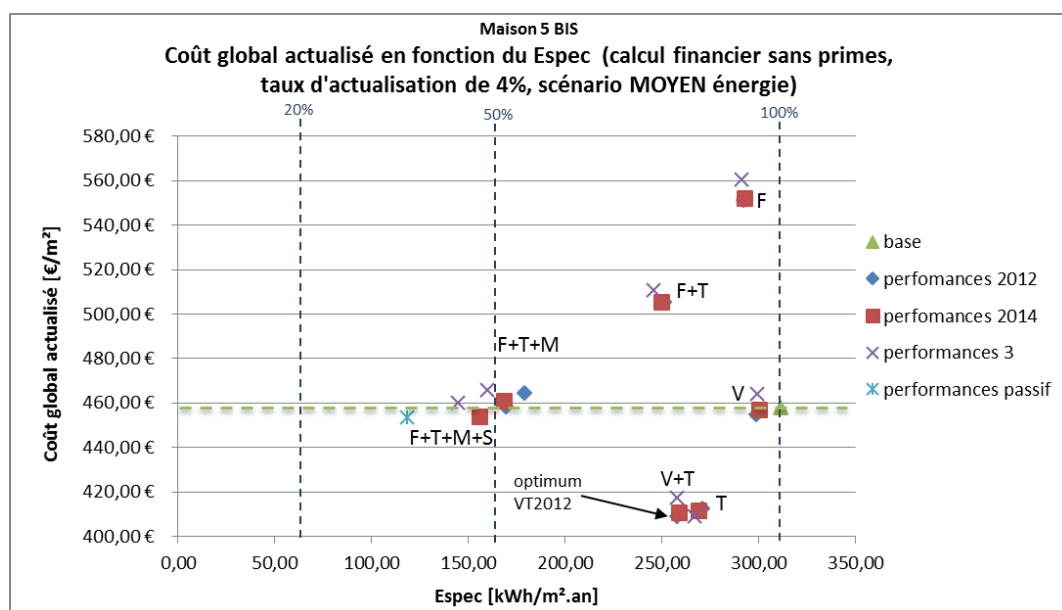


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 5	Base		120.011	460	0	506 (100%)	0 €	0 €	739 €	0 €
	Optimum - FTMS passif (cas 24)	261	17.420	67	393	119 (23%)	72.684 €	278 €	439 €	300 €

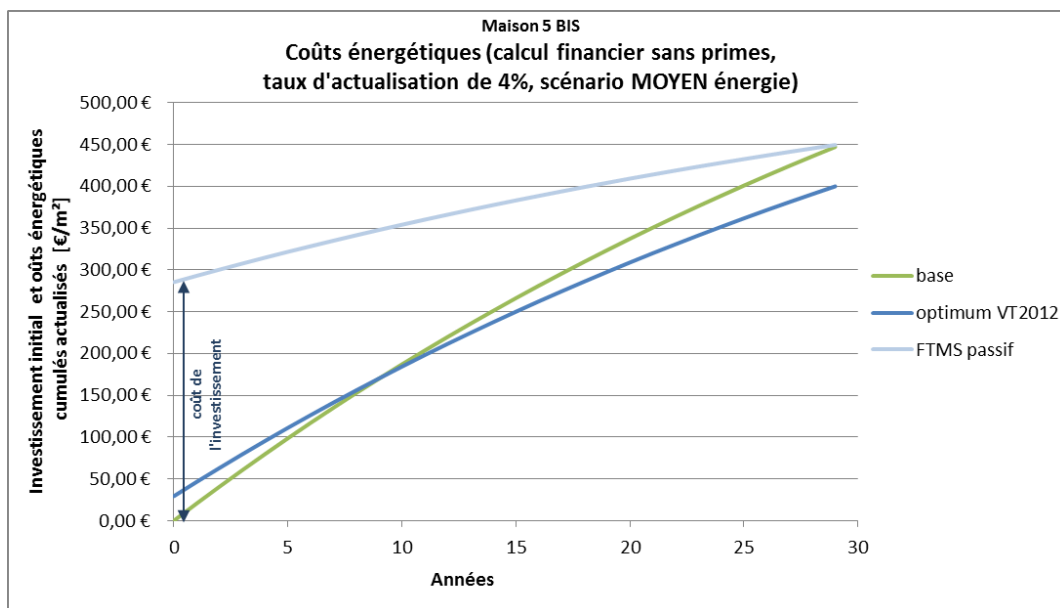


Maison 5 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 5 BIS	Base	2,50	0,71	2,31 et 0,82	0,58	9,0
	Optimum - VT 2012 (cas 10)	Ug=1,3	0,27	2,31 et 0,82	0,58	8,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5



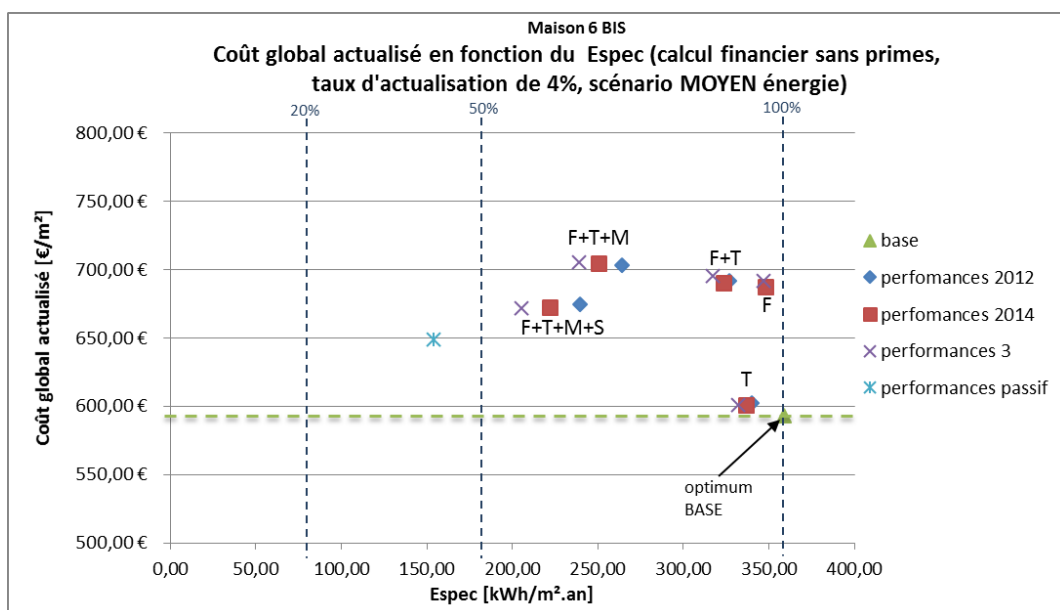
		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 5 BIS	Base	261	69.466	266	0	312 (100%)	0 €	0 €	458 €	0 €
	Optimum - VT 2012 (cas 10)		57.788	221	45	258 (83%)	4.176 €	16 €	409 €	49 €
	FTMS Passif (cas 24)		17.420	67	199	119 (38%)	74.488 €	285 €	454 €	4 €



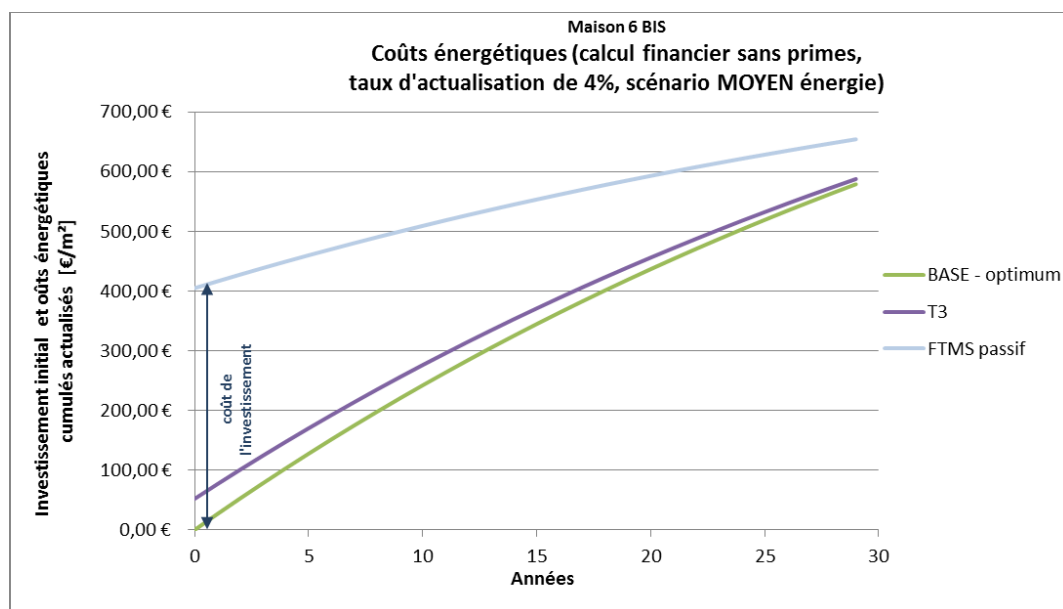
Maison 6 (dans le corps du texte)

Maison 6 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 6 BIS	Base - Optimum	2,50	0,42	0,71	0,62	6,0
	Passif	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

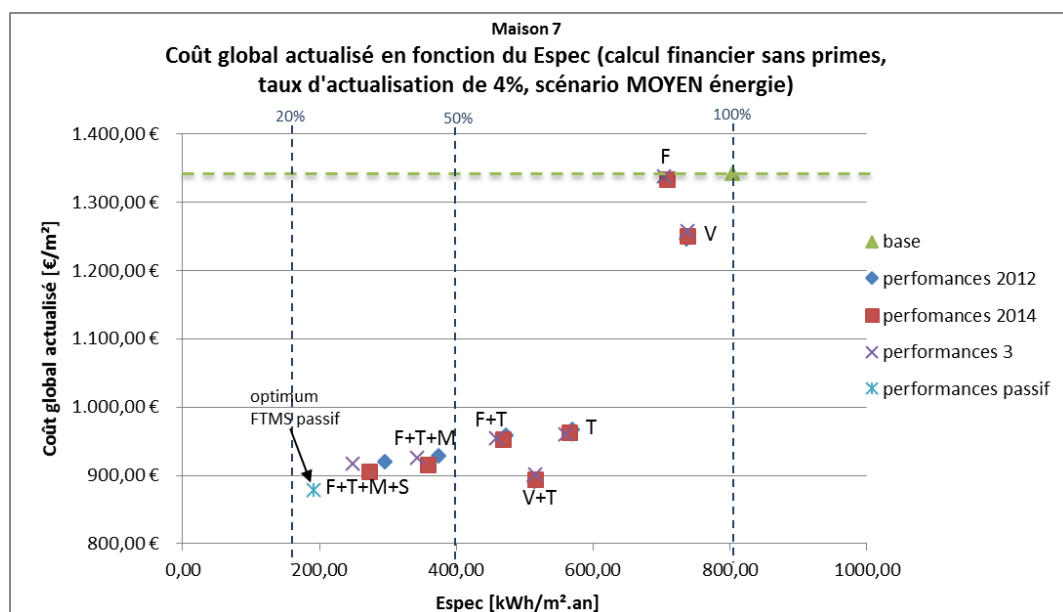


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 6 BIS	Base - Optimum	140	44.021	314	0	359 (100%)	0 €	0 €	593 €	0 €
	Passif		15.354	110	205	154 (43%)	56.693 €	405 €	649 €	-56 €

