



## COZEB 3

**Mise à jour et extension de l'étude CO-ZEB  
déterminant le niveau de performance énergétique  
optimal en fonction des coûts conformément à la  
Directive 2010/31/EU et analyse de sensibilité des  
résultats obtenus**



# DÉTERMINATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE OPTIMAL DES BÂTIMENTS EN FONCTION DES COÛTS

**Etude Cost-optimum 2023**





# DÉTERMINATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE OPTIMAL DES BÂTIMENTS EN FONCTION DES COÛTS

## Etude Cost-optimum 2023

**Client :**

SPW – TLPE - DBD

**Personnes de contact :**

Céline Renard et Marie-Eve Dorn

Rue des Brigades d'Irlande 1, 5100 Jambes

**Auteurs :**

Objectif Zéro : Sylvain Carbonnelle, Stéphanie Nourricier

Cecotepe (HEPL) : Stéphanie Monfils, Jonas Lambert, Isabelle Nijskens

Cap Construction : Pauline Bruge

**Date :**

13/12/2023

**Version :**

Version 1.14

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Glossaire</b>	<b>15</b>
<b>1. Contexte de l'étude</b>	<b>17</b>
<b>1.1. Exigences PEB minimales en Wallonie</b>	<b>18</b>
1.1.1. <i>Bâtiments neufs (nouvelles constructions)</i>	18
1.1.2. <i>Bâtiments existants</i>	20
<b>1.2. La stratégie wallonne à long-terme de rénovation énergétique des bâtiments</b>	<b>23</b>
<b>1.3. Le PACE 2030 de la Wallonie</b>	<b>23</b>
<b>1.4. Méthode de calcul de la performance énergétique</b>	<b>24</b>
<b>1.5. Le consortium auteur de l'étude</b>	<b>31</b>
<b>1.6. Objectifs de la mission</b>	<b>32</b>
<b>1.7. Périmètre de l'étude</b>	<b>32</b>
<b>2. Méthodologie</b>	<b>34</b>
<b>2.1. Consultation du secteur</b>	<b>34</b>
<b>2.2. Paramètres économiques utilisés et hypothèses retenues</b>	<b>34</b>
2.2.1. <i>Modes de calcul imposés par le Règlement Délégué de l'UE</i>	35
2.2.2. <i>Calcul du coût global actualisé</i>	38
2.2.3. <i>Taux d'actualisation</i>	39
2.2.4. <i>Coût de l'énergie et scénarios d'évolution</i>	42
2.2.5. <i>Coût de remplacement et valeur résiduelle</i>	47
2.2.6. <i>Primes, incitants fiscaux et TVA</i>	50
2.2.7. <i>Cadre pour l'estimation de la valeur des bâtiments de référence</i>	50
2.2.8. <i>Coûts des mesures d'amélioration</i>	53
2.2.9. <i>Coûts Opérationnels (OPEX)</i>	54
<b>2.3. Conditions climatiques</b>	<b>55</b>
<b>2.4. Définition des bâtiments de référence</b>	<b>55</b>
<b>2.5. Mesures – Variantes – Combinaisons – Groupes</b>	<b>56</b>
2.5.1. <i>Terminologie</i>	56
2.5.2. <i>Sets de mesures pour les bâtiments résidentiels</i>	57
<b>Pour les maisons unifamiliales individuelles existantes - HE :</b>	60
<b>Pour les maisons unifamiliales individuelles neuves - HN :</b>	62
<b>Pour les immeubles à appartements existants - IAE :</b>	64
<b>Pour les immeubles à appartements neufs - IAN :</b>	66
<b>La mesure photovoltaïque pour les bâtiments résidentiels</b>	67
2.5.3. <i>Sets de mesures pour les bâtiments non résidentiels</i>	67
<b>Pour les bureaux, écoles, hôtels et maisons de repos existants</b>	69
<b>Pour les bureaux, écoles, hôtels et maisons de repos neufs</b>	73
<b>La mesure photovoltaïque pour les bâtiments non résidentiels</b>	75

2.6. L'outil de calcul Cost-optimum (COT)	76
2.7. Limites de l'étude	76
2.7.1. Au niveau de la méthode	76
2.7.2. Au niveau des coûts	77
<b>3. Bâtiments de référence</b>	<b>78</b>
3.1. Maisons unifamiliales existantes (HE)	78
3.2. Maisons unifamiliales neuves (HN)	81
3.3. Immeubles à appartements existants (IAE)	82
3.4. Immeuble à appartements neufs (IAN)	84
3.5. Bureaux existants (BUE)	85
3.6. Bureaux neufs (BUN)	87
3.7. Etablissements scolaires existants (EE)	88
3.8. Etablissements scolaires neufs (EN)	88
3.9. Maisons de repos existantes (MRE)	90
3.10. Maison de repos neuves (MRN)	90
3.11. Hôtels existants (HOE)	90
3.12. Hôtels neufs (HON)	90
<b>4. Analyse des résultats</b>	<b>91</b>
<b>5. Analyse des résultats des habitations unifamiliales existantes</b>	<b>96</b>
5.1. HE1 - La maison vernaculaire - <1945	96
5.1.1. Bâtiment de référence	96
5.1.2. Combinaisons calculées	96
5.1.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois	96
5.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W/E_{spec}/K$ et U parois	97
5.2. HE2 - La maison type ouvrière 3 façades - < 1945	100
5.2.1. Bâtiment de référence	100
5.2.2. Combinaisons calculées	100
5.2.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois	100
5.2.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W/E_{spec}/K$ et U parois	100
5.3. HE3 - La maison type ouvrière mitoyenne - < 1945	103
5.3.1. Bâtiment de référence	103
5.3.2. Combinaisons calculées	103
5.3.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois	103
5.3.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W/E_{spec}/K$ et U parois	104
5.4. HE4 - La maison villageoise - < 1945	107
5.4.1. Bâtiment de référence	107
5.4.2. Combinaisons calculées	107
5.4.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois	107
5.4.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W/E_{spec}/K$ et U parois	108

<b>5.5. HE5 - La maison urbaine mitoyenne - &lt; 1945</b>	<b>110</b>
5.5.1. <i>Bâtiment de référence</i>	110
5.5.2. <i>Combinaisons calculées</i>	110
5.5.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	110
5.5.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	111
5.5.5. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec}</math> avec une installation photovoltaïque</i>	113
<b>5.6. HE6 - La villa des premières extensions urbaines – 1946-1970</b>	<b>116</b>
5.6.1. <i>Bâtiment de référence</i>	116
5.6.2. <i>Combinaisons calculées</i>	116
5.6.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	116
5.6.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	116
<b>5.7. HE7 - La villa de plain-pied – 1946-1970</b>	<b>120</b>
5.7.1. <i>Bâtiment de référence</i>	120
5.7.2. <i>Combinaisons calculées</i>	120
5.7.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	120
5.7.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	121
<b>5.8. HE8 - La maison bel étage mitoyenne – 1946-1970</b>	<b>124</b>
5.8.1. <i>Bâtiment de référence</i>	124
5.8.2. <i>Combinaisons calculées</i>	124
5.8.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	124
5.8.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	124
<b>5.9. HE9 - La villa 4 façades de type lotissement – 1971-1984</b>	<b>127</b>
5.9.1. <i>Bâtiment de référence</i>	127
5.9.2. <i>Combinaisons calculées</i>	127
5.9.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	127
5.9.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	127
<b>5.10. HE10 - La maison type barre de logement social – 1971-1984</b>	<b>130</b>
5.10.1. <i>Bâtiment de référence</i>	130
5.10.2. <i>Combinaisons calculées</i>	130
5.10.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	130
5.10.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	130
<b>5.11. HE11 - La villa 4 façades K70 – 1985-1995</b>	<b>133</b>
5.11.1. <i>Bâtiment de référence</i>	133
5.11.2. <i>Combinaisons calculées</i>	133
5.11.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	133
5.11.4. <i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_W / E_{spec} / K</math> et U parois</i>	134
<b>5.12. HE12 - La maison 3 façades K70 – 1985-1995</b>	<b>137</b>
5.12.1. <i>Bâtiment de référence</i>	137
5.12.2. <i>Combinaisons calculées</i>	137
5.12.3. <i>Niveau de performance cost-optimum U des parois</i>	137

5.12.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	137
<b>5.13. HE13 - La maison mitoyenne bel-étage K70 – 1985-1995</b>	<b>141</b>
5.13.1. Bâtiment de référence	141
5.13.2. Combinaisons calculées	141
5.13.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ des parois	141
5.13.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	141
<b>5.14. HE14 - La villa 4 façades K55 – 1996-2008</b>	<b>144</b>
5.14.1. Bâtiment de référence	144
5.14.2. Combinaisons calculées	144
5.14.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ des parois	144
5.14.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	144
<b>5.15. Observations globales pour les HE</b>	<b>148</b>
<b>5.16. Analyse transversale des résultats des habitations unifamiliales existantes</b>	<b>148</b>
 <b>6. Analyse des résultats des habitations unifamiliales neuves</b>	 <b>149</b>
<b>6.1. HN1 T1 - Maison neuve 4 façades maçonnerie traditionnelle</b>	<b>149</b>
6.1.1. Bâtiment de référence	149
6.1.2. Combinaisons calculées	149
6.1.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	150
6.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}$ avec une installation photovoltaïque	152
<b>6.2. HN1 T2 - Maison neuve 4 façades crépi sur isolant</b>	<b>155</b>
6.2.1. Bâtiment de référence	155
6.2.2. Combinaisons calculées	155
6.2.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	155
<b>6.3. HN1 T3 - Maison neuve 4 façades ossature bois</b>	<b>159</b>
6.3.1. Bâtiment de référence	159
6.3.2. Combinaisons calculées	159
6.3.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	159
<b>6.4. HN2 T1 - Maison neuve 4 façades avec cave maçonnerie traditionnelle</b>	<b>163</b>
6.4.1. Bâtiment de référence	163
6.4.2. Combinaisons calculées	163
6.4.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	163
<b>6.5. HN2 T2 - Maison neuve 4 façades avec cave crépi sur isolant</b>	<b>166</b>
6.5.1. Bâtiment de référence	166
6.5.2. Combinaisons calculées	166
6.5.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	166
<b>6.6. HN2 T3 - Maison neuve 4 façades avec cave ossature bois</b>	<b>169</b>
6.6.1. Bâtiment de référence	169
6.6.2. Combinaisons calculées	169
6.6.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w/E_{spec}/K$ et $U$ parois	169

<b>6.7.</b>	<b>HN3 T1- Maison neuve 3 façades maçonnerie traditionnelle</b>	<b>172</b>
6.7.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	172
6.7.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	172
6.7.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	172
<b>6.8.</b>	<b>HN3 T2- Maison neuve 3 façades crépi sur isolant</b>	<b>175</b>
6.8.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	175
6.8.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	175
6.8.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	175
<b>6.9.</b>	<b>HN3 T3 - Maison neuve 3 façades ossature bois</b>	<b>178</b>
6.9.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	178
6.9.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	178
6.9.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	178
<b>6.10.</b>	<b>HN4 T1 - Maison mitoyenne neuve maçonnerie traditionnelle</b>	<b>181</b>
6.10.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	181
6.10.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	181
6.10.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	181
<b>6.11.</b>	<b>HN4 T2 – Maison mitoyenne neuve crépi sur isolant</b>	<b>185</b>
6.11.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	185
6.11.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	185
6.11.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	185
<b>6.12.</b>	<b>HN4 T3 – Maison mitoyenne neuve ossature bois</b>	<b>189</b>
6.12.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	189
6.12.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	189
6.12.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	189
<b>6.13.</b>	<b>Analyse transversale des résultats des habitations unifamiliales neuves</b>	<b>192</b>
<b>7.</b>	<b>Analyse des résultats des immeubles à appartements existants</b>	<b>193</b>
<b>7.1.</b>	<b>IAE1 - Immeuble à appartements d'avant 1919</b>	<b>193</b>
7.1.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	193
7.1.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	193
7.1.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>U</math> des parois</i>	193
7.1.4.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	194
7.1.5.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec}</math> avec une installation photovoltaïque</i>	195
<b>7.2.</b>	<b>IAE2 - Maison divisée en appartements (&lt; 1919)</b>	<b>198</b>
7.2.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	198
7.2.2.	<i>Combinaisons calculées</i>	198
7.2.3.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>U</math> des parois</i>	198
7.2.4.	<i>Niveau de performance cost-optimum <math>E_w / E_{spec} / K</math> et <math>U</math> parois</i>	199
<b>7.3.</b>	<b>IAE3 - Maison divisée en appartements &amp; service au rez-de-chaussée (&lt; 1919)</b>	<b>202</b>
7.3.1.	<i>Bâtiment de référence</i>	202



7.3.2.	Combinaisons calculées	202
7.3.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	202
7.3.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	202
<b>7.4.</b>	<b>IAE4 - Maison divisée en appartements de 1919-1945</b>	<b>205</b>
7.4.1.	Bâtiment de référence	205
7.4.2.	Combinaisons calculées	205
7.4.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	205
7.4.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	206
<b>7.5.</b>	<b>IAE5 - Immeuble à appartements de 1946-1970</b>	<b>209</b>
7.5.1.	Bâtiment de référence	209
7.5.2.	Combinaisons calculées	209
7.5.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	209
7.5.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	210
<b>7.6.</b>	<b>IAE6 - Immeuble à appartements de 1946-1970</b>	<b>213</b>
7.6.1.	Bâtiment de référence	213
7.6.2.	Combinaisons calculées	213
7.6.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	213
7.6.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	214
<b>7.7.</b>	<b>IAE7 - Maison divisée en appartements de 1946-1970</b>	<b>217</b>
7.7.1.	Bâtiment de référence	217
7.7.2.	Combinaisons calculées	217
7.7.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	217
7.7.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	218
<b>7.8.</b>	<b>IAE9 - Immeuble à appartements d'après 1990</b>	<b>221</b>
7.8.1.	Bâtiment de référence	221
7.8.2.	Combinaisons calculées	221
7.8.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	221
7.8.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	222
<b>7.9.</b>	<b>IAE10 - Immeuble d'appartements d'après 1990</b>	<b>225</b>
7.9.1.	Bâtiment de référence	225
7.9.2.	Combinaisons calculées	225
7.9.3.	Niveau de performance cost-optimum U des parois	225
7.9.4.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	226
<b>7.10.</b>	<b>Analyse transversale des résultats des immeubles d'appartements existants</b>	<b>228</b>
<b>8.</b>	<b>Analyse des résultats des immeubles à appartements neufs</b>	<b>229</b>
<b>8.1.</b>	<b>IAN1 - Immeuble de 6 appartements neuf</b>	<b>229</b>
8.1.1.	Bâtiment de référence	229
8.1.2.	Combinaisons calculées	229
8.1.3.	Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec} / K$ et U parois	230

8.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W / E_{spec}$ avec une installation photovoltaïque	232
<b>9. Analyse des résultats des immeubles de bureaux existants</b>	<b>235</b>
9.1. BUE1 - Grand bureau existant (avant 1945)	235
9.1.1. Bâtiment de référence	235
9.1.2. Combinaisons calculées	235
9.1.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ des parois	235
9.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W$	236
9.1.5. Niveau de performance cost-optimum $E_W$ avec une installation photovoltaïque	238
9.2. BUE2 - Petit bureau existant (1970)	241
9.2.1. Bâtiment de référence	241
9.2.2. Combinaisons générées par le COT	241
9.2.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ max des parois	241
9.2.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W$	241
9.3. BUE3 - Petit bureau existant (1984)	245
9.3.1. Bâtiment de référence	245
9.3.2. Combinaisons générées par le COT	245
9.3.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ max des parois	245
9.3.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W$	246
9.4. BUE4 - Bureau existant (1996)	249
9.4.1. Bâtiment de référence	249
9.4.2. Combinaisons générées par le COT	249
9.4.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ max des parois	249
9.4.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W$	249
9.5. BUE5 - Bureau existant (<1945)	253
9.5.1. Bâtiment de référence	253
9.5.2. Combinaisons générées par le COT	253
9.5.3. Niveau de performance cost-optimum $U$ max des parois	253
9.5.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W$	254
<b>10. Analyse des résultats des immeubles de bureaux neufs</b>	<b>257</b>
10.1. BUN1 - bâtiment de bureau 4 façades, neuf	257
10.1.1. Bâtiment de référence	257
10.1.2. Combinaisons générées par le COT	257
10.1.3. Niveau de performance cost-optimum $E_W$ et $K$ du bâtiment	257
10.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_W$ avec une installation photovoltaïque	260
<b>11. Analyse des résultats des écoles existantes</b>	<b>262</b>
11.1. EE1 – Ecole maternelle/primaire (<1945) de surface < 5000 m <sup>2</sup>	262

11.1.1. Bâtiment de référence	262
11.1.2. Combinaisons générées par le COT	262
11.1.3. Niveau de performance cost-optimum $U_{max}$ des parois	262
11.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$	263
11.1.5. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque	265
11.2. EE2 – Ecole maternelle primaire (1950) de surface < 5000 m <sup>2</sup>	268
11.2.1. Bâtiment de référence	268
11.2.2. Combinaisons générées par le COT	268
11.2.3. Niveau de performance cost-optimum $U_{max}$ des parois	268
11.2.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$	269
11.3. EE3 – Ecole secondaire (> 1970) surface comprise entre 5.000 et 10.000 m <sup>2</sup>	271
11.3.1. Bâtiment de référence	271
11.3.2. Combinaisons générées par le COT	271
11.3.3. Niveau de performance cost-optimum $U_{max}$ des parois	271
11.3.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$	272
11.4. EE4 – Bâtiment universitaire (1968) d'une surface d'environ 10.000 m <sup>2</sup>	275
11.4.1. Bâtiment de référence	275
11.4.2. Combinaisons générées par le COT	275
11.4.3. Niveau de performance cost-optimum $U_{max}$ des parois	275
11.4.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$	276
<b>12. Analyse des résultats des écoles neuves</b>	<b>279</b>
12.1. EN1 – Ecole maternelle d'une surface < 5000 m <sup>2</sup>	279
12.1.1. Bâtiment de référence	279
12.1.2. Combinaisons générées par le COT	279
12.1.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ et $K$ du bâtiment	279
12.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque	282
12.2. EN2 – Ecole fondamentale de taille moyenne (3.000 m <sup>2</sup> )	285
12.2.1. Bâtiment de référence	285
12.2.2. Combinaisons générées par le COT	285
12.2.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ et $K$ du bâtiment	285
<b>13. Analyse des résultats des maisons de repos existantes</b>	<b>288</b>
13.1. MRE1 – Maison de repos existante 1	288
13.1.1. Bâtiment de référence	288
13.1.2. Combinaisons générées par le COT	288
13.1.3. Niveau de performance cost-optimum $U_{max}$ des parois	288
13.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$	289
13.1.5. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque	291

<b>13.2. MRE2 – Maison de repos existante 2</b>	<b>294</b>
<b>13.2.1. Bâtiment de référence</b>	294
<b>13.2.2. Combinaisons générées par le COT</b>	294
<b>13.2.3. Niveau de performance cost-optimum <math>U_{max}</math> des parois</b>	294
<b>13.2.4. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math></b>	295
<b>14. Analyse des résultats des maisons de repos neuves</b>	<b>298</b>
<b>14.1. MRN1 – Maison de repos neuve 1</b>	298
<b>14.1.1. Bâtiment de référence</b>	298
<b>14.1.2. Combinaisons générées par le COT</b>	298
<b>14.1.3. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math></b>	298
<b>14.1.4. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math> avec une installation photovoltaïque</b>	300
<b>15. Analyse des résultats des hôtels existants</b>	<b>303</b>
<b>15.1. HOE1 – Hôtel existant 1</b>	303
<b>15.1.1. Bâtiment de référence</b>	303
<b>15.1.2. Combinaisons générées par le COT</b>	303
<b>15.1.3. Niveau de performance cost-optimum <math>U_{max}</math> des parois</b>	303
<b>15.1.4. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math></b>	304
<b>15.2. HOE2 – Hôtel existant 2</b>	307
<b>15.2.1. Bâtiment de référence</b>	307
<b>15.2.2. Combinaisons générées par le COT</b>	307
<b>15.2.3. Niveau de performance cost-optimum <math>U_{max}</math> des parois</b>	307
<b>15.2.4. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math></b>	308
<b>15.2.5. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math> avec une installation photovoltaïque</b>	310
<b>16. Analyse des résultats des hôtels neufs</b>	<b>313</b>
<b>16.1. HON1 – Hôtel neuf 1</b>	313
<b>16.1.1. Bâtiment de référence</b>	313
<b>16.1.2. Combinaisons générées par le COT</b>	313
<b>16.1.3. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math></b>	313
<b>16.1.4. Niveau de performance cost-optimum <math>E_w</math> avec une installation photovoltaïque</b>	315
<b>17. Conclusions générales de l'étude sur les bâtiments résidentiels</b>	<b>317</b>
<b>17.1. Maisons unifamiliales existantes (HE)</b>	320
<b>17.2. Maisons unifamiliales neuves (HN)</b>	324
<b>17.3. Immeubles à appartements existants (IAE)</b>	327
<b>17.4. Immeubles de 6 appartements neuf (IAN)</b>	330
<b>17.5. Résumé des niveaux optimaux</b>	332

17.6. Justification des écarts	333
<b>18. Conclusions générales de l'étude sur les bâtiments non résidentiels</b>	<b>335</b>
18.1. Bureaux existants (BUE)	335
18.2. Bureaux neufs (BUN)	338
18.3. Etablissements scolaires existants (EE)	339
18.4. Etablissements scolaires neufs (EN)	341
18.5. Maisons de repos existantes (MRE)	343
18.6. Maisons de repos neuves (MRN)	344
18.7. Hôtels existants (HOE)	346
18.8. Hôtels neufs (HON)	347
18.9. Conclusions générales sur les systèmes	349
18.10. Résumé des niveaux optimaux	352
18.11. Justification des écarts	353
<b>19. Etude de sensibilité</b>	<b>357</b>
19.1. Introduction	357
19.2. Hypothèses	357
19.3. Résultats	358
19.3.1. Maison unifamiliale existante HE5	361
19.3.2. Immeuble à appartements existant IAE1	367
19.3.3. Immeuble à appartements neuf IAN1	373
19.3.4. Ecole existante EE1	379
19.3.5. Maison de repos neuve MRN1	386
19.4. Synthèse	391
19.4.1. Le taux d'actualisation	392
19.4.2. L'évolution des prix de l'énergie	393
19.5. Conclusions générales de l'étude de sensibilité	395
<b>Liste des tableaux</b>	<b>396</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>398</b>
<b>Références</b>	<b>400</b>
<b>Annexe A : Descriptif des bâtiments de référence</b>	<b>401</b>
<b>Annexe B : Groupes constructifs</b>	<b>402</b>
<b>Annexe C : Tableaux de résultats</b>	<b>407</b>
<b>Annexe D : Analyses transversales PER</b>	<b>408</b>
<b>Annexe E : Tableaux pour la CE</b>	<b>411</b>