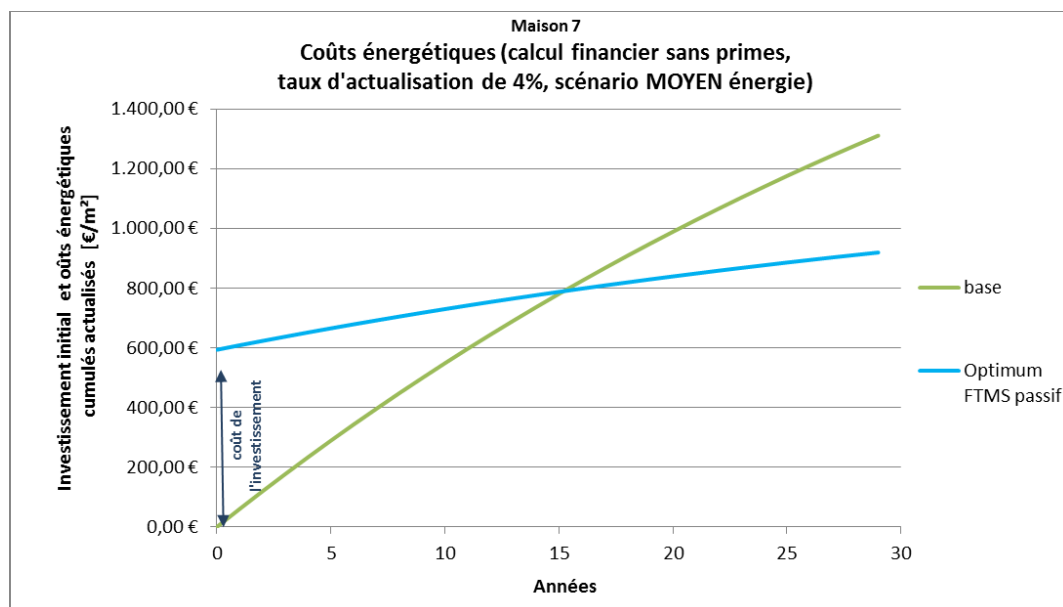


Maison 7

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 7	Base	4,07	1,77	0,91	0,80	18,0
	Optimum - FTMS passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

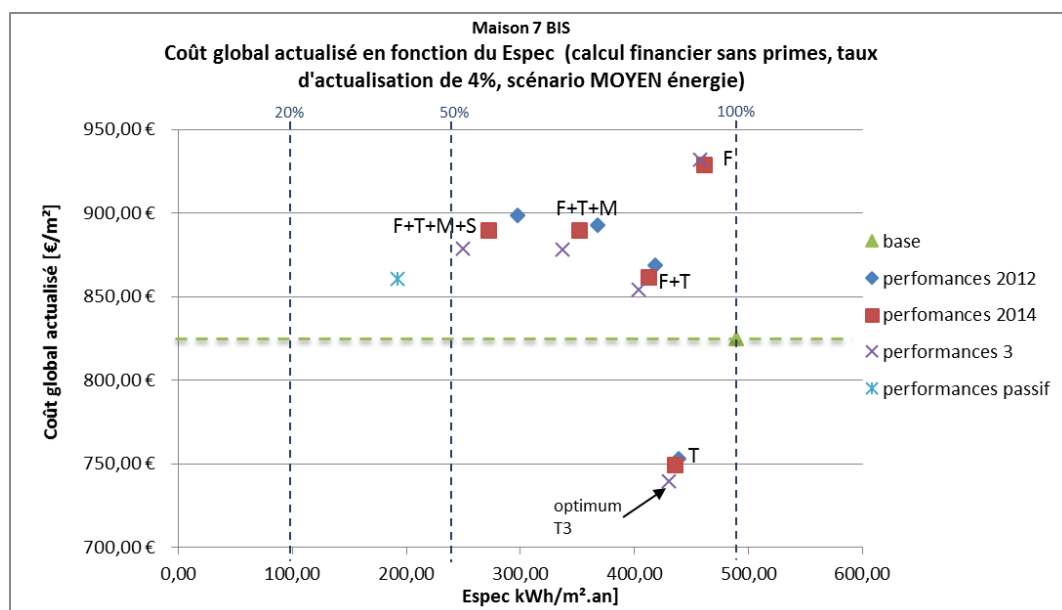


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 7	Base		88.400	737	0	801 (100%)	0 €	0 €	1.343 €	0 €
	Optimum - FTMS passif (cas 24)	120	14.917	124	612	191 (24%)	71.204 €	593 €	879 €	464 €

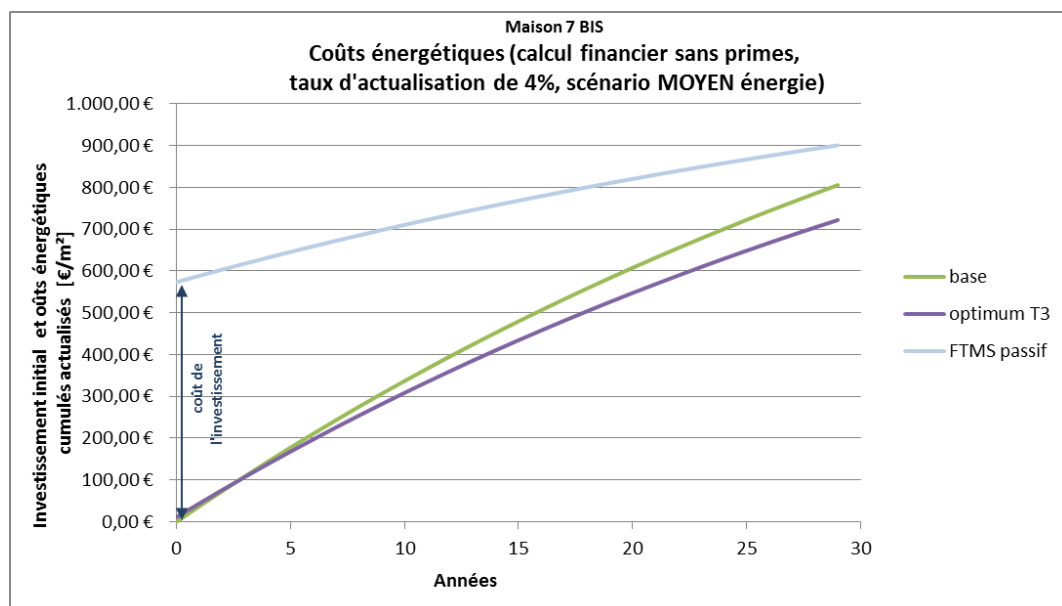


Maison 7 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 7 BIS	Base	2,50	0,73	0,91	0,80	8,0
	Optimum - T3 (cas 9)	2,50	0,20	0,91	0,80	7,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5



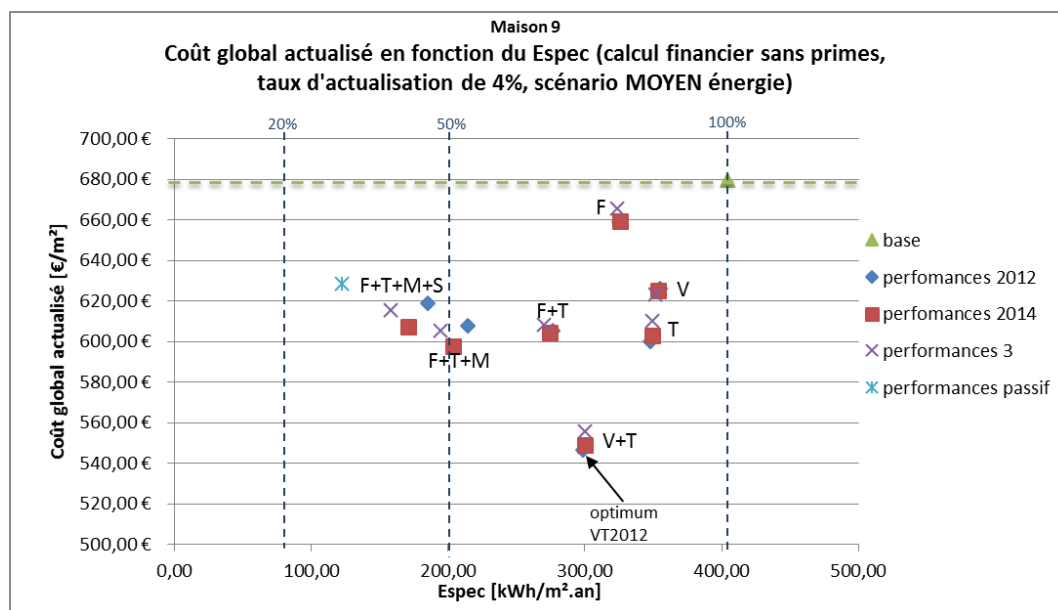
		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espece	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 7 BIS	Base	120	50.712	423	0	488 (100%)	0 €	0 €	825 €	0 €
	Optimum - T3 (cas 9)		43.642	364	59	429 (88%)	1.350 €	11 €	739 €	86 €
	FTMS Passif (cas 24)		14.917	124	298	191 (39%)	68.818 €	573 €	861 €	-35 €



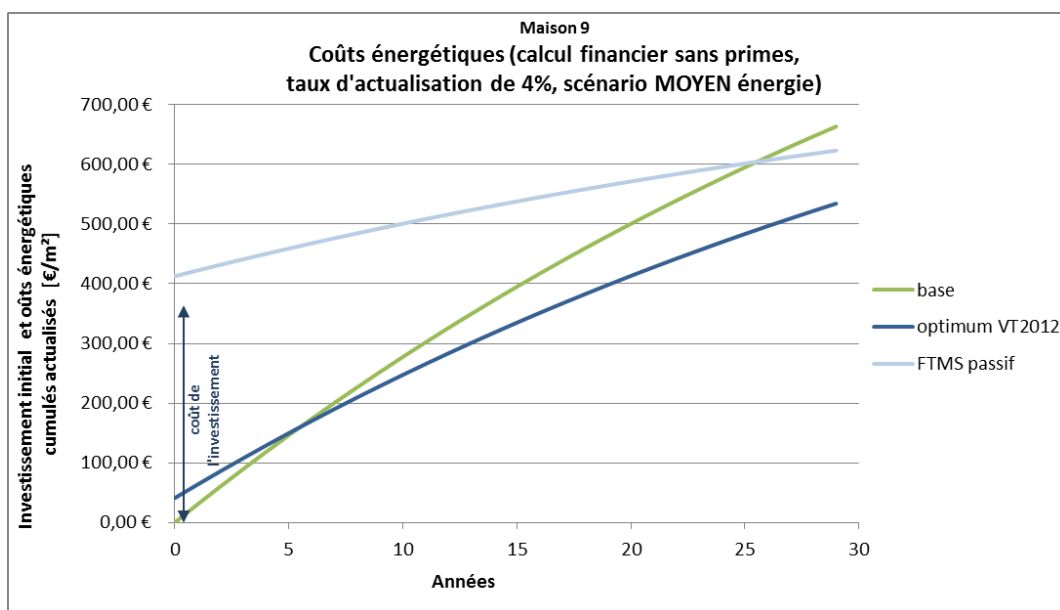
Maison 8 (dans le corps du texte)

Maison 9

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 9	Base	4,47	0,72 et 0,91	0,81	0,73	17,0
	Optimum - VT 2012 (cas 10)	Ug=1,3	0,27	0,81	0,73	13,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

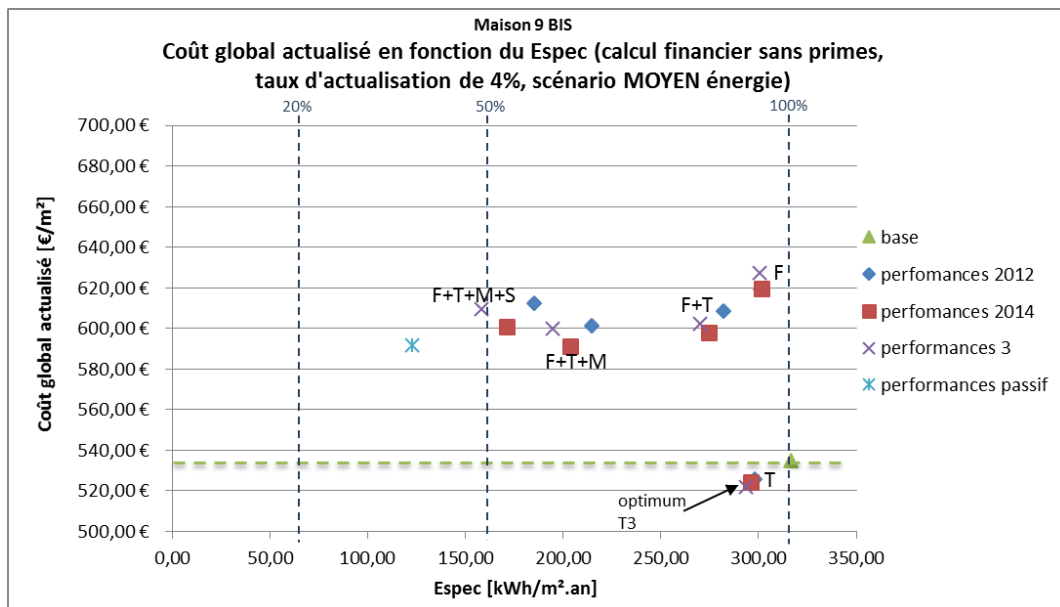


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espece	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 9	Base	221	78.807	357	0	404 (100%)	0 €	0 €	680 €	0 €
	Optimum - VT 2012 (cas 10)		55.425	251	106	298 (74%)	9.091 €	41 €	546 €	133 €
	FTMS Passif (cas 23)		16.587	75	282	123 (30%)	91.183 €	413 €	628 €	51 €

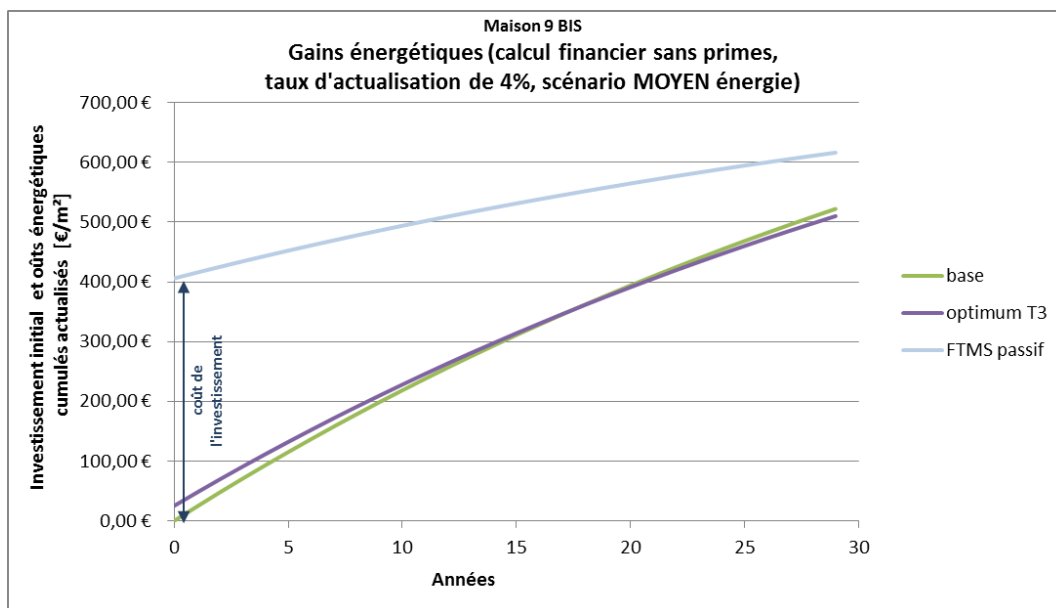


Maison 9 BIS

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 9 BIS	Base	2,50	0,38 et 0,47	0,81	0,73	13,0
	Optimum - T3 (cas 9)	2,50	0,20	0,81	0,73	11,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

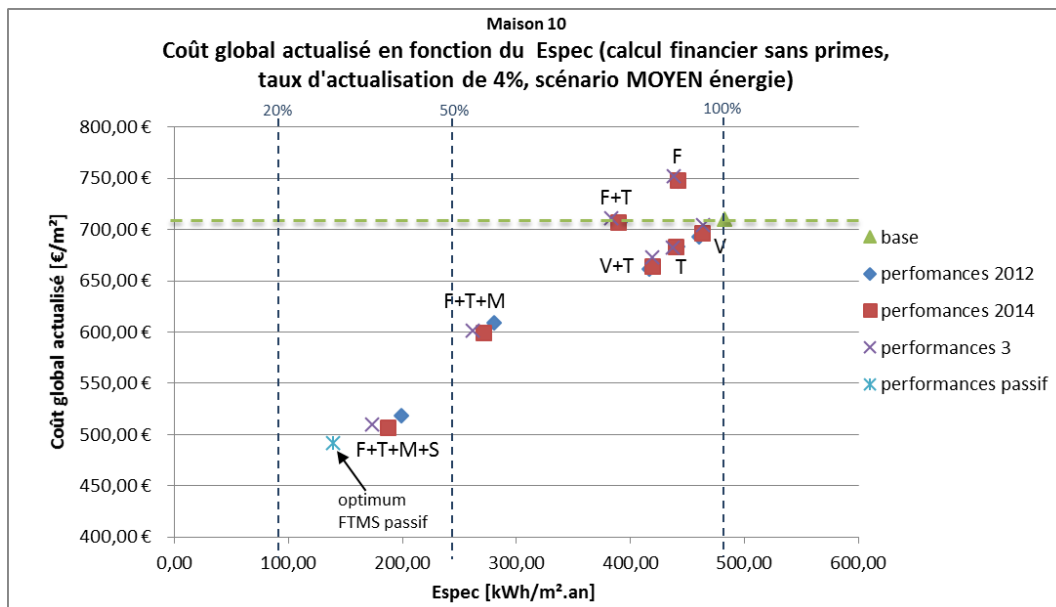


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 9 BIS	Base	221	59.432	269	0	316 (100%)	0 €	0 €	535 €	0 €
	Optimum - T3 (cas 9)		54.313	246	23	293 (93%)	5.567 €	25 €	522 €	13 €
	FTMS Passif (cas 23)		16.587	75	194	123 (39%)	89.743 €	406 €	592 €	-57 €

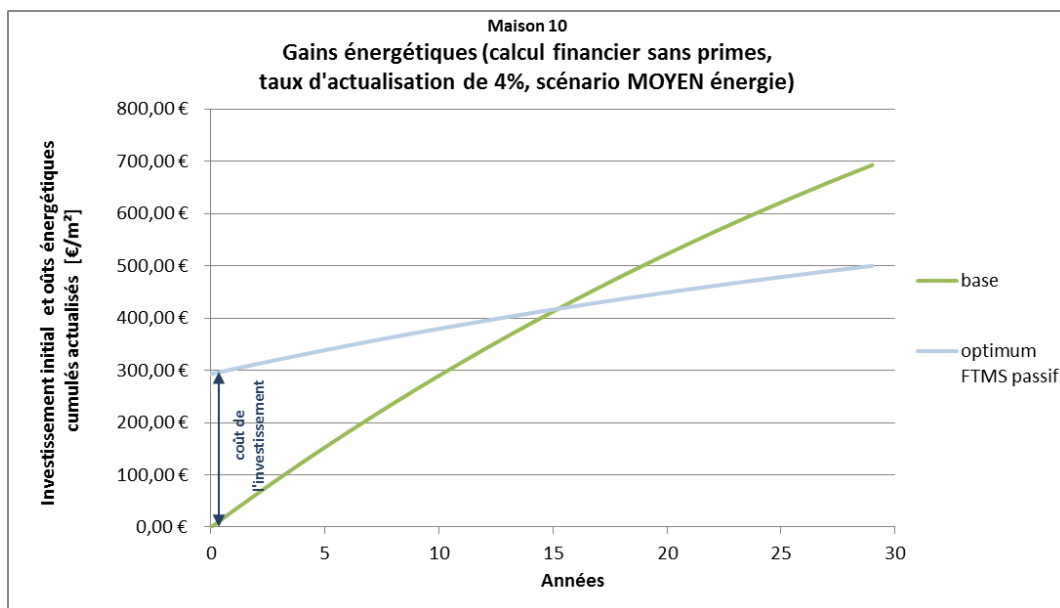


Maison 10

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 10	Base	3,02	0,94	1,07	0,8 et 1,95	14,0
	Optimum - FTMS passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5



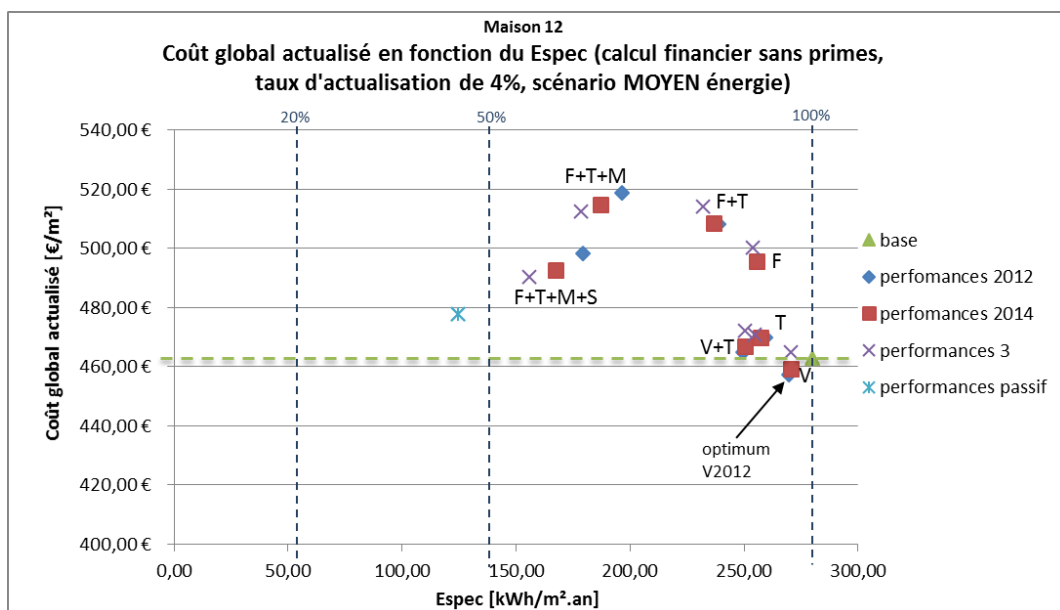
		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 10	Base		40.631	428	0	482 (100%)	0 €	0 €	710 €	0 €
	Optimum - FTMS passif (cas 24)	95	8.077	85	343	139 (29%)	27.851 €	293 €	491 €	219 €



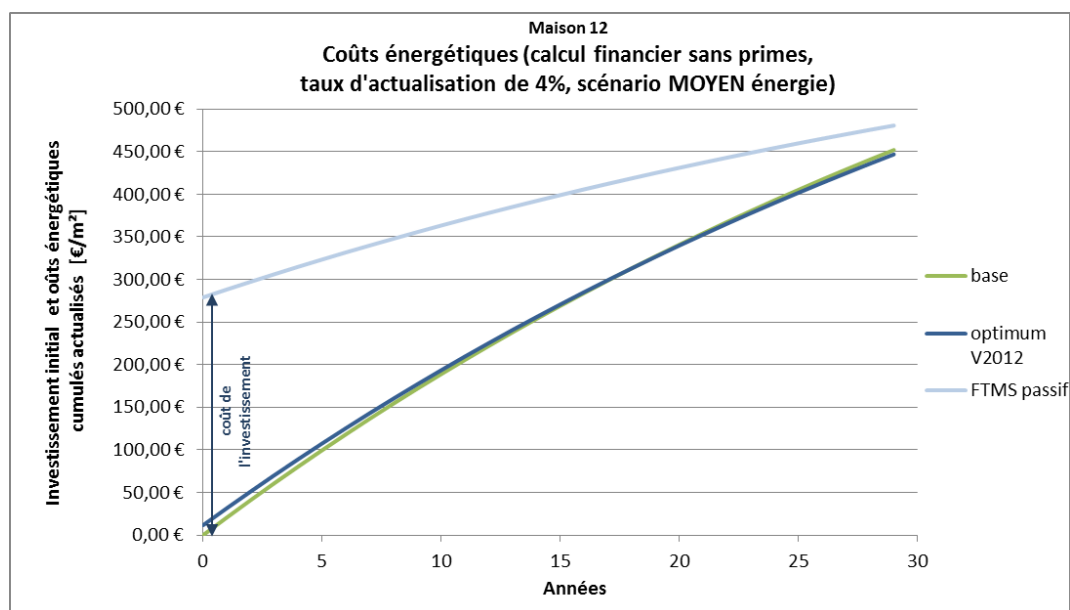
Maison 11 (dans le corps du texte)

Maison 12

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 12	Base	2,29	0,48	0,71	0,60	12,0
	Optimum - V2012 (cas 1)	Ug=1,3	0,48	0,71	0,60	11,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