<b>Annexe F :</b>	<b>Résultats macroéconomiques et financiers de l'étude de sensibilité sur le taux d'actualisation et les scénarii d'évolution des prix de l'énergie</b>	<b>412</b>
-------------------	---	------------



# GLOSSAIRE

<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>BNC</b>	Besoin net en chaleur
<b>BNF</b>	Besoin net en refroidissement
<b>Combinaison</b>	Combinaison de variantes calculée par le COT
<b>COT</b>	Cost-optimum Tool
<b>Directive PEB</b>	Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments
<b>ECS</b>	Eau chaude sanitaire
<b>EER</b>	Energy Efficiency Ratio
<b>Espec (E_Char_Surf)</b>	La consommation spécifique en énergie primaire, calculée par unité PEB et exprimée en kWh/m <sup>2</sup> an. correspond au rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire de l'unité PEB et la surface totale de plancher chauffée ou climatisée (Ach) de cette unité
<b>Ew</b>	Le niveau de consommation d'énergie primaire de l'unité PEB ; correspond au rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire de l'unité et une consommation annuelle d'énergie primaire de référence, multiplié par 100
<b>FP</b>	Front de Pareto
<b>Groupe constructif</b>	Choix constructif au niveau de l'enveloppe, permettant d'atteindre la mesure d'amélioration (ex : U de paroi) à un coût déterminé
<b>K</b>	Niveau d'isolation thermique global d'un bâtiment
<b>Mesure</b>	Modification de la performance énergétique d'un élément de bâtiment (enveloppe ou système)
<b>PAC</b>	Pompe à chaleur
<b>Partie fonctionnelle</b>	Partie d'un secteur énergétique délimitée par des parois qui englobent des espaces adjacents ayant la même activité
<b>PEB</b>	Performance Énergétique des Bâtiments
<b>PER</b>	Performance Énergétique Résidentielle. Acronyme utilisé pour qualifier plus facilement la méthode de détermination du niveau de consommation d'énergie primaire des unités résidentielles (annexe ou méthode PER) d'une part, et les unités résidentielles - logement individuel (unité PER) - d'autre part

<b>PEN</b>	Performance Energétique Non résidentielle. Acronyme utilisé pour qualifier plus facilement la méthode de détermination du niveau de consommation d'énergie primaire des unités non résidentielles (méthode PEN) d'une part, et les unités non résidentielles ou résidentielles -logement collectif (unité PEN) - d'autre part
<b>PV</b>	Solaire photovoltaïque
<b>Secteur énergétique</b>	Ensemble d'espaces du volume protégé qui : <ul style="list-style-type: none"> <li>- appartiennent à la même zone de ventilation</li> <li>- sont dotés du même type de système d'émission de chaleur (à moins que, dans le cas de chauffage central, l'on calcule avec le rendement d'émission le plus mauvais)</li> <li>- et sont chauffés par le même appareil producteur de chaleur (ou, le cas échéant, la même combinaison d'appareils producteurs de chaleur)</li> </ul>
<b>SEQE-UE</b>	Système d'Echange de Quotas d'Emission de l'UE
<b>SRLT</b>	Stratégie Rénovation Long Terme ( objectif Espec : 85 kWh/m <sup>2</sup> an pour les bâtiments résidentiels)
<b>U</b>	Coefficient de transmission thermique exprimé en W/m <sup>2</sup> K. il caractérise la performance thermique d'une paroi et correspond à la quantité de chaleur qui traverse 1 m <sup>2</sup> de paroi, par seconde, pour un écart de température de 1°C entre l'intérieur et l'extérieur
<b>Umax</b>	Valeur U maximale autorisée par la réglementation PEB sur base du type de paroi, de sa composition et de son environnement
<b>v50</b>	Débit de fuite (volume d'air qui s'échappe par les défauts d'étanchéité du bâtiment par heure) pour une différence de pression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur par unité de surface de l'enveloppe ; exprimé en m <sup>3</sup> h /m
<b>Variante</b>	Combinaison de mesures (enveloppe et/ou systèmes) ou application d'une mesure donnée à tous les éléments d'un même type

## 1. Contexte de l'étude

La présente étude s'inscrit dans la lignée des études précédentes réalisées pour la Région wallonne (COZEB I, COZEB II et COZEB extension).

Son objectif est de répondre à l'article 5 de la Directive 2010-31-UE, conformément au cadre méthodologique comparatif établissant les règles de calcul des niveaux optimaux d'exigences de performance énergétique en fonction des coûts, mis en place par la Commission Européenne afin de comparer les résultats des Etats Membres en matière de performance énergétique de leur parc de bâtiments neufs et existants.

La refonte de la directive sur la Performance énergétique des Bâtiments 2010/31/EU précise que si les exigences minimales de performance énergétique imposées par les Etats Membres sont de plus de 15% en deçà des résultats du calcul des niveaux d'exigences PEB minimum optimaux en fonction des coûts, l'Etat Membre doit justifier cette différence ou prévoir des mesures appropriées pour la réduire.

Dans ce cadre, la Wallonie a imposé des exigences PEB minimales en vue d'atteindre un optimum de coût entre les mesures d'amélioration de la performance et les coûts évités actualisés sur une période de 20 ou 30 ans. Ces exigences sont revues tous les cinq ans.

Afin de garantir la fiabilité de l'étude et des données d'entrées des analyses, le secteur de la construction a été impliqué dès le départ, par le biais de consultations qui avait pour objet :

La détermination et la validation des bâtiments de référence ;

La détermination et la validation des coûts utilisés aux fins de l'étude (répertoriés dans une base de données des coûts de rénovation) ;

La détermination et la validation des mesures d'amélioration énergétique.

## 1.1. Exigences PEB minimales en Wallonie

### 1.1.1. Bâtiments neufs (nouvelles constructions)

Depuis le 1er janvier 2021, les bâtiments à construire doivent atteindre le standard NZEB (Nearly zero energy building) ou Q-ZEN (bâtiment dont la consommation est quasi nulle ou bâtiment Quasi Zéro Energie). Les exigences sont donc renforcées pour les nouvelles constructions.

Pour les **unités PER** (résidentielles) nouvellement construites, les exigences sont les suivantes :

Les éléments de construction respectent les valeurs  $U_{max}$  déterminées par l'arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments (annexe C1 : valeurs **U maximales** admissibles ou valeurs R minimales à réaliser)

- **Le niveau  $K \leq 35$**
- **Le niveau  $E_w$  n'excède pas 45 ;**
- **Le  $E_{spec}$  n'excède pas 85 kWh/m<sup>2</sup>an.**

Pour les **unités PEN** (non résidentielles) neuves, le  $E_{spec}$  n'est pas d'application ; des exigences en termes de **K**,  **$U_{max}$**  et  **$E_w$**  sont d'application pour les parties fonctionnelles depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2017.

Le niveau  $E_w$  requis pour l'unité PEN est calculé au prorata des exigences (90/45) propres à chacune des parties fonctionnelles, tel que présenté dans le Tableau 2.

Ces exigences constituent une étape en vue d'atteindre un niveau de consommation des bâtiments à construire « *nearly zero energy* » ou quasi nul en énergie primaire (Q-ZEN) à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2021.

Ces exigences sont d'application pour les autorités publiques depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2019.

**Tableau 1: Exigences PEB d'application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021 en fonction de la nature des travaux :**

NATURE DES TRAVAUX SOU MIS À PERMIS				Valeurs U	Niveau K	Niveau E <sub>W</sub>	Consommation spécifique	Ventilation	Surchauffe
				U	K	E <sub>W</sub>	E <sub>cons</sub>	V	S
Procédure AVEC responsable PEB	Bâtiment neuf ou assimilé	PER	Maisons unifamiliales Appartements	≤ U <sub>max</sub> (1)	≤ K35 + nœuds constructifs	45	85 kWh/m <sup>2</sup> a n	Annexe C2	< 6.500 Kb
		PEN	Bureaux Services Enseignement Hôpitaux HORECA Commerces Hébergements collectifs ---			90/45 (2)	Annexe C3		
		I	Industriel		≤ K55 + nœuds constructifs				
	Rénovation importante (4)			Uniquement éléments modifiés et neufs				(3)	

Procédure SANS responsable PEB Déclaration PEB simplifiée	Rénovation simple, y compris Changement d'affectation chauffé > chauffé (4)	≤ U <sub>max</sub> (1) des éléments modifiés et neufs			(3)	
	Changement d'affectation non chauffé > chauffé (4)		≤ K65 + nœuds constructifs		Annexe C2 ou C3	

Tableau 1: Exigences PEB d'application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021 en fonction de la nature des travaux

(1) Exigences renforcées pour certaines parois - cf. tableau des valeurs U ci-dessous.

(2) La performance de l'unité PEN est calculée au prorata des exigences (90/45) propres à chacune des parties fonctionnelles. Voir ci-dessous.

(3) Selon l'[annexe C2](#)<sup>1</sup> ou [C3](#)<sup>2</sup> de la réglementation PEB, les exigences doivent être respectées pour les amenées et les extractions d'air dans les nouveaux locaux et uniquement les amenées d'air dans les locaux existants lorsque les châssis de porte ou fenêtre sont remplacés.

(4) Cas particuliers.

La rénovation simple ou importante d'un bâtiment industriel n'est soumise à aucune exigence PEB.

<sup>1</sup> Annexe C2 - DISPOSITIFS DE VENTILATION DANS LES BÂTIMENTS RESIDENTIELS (Annexe VHR)

<sup>2</sup> Annexe C3 - DISPOSITIFS DE VENTILATION DES IMMEUBLES NON RESIDENTIELS : Méthode de détermination et exigences (Annexe VHN)

Tout bâtiment industriel, initialement chauffé ou non chauffé pour les besoins de l'homme qui, par changement de destination, acquiert une destination de logement individuel, de bureaux et de services ou d'enseignement, est soumis aux mêmes exigences que le changement de destination - non chauffé > chauffé (niveau K, valeur U et ventilation).

Fonctions dans l'unité PEN		$E_{W, fct f}$
Hébergement		90
Bureau		45
Enseignement		45
Soins de santé	Avec occupation nocturne	90
	Sans occupation nocturne	90
	Salle d'opération	90
Rassemblement	Occupation importante	90
	Faible occupation	90
	Cafétéria / Réfectoire	90
Cuisine		90
Commerce / Service		90
Installations sportives	Hall de sport / Salle de gymnastique	90
	Fitness / Danse	90
	Sauna / Piscine	90
Locaux techniques		90
Communs		90
Autre		90
Inconnue		90

Tableau 2 : Exigences EW 2021 pour les parties fonctionnelles des unités PEN neuves

#### 1.1.2. Bâtiments existants

Pour les **bâtiments existants**, la Wallonie impose des exigences minimales à respecter lors de toute transformation (ajout, remplacement, rénovation) au niveau des éléments de l'enveloppe lorsque ces travaux influencent la performance énergétique de l'élément ( $U_{max}$ ) ainsi qu'au niveau de la ventilation des espaces secs dans lesquels les châssis sont remplacés, ou dans tous les nouveaux espaces (secs ou humides).



Pour les **bâtiments existants** PER/PEN (à rénover), les **valeurs U<sub>max</sub> en vigueur** depuis le 1er janvier 2017 au niveau des différentes parois du bâtiment sont reprises dans le Tableau 3.

Elément de construction		U <sub>max</sub> [W/m <sup>2</sup> K]
<b>Parois délimitant le volume protégé</b>		
	Toitures et plafonds	0.24
	Murs (1)	0.24
	Planchers (1)	0.24
	Portes et portes de garage	2.00
	Fenêtres :	
	- Ensemble châssis et vitrage	1.50
	- Vitrage uniquement	1.10
	Murs-rideaux :	
	- Ensemble châssis et vitrage	2.00
	- Vitrage uniquement	1.10
	Parois transparentes/translucides autres que le verre :	
	- Ensemble châssis et partie transparente	2.00
	- Partie transparente uniquement	1.40
	(ex : coupole de toit en polycarbonate,...)	
	Briques de verre	2.00
<b>Parois entre 2 volumes protégés situés sur des parcelles adjacentes (2)</b>		1.00
<b>Parois opaques à l'intérieur du volume protégé ou adjacentes à un volume protégé sur la même parcelle (3)</b>		1.00

Tableau 3 : Exigences U<sub>max</sub> applicables en rénovation depuis le 1er janvier 2017

(1) Pour les parois en contact avec le sol, la valeur U tient compte de la résistance thermique du sol et doit être calculé conformément aux spécifications fournies à l'annexe B1 de l'Arrêté.

(2) À l'exception des portes et des fenêtres

(3) Parois opaques (à l'exception des portes et portes de garage) :

- entre unités d'habitations distinctes ;
- entre unités d'habitation et espaces communs (cage d'escaliers, hall d'entrée, couloirs,...) ;
- entre unités d'habitation et espaces à affectation non résidentielle ;
- entre espaces à affectation industrielle et espaces à affectation non industrielle.

La réglementation PEB vise également à garantir la performance des systèmes techniques installés, remplacés ou modernisés, en leur appliquant des exigences de **rendement**, de **calorifugeage** et de **comptage énergétique**. Depuis le 1er mai 2016, les exigences listées ci-dessous s'appliquent aux systèmes HVAC (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, ventilation).

Travaux soumis à permis ou non		Performance	Calorifugeage	Comptage énergétique
Bâtiments existants	Installation Modernisation Remplacement	Exigence systèmes – Annexe C4		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chaudières gaz</li> <li>- Chaudières mazout</li> <li>- Pompes à chaleur</li> <li>- Chauffage électrique direct</li> <li>- ECS électrique</li> <li>- Machines à eau glacée</li> <li>- Récupérateur de chaleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conduites d'eau chaude</li> <li>- Conduites d'eau glacée</li> <li>- Conduits d'air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comptage par installation</li> <li>- Comptage entre bâtiments</li> <li>- Comptage entre unités PEB</li> </ul>
Bâtiments à construire	Installation	-	-	Uniquement <sup>(1)</sup> : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comptage entre bâtiments</li> <li>- Comptage entre unités PEB</li> </ul>

Tableau 4 : Exigences en vigueur au niveau des systèmes HVAC depuis le 1er mai 2016

## 1.2. La stratégie wallonne à long-terme de rénovation énergétique des bâtiments

En application de la Directive Efficacité Énergétique 2012/27/EU (art. 4), le SPW, Département de l'Énergie, Direction du Bâtiment Durable, a élaboré avec le soutien de CLIMACT et en collaboration avec les parties prenantes, la **Stratégie wallonne à long terme pour la rénovation énergétique des bâtiments**. Celle-ci a été actée par le Gouvernement wallon le 20 avril 2017.

Elle a été mise à jour pour répondre à la Directive 0218/844/EU et a été actée par le Gouvernement wallon le 12 novembre 2020.

**Les objectifs** de la stratégie sont les suivants :

- Pour les logements : tendre vers le **label PEB A (Espec de 85 kWh/m²an)** décarboné en moyenne pour 2050 pour le privé et pour 2040 pour le secteur public.
- Pour le secteur tertiaire : tendre pour 2040 vers un parc de bâtiments tertiaires efficace en énergie et neutre en carbone.

## 1.3. Le PACE 2030 de la Wallonie

Le projet de **Plan Air Climat Énergie** 2030 de la Wallonie proposé en septembre 2022 et adopté en première lecture en décembre 2022 est en cours de consultation des acteurs en vue d'une adoption définitive en mars 2023.

Dans ce PACE révisé, les politiques et mesures ont été regroupées dans 10 thématiques dont :

- Sortir des énergies fossiles ;
- Déployer massivement les énergies renouvelables ;
- Accélérer et massifier la rénovation des bâtiments.

Pour sortir des énergies fossiles, le projet de PACE propose de sortir du charbon et du **mazout** pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des bâtiments (résidentiels et non-résidentiels/tertiaires) selon l'échéancier suivant pour la fin d'installation de nouveaux appareils de chauffage au mazout et au charbon :

- Bâtiments neufs : charbon et mazout au 01/01/2024
- Bâtiments existants (lors du remplacement d'installations existantes) :
  - Charbon en 2024
  - Mazout en 2025, sauf dérogation jusqu'en 2030 en cas d'impossibilité technique d'alternatives

Outre le charbon et le mazout, il est nécessaire de réduire puis d'annuler à terme l'usage de toutes les énergies fossiles, y compris le **gaz non-renouvelable**.

Une stratégie de sortie du gaz non-renouvelable pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des bâtiments (résidentiels et non-résidentiels) sera donc définie d'ici à décembre 2023. Celle-ci tiendra compte de la facilité d'accès aux solutions non-fossiles et du développement de la production de gaz renouvelable. Elle prendra en

compte la nécessité de conserver un réseau de distribution ad hoc pour les gaz renouvelables. Elle établira également un calendrier avec des objectifs de réductions successives en 2025 et 2030.

Pour accélérer et massifier la rénovation des bâtiments, le projet de PACE propose de mettre en place une réglementation d'ambition graduelle et croissante (pour la rénovation et le neuf).

Ce qui se traduit pour les bâtiments existants en la mise en place d'obligations de rénovation, phasées dans le temps (interdiction des labels les plus bas et obligations en cas de changement de propriété et/ou mise en location), tant pour le résidentiel que pour le tertiaire, et par le **renforcement des normes énergétiques en cas de rénovation de bâtiments.**

Pour les bâtiments neufs, cela se traduit par le renforcement de la performance énergétique des bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire, en passant du label actuel Q-ZEN (quasi zéro énergie) au label "ZEN" (Zéro ENergie et zéro émission de CO<sub>2</sub>) en 2027 pour les bâtiments publics et en 2030 pour les bâtiments privés ; un label intermédiaire dès 2024 "ZEN-ready" permettra aux bâtiments neufs construits d'atteindre facilement le label ZEN quand il sera d'application.

Les indicateurs permettant de définir un bâtiment ZEN ne sont pas encore connus à ce jour.

#### 1.4. Méthode de calcul de la performance énergétique

La méthode de calcul de la performance énergétique est annexée à l'Arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014 portant exécution du Décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments.

Les niveaux de confort intérieur pris en compte pour les saisons d'hiver et d'été sont :

- Bâtiments résidentiels : Température : 18°C pour les besoins en chauffage ; 23°C pour les besoins en refroidissement ;
- Bâtiments non résidentiels : les niveaux de confort en fonction des parties fonctionnelles sont repris dans les tableaux ci-dessous :

Fonctions		$\theta_{i,heat,fct \text{ f, setpoint}}$ (°C)	$\theta_{i,heat,fct \text{ f, avg}}$ (°C)
Hébergement		19,0	
Bureaux		21,0	16,8
Enseignement		21,0	16,8
Soins de santé	Avec occ. nocturne	23,0	
	Sans occ. nocturne	23,0	19,5
	Salle d'opération	19,0	
Rassemblement	Occupation importante	21,0	18,2
	Faible occupation	21,0	18,2
	Cafétéria / Réfectoire	21,0	16,8
Cuisine		19,0	16,4
Commerce / Services		21,0	17,6
Installations sportives	Hall de sport / Gymnase	13,0	
	Fitness / Danse	21,0	18,0
	Sauna / Piscine	27,0	22,5
Locaux techniques		21,0	
Communs		21,0	Déterminée comme ci-dessous
Autre		21,0	16,8
Inconnue		21,0	18,2

Tableau 5 : Température de consigne pour le chauffage et température de consigne intérieure moyenne pour les calculs de chauffage, par fonction.

Fonctions		$\theta_{i,cool,fat} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\theta_{i,cool,fat} \text{ } ^\circ\text{C}$
Hébergement		25,0	
Bureaux		25,0	27,1
Enseignement		25,0	27,1
Soins de santé	Avec occ. nocturne	23,0	
	Sans occ. nocturne	23,0	25,1
	Salle d'opération	23,0	
Rassemblement	Occupation importante	25,0	26,4
	Faible occupation	25,0	26,4
	Cafétéria / Réfectoire	25,0	27,1
Cuisine		25,0	26,9
Commerce / Services		24,0	25,7
Installations sportives	Hall de sport / Gymnase	25,0	26,5
	Fitness / Danse	25,0	26,5
	Sauna / Piscine	Pas de calcul de refroidissement	
Locaux techniques		Pas de calcul de refroidissement	
Communs		25,0	Déterminée comme ci-dessous
Autre		25,0	27,1
Inconnue		25,0	26,4

Tableau 6: Température intérieure de consigne pour le refroidissement des espaces avec refroidissement actif et température intérieure moyenne pour les calculs de refroidissement des espaces avec refroidissement actif, par fonction.

- Qualité de l'air intérieur, norme de ventilation assurant un débit de renouvellement d'air minimum.

La méthode de calcul est décrite dans les documents suivants :

Annexe A1 - Méthode de calcul pour les bâtiments neufs résidentiels :

<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-a1-per-2021-fr.pdf?ID=66859&saveFile=true>

Annexe A3 - Méthode de calcul pour les bâtiments neufs non résidentiels :

<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-a3-pen-2021-fr-version-coordonnee.pdf?ID=66860&saveFile=true>

Annexe B1 - Méthode de calcul des pertes par transmission (pour tous les bâtiments) :

<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-b1-drt-2021-fr-version-coordonnee.pdf?ID=66861&saveFile=true>

Annexe B2 - Méthode de calcul des pertes par les nœuds constructifs (pour tous les bâtiments) :

<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/agw-peb-b2-annexe-nc-2019-fr.pdf?ID=55326&saveFile=true>



La méthode de calcul reprend pas à pas des caractéristiques énergétiques de chaque unité PEB. Suivant la destination de cette dernière, la méthode est plus ou moins détaillée.