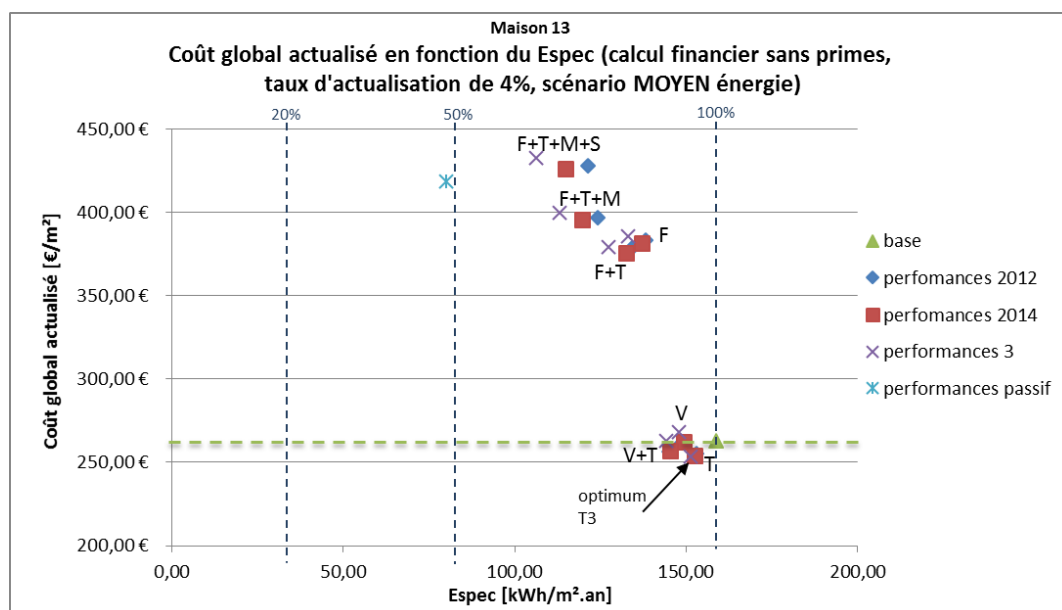


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 12	Base		26.769	235	0	280 (100%)	0 €	0 €	463 €	0 €
	Optimum - V2012 (cas 1)	114	25.573	224	10	270 (96%)	1.338 €	12 €	457 €	6 €
	FTMS Passif (cas 24)		8.979	79	156	124 (44%)	31.890 €	280 €	478 €	-15 €

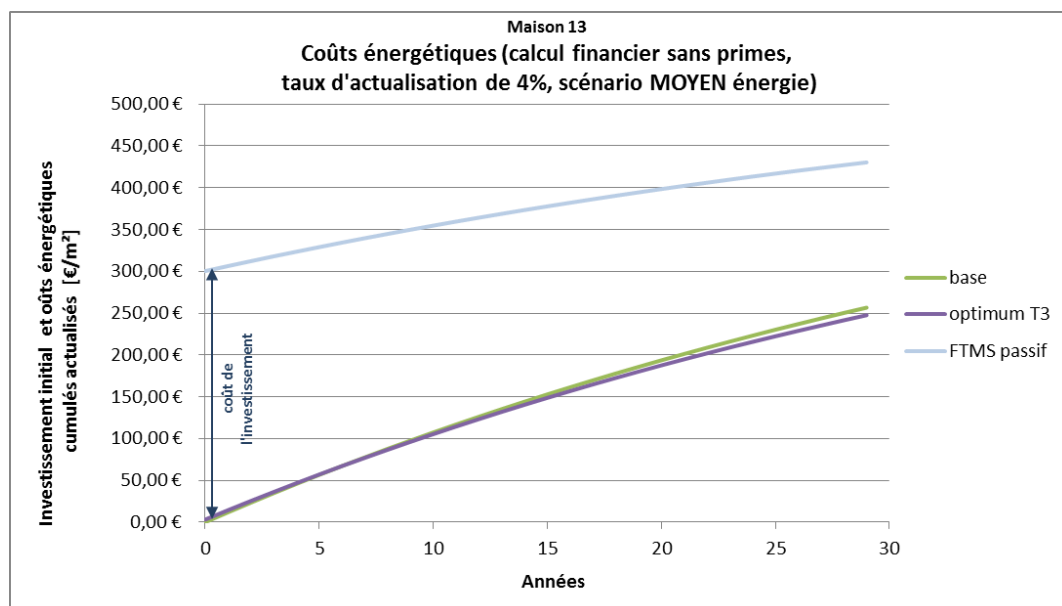


Maison 13

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 13	Base	2,26	0,35	0,60	0,41	10,0
	Optimum - T3 (cas 9)	2,26	0,20	0,60	0,41	8,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5



		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 13	Base	229	29.082	127	0	159 (100%)	0 €	0 €	263 €	0 €
	Optimum - T3 (cas 9)		27.348	119	8	151 (95%)	0 €	0 €	254 €	9 €
	FTMS Passif (cas 24)		11.046	48	79	80 (50%)	715 €	3 €	418 €	-155 €



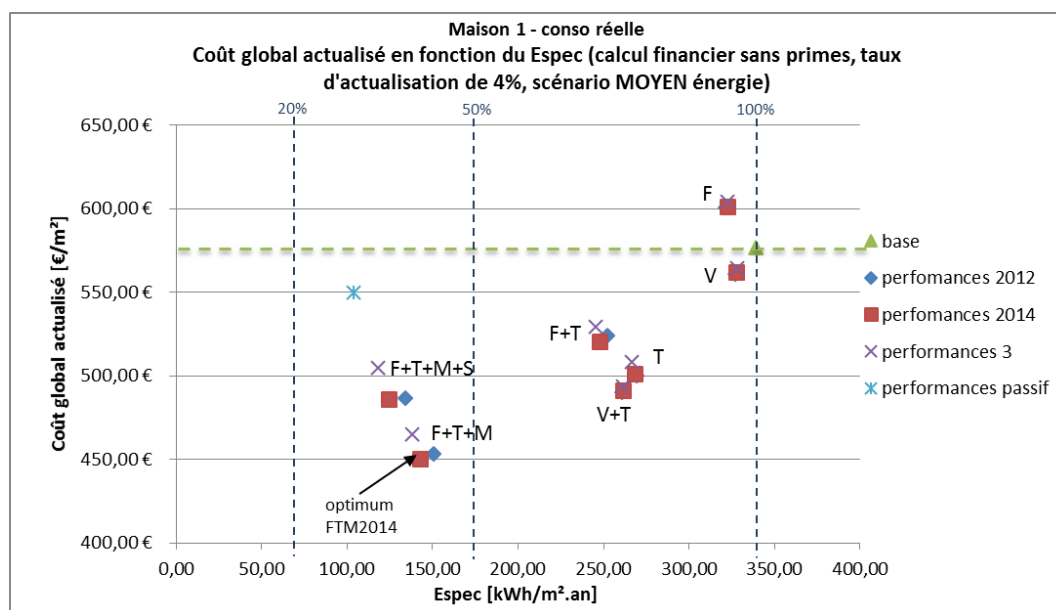
Maison 14 (dans le corps du texte)

Maison 15 (dans le corps du texte)

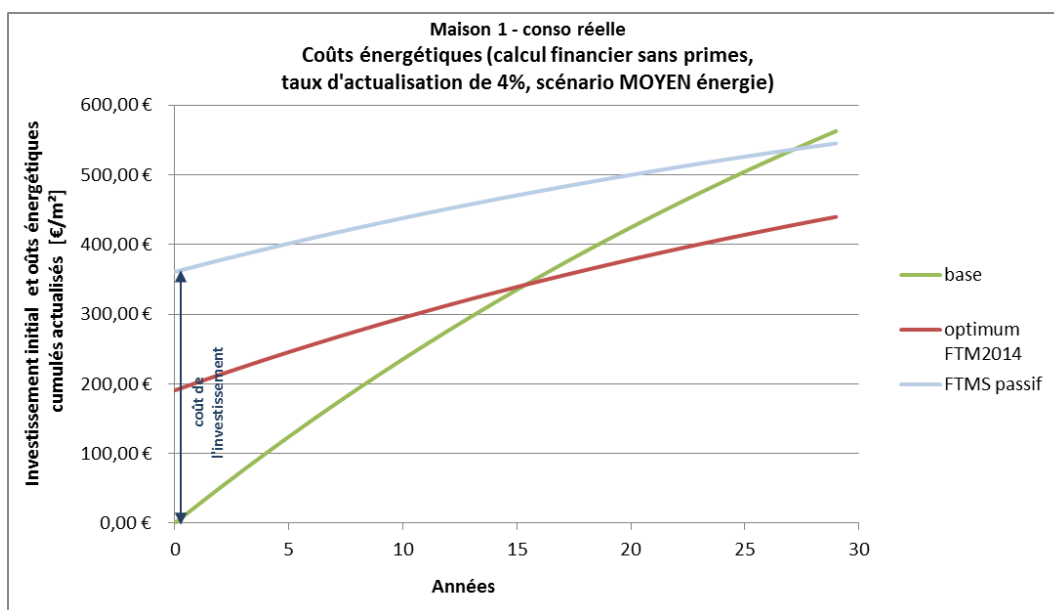
Annexe F : résultats de toutes les maisons étudiées sur base de la consommation réelle (consommation théorique * facteur de correction)

MAISON (1)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 1	Base	4,47	1,76	2,20	0,79	18,0
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)	1,80	0,24	0,24	0,79	6,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

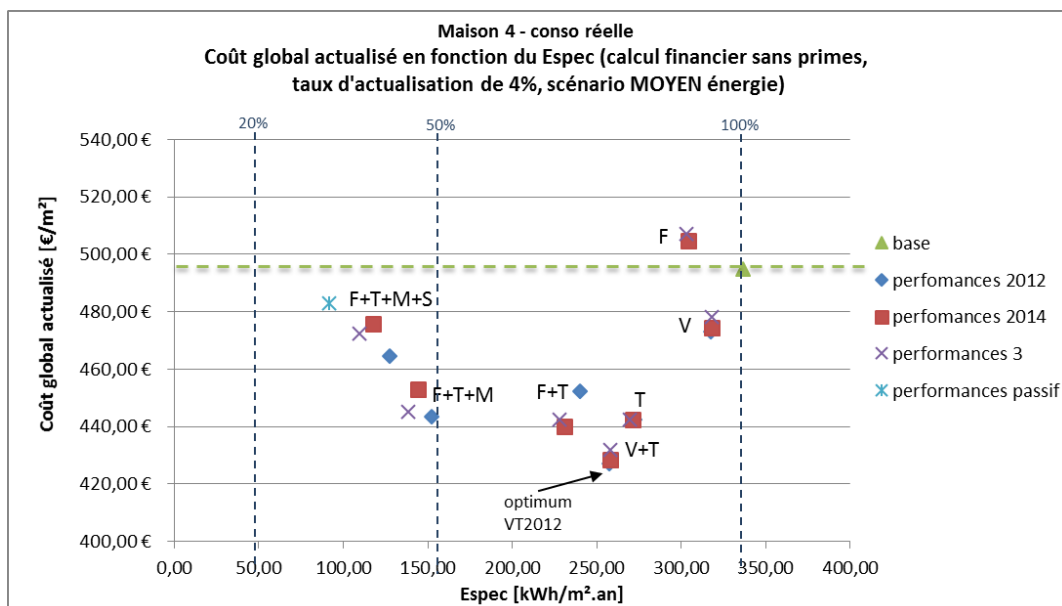


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 1	Base	157	43.295	276	0	340 (100%)	0 €	0 €	577 €	0 €
	Optimum - FTM 2014 (cas 18)		12.430	79	197	142 (41%)	31.083 €	198 €	446 €	131 €
	FTMS Passif (cas 23)		6.381	41	235	104 (30%)	56.618 €	361 €	550 €	27 €

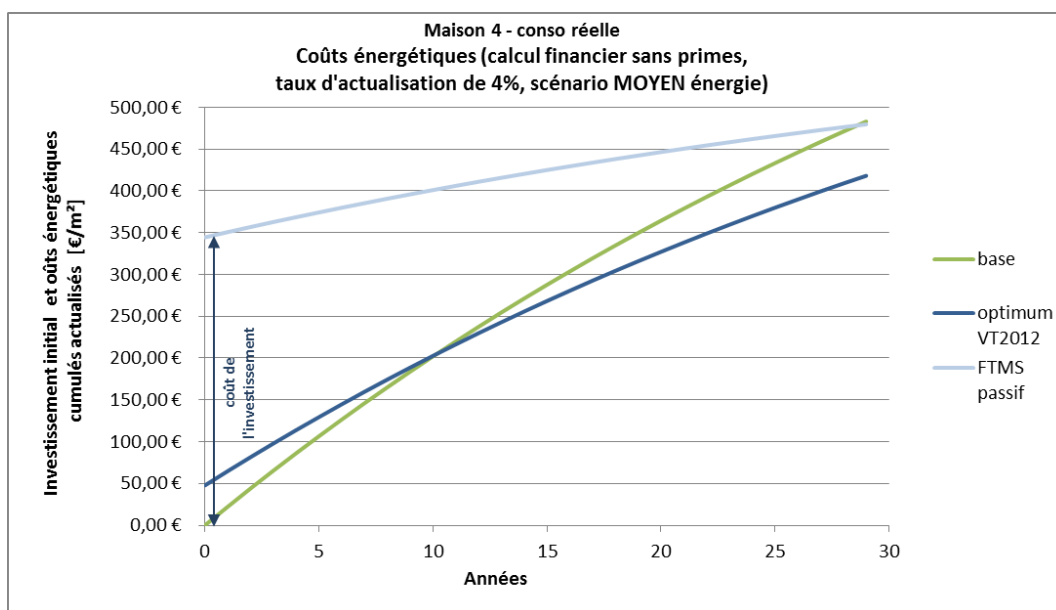


MAISON (4)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 4	Base	4,47	1,77	1,41	1,24	18,0
	Optimum - VT 2012 (cas 10)	Ug=1,3	0,27	1,41	1,24	13,0
	FTMS passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