### 1. Besoins nets d'énergie pour le chauffage

Dans un premier temps, la méthode de calcul PEB évalue les besoins nets en énergie pour le chauffage pour chaque secteur énergétique (cf. glossaire) présent au sein de l'unité PEB compte tenu :

- d'une part, des pertes :
  - par transmission de chaleur au travers des parois et des nœuds constructifs ;
  - dues aux in/exfiltrations d'air ;
  - générées par la ventilation hygiénique des locaux ;
- d'autre part, des gains :
  - solaires ;
  - internes dus à l'occupation de l'unité ;
- et de l'inertie.

### 2. Besoins bruts et consommation d'énergie finale pour le chauffage

La méthode de calcul évalue, pour chaque secteur énergétique présent au sein de l'unité PEB, les besoins bruts en énergie, compte tenu des besoins nets et des caractéristiques du système de chauffage installé liées au mode de distribution, d'émission, et de stockage éventuel.

Ensuite, la méthode de calcul détermine, pour chaque secteur énergétique présent au sein de l'unité PEB, la consommation d'énergie finale compte tenu des besoins bruts en énergie, de la contribution éventuelle d'un système solaire thermique et des performances du ou des producteurs installés (cf. chaudière, pompe à chaleur, chauffage local...).

### 3. Besoins nets, bruts et consommation d'énergie finale pour l'eau chaude sanitaire

Dans les unités résidentielles (PER) neuves ou assimilées à du neuf, les besoins nets en énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS) sont évalués sur une base forfaitaire en fonction du volume protégé de l'unité.

Dans les unités non résidentielles (PEN) neuves ou assimilées à du neuf, les besoins nets en énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS) sont évalués par partie fonctionnelle et ne sont définis qu'en présence de douche/baignoire ou évier de cuisine :

- pour les douches et les baignoires, la méthode de calcul détermine les besoins nets en ECS par douche ou baignoire compte tenu de la fonction desservie ;
- pour les éviers de cuisine, la méthode de calcul détermine les besoins nets en ECS compte tenu du nombre de repas préparés par service, du nombre de service assurés par jour et de la fonction desservie.

Que ce soit pour les unités PER ou PEN, la méthode de calcul détermine les besoins bruts en énergie pour l'ECS selon le mode de distribution de l'eau chaude et le mode de puisage. Ensuite, la méthode de calcul détermine la consommation d'énergie finale pour l'ECS compte tenu des besoins bruts en énergie, de la contribution éventuelle d'un système solaire thermique et des performances du ou des producteurs installés (cf. chaudière, pompe à chaleur, chauffage local...).

#### 4. Consommation d'énergie finale pour les auxiliaires

La consommation d'énergie des auxiliaires est comptabilisée dans le calcul de l'énergie primaire consommée par le bâtiment. La méthode de calcul distingue les consommations d'énergie des auxiliaires :

- pour la production de chauffage et d'ECS ;
- pour la distribution de chauffage, l'ECS et le refroidissement (PEN) ;
- pour la ventilation.

#### 5. Besoins nets pour le refroidissement

Dans un premier temps, la méthode de calcul PEB évalue les besoins nets en énergie pour le refroidissement pour chaque secteur énergétique présent au sein de l'unité PEB compte tenu :

- d'une part, des pertes :
  - par transmission de chaleur au travers des parois et des nœuds constructifs ;
  - dues aux in/exfiltrations d'air ;
  - générées par la ventilation hygiénique des locaux ;
- d'autre part, des gains :
  - solaires ;
  - internes dus à l'occupation de l'unité ;
- et de l'inertie.

#### 6. Consommation d'énergie finale pour le refroidissement (bâtiments résidentiels)

Dans les unités PER neuves ou assimilées à du neuf, un besoin net pour le refroidissement est déterminé dans 2 cas :

- soit lorsqu'un système de refroidissement actif est installé dans l'unité. Qu'il y ait ou non risque de surchauffe, on tient entièrement compte des besoins nets de refroidissement ;
- soit lorsque l'unité présente un risque de surchauffe, même si l'on n'installe pas de système de refroidissement actif, on tient compte d'un besoin net fictif pour le refroidissement qui est équivalent au risque de surchauffe. Ensuite, la méthode détermine la consommation d'énergie finale pour le refroidissement compte tenu des besoins nets et d'un rendement par défaut du système de refroidissement.

#### 7. Consommation d'énergie finale pour le refroidissement (bâtiments non résidentiels)

Dans les unités PEN neuves ou assimilées à du neuf, un besoin net pour le refroidissement est comptabilisé dans 2 cas :

- soit lorsqu'un système de refroidissement actif est installé dans l'unité ;
- soit lorsqu'il y a un excédent de gains (solaires et internes) par rapport aux pertes (par transmission et ventilation). Même si l'on n'installe pas de système de refroidissement actif, on tient compte d'un besoin net fictif pour le refroidissement.

Ensuite, la méthode détermine les besoins bruts pour le refroidissement compte tenu des besoins nets et du rendement du système.

Enfin, la consommation d'énergie finale pour le refroidissement est calculée compte tenu des besoins bruts et des caractéristiques du producteur de froid. En l'absence d'un système de refroidissement actif mais en présence d'un excédent de gains, la méthode de calcul prévoit des valeurs par défaut pour le rendement de système et le rendement de production.

#### 8. Consommation d'énergie pour l'humidification (bâtiments non résidentiels PEN)

Si les installations de l'unité PEN comprennent des dispositifs destinés à humidifier l'air neuf introduit dans (une partie de) l'unité PEN, la méthode de calcul PEB prend en compte la consommation d'énergie pour cette humidification

#### 9. Consommation d'énergie pour l'éclairage (bâtiments non résidentiels PEN)

La méthode de calcul PEB des unités non résidentielles (PEN) neuves ou assimilées à du neuf considère la consommation d'énergie pour l'éclairage. Elle prévoit 2 modes de calcul :

- soit forfaitaire, basé sur des valeurs par défaut ;
- soit basé sur la puissance réellement installée.

#### 10. Facteur de conversion en énergie primaire

Les facteurs de conversion en énergie primaire considérés dans la méthode de calcul sont les suivants :

Vecteur énergétique	Facteur de conversion en EP
Gaz naturel	1,00
Mazout	1,00
Propane/Butane/GPL	1,00
Charbon	1,00
Bois	1,00
Pellets	1,00
Electricité	2,50
Electricité produite par une installation photovoltaïque ou de cogénération	2,50

Tableau 7 : Facteur de conversion en énergie primaire des différents vecteurs énergétiques utilisés dans cette étude

#### 11. Autoproduction d'électricité

L'électricité produite par une installation solaire photovoltaïque convertie énergie primaire (EP) est déduite du bilan énergétique du bâtiment.

#### 12. Bilan énergétique d'une unité résidentielle | Schéma complet

Le schéma ci-dessous résume en le simplifiant le bilan énergétique d'une unité résidentielle. Il reprend l'ensemble des postes qui influencent la consommation d'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires et le refroidissement éventuel. Au final, ce bilan donne la consommation annuelle d'énergie primaire de l'unité PEB.

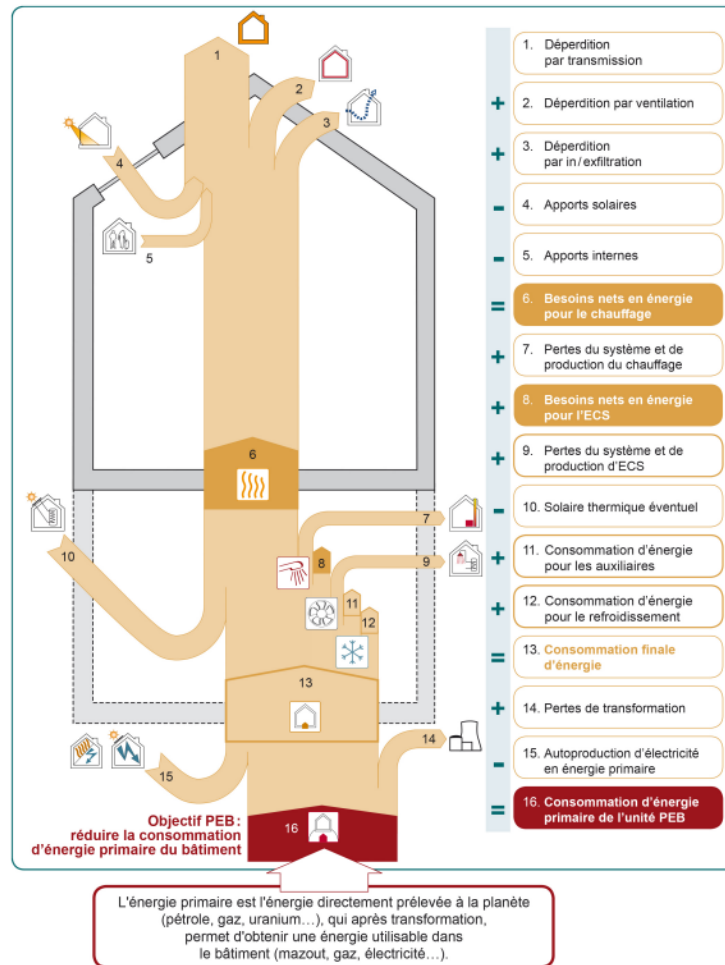


Figure 1 : Schéma complet du bilan énergétique d'un unité résidentielle

### 13. Bilan énergétique d'une unité non résidentielle | Schéma complet

Le schéma ci-dessous résume en le simplifiant le bilan énergétique d'une unité non résidentielle. Il reprend l'ensemble des postes qui influencent la consommation d'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, les auxiliaires, l'eau chaude sanitaire, le refroidissement et l'humidification éventuels. Au final, ce bilan donne la consommation annuelle d'énergie primaire de l'unité PEN.

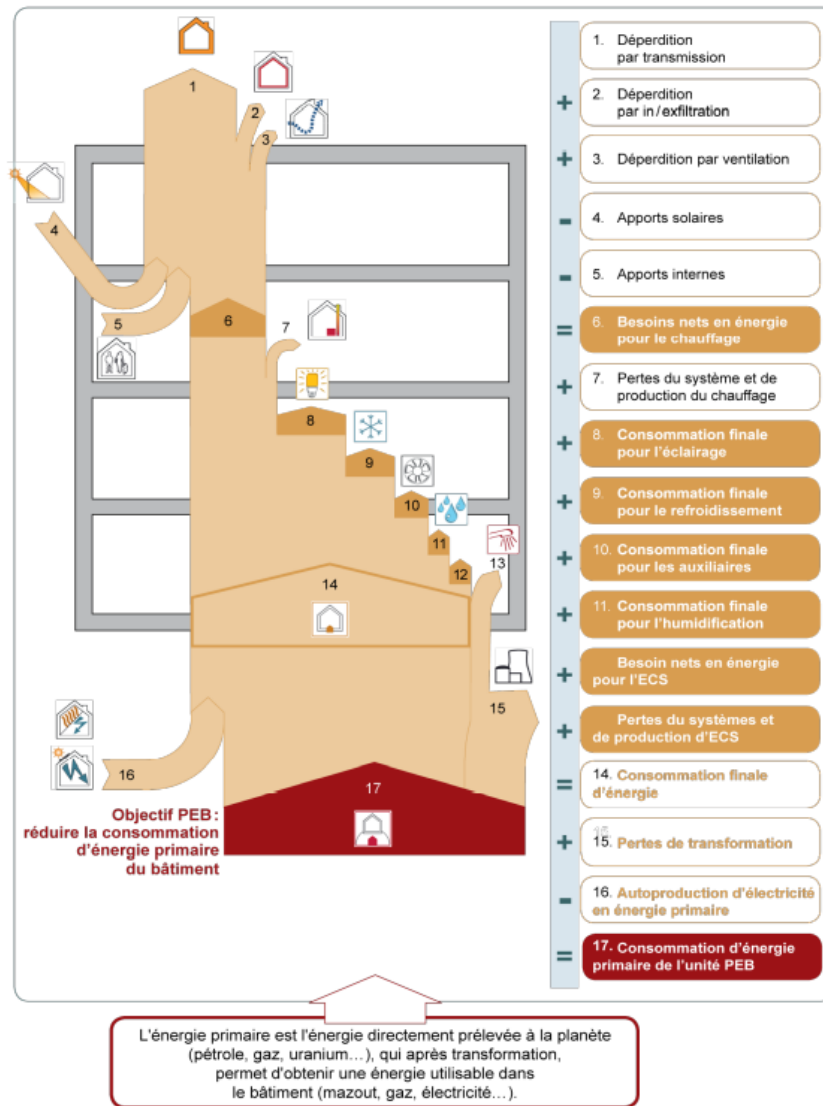


Figure 2 : Schéma complet du bilan énergétique d'une unité non résidentielle

### 1.5. Le consortium auteur de l'étude

Le consortium constitué pour la mise à jour 2023 de l'étude Cost-Optimum de 2018 et son extension, en étroite collaboration avec l'administration wallonne, se compose d'Objectif Zéro (anciennement Plateforme Maison Passive), du CECOTEPE (Centre de Coopération Technique et Pédagogique ou Centre de recherche associé à la Haute Ecole de la Province de Liège) et du cluster Cap Construction.

Objectif Zéro est active dans plusieurs missions pour l'administration wallonne, des missions facilitateurs (Responsable PEB, Auditeur logement, Certificateur PEB, Certificateur PEB des bâtiments publics) mais également des missions de développement (Quickscan, Certificat PEB+).

Le CECOTEPE, centre de formation et de recherche de haute Ecole la Province de Liège, dispose d'une expertise pointue dans toutes les catégories de la HEPL (Sciences agronomiques, Sciences de la motricité, Sciences de la santé, Sciences économiques et juridiques, Sciences et techniques, Sciences psychologiques et

de l'éducation, Sciences sociales et communication) et compte dans son équipe d'anciens membres de l'équipe EnergySuD de l'ULiège ayant participé à l'étude précédente.

Le cluster wallon Cap Construction - qui dispose d'un réseau de plus de 200 membres regroupant les acteurs clés du monde de la construction (entrepreneurs, architectes, fabricants de matériaux et d'équipement liés au bâtiment...) – déjà membre du consortium de l'étude précédente en 2018 a organisé la consultation du secteur et assuré les échanges avec les représentants du secteur afin de valider **les bâtiments de référence, et les données de coûts**.

## 1.6. Objectifs de la mission

La mission confiée au consortium a pour objectif de répondre à l'article 5 de la Directive 2010/31/EU en définissant les niveaux de performance énergétique coût-optimum d'un échantillon de bâtiments de référence selon le cadre méthodologique comparatif imposé par la CE.

Plus précisément, dans le cadre de cette mission, l'étude précédente COZEB 2 (2017) sera mise à jour et étendue à d'autres typologies de bâtiments.

## 1.7. Périmètre de l'étude

Les calculs et l'analyse des résultats ont porté sur 54 bâtiments de référence représentatifs du parc de bâtiments wallon encodés dans le logiciel PEB (v11.5.3) :

36 Bâtiments existants dont :

- 14 maisons unifamiliales
- 9 Immeubles à appartements
- 5 Immeubles de bureaux
- 4 Etablissements scolaires
- 2 maisons de repos
- 2 hôtels

18 Bâtiments neufs dont :

- 12 maisons unifamiliales (4 en 3 modes constructifs)
- 1 immeubles à appartements
- 1 immeuble de bureaux
- 2 bâtiments scolaires
- 1 maison de repos
- 1 hôtel

Auxquels ont été appliqués :

Les mesures enveloppe, ventilation et systèmes décrites au chapitre 2.5, par typologie.

44 groupes constructifs<sup>3</sup> au niveau de l'enveloppe (détail des groupes voir Annexe D)

Les **résultats des calculs** présentés dans le rapport décrivent ou vérifient pour chaque bâtiment et élément de bâtiment de référence sélectionnés pour l'étude :

- La consommation en énergie primaire et le coût global actualisé des combinaisons situées sur le front de Pareto (FP).
- Le coût global actualisé des combinaisons coût-optimum sur la période d'évaluation (PER : 20 ans ; PEN : 30 ans) ;
- Les niveaux de performance énergétique optimaux en fonction des coûts ;
- Le pourcentage d'écart entre le niveau de performance énergétique optimal en fonction des coûts et les exigences PEB minimales en vigueur en Wallonie en 2023 (tant pour les bâtiments neufs que pour les bâtiments existants).

Les données de base, les hypothèses de calculs ainsi que les résultats des calculs des combinaisons coût-optimums présentés dans ce rapport sont repris dans **une série de tableaux Excel structurés et mis en forme selon les guidelines imposées par la CE** :

Les informations sur le bâtiment de référence sont reprises dans les tableaux Excel suivants : **PR109008\_COT\_GrilleCE\_tab1.xls ; PR109008\_COT\_GrilleCE\_tab2.xls**

Un résumé des performances énergétiques des différents bâtiments est disponible dans **PR109008\_COT\_GrilleCE\_tab3.xls**.

La liste des mesures d'amélioration enveloppe-systèmes appliquées aux différents bâtiments de référence est dans le tableau : **PR109008\_COT\_GrilleCE\_tab4.xls**

Un récapitulatif des résultats des combinaisons situées sur le Front de Pareto est disponible dans le tableau **PR109008\_COT\_GrilleCE\_tab5.xls**

Les résultats détaillés des calculs de combinaisons sont disponibles dans les tableaux suivants : **PR109008\_COT\_Resultats-neuf.xls ; PR109008\_COT\_Resultats-exist.xls** ;

---

<sup>3</sup> Les groupes correspondent à des choix constructifs au niveau de l'enveloppe, permettant d'atteindre la mesure d'amélioration (ex : U de paroi) à un coût déterminé.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Consultation du secteur

Préalablement aux calculs d'optimalité en fonction des coûts, les partenaires et le SPW TLPE, Département de l'Energie, ont mené une consultation des représentants du secteur de la construction en Wallonie, en vue de déterminer et de valider les données d'entrée utilisables pour le calcul.

Cette consultation a permis de présenter, d'adapter et de valider les nouveaux bâtiments de référence proposés. Celle-ci a également servi à valider la mise à jour des coûts des mesures d'amélioration.

Dans le cadre de l'étude précédente de 2018, deux bases de données des coûts avaient été constituées, l'une pour la rénovation des bâtiments résidentiels et non résidentiels existants, l'autre pour les bâtiments résidentiels et non résidentiels neufs.

Ces bases de données des coûts avaient alors été alimentées, discutées puis validées avec les représentants du secteur de la construction durable, sous l'égide du cluster Cap2020 devenu Cap Construction, qui a organisé les consultations sectorielles nécessaires à cette fin.

Pour cette nouvelle étude, la **mise à jour** des bases de données des coûts a été confiée à un deviseur professionnel. Cette mise à jour a ensuite été soumise à la discussion et à la validation du secteur.

### 2.2. Paramètres économiques utilisés et hypothèses retenues

Une hypothèse importante dans la détermination des paramètres économiques de cette étude est d'éviter autant que possible de tenir compte de la situation particulière que représentait la période 2020-2022 dans le marché de l'énergie. En effet, la période de pandémie que nous avons connue, suivie d'un contexte géopolitique particulier lié notamment à la guerre entre la Russie et l'Ukraine, ont influencé de manière particulière et probablement non pérenne les coûts de l'énergie. 2020 représente par exemple, selon les 2 sources principales citées ci-dessous, une période de prix bas de l'énergie (liés à une demande ralentie pendant la pandémie). L'année 2022, à l'inverse, a vu les prix de l'énergie (principalement le gaz naturel, et par conséquent l'électricité) s'envoler. Depuis lors, les prix de l'énergie sont déjà repartis à la baisse, sans toutefois revenir (pour les ménages en tout cas) aux niveaux pré-pandémie.

La prise en compte de l'année 2022 impliquerait un biais dans l'étude COZEB3. En effet, les prix du gaz en particulier, mais aussi de l'électricité, ont atteint de tels niveaux que les utiliser en base de l'étude impliquerait de facto la non-rentabilité des solutions utilisant ces vecteurs. Cette situation particulière implique des projections très différentes sur l'évolution des prix des différents vecteurs énergétiques dans un horizon de 30 ans (voir *European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on*



GHG projections in 2023, April 2022<sup>4</sup>). À l'inverse, la non prise en compte de l'année 2022 dans la projection à 2050 (voir European Commission, EU Reference Scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, July 2021<sup>5</sup>) renseigne une évolution similaire pour les vecteurs gaz et pétrole. Le prix de marché de l'électricité est très souvent calqué en Belgique sur celui du gaz naturel, ce qui implique un taux d'évolution similaire dans les projections à 30 ans également.

### 2.2.1. Modes de calcul imposés par le Règlement Délégué de l'UE<sup>6</sup>

Le Règlement Délégué (UE) n° 244/2012 de la CE du 16 janvier 2012 fixe les périodes d'évaluation à utiliser aux fins de l'étude.

Pour les bâtiments résidentiels, la période d'évaluation est de 30 ans. Pour les bâtiments non résidentiels (bureaux et enseignement), cette période est de 20 ans.

Le cadre méthodologique impose de calculer les niveaux optimaux en fonction des coûts du point de vue macroéconomique et du point de vue financier mais laisse aux États membres le soin de décider lequel de ces calculs doit servir de référence pour évaluer les exigences minimales de performance énergétique.

A l'instar des études COZEB précédentes et des hypothèses considérées pour la stratégie de rénovation à long terme des bâtiments, les résultats graphiques de calcul du cost-optimum sont exprimés en termes de CGA macro-économique. Les résultats en termes de CGA financiers sont néanmoins affichés dans les tableaux au chapitre 5

### Calcul financier

Le calcul financier considère les coûts supportés par l'occupant/propriétaire du bâtiment qui réalise les investissements. Il comprend les taxes, la TVA et les redevances.

Dans la présente étude, les subventions (primes) octroyées en Wallonie pour certaines mesures d'amélioration (isolation des parois, systèmes solaires, PAC...) **n'ont pas été prises en compte** dans le calcul financier (ni, a fortiori, dans le calcul macroéconomique).

La formule utilisée pour le **calcul du coût global au niveau financier** est la suivante :

$$C_g(\tau) = C_i + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

Avec,

$\tau$  : la période de calcul ;

$C_g(\tau)$  : le coût global (par rapport à l'année de départ  $\tau_0$ ) sur la période de calcul ;

<sup>4</sup> European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022

<sup>5</sup> European Commission, EU Reference Scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, July 2021

<sup>6</sup> Règlement délégué (UE) N°244/2012 de la Commission du 16 janvier 2012.