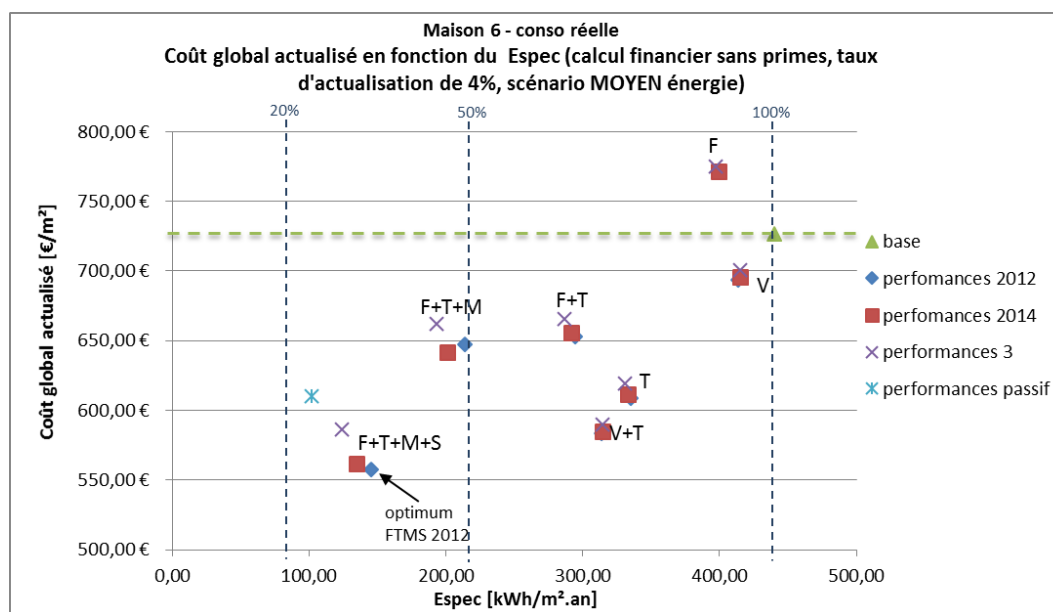


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 4	Base	228	66.347	291	0	337 (100%)	0 €	0 €	495 €	0 €
	Optimum - VT 2012 (cas 10)		48.238	212	79	257 (76%)	10.888 €	48 €	427 €	68 €
	FTMS passif (cas 23)		10.433	46	245	91 (27%)	78.550 €	345 €	483 €	12 €

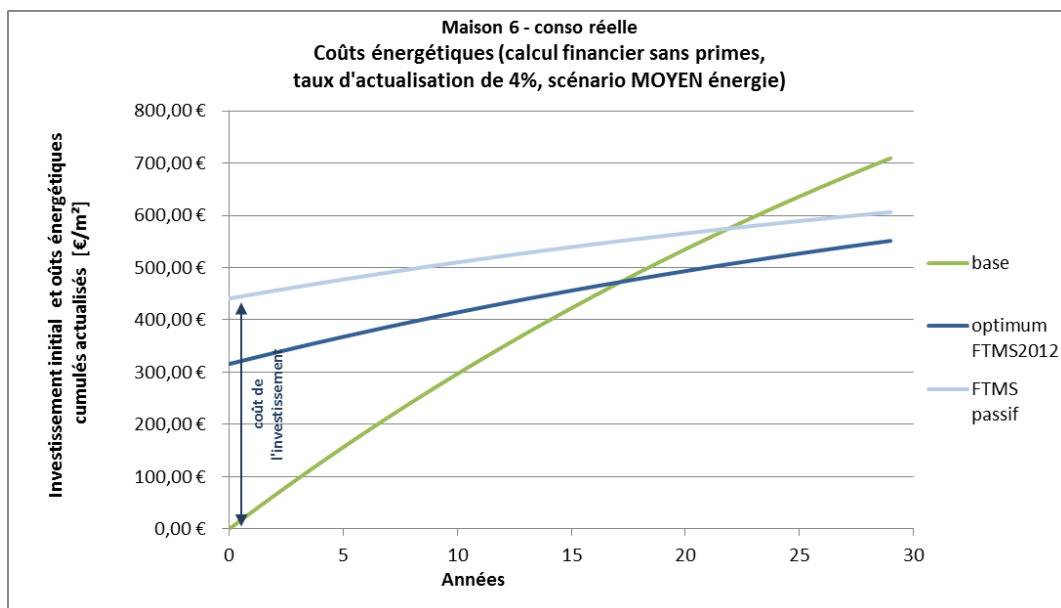


MAISON (6)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 6	Base	4,47	1,71	1,53	1,66	18,0
	Optimum - FTMS 2012 (cas 15)	2,20	0,27	0,32	0,35	4,5
	FTMS passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

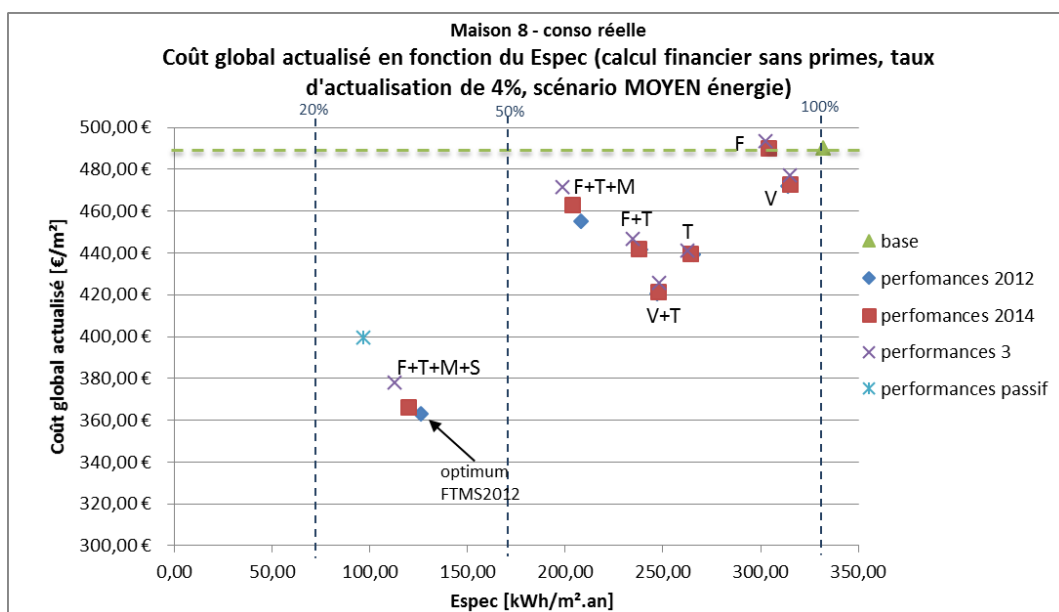


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 6	Base	140	55.389	396	0	440 (100%)	0 €	0 €	727 €	0 €
	Optimum - FTMS 2012 (cas 15)		14.147	101	295	145 (33%)	44.208 €	316 €	557 €	170 €
	FTMS passif (cas 23)		8.015	57	338	102 (23%)	61.752 €	441 €	610 €	117 €

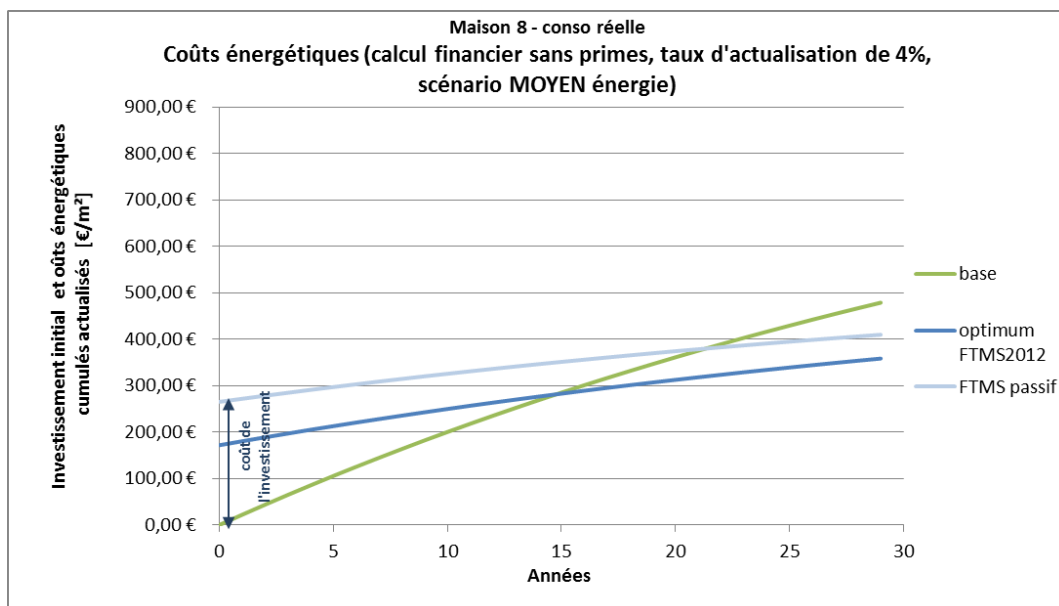


MAISON (8)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 8	Base	4,47	1,77	1,05	2,28	15,0
	Optimum - FTMS 2012 (cas15)	2,20	0,27	0,32	0,35	4,5
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

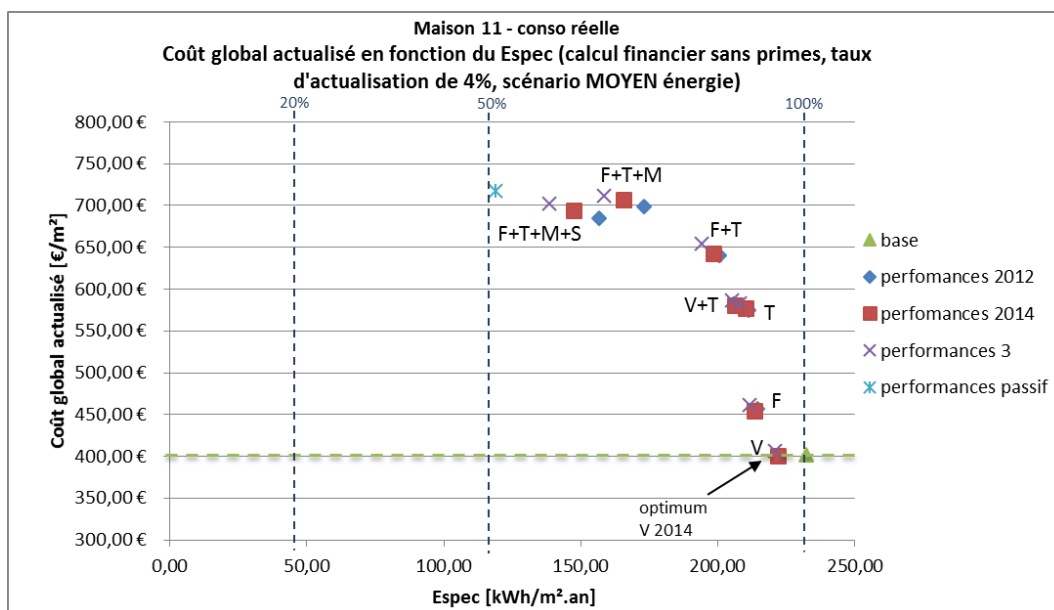


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 8	Base	127	35.919	283	0	332 (100%)	0 €	0 €	490 €	0 €
	Optimum - FTMS 2012 (cas 15)		9.793	77	206	126 (38%)	21.799 €	172 €	362 €	128 €
	FTMS Passif (cas 24)		6.024	47	235	96 (29%)	33.660 €	265 €	399 €	91 €

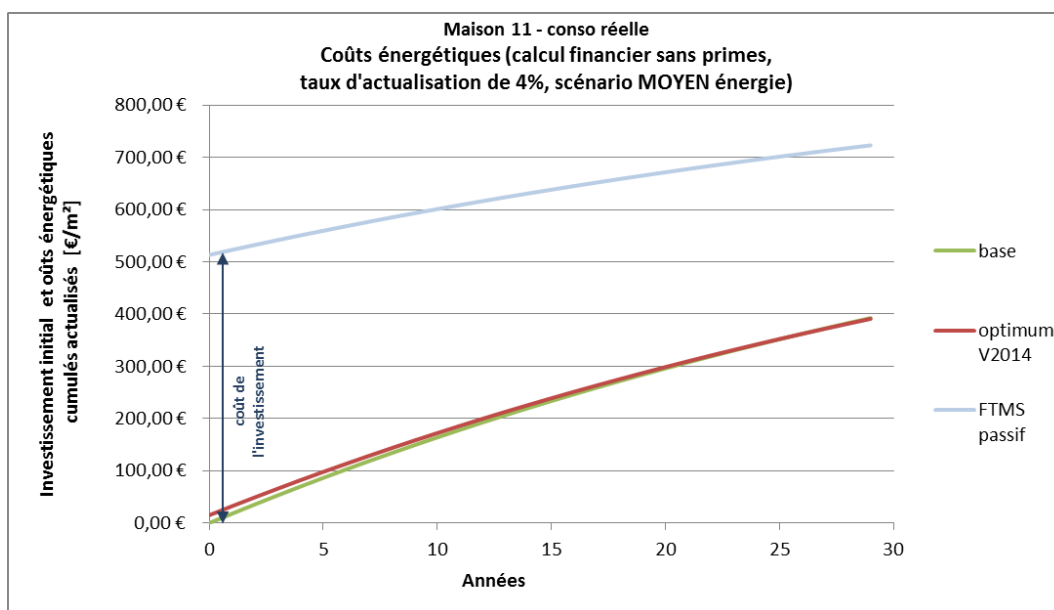


MAISON (11)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 11	Base	2,40	0,53	0,68	0,76	12,0
	Optimum - V2014 (cas 2)	Ug=1,1	0,53	0,68	0,76	11,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

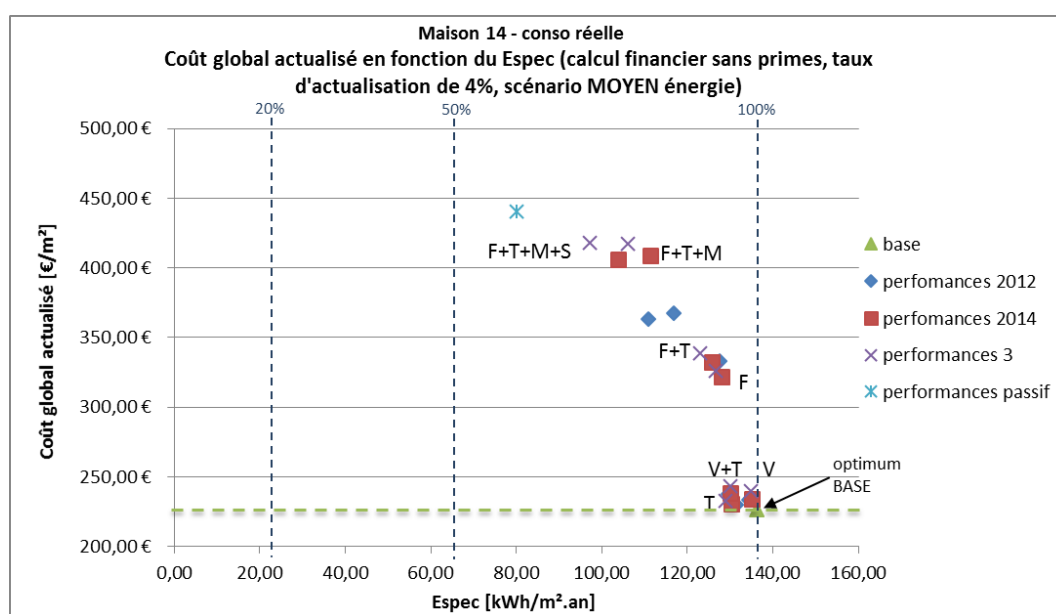


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 11	Base		29.084	164	0	232 (100%)	0 €	0 €	402 €	0 €
	Optimum - V2014 (cas 2)	177	27.273	154	10	222 (95%)	2.667 €	15 €	400 €	2 €
	FTMS Passif (cas 23)		8.975	51	114	119 (51%)	90.857 €	513 €	717 €	-315 €

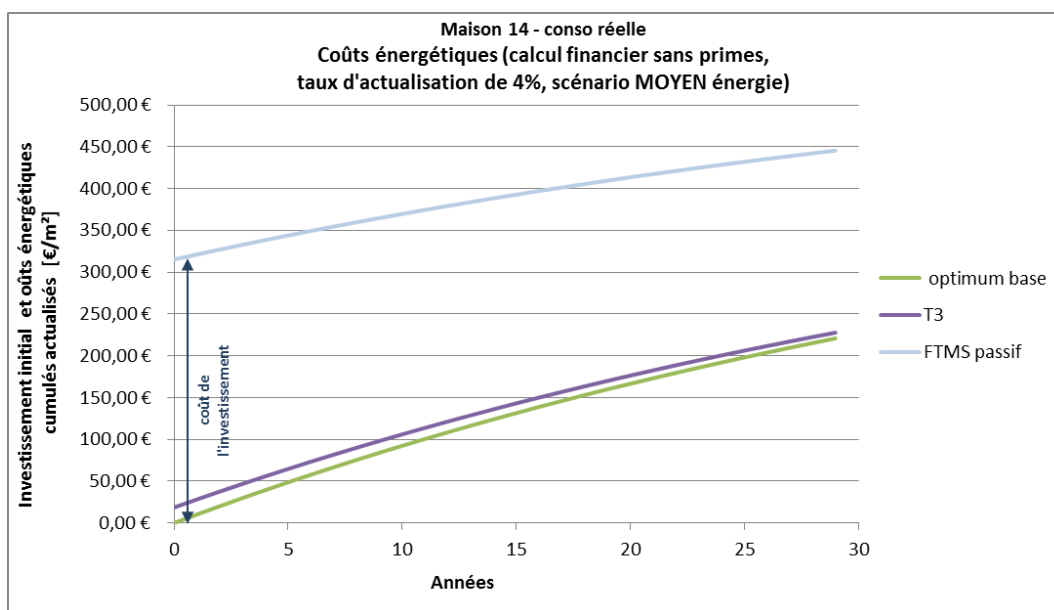


MAISON (14)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 14	Optimum - Base	1,98	0,29 et 0,32	0,54	0,49	9,0
	FTMS Passif (cas 23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

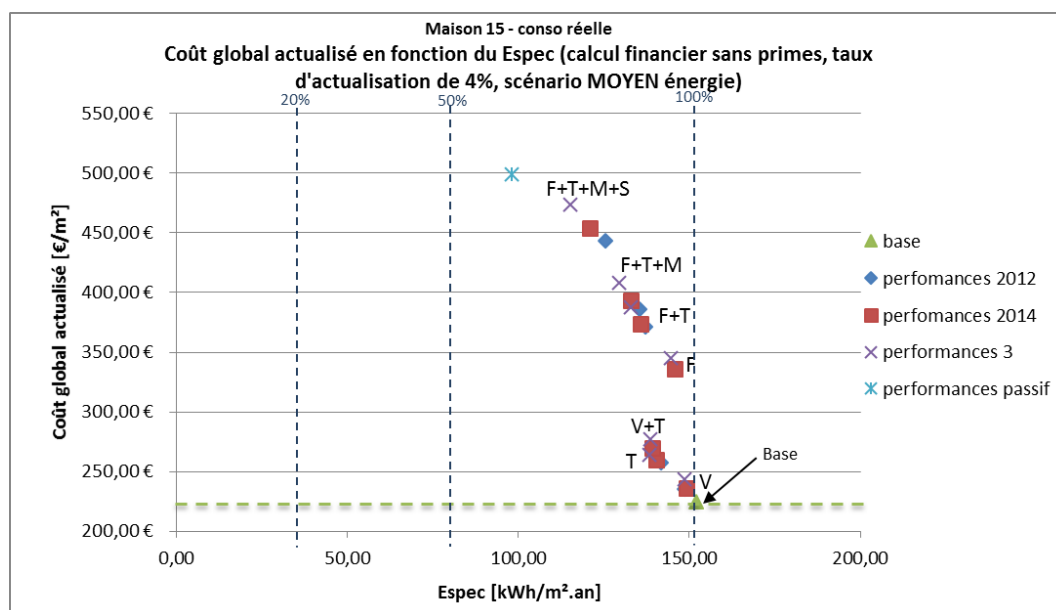


		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 14	Optimum - Base		16.744	96	0	136 (100%)	0 €	0 €	226 €	0 €
	FTMS Passif (cas 23)	175	6.918	40	56	80 (58%)	55.038 €	315 €	441 €	-215 €

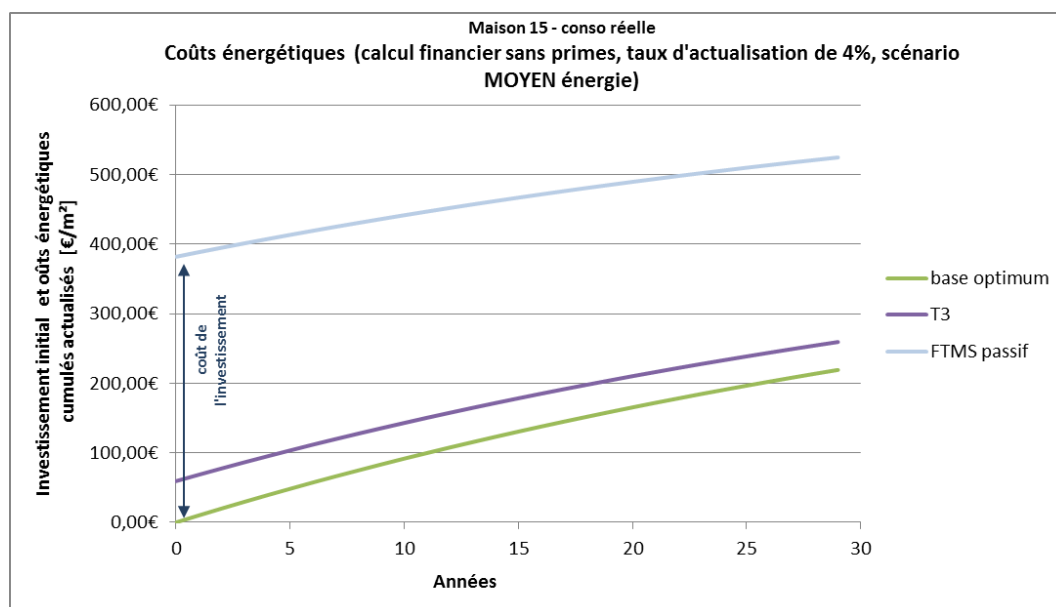


MAISON (15)

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Maison 15	Base - Optimum	2,01	0,45	0,43	0,61	7,0
	FTMS Passif (cas 24)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5



		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espece	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Maison 15	Base - Optimum	110	11.424	104	0	152 (100%)	0 €	0 €	224 €	0 €
	FTMS Passif (cas 24)		5.489	50	54	98 (64%)	42.021 €	382 €	498 €	-274 €



Annexe G : résultats de tous les immeubles à appartements sur base de la consommation théorique

Immeuble 1 (Dans le corps du texte)

Immeuble 2

Immeuble 2		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Immeuble 2	Base	3,85	2,24	2,15	0,70	15,0
	Optimum FTM 2014 (cas18)	1,80	0,24	0,24	0,70	5,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 53 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et passif - immeuble 2