$C_I$  sont les coûts d'investissement initiaux pour la mesure ou la combinaison de mesures  $j$  ;

$C_{a,i}(j)$  est le coût d'exploitation annuel du bâtiment au cours de l'année  $i$  après application de la (combinaison de) mesures  $j$  ;

$V_{f,\tau}(j)$  est la valeur résiduelle de la mesure ou de l'ensemble de mesures  $j$  au terme de la période de calcul (rapportée à l'année de départ  $\tau_0$ ) ;

$R_d(i)$  est le facteur d'actualisation pour l'année  $i$ , sur la base du taux d'actualisation  $r$ , à calculer à l'aide de la formule :

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1 + r/100} \right)^p$$

Où  $p$  est le nombre d'années depuis l'année de départ et  $r$  est le taux d'actualisation réel.

### Calcul macro-économique

Le calcul macro-économique prend en compte la dimension environnementale des mesures d'amélioration de la performance énergétique en intégrant le coût de la tonne de  $CO_2$  évité. Il permet d'identifier les mesures d'amélioration du bâti ayant le plus d'impact au niveau macro-économique et n'a pas d'effet pénalisant sur les techniques de combustion utilisant la biomasse.

Les coûts macroéconomiques sont considérés hors TVA et sans subventions mais avec un coût des émissions de  $CO_2$  liées à la consommation en énergie primaire du bâtiment.

Ce coût est calculé sommant les émissions annuelles de  $CO_2$  multipliées par le prix de la tonne de  $CO_2$  émises

La formule utilisée pour le **calcul du coût global au niveau macroéconomique** est la suivante :

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) R_d(i) + C_{e,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

Avec,

$C_{e,i}(j)$  : le coût des émissions de  $CO_2$  liées à la consommation d'énergie primaire du bâtiment après application de la (combinaison de) mesure(s)  $j$  au cours de l'année  $i$ .

### Coûts des émissions de $CO_2$

La source principale utilisée pour déterminer ce paramètre est : « *European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022* ».

Le tableau de la figure 4 ci-dessous montre la trajectoire du prix du carbone de l'ETS (Emissions Trading System) existant dans son périmètre actuel (secteurs de l'électricité, de l'industrie, de la chaleur centralisée et de l'aviation) jusqu'en 2030, correspondant au contexte de l'objectif climatique juridiquement contraignant de -55 % et en tenant compte de la trajectoire centrale pour les marchés internationaux du prix du carburant. Pour les valeurs à long terme au-delà de 2030, le tableau de la figure 4 ci-dessous montre deux trajectoires :

- une trajectoire basée sur le scénario de référence de l'UE 2020 pour le prix ETS du carbone de l'UE dans les scénarios "WEM" ;

- et une trajectoire indicative de la valeur du carbone dans l'ensemble de l'économie pour atteindre la neutralité climatique de l'UE dans les scénarios nationaux (« WAM »).

Il a été décidé de considérer le scénario WAM car cela correspond à une trajectoire indicative (après 2030) basée sur un moteur de modélisation pour atteindre la neutralité climatique de l'UE 2050 dans l'analyse du package FF557. Il s'agit d'un paquet de 12 propositions législatives publié par la Commission Européenne le 14 juillet 2021 qui vise à proposer des actions concrètes pour accomplir les objectifs de l'Union Européenne de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 55% d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990. La loi européenne sur le climat fait de la réalisation de cet objectif climatique une obligation légale.

**Table 3. Harmonised trajectory for the carbon price / value (EUR2020 / tCO<sub>2</sub>)**

EUR 2020 / tCO <sub>2</sub>	Common trajectory carbon price existing ETS up to 2030	
2018*	16	
2019*	25	
2020*	24	
2021*	54	
2022	75	
2023	77	
2024	78	
2025	80***	
2030	80***	
	WEM trajectory	WAM trajectory
2035	82	120**
2040	85	250**
2045	130	360**
2050	160	410**

Tableau 8 : Trajectoire harmonisée du prix / valeur du carbone (EUR2020 / tCO<sub>2</sub>) (Source : « European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022 »)

Les coûts annuels considérés pour l'émission d'une tonne de CO<sub>2</sub> utilisés dans cette étude sont donc les suivants :

Période	Coût €/t <sub>CO2</sub> émise
2023 - 2030	80
2030 - 2035	100
2035 - 2040	185
2040 - 2045	305
2045 - 2050	385
2050 - ...	410

Tableau 9 : coûts annuels considérés pour l'émission d'une tonne de CO<sub>2</sub>

<sup>7</sup> Les analyses nationales projetant les émissions de GES à l'échelle de l'économie compatibles avec l'objectif de neutralité climatique de l'UE à l'horizon 2050 pourraient fournir une trajectoire de valeur carbone différente. Mais une telle trajectoire n'est pas encore connue à l'échelle de la Région wallonne.

### 2.2.2. Calcul du coût global actualisé

La méthode ci-dessous détaille le calcul du coût global actualisé des combinaisons d'amélioration des performances énergétique d'un bâtiment (PER/PEN).

Le cost-optimum est la combinaison de mesures d'amélioration enveloppe-systèmes pour laquelle le coût global actualisé est minimal. Il est exprimé en fonction des indicateurs de performance pour lesquels la Wallonie a fixé un niveau d'exigence (voir 1.1).

Le CGA de chaque combinaison est obtenu en sommant, sur la période d'évaluation considérée :

- Les coûts d'investissements initiaux (coût initial à l'année 0). Ces coûts comprennent les coûts de construction (fourniture et placement), d'installation de chantier (12%), les honoraires d'études (architecte, ingénieur stabilité et techniques spéciales, responsable PEB, coordinateur sécurité santé, soit 13 % pour les nouvelles constructions et 18 % pour les rénovations), la TVA
- Les coûts de fonctionnement annuels
  - Les coûts de l'énergie
  - Les coûts d'exploitation
  - Les coûts de maintenance
- Les coûts d'élimination
- Les coûts annuels des émissions de gaz à effet de serre<sup>8</sup>
- Les coûts de remplacement (réinvestissement) périodiques

Le coût global comprend le coût de l'enveloppe du bâtiment, le coût des systèmes installés (production, stockage, distribution et émission) ainsi que le coût de la consommation énergétique du bâtiment pendant 20 (PEN) ou 30 (PER) ans. Le coût total d'une paroi de déperdition comprend la structure, l'isolation, les finitions intérieures et extérieures. Le prix des cloisons et menuiseries intérieures, des sanitaires, de la plomberie, de l'électricité, ... ne sont pas compris dans le coût global.

Dans le calcul du coût global, l'investissement initial, la somme des coûts annuels rapportés à l'année de départ et la valeur finale sont pris en considération. À l'échelle macroéconomique, le coût des émissions de gaz à effet de serre - défini comme la valeur monétaire des dommages environnementaux causés par les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments - est ajouté au coût global.

Le résultat du calcul du coût global correspond à la valeur actualisée nette des coûts supportés au cours d'une période de calcul définie, compte tenu de la valeur résiduelle des équipements dont la durée de vie est plus longue que la période de calcul. Les projections relatives aux coûts de l'énergie sont limitées à la période de calcul.

La période de calcul est déterminée par le cycle de rénovation d'un bâtiment, soit le délai au terme duquel un bâtiment fait l'objet d'une rénovation importante, y compris en vue de l'améliorer dans son ensemble et de l'adapter à l'évolution des exigences des occupants.

---

<sup>8</sup> Pour le calcul macro-économique uniquement.

Les paramètres économiques utilisés et les hypothèses retenues pour vérifier l'optimalité des niveaux d'exigences minimales de performance énergétique en fonction des coûts, conformément à la directive PEB, (2010/31/UE), sont décrits ci-après.

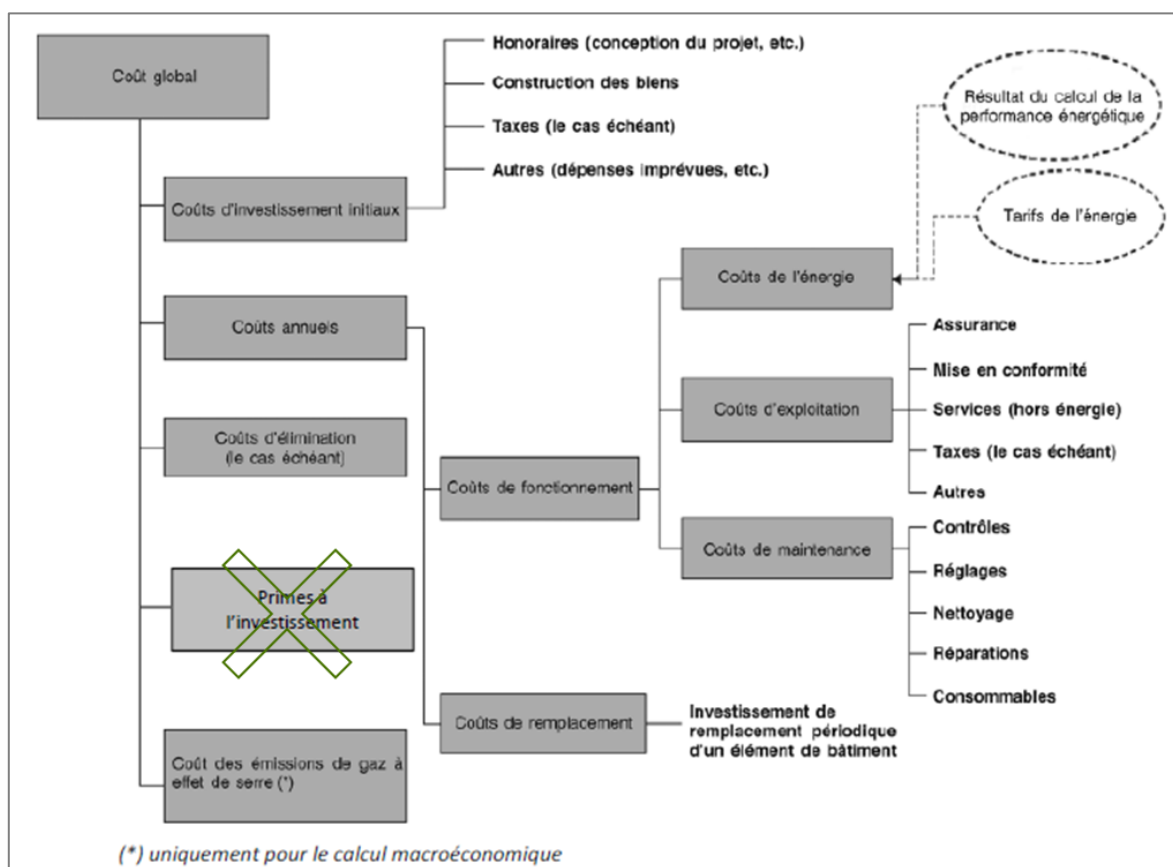


Figure 3 : éléments constitutifs du coût global selon la directive PEB. Source : règlement Délégué (UE) n°244/2012

### 2.2.3. Taux d'actualisation

Le coût global pour les bâtiments et éléments de bâtiment est calculé en additionnant les différents types de coût et en leur appliquant le taux d'actualisation, à l'aide d'un facteur d'actualisation, de façon à les exprimer en valeur rapportée à l'année de départ.

Le choix du taux d'actualisation dépend du contexte spécifique de l'analyse économique et des objectifs particuliers de l'étude. En général, le taux d'actualisation est utilisé pour convertir des flux de trésorerie futurs en valeurs présentes, afin de prendre en compte le coût du capital et l'effet du temps sur la valeur de l'argent. Les hypothèses considérées quant au choix des taux d'actualisation pour l'étude COZEB 3 sont conformes aux prescriptions du règlement délégué<sup>9</sup>, page L81/26 :

<sup>9</sup> RÈGLEMENT DÉLÉGUÉ (UE) No 244/2012 DE LA COMMISSION du 16 janvier 2012 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments en établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment ; Journal officiel de l'Union Européenne du 21/03/2012.

« Les États membres déterminent le taux d'actualisation à utiliser dans le calcul macroéconomique après avoir effectué une analyse de sensibilité portant sur au moins deux taux différents dont un de **3%** en termes réels. »

« Les États membres effectuent une analyse de sensibilité concernant le taux d'actualisation en utilisant au moins deux taux exprimés en termes réels pour le calcul macroéconomique et deux taux pour le calcul financier. L'un des taux à utiliser dans l'analyse de sensibilité pour le calcul macroéconomique doit être de **3%** en termes réels. »

À noter :

- Le taux d'actualisation est exprimé en termes réels, donc hors inflation, ce qui a pour effet de décaler légèrement le front de Pareto vers le bas, sans modifier les combinaisons cost-optimum, ni l'écart entre les combinaisons cost-optimum et la référence.
- Le taux d'actualisation considéré pour le calcul financier est généralement inférieur dans la mesure où il reflète plus fidèlement l'avantage que les investissements écoénergétiques procurent aux occupants sur la période d'évaluation.
- Sur base des taux OLO<sup>10</sup> sur les obligations d'état à 10 ans qui varient entre 1% et 2% au moment d'effectuer les calculs, le taux d'actualisation considéré pour le calcul financier des mesures d'amélioration des bâtiments est de **2%**.
- En matière de projet de développement ou d'amélioration de bâtiments, le taux d'actualisation utilisé dans les calculs afin d'évaluer la rentabilité des projets, repose sur le coût moyen pondéré du capital (CMPC), un indicateur économique, représentant le taux de rentabilité annuel moyen attendu par les créanciers, en retour de leur investissement. Le CMPC estimé nécessaire pour déclencher un investissement économiseur d'énergie est de minimum **3%**.
- Enfin, les Guidelines<sup>11</sup> de l'UE précisent que « l'analyse de sensibilité pour le calcul macroéconomique doit porter sur un taux de **4%** en termes réels. Cela est conforme aux actuelles lignes directrices de la Commission concernant l'analyse d'impact, publiées en 2009, qui suggèrent un taux d'actualisation social de **4%**<sup>12</sup>. Un taux d'actualisation plus élevé – généralement supérieur à 4% hors inflation avec différenciation éventuelle pour les bâtiments résidentiels et non résidentiels – traduira une approche à court terme, purement commerciale, de l'évaluation des investissements. Un taux plus bas – généralement compris entre 2% et 4% hors inflation – reflétera plus fidèlement les avantages que les investissements écoénergétiques procurent aux occupants du bâtiment sur la durée de vie totale de l'investissement. »

Ainsi, l'étude ici présentée a été réalisée avec les hypothèses suivantes :

	Calcul financier	Calcul macroéconomique
PER	2%	3%
PEN	3%	4%

<sup>10</sup> Obligation Linéaire/Lineaire Obligatie

<sup>11</sup> Orientations accompagnant le règlement délégué (UE) n° 244/2012 de la Commission du 16 janvier 2012 complétant la directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments en établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment

<sup>12</sup> [http://ec.europa.eu/governance/impact/commission\\_guidelines/docs/iag\\_2009\\_fr.pdf](http://ec.europa.eu/governance/impact/commission_guidelines/docs/iag_2009_fr.pdf). Dans l'édition 2010 des indices des prix de l'énergie et facteurs d'actualisation pour effectuer une analyse du coût du cycle de vie, au titre du programme fédéral de gestion de l'énergie du ministère de l'énergie des États-Unis, il est suggéré 3%.



Dans ce rapport seront présentés, bâtiment par bâtiment, les résultats du calcul macroéconomique, établis en utilisant le taux moyen de 3%, pour les bâtiments résidentiels, et 4%, pour les bâtiments non résidentiels. Comme l'indique le tableau ci-dessus, un taux légèrement plus bas sera utilisé pour le calcul financier (2% pour les bâtiments résidentiels, 3% pour les bâtiments non résidentiels), par rapport au calcul macroéconomique (3% pour les bâtiments résidentiels, 4% pour les bâtiments non résidentiels). La raison est la suivante :

Dans un contexte financier, comme l'évaluation d'un projet d'investissement spécifique, un taux d'actualisation plus faible peut être utilisé lorsque le niveau de risque associé au projet est considéré comme relativement faible. Cela peut être le cas pour des investissements sûrs et stables, ainsi que sont souvent considérés les investissements immobiliers (construction et rénovation), a fortiori ceux qui visent une performance énergétique élevée dans un contexte de flambée des prix de l'énergie. Un taux d'actualisation plus faible signifie que les flux de trésorerie futurs sont moins fortement réduits pour refléter leur valeur actuelle, ce qui peut rendre un projet plus attractif.

D'un autre côté, dans un contexte macroéconomique, le choix d'un taux d'actualisation plus élevé peut être lié à la prise en compte des coûts d'opportunité et des rendements attendus sur d'autres investissements dans l'économie (en d'autres termes, les investissements sont-ils judicieux, au regard d'autres investissements qui pourraient être consentis selon des considérations purement économiques ? Dans le cas de l'étude COZEB, qui ne considère aucune alternative macroéconomique à la construction ou à la rénovation énergétique, cela se traduit donc par un taux d'actualisation légèrement plus élevé). Les taux d'actualisation plus élevés peuvent être utilisés pour refléter des niveaux de risque plus importants associés aux variables macroéconomiques et pour tenir compte des rendements attendus sur des investissements alternatifs dans l'économie.

De même, nous présentons un taux plus faible pour les études sur les bâtiments résidentiels (2% pour le calcul financier, 3% pour le calcul macroéconomique), et plus élevé pour les analyses des bâtiments non-résidentiels (3% pour le calcul financier, 4% pour le calcul macroéconomique), pour les raisons suivantes :

- Les investissements de performance énergétique consentis dans des propriétés résidentielles sont souvent perçus comme moins risqués que ceux consentis dans des propriétés commerciales ou non résidentielles. En effet, les investissements immobiliers résidentiels (construction / rénovation énergétique) se traduisent généralement par une plus-value qui s'est rarement démentie ces dernières années ; alors que les investissements dans des bâtiments non résidentiels (générateurs de valeur ou de revenus) doivent généralement se mesurer à d'autres possibles placements, potentiellement moins risqués en termes de revenus ou de retours sur investissements.
- Les investisseurs peuvent avoir des rendements attendus différents en fonction du type d'actif immobilier. Les biens non résidentiels peuvent être perçus comme offrant des rendements potentiels plus élevés.
- Les propriétés non résidentielles, telles que les bureaux, les hôtels ou les centres commerciaux, peuvent être plus sensibles aux fluctuations économiques que les propriétés résidentielles.

Par conséquent, un taux d'actualisation plus élevé peut être utilisé pour refléter le niveau de risque accru associé à ces propriétés non-résidentielles. Au chapitre 19, se trouve une étude de sensibilité, qui a pour objectif d'analyser l'influence de 2 paramètres, le taux d'évolution des prix de l'énergie et le taux d'actualisation, sur les résultats de l'étude. Elle a également pour but de confirmer le choix de présenter dans ce rapport les résultats du calcul pour les taux mentionnés dans le tableau ci-dessus.

Cette étude de sensibilité a été menée, en ce qui concerne les taux d'actualisation, en considérant un taux inférieur, et supérieur à ceux mentionnés ci-dessus, afin d'obtenir une tendance d'évolution des résultats à la hausse, et à la baisse, tant pour le calcul macro-économique que pour le calcul financier. Ainsi, les taux considérés dans cette étude de sensibilité sont :

	Calcul financier	Calcul macroéconomique
PER	1%, 2% et 3%	2%, 3% et 4%
PEN	2%, 3% et 4%	3%, 4% et 5%

#### 2.2.4. Coût de l'énergie et scénarios d'évolution

##### Prix de l'énergie

Le coût de l'énergie consommée par le bâtiment dépend de la consommation d'énergie finale annuelle de chaque poste et du vecteur énergétique considéré.

Ce coût résulte de la somme des quantités d'énergie consommées pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, les auxiliaires, l'éclairage (PEN) et le refroidissement (PEN) **moins** l'énergie produite (le cas échéant) par un système solaire (thermique ou PV).

La consommation en énergie finale de chacun des postes est calculée par l'outil COT intégrant la méthode de calcul PEB 2021, qui fait le bilan énergétique du bâtiment de référence et des combinaisons de variantes enveloppe et/ou systèmes de production de chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation, éclairage, etc.

Les vecteurs qui seront considérés (mis à jour) dans cette étude sont donc :

- Le gaz naturel
- L'électricité
- Les pellets
- Le mazout

En considérant l'interdiction du placement des chaudières au mazout annoncée pour 2035, le placement d'une chaudière au mazout dans le bâtiments neufs, ainsi que le remplacement d'une chaudière au mazout par une nouvelle chaudière au mazout, dans les bâtiments existants, ne constituent pas des solutions viables. La justification de ce choix est à trouver dans le Plan Air Climat Energie 2030, voir chapitre 1.3 ci-dessus. Toutefois, il est important de considérer que le vecteur mazout reste à intégrer à l'étude, pour la définition des cas « de base » des bâtiments existants qui étaient équipés de chaudières au mazout.

Les derniers prix renseignés par de nombreuses sources<sup>13</sup> sont toujours ceux de l'année 2022, qu'il serait regrettable d'utiliser, ainsi qu'expliqué plus haut.

<sup>13</sup> Energie Commune, statbel.be, eurostat.be...



Cette étude se basera donc, pour les prix du gaz et de l'électricité, sur les valeurs du comparateur de la CWaPE (Commission Wallonne pour l'énergie)<sup>14</sup>, en regardant plus spécifiquement la « fourchette basse » afin de tenir compte du fait que les prix restaient relativement élevés lors de la dernière consultation de l'outil, le 27/01/2023.

Les hypothèses utilisées dans ce comparateur sont :

- Selon les chiffres recherchés, la sélection d'un prix pour un client résidentiel ou professionnel ;
- Le code postal de Namur (pour sélectionner le GRD le plus répandu en Wallonie, ORES) ;
- Une consommation annuelle connue, en kWh (voir ci-dessous) ;
- Pour l'électricité, la sélection d'un compteur bihoraire (selon le document de référence de la CREG, il apparaît que c'est le régime de comptage le plus présent en Région wallonne – 52,5%, contre 43,13% de compteurs mono-horaires et 4,37% d'exclusifs nuit).

L'« analyse des prix de l'électricité et du gaz naturel en Wallonie (clients résidentiels) sur la période de janvier 2007 à juin 2022 » de la CREG, datée d'octobre 2022, propose, **pour le secteur résidentiel**, le niveau de consommation moyen de gaz naturel de 17.000 kWh/an, et la consommation moyenne d'électricité de 3.500 kWh/an, selon le profil de client-type Dc (compteur bihoraire, 1.600 kWh/an en heures pleines, 1.900 kWh/an en heures creuses).

**Pour le secteur non-résidentiel**, la CREG annonce dans son « étude relative aux composantes des prix de l'électricité et du gaz naturel », datée d'avril 2021, une consommation électrique moyenne de 160.000 kWh/an (compteur bihoraire, 135.000 kWh/an en heures pleines, 25.000 kWh/an en heures creuses), et une consommation moyenne de gaz pour les « petits professionnels », de 2.300.000 kWh/an.

Par conséquent, les prix issus du comparateur de la CWaPe sont :

- Pour l'**électricité résidentielle** : entre 472 €/MWh et 582 €/MWh TVAC (446 à 549 €/MWh HTVA, tenant compte d'un taux de TVA de 6% au 27/01/2023 lors de la dernière consultation du comparateur) selon le fournisseur. L'hypothèse de COZEB3 sera donc **0,446 €/kWh HTVA**.
- Pour l'**électricité non-résidentielle** : seul le fournisseur TotalEnergies fournit une offre pour une consommation de 160 MWh/an, à 468 €/MWh HTVA. Afin d'obtenir un meilleur panel de coûts, la demande a été très légèrement réduite à 150 MWh/an ; les prix s'étalent alors entre 459 et 541 €/MWh HTVA. L'hypothèse de COZEB3 sera donc **0,460 €/kWh HTVA**.
- Pour le **gaz naturel résidentiel** : entre 135 €/MWh et 175 €/MWh TVAC (127 à 165 €/MWh HTVA, tenant compte d'un taux de TVA de 6% au 27/01/2023 lors de la dernière consultation du comparateur) selon le fournisseur. L'hypothèse de COZEB3 sera donc **0,127 €/kWh HTVA**.
- Pour le gaz naturel non résidentiel : aucun fournisseur du comparateur ne propose d'offre pour une consommation annuelle de 23 GWh/an. Pour une consommation de 400 MWh/an, les prix s'étalent entre 115 €/MWh et 144 €/MWh HTVA. L'hypothèse de COZEB3 sera donc **0,115 €/kWh HTVA**.

<sup>14</sup> <https://www.compacwape.be/client/#/myProfile>

Pour le mazout, la principale source d'information utilisée est Informazout<sup>15</sup>. Selon cette source, le prix du gasoil de chauffage, au 25/01/2023 est de 1,1549 €/litre (TVAC). Tenant compte d'une TVA de 21% sur les produits pétroliers, et d'un pouvoir calorifique de 10,641 kWh/litre selon Informazout, cela se traduit par un prix de 0,09 €/kWh.

Pour le **pellet**, les sources principales d'information sont Valbiom<sup>16</sup> et Energie Commune. La valeur la plus récente annoncée par cette dernière source est de 125,4 €/MWh HTVA pour le mois de janvier 2023. Une rapide comparaison est possible avec les valeurs annoncées par Valbiom pour novembre 2022 (11,35 €/sac de 15 kg, ce qui correspond à un prix de 151 €/MWh TVAC ou 143 €/MWh HTVA). Si l'on considère les variations constatées pour les prix du gaz et de l'électricité entre novembre 2022 et janvier 2023, un taux moyen d'évolution de 0,883 peut être appliqué (→ les vecteurs ont vu leur prix diminuer de 11,7% entre novembre 2022 et janvier 2023). Appliqué au prix du pellet de Valbiom pour novembre 2022, on arrive à un prix supposé en janvier 2023 de 126 €/MWh, ce qui tend à valider les prix d'Energie Commune.

Le prix qui sera appliqué dans COZEB3 pour les pellets sera donc de **0,125 €/kWh HTVA**.

Conclusions pour COZEB3 :

Vecteur	Coût de l'énergie dans COZEB3 [€/kWh] HTVA
Gaz naturel (PER)	0,127
Gaz naturel (PEN)	0,115
Électricité (PER)	0,446
Électricité (PEN)	0,459
Mazout	0,09
Pellets	0,125

Tableau 10 : Prix de l'énergie utilisés dans l'étude

Ces coûts ont été arrêtés à la date 27/01/2023 (date à laquelle les simulations des coûts de l'énergie sur le comparateur de la CWaPE ont été faites).

### Scénarios d'évolution des prix de l'énergie

Les 2 sources utilisées pour définir ces taux d'évolution sont :

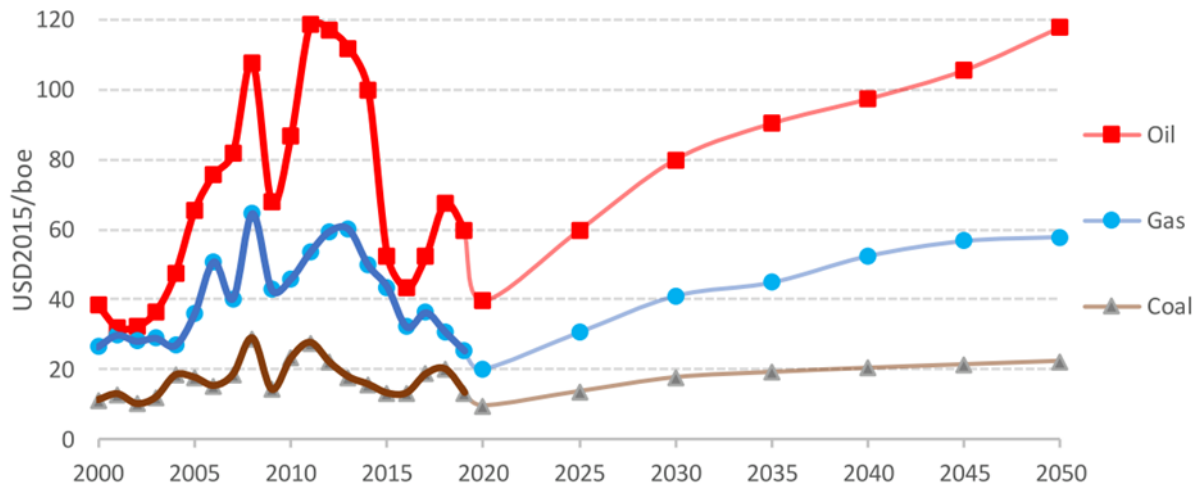
- European Commission, EU Reference Scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, July 2021.
- European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022.

La première source fournit les trajectoires internationales des prix des carburants envisagées pour le scénario de référence 2020, telles qu'établies en 2021 :

<sup>15</sup> <https://informazout.be/fr/mazout/prix>

<sup>16</sup> <https://www.valbiom.be/actualites/suivi-mensuel-des-prix-des-combustibles-bois>

Figure 111: International fossil fuel prices in the EU Reference Scenario 2020



Note: oil prices refer to Brent, gas and coal prices refer to the average imports to the European market.  
 Source: historical (bold): Eurostat, PLATTS; 2020: estimates with data as of August 2020

Figure 4 : Prix internationaux des combustibles fossiles dans le scénario de référence de l'UE 2020 (source : European Commission, EU Reference Scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, July 2021)

La seconde source, un peu plus récente encore (avril 2022), recommande des trajectoires pour les prix à l'importation du pétrole, du gaz et du charbon, qui visent à combiner les évolutions récentes avec les tendances à long terme :

- des données historiques mises à jour pour 2018-2021 combinées à des estimations de prix en 2022 et pour les deux prochaines années, et
- une interpolation linéaire à la trajectoire de long terme à partir de 2035 dérivée du scénario de référence de l'UE 2020 (REF2020)<sup>17</sup>, lui-même basé sur une modélisation globale de l'énergie mondiale.

<sup>17</sup> [https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020\\_en](https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en)

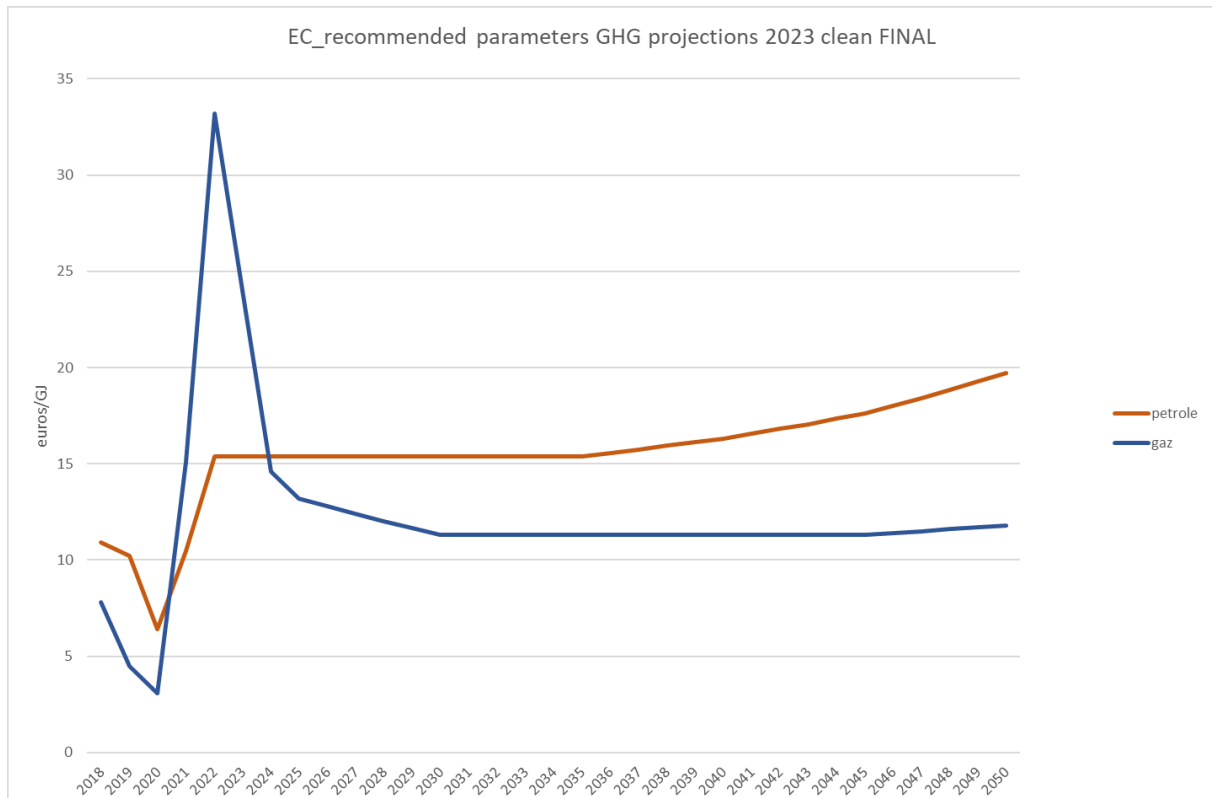


Figure 5 : Propositions de trajectoires centrales harmonisées pour les prix internationaux des carburants (EUR2020) (Source : European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022)

Comme déclaré plus haut, il a été décidé de ne pas tenir compte des événements anormaux de la période 2020-2022, dans les 2 sources. Repartant des 2 sources ci-dessus, des courbes lissées d'évolution des prix de l'énergie sur les périodes couvertes ont donc été définies. Les graphiques ci-dessous reprennent les courbes « lissées » des graphiques précédents pour la période 2020-2050, desquelles des taux constants d'évolution du prix du vecteur ont été tirés :

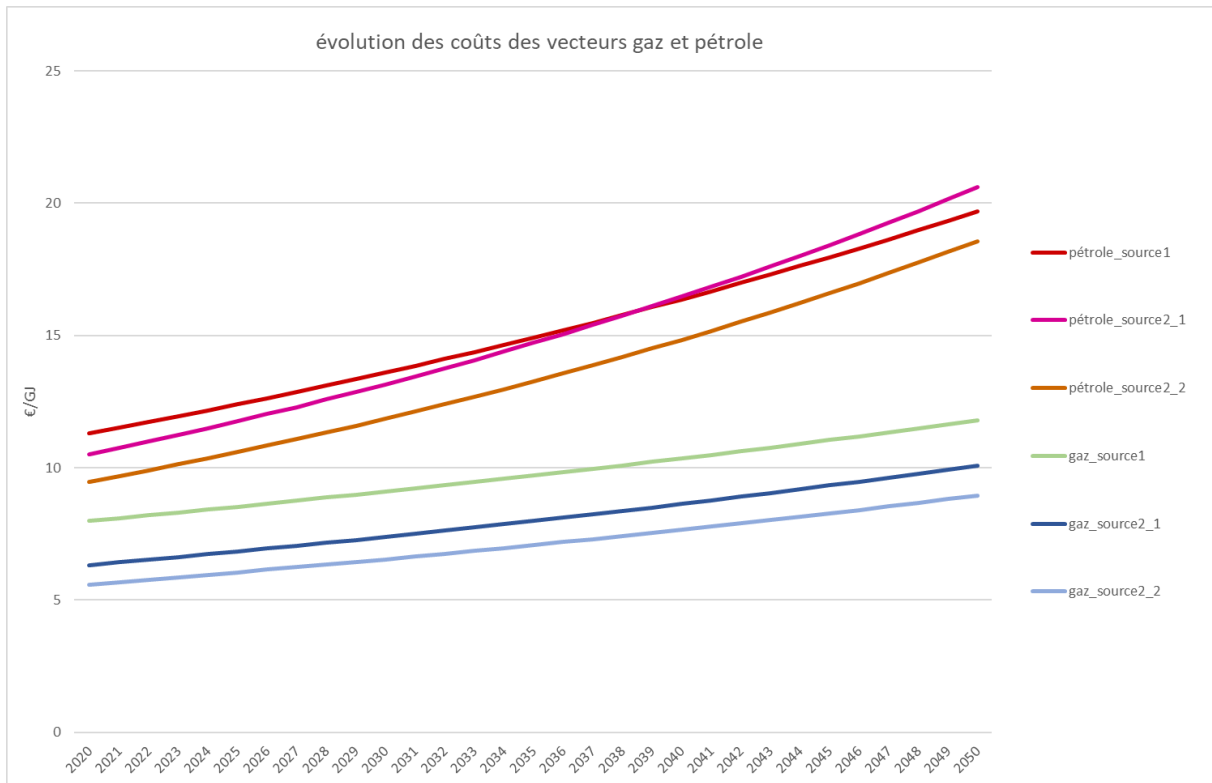


Figure 6 : évolution lissée des coûts des vecteurs pétrole et gaz naturel, sans tenir compte des épisodes particuliers des années 2020 à 2022. Basé sur [European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projection]

Tous vecteurs confondus, les taux d'évolution annuels constants affichés par ces courbes varient entre 1,3%/an et 2,27%/an. En moyenne, ce taux d'évolution est de 1,81%/an.

Par conséquent, le taux moyen de 1.81%, défini sur base des sources citées, est celui qui est utilisé dans les simulations présentées dans ce rapport.

Deux autres taux extrêmes, 0% et 3.62%, sont définis en vue de l'étude de sensibilité.

#### 2.2.5. Coût de remplacement et valeur résiduelle

Les coûts des (combinaisons) de mesures analysées pour les bâtiments neufs et existants sont définis pour les remplacements portant sur :

Les éléments constitutifs de l'enveloppe des bâtiments, à savoir :

- Les parois opaques ;
- Les fenêtres (châssis et vitrage) ;
- Le plancher ;
- La toiture.

Les systèmes de ventilation ;

Les systèmes de chauffage ;

La production d'ECS ;

Le refroidissement des locaux ;

Le placement de panneaux solaires thermiques et/ou photovoltaïques.

Afin de pouvoir calculer le coût global actualisé de chacune des combinaisons, une durée de vie spécifique est considérée pour chaque mesure portant sur un élément constitutif de l'enveloppe thermique ou sur un système.

Hormis les coûts de l'énergie qui évoluent avec le temps, on ne considère pas d'augmentation ni de diminution des coûts de réinvestissement avec le temps.

Les durées de vie normalisées des systèmes considérés dans l'étude proviennent de la norme **EN 15459** (relative aux systèmes énergétiques dans les bâtiments), complétées le cas échéant par d'autres normes et/ou expertises techniques.

Le remplacement périodique, qui fait référence au renouvellement indispensable de tout un élément de bâtiment en raison du vieillissement, est traité comme une catégorie de coûts distincte.

Le coût de remplacement est lié à la durée de vie de l'élément remplacé. Si l'élément remplacé a une durée de vie inférieure à celle de la période d'évaluation (ex: 30 ans pour le résidentiel), l'investissement sera réalisé une seconde fois à l'année  $n$  pour remplacer l'élément arrivé en fin de vie. On considère que le coût de ce remplacement est identique au coût d'investissement initial.

Dans la même logique, si la durée de vie de l'élément remplacé se prolonge au-delà de la période d'évaluation, on tient compte de la valeur résiduelle de l'investissement dans le calcul du CGA.

Description	Durée	Remarque - Justification
Durée de vie bâtiment	90 ans	idem résidentiel/non résidentiel
Durée de vie isolation du sol	90 ans	idem durée de vie du bâtiment
Durée de vie isolation de façade	30 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008 - insulation, buidling envelope
Durée de vie isolation du toit	30 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008 - insulation, buidling envelope
Durée de vie fenêtres	30 ans	EN15459:2007
Durée de vie protections solaires	20 ans	Aucune source disponible
Durée de vie nœuds constructifs	90 ans	idem bâtiment
Durée de vie étanchéité à l'air	90 ans	idem bâtiment

Tableau 11 : Durée de vie normalisée des éléments constitutifs de l'enveloppe du bâtiment

Description	Durée	Remarque - Justification
Durée de vie chaudière au gaz	20 ans	EN15459:2007 - boiler direct evacuation, but EN15459 2nd revision, Octobre 2008 says 30 years for large boiler
Durée de vie chaudière au gaz à condensation	20 ans	EN15459:2007 - boiler condensing, but EN15459 2nd revision, Octobre 2008 says 30 years for large boiler
Durée de vie chaudière biomasse	20 ans	EN15459:2007 - boiler direct evacuation, but EN15459 2nd revision, Octobre 2008 says 30 years for large boiler
Durée de vie PAC sol-eau	25 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008

Durée de vie sonde géothermique	90 ans	idem bâtiment
Durée de vie PAC eau-eau	25 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008
Durée de vie PAC air-eau	15 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008
Durée de vie PAC Air-Air	10 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008
Durée de vie Cogénération	15 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008 - combined heat and power below 5 MW
Durée de vie du réseau de chaleur	90 ans	idem bâtiment, no source
Durée de vie machine frigorifique à compression	15 ans	15 in EN15459:2007, but 17 in EN15459 2nd revision, Octobre 2008 - efficient chiller in AC
Durée de vie régulation chaud-froid	17 ans	EN15459:2007 - control equipment: 15-20 years
Durée de vie radiateurs	35 ans	EN15459:2007 - radiators: 30-40 years
Durée de vie chauffage sol	50 ans	EN15459:2007 - water floor heating
Durée de vie aérothermes	15 ans	EN15459:2007 - fan coil units
Durée de vie Distribution chauffage et refroidissement	35 ans	Étude de cas – 3E
Durée de vie éclairage	12 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008 - new/renovated office lighting
Durée de vie Ventilation	15 ans	EN15459 2nd revision, Octobre 2008 - efficient ventilation systems, but heat recovery system: 20 years according to EN15459 2nd revision, Octobre 2008
Durée de vie Installation PV	25 ans	Etude de cas 3E - 23 ans selon EN15459 2nd revision, Octobre 2008

Tableau 12 : Durée de vie normalisée des systèmes HVAC

### 2.2.6. Primes, incitants fiscaux et TVA

Les primes, et les incitants fiscaux éventuels ne sont pas pris en compte dans le cadre de l'étude. En effet les mesures d'aides à l'investissement sont par nature peu pérennes et biaisent l'analyse comparative des combinaisons cost-optimum.

La TVA est prise en compte dans le calcul financier.

Depuis février 2016, les **travaux de rénovation** et/ou de réparation d'habitations privées occupées depuis au moins dix ans bénéficient d'un taux de TVA de 6 % (au lieu de 21 %). Cet avantage fiscal s'applique à tous les travaux de rénovation et de réparation d'un logement privé.

Le taux de 21% est applicable aux coûts de la **construction neuve**.

En ce qui concerne **les énergies**, l'hypothèse appliquée dans cette étude sont :

- Un taux de TVA de 6% pour la biomasse (pellets)
- Un taux de TVA de 21% pour les autres vecteurs (mazout, gaz et électricité).

Ces valeurs ont été arrêtées en janvier 2023, en même temps que les prix de l'énergie repris au chapitre 2.2.4.

### 2.2.7. Cadre pour l'estimation de la valeur des bâtiments de référence

Lors de la détermination du cout global d'une mesure/groupe/variante, peuvent être omis les coûts suivants :

- Les couts qui sont identiques pour toutes les mesures/groupes/variantes évaluées ;
- Les couts liés à des éléments de bâtiment qui n'ont pas d'incidence sur la performance énergétique du bâtiment.

Afin de situer le coût des investissements visant à améliorer la performance énergétique et leur impact en termes de coût global actualisé par rapport à la valeur immobilière du bâtiment, nous avons pris l'option d'intégrer cette valeur immobilière dans le calcul du CGA.

Alors que des « valeurs immobilières » étaient utilisées dans l'étude précédente, ce sont bien ici des valeurs « intrinsèques hors-sol » qui sont utilisées.

#### Méthodologie de calcul de la valeur intrinsèque hors-sol :

Dans cette étude, nous avons établi une méthode adaptée aux paramètres de l'étude COZEB.

La méthode choisie est celle du calcul par valeur intrinsèque, c'est-à-dire le calcul de la valeur à neuf. Pour les bâtiments existants, la valeur à neuf est diminuée de la vétusté.

Certains paramètres habituellement évalués dans les calculs de valeur intrinsèque ont été négligés. C'est notamment le cas pour les éléments suivants :

- Situation du bien



- Facteurs de convenances
- Valeurs foncières

En effet, dans cette étude, l'hypothèse est faite que l'ensemble des bâtiments se situe dans un environnement standard, caractérisé par une mobilité moyenne, sans pollution sonore, aérienne ou routière, sans exposition au radon et hors des zones inondables.

L'individualité des raccordements électriques, gaz et eau ainsi que les techniques et chauffage et de ventilation pour chaque unité ont été prises en considération.