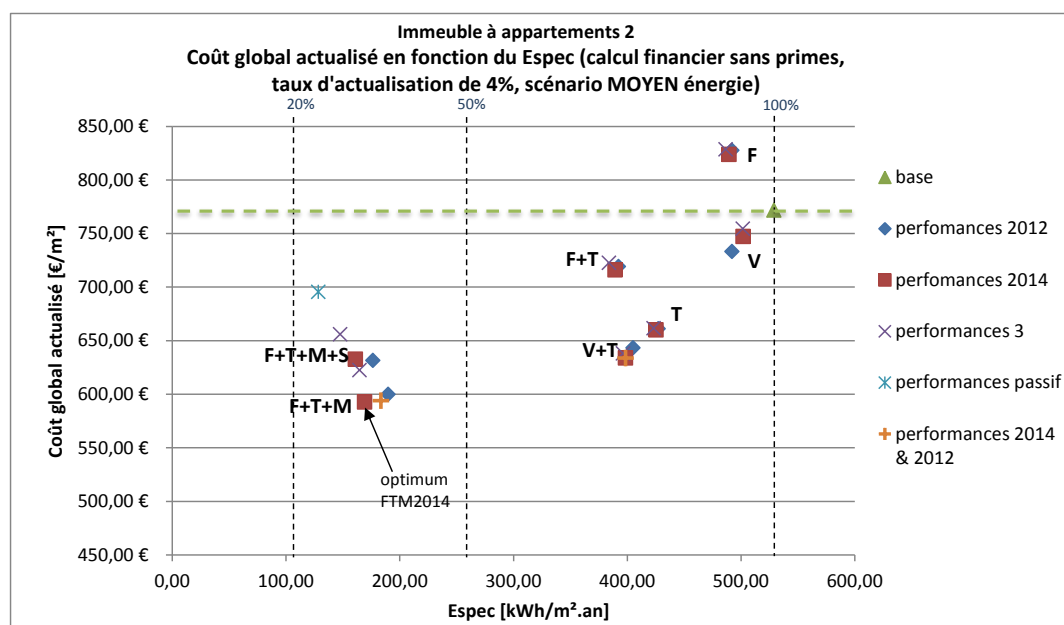


Figure 47: coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 2

Immeuble 2		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 2	Base	345	166.911	484	0	529 (100%)	0 €	0 €	772 €	0 €
	Optimum FTM 2014 (cas18)		41.826	121	362	169 (32%)	120.039 €	348 €	593 €	179 €
	Passif (cas23)		24.755	72	412	128 (24%)	186.960 €	542 €	695 €	76 €

Tableau 54 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et passif immeuble 2

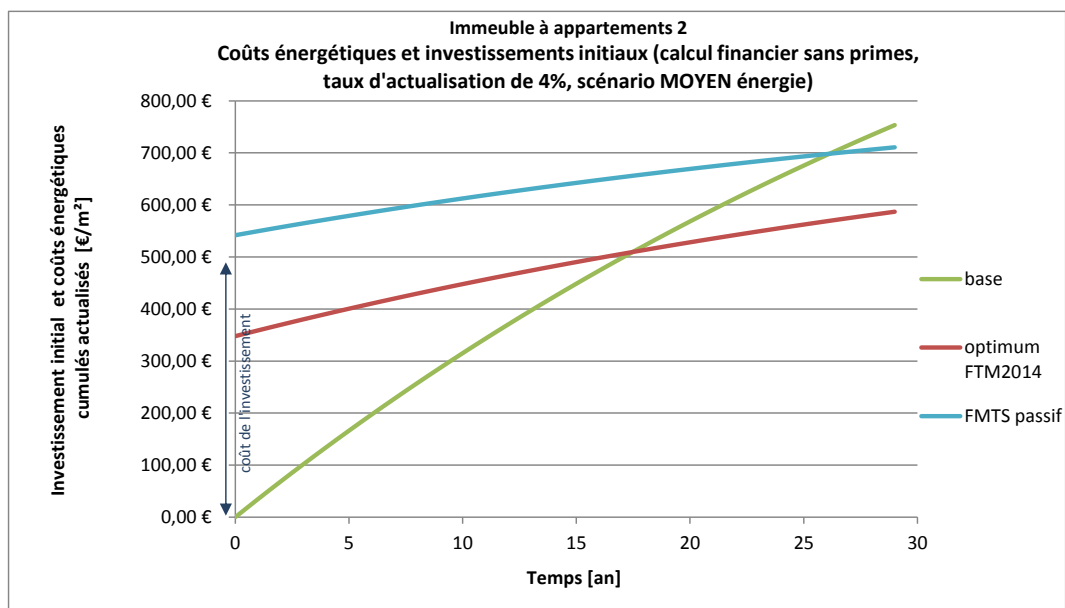


Figure 48 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 2

Immeuble 3 (dans le corps du texte)

Immeuble 4

Immeuble 4		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(U _w) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
	Base	5,05	1,61 et 0,48	2,31 et 0,89	1,0 et 0,43	15,0
	Optimum VT2012 (cas10)	U _g =1,3	0,27	2,31 et 0,89	1,0 et 0,43	12,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 55 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et passif - immeuble 4

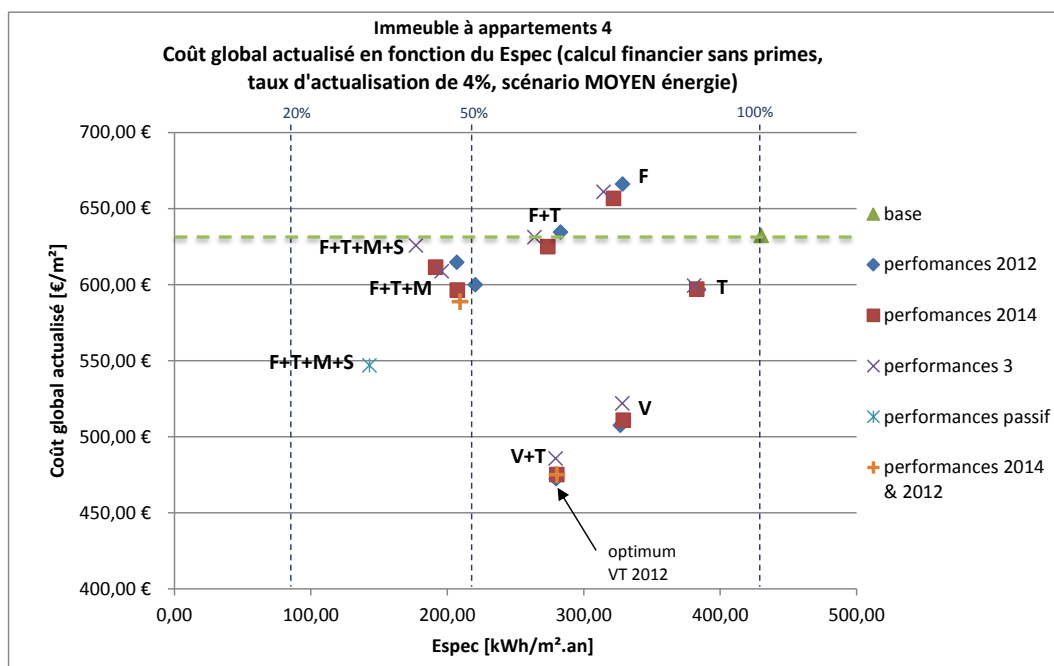


Figure 49 : coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 4

		Ach m ²	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			kWh/an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	kWh/m ² .an	EUR	EUR/m ²	EUR/m ²	EUR/m ²
Immeuble 4	Base	420	153.509	365	0	430 (100%)	0 €	0 €	632 €	0 €
	Optimum VT2012 (cas10)		90.467	215	150	280 (65%)	24.515 €	58 €	472 €	160 €
	Passif (cas23)		32.141	77	289	143 (33%)	147.296 €	351 €	547 €	85 €

Tableau 56 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et passif immeuble 4

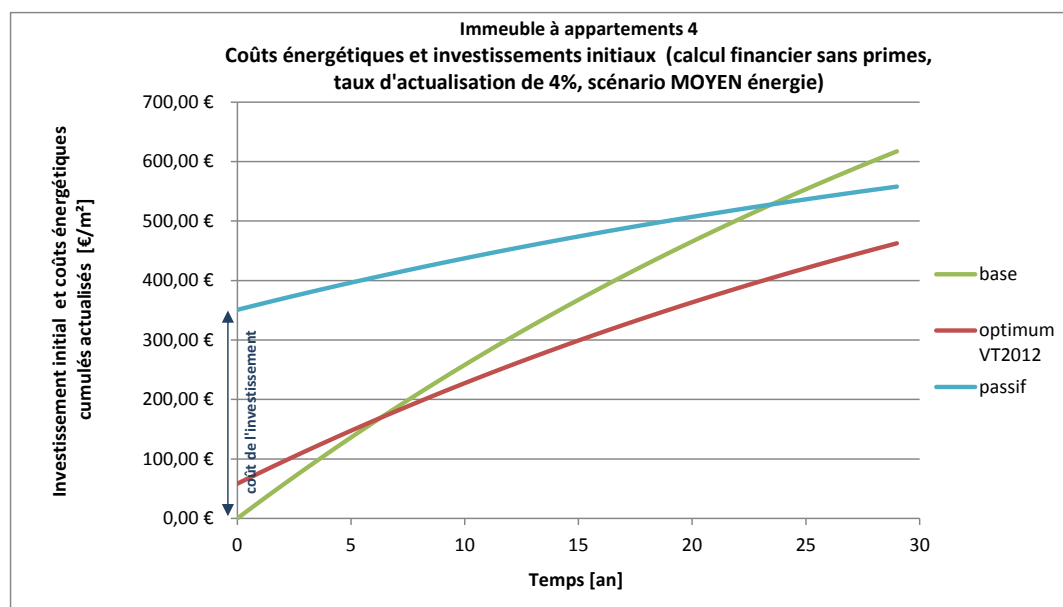


Figure 50 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 4

Immeuble 5

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	W/m ² .K	m ³ /h.m ²
Immeuble 5	Base	3,69	2,83	3,05	1,28	15,0
	Optimum FTMS Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 57 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et passif - immeuble 5

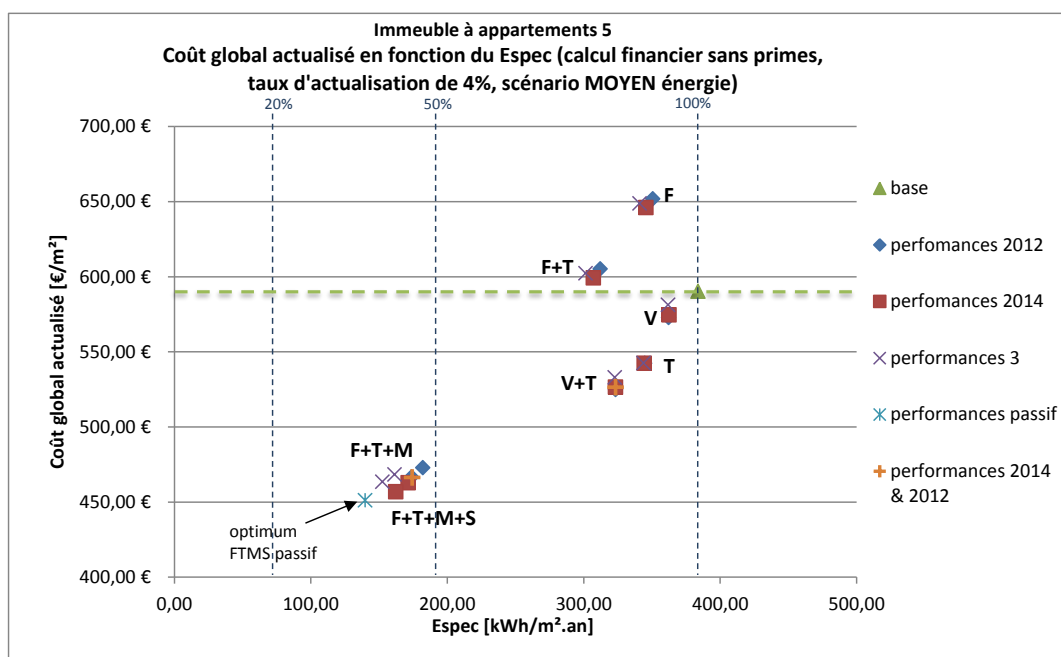


Figure 51 : coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 5

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 5	Base	1382	432.747	313	0	384 (100%)	0 €	0 €	590 €	0 €
	Optimum FTMS Passif (cas23)		75.054	54	259	140 (36%)	332.774 €	241 €	451 €	139 €

Tableau 58 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et passif immeuble 5