En conséquence, la valeur obtenue peut être sensiblement différentes des valeurs immobilières rencontrées sur le marché, ou obtenue par la méthode par point de comparaison.

### Indice ABEX :

La vétusté des constructions est établie en utilisant l'indice ABEX<sup>18</sup>. L'indice ABEX représente l'évolution du prix de la construction. Il s'agit d'une compilation des observations des membres d'une Commission dont l'activité s'exerce au niveau national. Celle-ci analyse le coût de la construction d'habitations et de logements privés. De ces données territorialement récoltées est tirée une moyenne nationale. L'indice ABEX reflète cette moyenne nationale et l'évolution de cette moyenne pour une période déterminée. Deux fois par an, la Commission de l'indice ABEX édite cet indice.

Le coût d'une construction peut varier d'une région à l'autre aussi bien sur l'ensemble du territoire que dans chacune des régions. Des constantes existent cependant :

#### **Le prix des matériaux**

Le prix des matériaux de base est fixé en tenant compte des productions de groupes importants fabricant et commercialisant au niveau national, européen ou mondial.

#### **Le coût de la main-d'œuvre**

Le coût de la main-d'œuvre est défini par des conventions pour l'ensemble du pays au même titre que les taxes appliquées dans le domaine de la construction.

#### **Les critères locaux**

Les différences que l'on constate d'une région à l'autre, d'un endroit à l'autre, relèvent plus de critères particuliers résultant de choix esthétiques, de mode de vie et de confort. Elles peuvent également être la conséquence de critères locaux qui généralement alourdissent le coût final d'un logement.

Ces critères particuliers ne peuvent être pris en considération par l'ABEX mais bien par les utilisateurs de l'Indice.

Lors de sa constitution en 1963, la Commission de l'indice ABEX a décidé de valoriser, deux fois par an, et suivant des métrés « types » d'immeubles caractéristiques du parc immobilier d'habitation en Belgique.

Le premier indice – ou indice 1 – est celui qui fut calculé et attribué au 1er janvier 1914<sup>19</sup>.

Dans cette étude, l'indice ABEX utilisé est celui en vigueur au 1er janvier 2023. Cet indice était égal 1004.

---

<sup>18</sup> <https://www.abex.be/fr/indice-abex/>

<sup>19</sup> Source : <https://www.abex.be/fr/indice-abex/>

### Valeur de référence :

Une valeur a été déterminée afin de pouvoir évaluer une valeur de construction par m<sup>2</sup>. Cette valeur de référence est de 1781,29 €/m<sup>2</sup> TVAC.

Cette valeur correspond au coût de construction moyen pour un bâtiment ayant une superficie au sol de 100 m<sup>2</sup>, construit suivant un mode constructif de type massif, et constitué des éléments suivants :

- Mur mixte composé d'un bloc béton, d'un isolant, d'une coulisse ventilée et d'un parement en briques,
- Plancher massif,
- Charpente légère,
- Menuiseries extérieures en PVC,
- Chauffage via une chaudière condensation gaz, émission de chaleur par radiateur.
- Système de ventilation avec alimentation et extraction mécanique.

Les prix de construction sont calculés sur base d'un coût réel (prix de revient) sans tenir compte des extras (marges) que le marché local pourrait permettre.

Pour permettre de tenir compte de l'âge de chaque bâtiment, la valeur à neuf est diminuée de la dépréciation physique du bâtiment (vétusté).

La vétusté est établie en fonction de la durée de vie du bâtiment et de ses équipements.

Les valeurs de durée de vie normalisée des éléments constitutifs des bâtiments utilisées sont les mêmes que pour l'étude précédente, et sont reprises ci-dessus.

### Code de mesurage :

Le code de mesurage utilisé dans cette étude est le code de mesurage **extra-muros**.

La surface extra-muros se rapporte au contour extérieur de tous les éléments de construction. Ce code de mesurage est compatible avec le code de mesurage de la méthode PEB.

### Facteurs de pondérations :

#### Division fonctionnelle :

Les bâtiments étudiés sont divisés en zones en fonction de leur utilisation. Cette subdivision permet d'appliquer un coefficient de pondération pour permettre de faire varier le coût de construction.

Par exemple, une surface de logement présentera le coefficient de pondération de 1.

Le calculateur qui a été utilisé, a été conçu pour évaluer la valeur vénale de logements existants, c'est pourquoi le facteur 1 est conservé.

Il a été décidé de conserver ce facteur 1 pour les fonctions suivantes :

- Bureau
- Enseignement
- Hotels
- Maisons de repos

Un facteur de pondération différent est appliqué pour certaines zones du bâtiment pour que l'estimation tienne compte du niveau de finition, du niveau d'équipement, des systèmes installés, etc.

Voici une liste non exhaustive des facteurs de pondération utilisés dans l'estimation des valeurs de l'étude de COZEB3 :

- Cave = entre 0,4 et 0,8
- Grenier aménagé ou non aménagé = entre 0,4 et 0,6

#### Système constructifs et qualité des éléments mise en œuvre

En fonction des systèmes constructifs rencontrés, des facteurs de pondération ont été appliqués.

Voici quelques exemples de facteurs de pondérations pour les systèmes constructifs évalués :

- Construction à ossature bois = entre 1,2 et 1,4
- Construction en structure métallique de type industriel = entre 0,4 et 0,8
- Bâtiment en bois massif = entre 1,1 et 1,3
- Construction en béton coffré = entre 1,1 et 1,3

Les systèmes constructifs ont été déterminés en fonction des éléments disponibles (plans, cahier de charges, bordereaux de prix, photos ...).

Il reste une part de subjectivité dans ce type d'estimation. L'expérience de l'estimateur et la consultation d'acteurs de la construction ont permis de réduire celle-ci.

De cette façon, les ordres de grandeurs sont approchés au mieux, afin de ne pas interférer dans l'interprétation des résultats des calculs de l'étude COZEB.

#### Estimation de la valeur du bâtiment pour les autres systèmes constructifs appliqués aux habitations neuves

Dans le cas des bâtiments neufs, nous avons dû établir une valeur intrinsèque hors-sol en fonction du système constructif. Une analyse a été réalisée dans la base de données cout pour établir une différence de cout de construction sur base du modèle HN1.

Nous avons déterminé les facteurs suivants :

- Système constructif du cas de base « construction mixte » : 100%
- Système constructif en maçonnerie avec crépis sur isolant : 93% de la valeur du cas de base.
- Système en ossature bois : 108% de la valeur du cas de base.

L'ensemble des valeurs intrinsèques hors sols des bâtiments de références étudiés dans cette étude se trouve dans les fiches descriptives des bâtiments en annexe A.

#### 2.2.8. Coûts des mesures d'amélioration

Dans le cadre de l'étude précédente, en 2018, deux bases de données des coûts une pour les bâtiments neufs, l'autre pour les bâtiments existants, ont été constituées, discutées puis validées avec les représentants du secteur de la construction durable, sous l'égide du cluster Cap2020 devenu Cap Construction, qui a organisé les consultations sectorielles nécessaires à cette fin.

Pour cette nouvelle étude, la **mise à jour** des bases de données des coûts a été confiée à un deviseur professionnel. Cette mise à jour a ensuite été soumise à la discussion et à la validation du secteur.

Ces 2 bases de données sont structurées en 3 blocs :

Des mesures enveloppe (isolation des parois, châssis, étanchéité à l'air...).

Des mesures systèmes HVAC et éclairage.

Des groupes constructifs au niveau de l'enveloppe, qui permettent d'atteindre une même valeur U selon différentes méthodes constructives (ex : isolation par l'intérieur, par l'extérieur, dans la coulisse), présentant des coûts différents. Détail en Annexe B.

Les **coûts respectifs** des mesures au niveau de l'enveloppe, des groupes (techniques ou choix constructifs) et des systèmes de chauffage, de production d'ECS, de ventilation, de refroidissement et d'éclairage sont répertoriés dans les tableaux Excel en annexe :

- COZEB3\_COT\_BD\_Couts\_EXISTANT\_final.xlsx
- COZEB3\_COT\_BD\_Couts\_NEUF\_final.xlsx

### 2.2.9. Coûts Opérationnels (OPEX)

Les frais d'exploitation et de maintenance sont calculés comme un pourcentage de l'investissement consacré annuellement à l'entretien des systèmes considérés. Ces coûts sont actualisés sur la période d'évaluation.

Les coûts liés à l'exploitation et à la maintenance sont pris en compte pour les différentes mesures sur leur durée de vie respective. Ces coûts sont estimés sur base de la norme EN 15459, d'études de cas ou d'expertises techniques pour les techniques non-référencées dans la norme.

Description	% du coût d'investissement	Remarque - Justification
Maintenance chaudière au gaz	1,50%	EN15459:2007 - boiler direct evacuation: 1-2%
Maintenance chaudière au gaz à condensation	1,50%	EN15459:2007 - boiler condensing: 1-2%
Maintenance chaudière à la biomasse	1,50%	EN15459:2007 - boiler direct evacuation: 1-2%
Maintenance PAC sol-eau	2,00%	EN15459:2007 - heat pumps: 2-4%
Maintenance sonde géothermique	-	Considéré inclus dans maintenance PAC
Maintenance PAC eau-eau	2,00%	EN15459:2007 - heat pumps: 2-4%
Maintenance PAC air-eau	3,00%	EN15459:2007 - heat pumps: 2-4%
Maintenance PAC Air-Air	3,00%	EN15459:2007 - heat pumps: 2-4%
Maintenance Cogénération	7,50%	Étude de cas – 3E
Maintenance réseau de chaleur	-	aucune source disponible
Maintenance machine frigorifique à compression	4,00%	EN15459:2007
Maintenance regulation chaud-froid	3,00%	EN15459:2007 - control equipment: 2-4%
Maintenance Radiateurs	1,50%	EN15459:2007 - radiators: 1-2%
Maintenance chauffage sol	2,00%	EN15459:2007 - water floor heating
Maintenance aérothermes	4,00%	EN15459:2007 - fan coil units

Maintenance Distribution chauffage et refroidissement	-	Inclus dans les coûts de maintenance du système d'émission
Maintenance éclairage	5,00%	Étude de cas – 3E
Maintenance des systèmes de ventilation	4,00%	Étude de cas – 3E
Maintenance Installation PV	1,55%	Etude de cas 3E –

Tableau 13 : Coûts de maintenance des différents systèmes HVAC considérés dans l'études

### 2.3. Conditions climatiques

Les conditions climatiques utilisées pour le calcul de l'optimalité en fonction des coûts sont les suivantes :

Localisation	L'ensemble de la Région wallonne constituant une seule zone climatique, la localisation exacte du bâtiment n'a aucun impact sur les données climatiques
Degrés-jours de chauffage	Maisons unifamiliales et immeubles à appartements : 2.812,5 DJ Bureaux et écoles : 3.907,5 DJ Maisons de repos et hôtels : 3.177,5 DJ
Degrés-jours de refroidissement	Maisons unifamiliales et immeubles à appartements : 4.272,5 DJ Bureaux, écoles, maisons de repos et hôtels : 5.367,5 DJ
Source de la série de données climatiques	Institut Royal de Météorologique
Description du terrain	L'ensemble de la Région wallonne constituant une seule zone climatique, la description du terrain n'a aucun impact sur les données climatiques.

Tableau 14 : Conditions climatiques

### 2.4. Définition des bâtiments de référence

Le Règlement Délégué de l'UE n°244/2012 établissant un cadre méthodologique comparatif de calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts des exigences minimales en matière de performance énergétique des bâtiments et éléments de bâtiment précise que : « pour chaque catégorie de bâtiment il convient de définir au moins un bâtiment de référence pour les bâtiments neufs et au moins deux bâtiments de référence pour les bâtiments faisant l'objet d'une rénovation importante ».

L'étude CO-ZEB originale (2012-2013) et le complément d'étude effectué en 2014-2015 visaient à définir des typologies représentatives du parc de bâtiments afin de répondre à l'article 4 de la Directive Efficacité Energétique concernant la stratégie de rénovation du parc immobilier à long terme.

Les bâtiments de références repris dans cette étude sont d'une part ceux des études COZEB précédentes, et d'autres part ceux représentant les 2 nouvelles typologies, présentés et validés par le secteur lors de la consultation.

Au total, c'est 54 de bâtiments qui ont été retenus comme bâtiments de référence pour les analyses cost-optimum, soit :

- 14 habitations existantes
- 12 habitations neuves (4 en 3 modes constructifs)
- 9 immeubles à appartements existants
- 1 immeuble à appartements neuf
- 5 bureaux existants
- 1 bureau neuf
- 4 établissements scolaires existants
- 2 établissements scolaires neufs
- 1 maison de repos neuve
- 2 maisons de repos existantes
- 1 hôtel neuf
- 2 hôtels existants

Chaque bâtiment est représentatif d'une typologie constructive et affiche une certaine représentativité au sein de son segment (estimée en % du total), afin de pouvoir tirer des conclusions pour l'ensemble du parc.

## 2.5. Mesures – Variantes – Combinaisons – Groupes

### 2.5.1. Terminologie

Les abréviations suivantes sont utilisées dans ce chapitre :

*C* : inchangé (référence au cas de base)

*ME* : mur en contact avec l'extérieur

*MS* : mur en contact avec le sol

*Mcave* : mur en contact avec une cave

*Meanc* : mur en contact avec un espace adjacent non chauffé

*Mvv* : mur en contact avec un vide ventilé

*Ch* : châssis

*DV* : double vitrage

*TV* : triple vitrage

*Pext* : porte extérieure

*Fen* : fenêtre

*PIE* : plancher en contact avec l'extérieur

*Plcave* : plancher en contact avec une cave

*Plsol* : plancher en contact avec le sol

*Plvv* : plancher en contact avec un vide ventilé

*T* : toit

*PfGr* : plafond en contact avec un grenier

*FT* : fenêtre de toit

*EA* : étanchéité à l'air

*PS* : protection solaire

*ST* : solaire thermique

Les principaux termes utilisés dans l'outil et dans la suite du rapport sont brièvement expliqués ci-dessous.

**Mesure** : modification de la performance énergétique d'un élément de bâtiment

Ex : Toit U 0,20 W/m<sup>2</sup>K à T0.20

**Variante** : set de mesures enveloppe et/ou système

Ex1 : Variante 1 > T0.20 (performance des toits à 0,20W/m<sup>2</sup>K) + fen1.1 (amélioration des fenêtres + portes) + EA4 (étanchéité à l'air à 4m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>))

Ex2 : Variante 2 > Ventil D (système de ventilation D)

**Combinaison** : combinaison de variantes. Exemple :

304770 2 T0.2 ; fen1.1; EA4(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE, Etanchéité 4, Pext2, T0.20), Ventil D(Système de ventilation [zv12], Ventilation D)

Combinaisons des **variantes EA2, M3, T2, S4 et Ventilation D**, comprenant les **mesures** suivantes :

**EA2** : une étanchéité à l'air de 2 m<sup>3</sup>h/m<sup>2</sup> de l'enveloppe ;

**M3** : isolation des murs en contact avec l'extérieur (ici au niveau U0.20),

**T2** : isolation de la toiture au niveau U0.20 ;

**Ventilation D** : placement d'un système de ventilation double flux avec récupérateur de chaleur ;

**S4** : isolation des planchers au niveau U0.15

**Groupe\*** : choix ou technique constructive au niveau de l'enveloppe, permettant d'atteindre la mesure (ex : U de paroi) à un coût déterminé :

Ex : pour M0.20 :

Groupe M2 : Isolation par l'extérieur + crépi pour les murs pleins / creux

Groupe M3 : Isolation par l'extérieur + brique pour les murs pleins

Groupe M4 : Isolation par la coulisse pour les murs creux

Chaque groupe constructif permet d'atteindre différentes valeurs U.

Exemple : M3 correspond à une technique constructive (isolation par l'extérieur + briquettes) à laquelle l'épaisseur d'isolation sera adaptée pour atteindre la valeur U à considérer (0,24 ; 0,20 ou 0,15 W/m<sup>2</sup>K).

\* Cf annexe B groupes constructifs

### 2.5.2. Sets de mesures pour les bâtiments résidentiels

Les mesures envisagées dans cette étude sont les mêmes que dans les études précédentes. Certaines mesures ont cependant été supprimées, car elles ne respectaient pas les exigences en vigueur en 2022.

Les variantes sont regroupées par catégorie de mesures (enveloppe/systèmes) et de bâtiments (résidentiel/non résidentiel, neuf/existant).

Les combinaisons de ces mesures, quant à elles, ont été largement adaptées afin de répondre aux évolutions réglementaires et stratégiques, à la réalité du terrain et aux évolutions technologiques.

En effet, depuis l'étude précédente, les objectifs et stratégies en matière de performance énergétique des bâtiments en Wallonie ont largement évolué :

- Exigences PEB pour les bâtiments neufs (QZen) ;
- Exigences relatives à l'obtention des primes (bien que pas considérées d'un point de vue économique dans cette étude) ;

- Stratégie wallonne à long terme pour la rénovation énergétique des bâtiments (2017 et 2020) ;
- Plan Air Climat Energie 2030 de la Wallonie (2022 et 2023) qui planifie la disparition des chaudières au mazout par exemple.

Des évolutions technologiques et économiques de certaines solutions telles que les ballons thermodynamiques pour la production d'ECS, ont également été constatées.

Par contre, la philosophie globale appliquée dans cette étude reste inchangée, à savoir le « *Trias Energetica* » :

- 1° Minimiser les besoins d'énergie
- 2° Utiliser au mieux les sources d'énergie renouvelable
- 3° Recourir à des systèmes énergétiques performants

Les variantes consistent en une (sélection de) mesure(s) validée(s) par le secteur.

Pour ce qui est des systèmes, seuls les rendements des systèmes de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire de climatisation et de ventilation ont été pris en compte dans l'étude.

Afin de répondre à la demande de la CE, toutes les parois de même type sont regroupées dans une même variante. Tous les murs sont par exemple regroupés dans la variante U Mur 0,24 sans distinction de leur environnement spécifique.

Au niveau des systèmes, les principaux producteurs de chauffage et d'eau chaude sanitaire font l'objet d'une variante spécifique. Seuls les systèmes soumis à la Directive Ecodesign ont été pris en compte dans cette étude.

Les systèmes solaires thermiques sont dimensionnés selon la taille du bâtiment de référence et l'usage de ce dernier.

Compte tenu de ces évolutions, de nouveaux sets de mesures courants et cohérents techniquement ont été utilisés dans cette étude et sont décrits ci-dessous par typologie de bâtiments.

Légende et performances des variantes enveloppe et système pour les bâtiments résidentiels :



Variantes Enveloppe	Mesures appliquées										
M 0.24	ME0.24	U= 0.24 W/m².K	Ms0.24	U= 0.24 W/m².K	Mcave0.24	U= 0.24 W/m².K	Meanc0.24	U= 0.24 W/m².K	Mvw0.24	U= 0.24 W/m².K	
M 0.20	ME0.20	U= 0.20 W/m².K	Ms0.20	U= 0.20 W/m².K	Mcave0.20	U= 0.20 W/m².K	Meanc0.20	U= 0.20 W/m².K	Mvw0.2	U= 0.20 W/m².K	
M 0.15	ME0.15	U= 0.15 W/m².K	Ms0.15	U= 0.15 W/m².K	Mcave0.15	U= 0.15 W/m².K	Meanc0.15	U= 0.15 W/m².K	Mvw0.15	U= 0.15 W/m².K	
Fen 1.1	Ch1.7- DV1.1/0.63	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.1 W/m².K g=0.63	Ftoit1	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.1 W/m².K g=0.63	Pext2	U= 2.00 W/m².K	Pcave2	U= 2.00 W/m².K	Peanc2	U= 2.00 W/m².K	
Fen 1.0	Ch1.7- DV1.0/0.5	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.0 W/m².K g=0.5	Ftoit1	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.0 W/m².K g=0.5	Pext2	U= 2.00 W/m².K	Pcave2	U= 2.00 W/m².K	Peanc2	U= 2.00 W/m².K	
Fen 0.6	Ch0.95- TV0.6/0.5	Uf= 0.95 W/m².K Triple vitrage Ug=0.6 W/m².K g=0.5	Ftoit2	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=0.50 W/m².K g=0.50	Pext0.8	U= 0.8 W/m².K	Pcave0.8	U= 0.8 W/m².K	Peanc2	U= 0.8 W/m².K	
PI 0.24	PIE0.24	U= 0.24 W/m².K	PISol0.24	U= 0.24 W/m².K	PIcave0.24	U= 0.24 W/m².K	PIeanc0.24	U= 0.24 W/m².K	PIvw0.24	U= 0.24 W/m².K	
PI 0.20	PIE0.20	U= 0.20 W/m².K	PISol0.20	U= 0.20 W/m².K	PIcave0.20	U= 0.20 W/m².K	PIeanc0.20	U= 0.20 W/m².K	PIvw0.20	U= 0.20 W/m².K	
PI 0.15	PIE0.15	U= 0.15 W/m².K	PISol0.15	U= 0.15 W/m².K	PIcave0.15	U= 0.15 W/m².K	PIeanc0.15	U= 0.15 W/m².K	PIvw0.15	U= 0.15 W/m².K	
T 0.24	TP0.24	U= 0.24 W/m².K	T0.24	U= 0.24 W/m².K							
T 0.20	TP0.20	U= 0.20 W/m².K	T0.20	U= 0.20 W/m².K							
T 0.15	TP0.15	U= 0.15 W/m².K	T0.15	U= 0.15 W/m².K							
PS	PS	Protection solaire extérieure manuelle									
EA 2	Etanchéité 2	v50=2 m3/h.m²									
Ventil C+	Ventilation C+	Alimentation naturelle, Evacuation mécanique. Ventilation à la demande F réduction= 0.9									
Ventil D	Ventilation D	Ventilation double-flux avec récupérateur de chaleur n=75%									

Variantes Systèmes (chauffage + ECS)		Mesures appliquées					
		Chauffage		Emetteurs		ECS	
CHM-CCgaz +ECS SANS stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par chaudière gaz mixte à condensation instantanée	Ccgaz + ECS SANS stock	Chaudière Gaz à Condensation η=107% Sans Stockage	Rad	Radiateurs		
CHM-CCgaz + ECS avec stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par chaudière gaz mixte à condensation avec stockage	Ccgaz + ECS AVEC stock	Chaudière Gaz à Condensation η=107% avec Stockage	Rad	Radiateurs	a/tampon	Volume tampon présent
CHS-CCgaz rad+ Boiler thermo	Chauffage central par chaudière gaz à condensation, eau chaude sanitaire produite par une boiler thermodynamique	CHS- Ccgaz + boiler thermo	Chaudière Gaz à Condensation η=107%	Rad	Radiateurs	Boiler thermo	Boiler thermodynamique
CHS-CCgaz	Chauffage central par chaudière gaz à condensation	CHS- Ccgaz	Chaudière Gaz à Condensation η=107%	Rad	Radiateurs		
CHM-PAC air- eau + ECS avec stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par pompe à chaleur air-eau mixte	CHM-PAC air- eau avec stock	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,62	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température	a/tampon	Volume tampon présent
CHS-PAC air- eau	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-eau	CHS-PAC air- eau	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,62	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température		
CHS-PAC air- eau + boiler thermo	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-eau, eau chaude sanitaire produit par un boiler thermodynamique	CHS-PAC air- eau + boiler thermo	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,62	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température	Boiler thermo	Boiler thermodynamique
CHM-CNC bio + ECS stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par une chaudière biomasse mixte	CHM-CNC bio + ECS avec stock	Chaudière biomasse non à condensation mixte avec stockage η=84 %	Rad	Radiateurs	a/tampon	Volume tampon présent
CHS-CNC bio + boiler thermo	Chauffage central produit par une chaudière biomasse, eau chaude sanitaire produite par un boiler thermodynamique	CHS-CNC bio + boiler thermo	Chaudière biomasse non à condensation η=84 %	Rad	Radiateurs	Boiler thermo	Boiler thermodynamique
CHS-CNC bio	Chauffage central produit par une chaudière biomasse	CHS-CNC bio	Chaudière biomasse non à condensation η=84 %	Rad	Radiateurs		
CHS-PP	Chauffage local par un poele pellet	CHS-PP	Poêle Pellet				
CHS-PP; boiler thermo	Chauffage local par un poele pellet, eau chaude sanitaire produite par un boiler thermodynamique	CHS-PP + boiler thermo	Poêle Pellet			Boiler thermo	Boiler thermodynamique
ST6	Panneaux solaires thermiques	ST6				Surface de Capteurs= 6m² Inclinaison 35° Orientation -45°(SE)	

### Pour les maisons unifamiliales individuelles existantes - HE :

Les mesures d'amélioration de l'enveloppe et des systèmes, appliquées dans cette étude portent sur les exigences de performance minimum en vigueur en termes de déperdition thermique maximale au niveau des parois ( $U_{max}$ ), et sur une indication de consommation spécifique d'énergie primaire (Espec) (PER uniquement) et de ratio de consommation d'énergie primaire ( $E_w$ ).

Pour les bâtiments existants, la recherche du niveau cost optimum de ces exigences se réalise en 2 temps.

- Dans un premier temps: pour rechercher les niveaux U optimum des parois, les éléments correspondants dans le bâtiment de référence sont remplacés par des éléments affichant différents niveaux de performances (ex :  $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $U=0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).
- Dans un second temps des variantes enveloppe sont combinées avec des variantes systèmes HVAC pour rechercher les niveaux Espec et  $E_w$  optimaux.

Certaines variantes regroupent plusieurs mesures d'amélioration afin de répondre à la réalité du terrain. Par exemple, le remplacement des châssis est toujours effectué ensemble avec le remplacement des portes.

La mesure isolation des murs s'accompagne automatiquement du remplacement des fenêtres et portes. Dans les bâtiments existants, une même variante d'amélioration de la performance peut présenter différents coûts en fonction du groupe constructif. Par exemple : différentes techniques d'isolation (par l'intérieur, par l'extérieur...) permettent d'atteindre un même U de paroi.

Les sets de mesures étudiés sur les HE pour déterminer les niveaux de performance cost optimum U des parois sont les suivants :

	Nom de la variante	Valeur U ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Description de la variante
<b>MURS</b>	M0.24	0.24	ME0.24 + Ms0.24 + Mcave 0.24 + Meanc 0.24 + Mvv 0.24
	M0.20	0.20	ME0.2 + Ms0.20 + Mcave 0.20 + Meanc 0.20 + Mvv 0.20
	M0.15	0.15	ME0.15 + Ms0.15 + Mcave 0.15 + Meanc 0.15 + Mvv 0.15
<b>CHASSIS</b>	Fen 1.1	1.1	Ch1.7-DV1.1/0.63 + Pext 2 + Fen toit 1
	Fen 1.0	1.0	Ch1.7-DV1.0/0.5 + Pext 2 + Fen toit 1
	Fen 0.6	0.6	Ch0.95-TV0.6/0.5 + Pext 0.8 + Fen toit 2 (0.5)
<b>PLANCHERS</b>	Pl0.24	0.24	PlE0.24 + Plcave 0.24 + Pl sol 0.24 + Pl vv 0.24
	Pl0.20	0.20	PlE0.20 + Plcave 0.20 + Pl sol 0.20 + Pl vv 0.20
	Pl0.15	0.15	PlE0.15 + Pl cave 0.15 + Pl sol 0.15 + Pl vv 0.15
<b>TOITS</b>	T0.24	0.24	T0.24 + TP 0.24 + PfGr0.24
	T0.20	0.20	T0.20 + TP 0.20 + PfGr0.20
	T0.15	0.15	T0.15 + TP 0.15 + PfGr0.15

Dans un souci de cohérence, nous avons groupé toutes les parois de même type.

Les sets de mesures étudiés sur les HE pour déterminer les niveaux de performance cost optimum  $E_w$  / Espec sont les suivants :

- 13 variantes enveloppe

N° variante	U TOITS (W/m²K)	U MURS (W/m²K)	U PLANCHERS (W/m²k)	U FENETRES (W/m²K)	U PORTES (W/m²k)	FToit	PS	ETANCHEITE À L'AIR (m³/hm²)
0	0,24	0.24	0.24	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
1	0,2	IC	IC	IC	IC	IC		IC
1'	0.24	IC	IC	IC	IC	IC		IC
2	0,2	IC	IC	Fen 1.1	2	FT1		EA 4
2'	0.24	IC	IC	Fen 1.1	2	FT1		EA 4
3	0,2	0,24	IC	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
4	0,2	0,2	IC	Fen 1.0	2	FT1		EA 2
5	0,2	0,2	0,24	Fen 1.0	2	FT1		EA 2
6	0,2	0,2	0,24	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
6'	0,2	0,2	0,24	Fen 1.1	2	FT1	Oui	EA 2
7	0,15	0,2	0,2	Fen 1.0	2	FT1		EA 2
8	0,15	0,15	0,2	Fen 0.6	0,8	FT2		EA 2
8'	0,15	0,15	0,2	Fen 0.6	0,8	FT2	Oui	EA 2

L'étanchéité à l'air est de 4 (EA4) (v50 [m³/hm²]) si les murs restent inchangés et que les fenêtres et portes sont remplacés. Elle passe à 2 (EA 2) quand les murs sont isolés.

- 2 variantes ventilation

Ventil D	Double flux avec récupération de chaleur. Rendement du récupérateur de chaleur = 75%.
Ventil C+	Amenées d'air naturelles et extraction mécanique simple flux centralisée. Facteur de réduction : 0.9

- 12 variantes systèmes (chauffage, ECS, solaire thermique)

N° variante	Nom de la variante	CHAUFFAGE	EMISSION	ECS	STOCKAGE	ST [m²]
S1	CHM-CCgaz + ECS sans stock	Chaudière gaz condensation	radiateurs	Chaudière gaz condensation	non	0
S1'	CHM-CCgaz + ECS avec stock; ST6	Chaudière gaz condensation	radiateurs	Chaudière gaz condensation	oui	6
S2	CHS-CCgaz + boiler thermo	Chaudière gaz condensation	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	0
S2'	CHS-CCgaz + boiler thermo ; ST6	Chaudière gaz condensation	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	6
S3	CHM-PAC air-eau avec stock	Pompe à chaleur Air-eau	Ventilo-convecteurs	Pompe à chaleur Air-eau	oui	0
S3'	CHM-PAC air-eau avec stock ; ST6	Pompe à chaleur Air-eau	Ventilo-convecteurs	Pompe à chaleur Air-eau	oui	6

S4	CHM-CNC bio + ECS avec stock	Chaudière biomasse	radiateurs	Chaudière biomasse	oui	0
S4'	CHM-CNC bio + ECS avec stock; ST6	Chaudière biomasse	radiateurs	Chaudière biomasse	oui	6
S5	CHS-CNC bio ; boiler thermo	Chaudière biomasse	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	0
S5'	CHS-CNC bio ; boiler thermos; ST6	Chaudière biomasse	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	6
S6	CHS-pp ; boiler thermo	Poêle pellet	-	Boiler thermodynamique	oui	0
S6'	CHS-pp ; boiler thermo ; ST6	Poêle pellet	-	Boiler thermodynamique	oui	6

Les pompe à chaleur air-eau mixte sont combinées avec un système d'émission de type ventilo-convecteur afin de valoriser le fonctionnement en basse température

Chaque variante est simulée avec et sans solaire thermique.

La chaudière gaz condensation est considérée avec stockage pour la variante avec solaire thermique.

Les installations de chauffage par le sol en rénovation n'ont pas été considérées car il faudrait isoler les planchers, ce qui est rarement le cas en rénovation.

L'assemblage des différentes variantes permettent de calculer 546 combinaisons.

#### Pour les maisons unifamiliales individuelles neuves - HN :

Les mesures enveloppe et systèmes appliquées à l'étude portent sur les exigences de performance minimum en vigueur en termes de déperdition thermique maximale au niveau des parois ( $U_{max}$ ) reprises au chapitre 1.1, d'isolation de l'enveloppe (K), de consommation spécifique d'énergie primaire (Espec) (PER uniquement) et de ratio de consommation d'énergie primaire ( $E_w$ ).

Pour les bâtiments neufs, la recherche du niveau cost optimum de ces exigences se réalise en un seul temps, contrairement aux bâtiments existants.

Pour les bâtiments neufs, la technique constructive utilisée pour les variantes est identique à celle du bâtiment de base, de manière à conserver la représentativité de la typologie du bâtiment (ex : sur un bâtiment de référence à ossature bois, la technique constructive utilisée pour la variante sera également l'ossature bois). Un même type de logement unifamilial neuf se décline ainsi en trois groupes constructifs (T1, T2, T3) afin de comparer les coûts des performances spécifiques à chacune des techniques de construction (T1 : maçonnerie traditionnelle (mur creux) / T2 : maçonnerie avec crépi sur isolant (mur plein) / T3 : ossature bois).

Le choix de ces techniques a été validé par le secteur dans le cadre des études précédentes dans le respect de transformations/constructions garantissant la prise en compte des problématiques spécifiques à chacune de ces techniques (tels que les risques de condensation par exemple).

Les sets de mesures étudiés sur les HN pour déterminer les niveaux de performance cost optimum EW / Espec, U et K du bâtiment sont les suivants :

- **Enveloppe**

10 variantes enveloppe :

N° variante	U TOITS (W/m²K)	U MURS (W/m²K)	U PLANCHERS (W/m²K)	FENETRES	U PORTES (W/m²K)	FToit	ETANCHEITE à l'AIR (m³/hm²)	PS
0	0,24	0,24	0,24	Fen 1.1	2	FT1	2	
0'	0,24	0,24	0,24	Fen1.1	2	FT1	2	oui
1	0,2	0,24	0,24	Fen1.1	2	FT1	2	
1'	0,2	0,24	0,24	Fen1.1	2	FT1	2	oui
2	0,2	0,2	0,2	Fen1.0	2	FT1	2	
2'	0,2	0,2	0,2	Fen1.0	2	FT1	2	oui
3	0,15	0,15	0,15	Fen 1.0	2	FT1	2	
3'	0,15	0,15	0,15	Fen 1.0	2	FT1	2	oui
4	0,15	0,15	0,15	Fen 0.6	0,8	FT2	2	
4'	0,15	0,15	0,15	Fen 0.6	0,8	FT2	2	oui

- **Ventilation**

2 variantes ventilation :

Ventil D	Double flux avec récupération de chaleur
Ventil C+	Amenées d'air naturelles et extraction mécanique simple flux centralisée. Facteur de réduction : 0.9

- **Systèmes**

12 variantes systèmes (chauffage, ECS, solaire thermique) :

N° variante	Nom de la variante	CHAUFFAGE	EMISSION	ECS	STOCKAGE	ST [m²]
S1	CHM-CCgaz + ECS sans stock	Chaudière gaz	radiateurs	Chaudière gaz	non	0
S1'	CHM-CCgaz + ECS avec stock; ST6	Chaudière gaz	radiateurs	Chaudière gaz	oui	6
S2	CHS-CCgaz + boiler thermo	Chaudière gaz	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	0
S2'	CHS-CCgaz + boiler thermo ; ST6	Chaudière gaz	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	6
S3	CHM-PAC air-eau avec stock	PAC air-eau	Surfacique	PAC air-eau	oui	0
S3'	CHM-PAC air-eau avec stock ; ST6	PAC air-eau	Surfacique	PAC air-eau	oui	6
S4	CHM-CNC bio + ECS avec stock	Chaudière biomasse	radiateurs	Chaudière biomasse	oui	0

S4'	CHM-CNC bio + ECS avec stock; ST6	Chaudière biomasse	radiateurs	Chaudière biomasse	oui	6
S5	CHS-CNC bio ; boiler thermo	Chaudière biomasse	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	0
S5'	CHS-CNC bio ; boiler thermos; ST6	Chaudière biomasse	radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	6
S6	CHS-pp ; boiler thermo	Poêle pellet	-	Boiler thermodynamique	oui	0
S6'	CHS-pp ; boiler thermo ; ST6	Poêle pellet	-	Boiler thermodynamique	oui	6

Il s'agit des mêmes sets de mesures que pour les habitations existantes, sauf pour la PAC air-eau qui est combinée à un système de chauffage sol.

L'assemblage des différentes variantes permet de calculer 429 combinaisons.

### Pour les immeubles à appartements existants - IAE :

- **Enveloppe**

Les variantes enveloppe sont identiques aux habitations.

- **Ventilation**

Les variantes ventilation sont identiques aux habitations.

- **Systèmes**

La principale hypothèse faite pour les systèmes de chauffage et d'ECS des immeubles à appartements consiste en la conservation du système collectif ou individuel.

#### Sets de mesures pour les installations de chauffage et ECS.

- 6 variantes lorsque le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sont collectifs en situation initiale.

Situation initiale		VARIANTES		N° variante	Nom de la variante
Chauffage collectif	Production ECS collective	CHAUFFAGE COLLECTIF	PRODUCTION D'ECS COLLECTIVE AVEC STOCKAGE		
		Gaz	Gaz	S1	CHM-CCgaz + ECS avec stock
			Gaz + ST *	S1'	CHM-CCgaz + ECS avec stock; ST6
		Biomasse	Biomasse	S2	CHM-CNC bio + ECS avec stock
			Biomasse + ST*	S2'	CHM-CNC bio + ECS avec stock; ST6

		PAC	PAC air eau	S3	CHM-PAC air-eau avec stock
			PAC air eau + ST*	S3'	CHM-PAC air-eau avec stock ; ST6

L'assemblage des différentes variantes enveloppe/ventilation avec les systèmes repris ci-dessus permet de calculer 294 combinaisons.

- 4 variantes lorsque le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sont individuels en situation initiale.

Situation initiale		VARIANTES		N° variante	Nom de la variante
Chauffage individuel	Production ECS individuelle	CHAUFFAGE INDIVIDUEL	PRODUCTION D'ECS INDIVIDUELLE		
		Gaz	Gaz instantané	S4	CHM-CCgaz + ECS sans stock
		PAC	PAC	S5	CHM-PAC air-eau avec stock
		Poêle pellet	IC*	S6	CHS-pp
			Boiler thermodynamique	S7	CHS-pp ; boiler thermo

L'assemblage des différentes variantes enveloppe/ventilation avec les systèmes repris ci-dessus permet de calculer 210 combinaisons.

- 6 variantes lorsque le chauffage est collectif et la production d'eau chaude sanitaire est individuelle en situation initiale.

Situation initiale		VARIANTES		N° variante	Nom de la variante
Chauffage collectif	Production ECS individuelle	CHAUFFAGE COLLECTIF	PRODUCTION D'ECS INDIVIDUELLE		
		Gaz	IC*	S8	CHS-CCgaz
			Boiler thermodynamique	S9	CHS-CCgaz + boiler thermo
		Biomasse	IC*	S10	CHS-CNC bio
			Boiler thermodynamique	S11	CHS-CNC bio ; boiler thermo
		PAC	IC*	S12	CHS-PAC air-eau
			Boiler thermodynamique	S13	CHS-PAC air-eau + boiler thermo

L'assemblage des différentes variantes enveloppe/ventilation avec les systèmes repris ci-dessus permet de calculer 294 combinaisons.

La mesure chaudière gaz instantanée pour la production d'ECS individuelle (par appartement) n'a pas été retenue compte tenu du peu de réalisme de prévoir des arrivées de gaz dans chaque appartement pour la

production d'ECS uniquement. Si une production de gaz instantanée pour l'ECS est existante, elle sera étudiée avec les variantes dans lesquelles la production d'ECS est inchangée.

### Pour les immeubles à appartements neufs - IAN :

- **Enveloppe**

Les variantes enveloppe sont identiques aux habitations.

- **Ventilation**

Les variantes ventilation sont identiques aux habitations.

- **Systèmes**

#### Sets de mesures pour les installations de chauffage et ECS

- 3 variantes combinant la production collective de chauffage et d'eau chaude sanitaire déclinées avec et sans panneaux solaire thermique (18 m<sup>2</sup>)

CHAUFFAGE COLLECTIF	PRODUCTION D'ECS COLLECTIVE AVEC STOCKAGE	N° variante	Nom de la variante
Gaz	Gaz	S1	CHM-CCgaz + ECS avec stock
	Gaz + ST	S1'	CHM-CCgaz + ECS avec stock; ST6
Biomasse	Biomasse	S2	CHS-CCgaz + boiler thermo
	Biomasse + ST	S2'	CHS-CCgaz + boiler thermo; ST6
PAC air eau	PAC air eau	S3	CHM-PAC air-eau avec stock
	PAC air eau + ST	S3'	CHM-PAC air-eau avec stock; ST6

- 4 variantes combinant le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire individuel.

CHAUFFAGE INDIVIDUEL	ECS INDIVIDUELLE	N° variante	Nom de la variante
Gaz	Gaz instantané	S8	CHM-CCgaz + ECS sans stock
	Boiler thermodynamique	S9	CHS-CCgaz + boiler thermo
PAC	PAC	S10	CHM-PAC air-eau avec stock
Poêle pellet	Boiler thermodynamique	S11	CHS-pp; boiler thermo

- 4 variantes combinant le chauffage collectif et la production d'eau chaude sanitaire individuelle.

CHAUFFAGE COLLECTIF	PRODUCTION D'ECS INDIVIDUELLE	N° variante	Nom de la variante
Gaz	Gaz instantané	S4	CHM-CCgaz + ECS sans stock



	Boiler thermodynamique	S5	CHS-CCgaz + boiler thermo
Biomasse	Boiler thermodynamique	S6	CHS-CNC bio ; boiler thermo
PAC air eau	Boiler thermodynamique	S7	CHS-PAC air-eau + boiler thermo

L'assemblage des différentes variantes enveloppe/ventilation avec l'ensemble des systèmes repris ci-dessus permet de calculer 495 combinaisons.

### La mesure photovoltaïque pour les bâtiments résidentiels

Les installations photovoltaïques ne sont pas systématiquement combinées aux mesures appliquées aux cas de base étudiés compte tenu de leur impact très important sur les indicateurs de performance Espec et Ew. En effet la production locale d'électricité est valorisée à 100% dans la méthode de calcul PEB 2021, sans lien direct avec la performance ou les besoins énergétiques des bâtiments analysés.

Cette méthode ne permet pas de prendre en compte la notion d'autoconsommation et considère que 100% de l'énergie produite localement est consommée localement.

Des installations photovoltaïques seront donc testées à posteriori sur :

- le cost optimum de l'habitation individuelle existante HE5 (3.75 kWc) ;
- le cost optimum de l'habitation individuelle neuve HN1 T1 (3.75 kWc) ;
- le cost optimum de l'immeuble à appartements existant IAE1 (15 kWc) ;
- le cost optimum de l'immeuble à appartements neuf IAN1 (15 kWc).