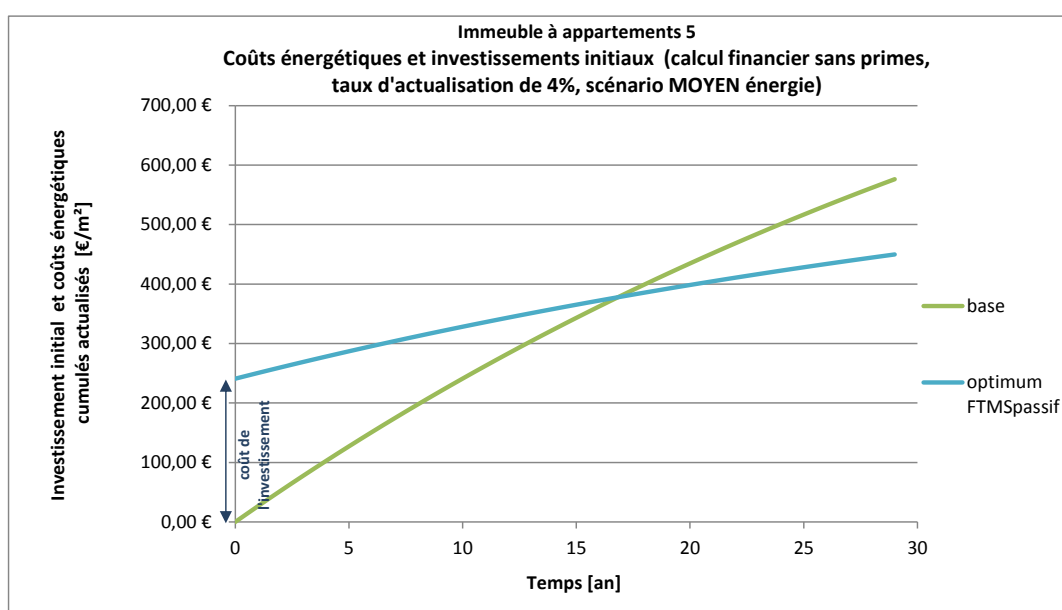


Figure 52 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 5

Immeuble 6

Immeuble 6		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
		5,14	1,03	2,07	0,23	15,0
	Base					
	Optimum FTMS Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 59 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et passif - immeuble 6

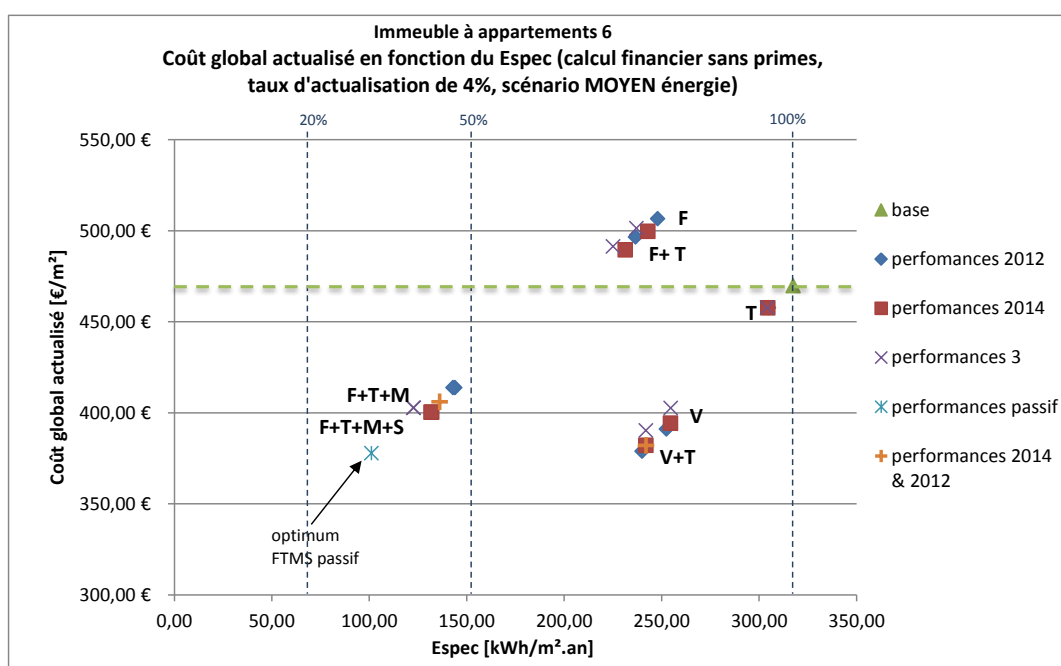


Figure 53 : coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 6

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
		m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 6	Base	2002	552.173	276	0	317 (100%)	0 €	0 €	470 €	0 €
	Optimum FTMS Passif (cas23)		110.626	55	221	101 (32%)	459.701 €	230 €	378 €	92 €

Tableau 60 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et passif immeuble 6

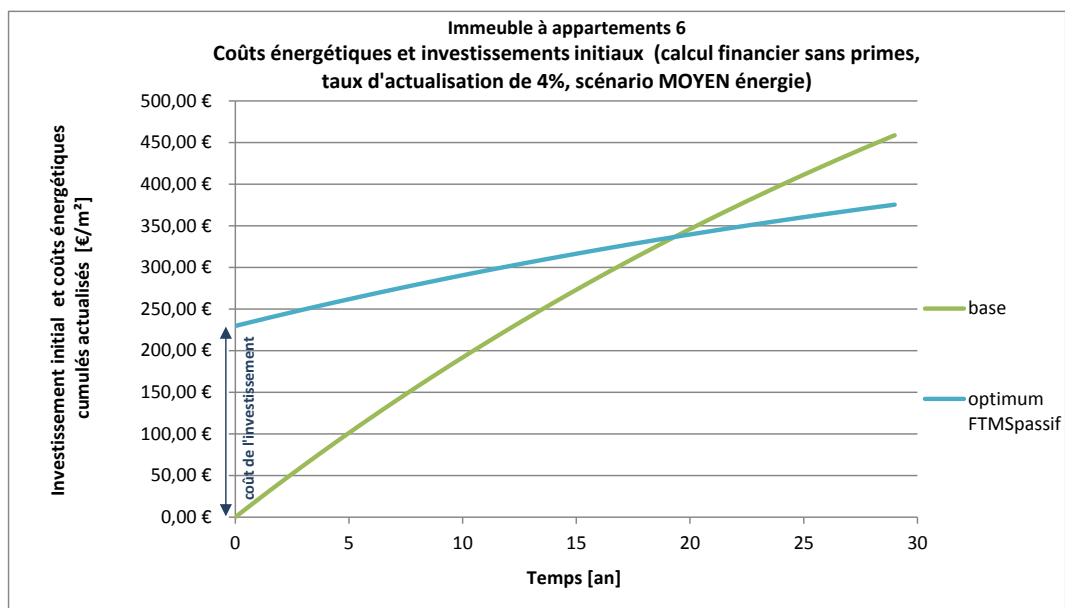


Figure 54 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 6

Immeuble 7

		Fenêtres	Toiture	Murs	Sol	Infiltration
		(Uw) W/m².K	W/m².K	W/m².K	W/m².K	m³/h.m²
Immeuble 7	Base	6,70	1,67	1,96	1,46	15,0
	Optimum VT2012 (cas10)	Ug=1,3	0,27	1,96	1,46	12,0
	Passif (cas23)	0,80	0,15	0,15	0,15	2,5

Tableau 61 : U caractéristiques des parois pour les cas base, optimum et passif - immeuble 7

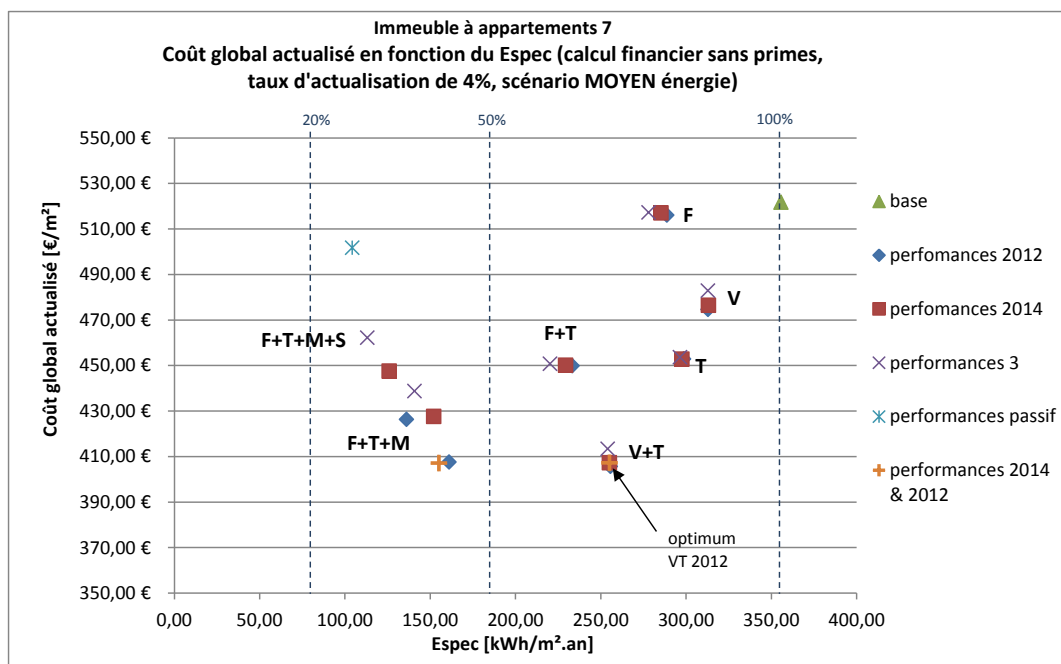


Figure 55 : coût global actualisé en fonction du Espec - immeuble 7

		Ach	Consommation de chaleur (chauffage)		Economie d'énergie en chauffage par rapport à la Base	Espec	Surcoût d'investissement	Surcoût d'investissement spécifique	CGA	Economie financière sur 30 ans par rapport à la Base
			m²	kWh/an	kWh/m².an	kWh/m².an	EUR	EUR/m²	EUR/m²	EUR/m²
Immeuble 7	Base	148	47.856	324	0	356 (100%)	0 €	0 €	522 €	0 €
	Optimum VT2012 (cas10)		33.164	225	99	256 (72%)	4.200 €	28 €	406 €	116 €
	Passif (cas23)		7.406	50	274	104 (29%)	58.955 €	399 €	502 €	20 €

Tableau 62 : comparaison consommation d'énergie, investissement et CGA pour les cas base, optimum et passif immeuble 7

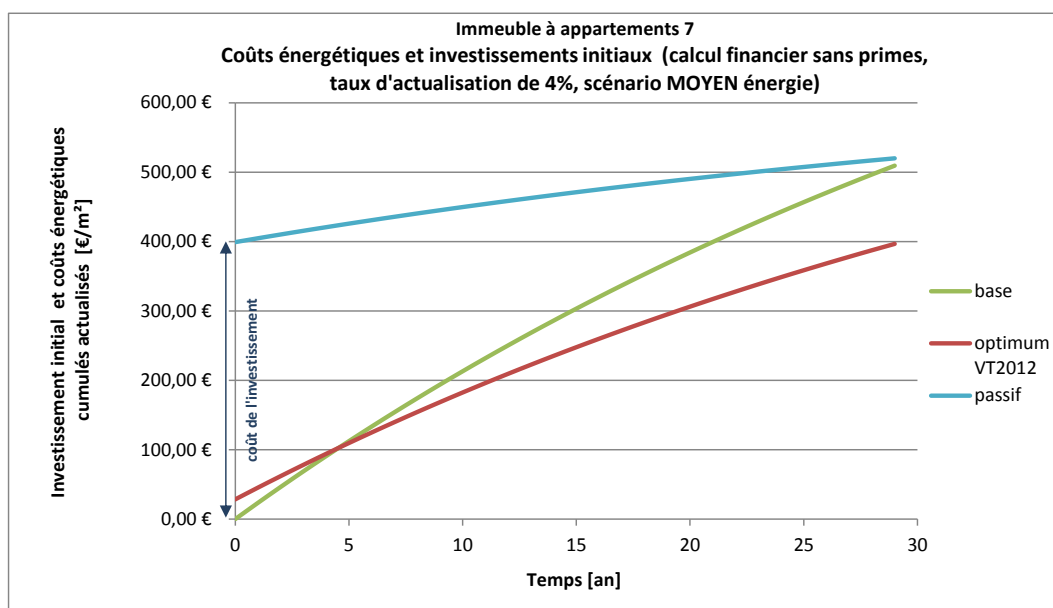


Figure 56 : coût de la consommation cumulée et investissements initiaux en fonction du temps - immeuble 7

Immeuble 8a (Dans le corps du texte)

Immeuble 8b (Dans le corps du texte)

Immeuble 9 (Dans le corps du texte)

Immeuble 10 (Dans le corps du texte)