#### 2.5.3. Sets de mesures pour les bâtiments non résidentiels

Légende et performances des variantes enveloppe et système pour les bâtiments non résidentiels :

Variantes	Mesures appliquées									
Enveloppe										
M 0.24	ME0.24	U= 0.24 W/m².K	Ms0.24	U= 0.24 W/m².K	Mcave0.24	U= 0.24 W/m².K	Meanc0.24	U= 0.24 W/m².K	Mvv0.24	U= 0.24 W/m².K
M 0.20	ME0.20	U= 0.20 W/m².K	Ms0.20	U= 0.20 W/m².K	Mcave0.20	U= 0.20 W/m².K	Meanc0.20	U= 0.20 W/m².K	Mvv0.2	U= 0.20 W/m².K
M 0.15	ME0.15	U= 0.15 W/m².K	Ms0.15	U= 0.15 W/m².K	Mcave0.15	U= 0.15 W/m².K	Meanc0.15	U= 0.15 W/m².K	Mvv0.15	U= 0.15 W/m².K
Fen 1.1	Ch1.7- DVI.1/0.63	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.1 W/m².K g=0.63	Ftoit1	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.1 W/m².K g=0.63	Pext2	U= 2.00 W/m².K	Pcave2	U= 2.00 W/m².K	Peanc2	U= 2.00 W/m².K
Fen 1.0	Ch1.7- DVI.0/0.5	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.0 W/m².K g=0.5	Ftoit1	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=1.0 W/m².K g=0.5	Pext2	U= 2.00 W/m².K	Pcave2	U= 2.00 W/m².K	Peanc2	U= 2.00 W/m².K
Fen 0.6	Ch0.95- TV0.6/0.5	Uf= 0.95 W/m².K Triple vitrage Ug=0.6 W/m².K g=0.5	Ftoit2	Uf= 1.7 W/m².K Double vitrage Ug=0.50 W/m².K g=0.50	Pext0.8	U= 0.8 W/m².K	Pcave0.8	U= 0.8 W/m².K	Peanc2	U= 0.8 W/m².K
PI 0.24	PIE0.24	U= 0.24 W/m².K	PISol0.24	U= 0.24 W/m².K	PICave0.24	U= 0.24 W/m².K	PIeanc0.24	U= 0.24 W/m².K	PIvv0.24	U= 0.24 W/m².K
PI 0.20	PIE0.20	U= 0.20 W/m².K	PISol0.20	U= 0.20 W/m².K	PICave0.20	U= 0.20 W/m².K	PIeanc0.20	U= 0.20 W/m².K	PIvv0.20	U= 0.20 W/m².K
PI 0.15	PIE0.15	U= 0.15 W/m².K	PISol0.15	U= 0.15 W/m².K	PICave0.15	U= 0.15 W/m².K	PIeanc0.15	U= 0.15 W/m².K	PIvv0.15	U= 0.15 W/m².K
T 0.24	TP0.24	U= 0.24 W/m².K	TO.24	U= 0.24 W/m².K						
T 0.20	TP0.20	U= 0.20 W/m².K	TO.20	U= 0.20 W/m².K						
T 0.15	TP0.15	U= 0.15 W/m².K	TO.15	U= 0.15 W/m².K						
PS	PS	Protection solaire extérieure manuelle								
EA 2	Etanchéité 2	v50= 2 m3/h.m²								
EA 4	Etanchéité 4	v50= 4 m3/h.m²								
Ventil C+	Ventilation C+	Alimentation naturelle, Evacuation mécanique. Ventilation à la demande F réduction= 0.9								
Ventil D	Ventilation D	Ventilation double-flux avec récupérateur de chaleur n=75%								

Variantes Systèmes (chauffage + ECS+ refroidissement)		Mesures appliquées							
		Chauffage		Emetteurs		ECS		Refroidissement	
CHM-CCgaz+ECS SANS stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par chaudière gaz mixte à condensation instantanée	Ccgaz + ECS SANS stock	Chaudière Gaz à Condensation $\eta=107\%$ Sans Stockage	Rad	Radiateurs				
CHM-CCgaz + ECS avec stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par chaudière gaz mixte à condensation avec stockage	Ccgaz + ECS AVEC stock	Chaudière Gaz à Condensation $\eta=107\%$ avec Stockage	Rad	Radiateurs	a/tampon	Volume tampon présent		
CHS-CCgaz rad+ Boiler thermo	Chauffage central par chaudière gaz à condensation, eau chaude sanitaire produite par une boiler thermodynamique	CHS- Ccgaz + boiler thermo	Chaudière Gaz à Condensation $\eta=107\%$	Rad	Radiateurs	Boiler thermo	Boiler thermodynamique		
CHS-CCgaz	Chauffage central par chaudière gaz à condensation	CHS- Ccgaz	Chaudière Gaz à Condensation $\eta=107\%$	Rad	Radiateurs				
CHS-PAC air-eau rev	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-eau réversible	PAC air-eau rev	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,62	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température			climatisation PAC	Pompe à chaleur Air-eau EER 3,8
PAC air-air rev	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-air réversible	PAC air-air rev	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Air SCOPon = 3,2	Air	Air			climatisation PAC	Pompe à chaleur Air-air EER 3
PAC air-air rev + boiler thermo	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-air réversible, eau chaude sanitaire produite par un boiler thermodynamique	PAC air-air rev + boiler thermodynamique	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Air SCOPon = 3,2	Air	Air	Boiler thermo	Boiler thermodynamique	climatisation PAC	Pompe à chaleur Air-air EER 3
PAC air-eau + boiler thermo	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-eau, eau chaude sanitaire produite par un boiler thermodynamique	PAC air-eau + boiler thermo	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,62	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température	Boiler thermo	Boiler thermodynamique		
PAC air-eau rev + boiler thermo	Chauffage central produit par pompe à chaleur air-eau réversible, eau chaude sanitaire produit par un boiler thermodynamique	PAC air-eau rev + boiler thermo	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: air neuf extérieur Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,62	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température	Boiler thermo	Boiler thermodynamique	climatisation PAC	Pompe à chaleur Air-eau EER 3,8
PAC sol-eau rev	Chauffage central produit par pompe à chaleur sol-eau réversible	PAC sol-eau rev	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: sol Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,97	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température			climatisation PAC	Pompe à chaleur sol-eau EER 3,97
PAC sol-eau rev+ boiler thermo	Chauffage central produit par pompe à chaleur sol-eau réversible, eau chaude sanitaire produit par un boiler thermodynamique	PAC sol-eau rev + boiler thermo	Pompe à chaleur électrique Source Chaude de l'évaporateur: sol Fluide caloporteur du condenseur: Eau SCOPon = 3,97	VC BT	Ventilo-convecteurs Basse Température	Boiler thermo	Boiler thermodynamique	climatisation PAC	Pompe à chaleur sol-eau EER 3,97
CHM-CNC bio + ECS stock	Chauffage central et eau chaude sanitaire produit par une chaudière biomasse mixte	CHM-CNC bio + ECS avec stock	Chaudière biomasse non à condensation mixte avec stockage $\eta=84\%$	Rad	Radiateurs	a/tampon	Volume tampon présent		
CHS-CNC bio + boiler thermo	Chauffage central produit par une chaudière biomasse, eau chaude sanitaire produite par un boiler thermodynamique	CHS-CNC bio + boiler thermo	Chaudière biomasse non à condensation $\eta=84\%$	Rad	Radiateurs	Boiler thermo	Boiler thermodynamique		
CHS-CNC bio	Chauffage central produit par une chaudière biomasse	CHS-CNC bio	Chaudière biomasse non à condensation $\eta=84\%$	Rad	Radiateurs				
ST22	Panneaux solaires thermiques	ST				Surface de Capteurs= 22m <sup>2</sup> Inclinaison 35°			
Clim	Climatisation par pompe à chaleur	Clim						climatisation PAC	Pompe à chaleur Air-Air EER 4
Variantes Eclairage									
Eclairage LED	Eclairage LED	Eclairage LED	4W/m <sup>2</sup> L <sub>rm</sub> =500						

## Pour les bureaux, écoles, hôtels et maisons de repos existants

Sets de mesures parois pour les bâtiments PEN existants pour déterminer les niveaux de performance cost optimum U des parois :

	Nom de la variante	Valeur U (W/m²K)	Description de la variante
<b>MURS</b>	M0.24	0,24	ME0.24 + Ms0.24 + Mcave 0,24 + Meanc 0.24 + Mvv 0.24
	M0.20	0,20	ME0.2 + Ms0.20 + Mcave 0.20 + Meanc 0.20 + Mvv 0.20
	M0.15*	0,15	ME0.15 + Ms0.15 + Mcave 0.15 + Meanc 0.15 + Mvv 0.15
<b>CHASSIS</b>	Fen 1.1*	1,1	Ch1.7-DV1.1/0.63 + Pext 2 + Fen toit 1
	Fen 1.0*	1,0	Ch1.7-DV1.0/0.5 + Pext 2 + Fen toit 1
	Fen 0.6*	0,6	Ch0.95-TV0.6/0.5 + Pext 0.8 + Fen toit 2 (0.5)
<b>PLANCHERS</b>	Pl0.24	0,24	PlE0.24 + Plcave 0.24 + Pl sol 0.24 + Pl vv 0.24
	Pl0.20*	0,20	PlE0.20 + Plcave 0.20 + Pl sol 0.20 + Pl vv 0.20
	Pl0.15*	0,15	PlE0.15 + Pl cave 0.15 + Pl sol 0.15 + Pl vv 0.15
<b>TOITS</b>	T0.24	0,24	T0.24 + TP 0.24 + PfGr0.24
	T0.20	0,20	T0.20 + TP 0.20 + PfGr0.20
	T0.15*	0,15	T0.15 + TP 0.15 + PfGr0.15

\*Variantes qui permettent de rencontrer les critères UREBA en matière d'isolation pour les bâtiments de droit public et les organismes non commerciaux

Les sets de mesures étudiés pour les bâtiments PEN existants pour déterminer les niveaux de performance cost optimum EW / Espec sont les suivants :

- **Enveloppe**

N° variante	U TOITS (W/m²K)	U MURS (W/m²K)	U PLANCHERS (W/m²k)	U FENETRES (W/m²K)	U PORTES (W/m²k)	FToit	PS	ETANCHEITE À l'AIR (m³/hm²)
0	0,24	0,24	0,24	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
1	0,24	IC	IC	IC	IC	IC		IC
2	0,20	IC	IC	IC	IC	IC		IC
3	0,15	IC	IC	IC	IC	IC		IC
4	0,24	IC	IC	Fen 1.1	2	FT1		EA 4
5	0,20	IC	IC	Fen 1.1	2	FT1		EA 4
6	0,20	0,24	IC	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
7	0,20	0,20	IC	Fen 1.0	2	FT1		EA 2
8	0,20	0,20	0,24	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
9	0,20	0,20	0,24	Fen 1.1	2	FT1	Oui	EA 2
10	0,15	0,20	0,20	Fen 1.0	2	FT1		EA 2
11	0,15	0,15	0,20	Fen 0.6	0,8	FT2		EA 2
12	0,15	0,15	0,20	Fen 0.6	0,8	FT2	Oui	EA 2

IC : inchangé

L'étanchéité à l'air ( $v_{50}$ ) est de  $4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  (EA 4) si les murs restent inchangés et que les fenêtres et portes sont remplacés. Elle ( $v_{50}$ ) passe à  $2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  (EA 2) quand les murs sont isolés.

Les protections solaires (PS) sont automatiques.

- **Ventilation**

Ventil D : Ventilation double-flux avec récupérateur de chaleur  $n=75\%$

Régulation horaire (IDA C3)

- **Eclairage**

LED : Une seule variante – Eclairage LED :  $4\text{W}/\text{m}^2$  - Lrm,r=500 appliquée d'office.

- **Systèmes**

N° variante	Nom de la variante	CHAUFFAGE	EMISSION	ECS	STOCKAGE ECS	ST	REFROIDISSEMENT
1	Clim	Existant	Existant	Existant	Existant	Non	Climatisation Pompe à chaleur Air-Air
2	CHS-CCgaz	Chaudière gaz condensation	Radiateurs	Existant	Existant	Non	Existant
3	CHM-CCgaz +ECS SANS stock	Chaudière gaz condensation (mixte)	Radiateurs	Chaudière gaz condensation (mixte)	non	Non	Existant
3'	CHM-CCgaz + ECS avec stock	Chaudière gaz Condensation (mixte)	Radiateurs	Chaudière gaz Condensation (mixte)	oui	Oui	Existant
4	PAC Air-air rev	Pompe à chaleur air-air (réversible)	Air	Existant	Existant	Non	Pompe à chaleur air-air (réversible)
5	PAC Air-air rev + boiler thermo	Pompe à chaleur air-air (réversible)	Air	Boiler thermodynamique	oui	Non	Pompe à chaleur air-air (réversible)
5'	PAC Air-air rev + boiler thermo + ST	Pompe à chaleur air-air (réversible)	Air	Boiler thermodynamique	oui	Oui	Pompe à chaleur air-air (réversible)
6	PAC Air-eau rev	Pompe à chaleur air-eau (réversible)	Ventilo-convecteurs	Existant	Existant	Non	Pompe à chaleur air-eau (réversible)

7	PAC Air-eau rev + boiler thermo	Pompe à chaleur air-eau (réversible)	Ventilo-convecteurs	Boiler thermodynamique	oui	Non	Pompe à chaleur air-eau (réversible)
7'	PAC Air-eau rev + boiler thermo + ST	Pompe à chaleur air-eau (réversible)	Ventilo-convecteurs	Boiler thermodynamique	oui	Oui	Pompe à chaleur air-eau (réversible)
8	PAC sol-eau rev	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)	Ventilo-convecteurs	Existant	Existant	Non	Pompe à chaleur sol-eau (réversible))
9	PAC sol-eau rev + boiler thermo	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)	Ventilo-convecteurs	Boiler thermodynamique	Oui	Non	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)
9'	PAC sol-eau rev + boiler thermo + ST	Pompe à chaleur sol-eau (réversible))	Ventilo-convecteurs	Boiler thermodynamique	Oui	Oui	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)
10	CHS-CNC bio	Chaudière biomasse	Radiateurs	Existant	Existant	Non	Existant
11	CHS-CNC bio + boiler thermo	Chaudière biomasse	Radiateurs	Boiler thermodynamique	Oui	Non	Existant
11'	CHS-CNC bio + boiler thermo + ST	Chaudière biomasse	Radiateurs	Boiler thermodynamique	Oui	Oui	Existant
12	CHM-CNC bio + ECS stock	Chaudière biomasse (mixte)	Radiateurs	Chaudière biomasse (mixte)	oui	Non	Existant
12'	CHM-CNC bio + ECS stock + ST	Chaudière biomasse (mixte)	Radiateurs	Chaudière biomasse (mixte)	oui	Oui	Existant

Une installation solaire thermique n'est envisagée que pour les maisons de repos et les hôtels (les variantes (')). Les installations seront dimensionnées en fonction de la taille du bâtiment et seront d'office équipées de stockage. Etant donné la taille des bâtiments, la surface de panneaux solaire testée est de 22 m<sup>2</sup> hormis pour l'HOE1 pour lequel la surface testée est de 12 m<sup>2</sup>.

Les pompes à chaleur (PAC) air-eau mixte sont combinées avec un système d'émission de type ventilo-convecteurs afin de valoriser le fonctionnement en basse température. Les chaudières sont combinées avec un système d'émission radiateurs.

Les variantes mixtes (chauffage + eau chaude sanitaire) n'ont pas été étudiées lorsque le producteur testé est une pompe à chaleur.

L'assemblage des différentes variantes permettent de calculer :

- Bureau et école : 1008 combinaisons.
- Hôtel et maison de repos : 1512 combinaisons.

### Pour les bureaux, écoles, hôtels et maisons de repos neufs

Les sets de mesures étudiés pour les bâtiments PEN existants pour déterminer les niveaux de performance cost optimum EW:

- **Enveloppe**

N° variante	U TOITS (W/m²K)	U MURS (W/m²K)	U PLANCHERS (W/m²k)	U FENETRES (W/m²K)	U PORTES (W/m²k)	FToit	PS*	ETANCHEITE à l'AIR
0	0,24	0,24	0,24	Fen 1.1	2	FT1		EA 2
0'	0,24	0,24	0,24	Fen1.1	2	FT1	oui	EA 2
1	0,20	0,24	0,24	Fen1.1	2	FT1		EA 2
1'	0,20	0,24	0,24	Fen1.1	2	FT1	oui	EA 2
2	0,20	0,20	0,24	Fen1.0	2	FT1		EA 2
2'	0,20	0,20	0,24	Fen1.0	2	FT1	oui	EA 2
3	0,20	0,20	0,20	Fen1.0	2	FT1		EA 2
3'	0,20	0,20	0,20	Fen1.0	2	FT1	oui	EA 2
4	0,15	0,15	0,20	Fen1.0	2	FT1		EA 2
4'	0,15	0,15	0,20	Fen1.0	2	FT1	oui	EA 2
5	0,15	0,15	0,15	Fen 1.0	2	FT1		EA 2
5'	0,15	0,15	0,15	Fen 1.0	2	FT1	oui	EA 2
6	0,15	0,15	0,15	Fen 0.6	0,8	FT2		EA 2
6'	0,15	0,15	0,15	Fen 0.6	0,8	FT2	oui	EA 2

L'étanchéité à l'air (v50) est de 2 m³/hm² (EA 2) pour le neuf.

Les protections solaires (PS) sont automatiques.

- **Ventilation**

Ventil D : Ventilation double-flux avec récupérateur de chaleur n=75%

Régulation horaire (IDA C3)

- **Eclairage**

LED : Une seule variante – Eclairage LED : 4W/m² - Lrm,r=500 appliquée d'office.

- **Systèmes**

N° variante	Nom de la variante	CHAUFFAGE	EMISSION	ECS	STOCKAGE ECS	ST	REFROIDISSEMENT
1	Clim						Climatisation Pompe à chaleur air-air

2	CHS-CCgaz rad+ Boiler thermo	Chaudière gaz condensation	Radiateurs	Boiler thermodyna- mique	oui	non	(1)
2'	CHS-CCgaz rad+ Boiler thermo + ST	Chaudière gaz condensation	Radiateurs	Boiler thermodyna- mique	oui	oui	(1)
3	CHM- CCgaz +ECS SANS stock	Chaudière gaz condensation (mixte)	Radiateurs	Chaudière gaz condensation (mixte)	non	non	(1)
3'	CHM- CCgaz + ECS avec stock	Chaudière gaz condensation (mixte)	Radiateurs	Chaudière gaz condensation (mixte)	oui	oui	(1)
4	PAC air-air rev + boiler thermo	Pompe à chaleur air-air (réversible)	Air	Boiler thermodyna- mique	oui	non	Pompe à chaleur air-air (réversible)
4'	PAC air-air rev + boiler thermo	Pompe à chaleur air-air (réversible)	Air	Boiler thermodyna- mique	oui	Oui	Pompe à chaleur air-air (réversible)
5	PAC air- eau + boiler thermo	Pompe à chaleur air-eau	Ventilo- convecteurs	Boiler thermodyna- mique	oui	non	(1)
5'	PAC air- eau + boiler thermo + ST	Pompe à chaleur air-eau	Ventilo- convecteurs	Boiler thermodyna- mique	oui	Oui	(1)
6	PAC air- eau rev + boiler thermo	Pompe à chaleur air-eau (réversible)	Ventilo- convecteurs	Boiler thermodyna- mique	oui	non	Pompe à chaleur air-eau (réversible)
6'	PAC air- eau rev + boiler thermo + ST	Pompe à chaleur air-eau (réversible)	Ventilo- convecteurs	Boiler thermodyna- mique	oui	oui	Pompe à chaleur air-eau (réversible)
7	PAC sol- eau rev+	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)	Ventilo- convecteurs	Boiler thermodyna- mique	oui	non	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)



	boiler therm						
7'	PAC sol-eau rev+ boiler thermo + ST	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)	Ventilo-convecteurs	Boiler thermodynamique	Oui	Oui	Pompe à chaleur sol-eau (réversible)
8	CHS-CNC bio + boiler thermo	Chaudière biomasse	Radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	non	(1)
8'	CHS-CNC bio + boiler thermo + ST	Chaudière biomasse	Radiateurs	Boiler thermodynamique	oui	oui	(1)
9	CHM-CNC bio + ECS stock	Chaudière biomasse (mixte)	Radiateurs	Chaudière biomasse (mixte)	oui	oui	(1)
9'	CHM-CNC bio + ECS stock + ST	Chaudière biomasse (mixte)	Radiateurs	Chaudière biomasse (mixte)	oui	oui	(1)

(1) : se combine avec la variante 1 « Climatisation pompe à chaleur air-air ». Chaque variante, lorsqu'elle ne présente pas un système de refroidissement, est testée avec et sans système de refroidissement de type pompe à chaleur air-air.

Une installation solaire thermique n'est envisagée que pour les maisons de repos et les hôtels (les variantes ( ' ) L'installation solaire est dimensionnée en fonction de la taille du bâtiment et seront d'office équipées de stockage. La surface de panneaux solaire testée est de 22 m<sup>2</sup>.

Les pompe à chaleur air-eau mixte sont combinées avec un système d'émission de type ventilo-convecteurs afin de valoriser le fonctionnement en basse température. Les chaudières sont combinées avec un système d'émission radiateurs.

L'assemblage des différentes variantes permettent de calculer :

- Bureau et école : 900 combinaisons
- Hôtel et maison de repos : 1800 combinaisons.

### La mesure photovoltaïque pour les bâtiments non résidentiels

Les installations photovoltaïques seront testées sur un bâtiment neuf et un bâtiment existant de chaque typologie. Les bâtiments suivants sont sélectionnés : BE1, BN1, EE1, EN2, HOE2, HON1, MRE1, MRN1.

La taille maximale des installations photovoltaïques prévue est de 25 kWc.

## 2.6. L'outil de calcul Cost-optimum (COT)

L'outil COT (Cost optimum Tool) a été développé par la Région wallonne spécifiquement pour l'étude cost-optimum. Il intègre, via une interface de programmation (API), la méthode de calcul de la performance énergétique en vigueur (méthode PEB 2021) ainsi qu'une base de données de coûts et permet d'effectuer un grand nombre de simulations d'optimalité des performances énergétiques en fonction des coûts sur des typologies de bâtiments.

L'outil fonctionne en remplaçant un élément PEB d'une typologie de référence par un même élément d'une autre valeur puis en calcule le coût. Par exemple il remplace une paroi avec un U de 0.24 W/m<sup>2</sup>K par une paroi de même type avec un U de 0.15 W/m<sup>2</sup>K ou encore un système de chauffage x par un système de chauffage y.

Les mesures à appliquer à une typologie de références sont sélectionnées dans l'outil et regroupées en « variantes ». Une fois les variantes définies par l'utilisateur, COT génère l'ensemble des combinaisons de variantes possibles, en excluant automatiquement celles dont les mesures s'excluent mutuellement. Par exemple une variante comprenant une mesure « Mur 0.24 » ne sera pas combinée avec une variante comprenant une mesure « Mur 0.20 ». Sont également exclues automatiquement les combinaisons qui aboutissent à un bâtiment qui ne remplit pas ses fonctions essentielles. Par exemple lorsqu'un système mixte chauffage/eau chaude est remplacé par un système local de chauffage, sans système de production d'eau chaude. Un tri manuel est également possible pour écarter les combinaisons qui ne permettraient pas de rencontrer les standards minimums de confort.

COT calcule alors les résultats PEB et les coûts de chaque combinaison de variantes. Les résultats et le front de Pareto sont présentés graphiquement et exportés dans un tableau Excel permettant de déterminer le coût optimum de la typologie.

Pour les bâtiments neufs, COT calcule le coût de l'ensemble des éléments constitutifs du bâtiment. Pour les bâtiments existants, il calcule le coût des éléments de remplacement appliqués au bâtiment de référence.

## 2.7. Limites de l'étude

### 2.7.1. Au niveau de la méthode

Conformément au règlement délégué de l'UE, les calculs d'optimalité des coûts sont réalisés selon la méthode réglementaire en vigueur. La consommation d'énergie primaire considérée est calculée par le logiciel COT, qui intègre la méthode de calcul du logiciel PEB, version 11.5.3, logiciel de calcul de la performance énergétique des bâtiments qui calcule une consommation théorique normalisée. L'écart entre les consommations

théoriques calculées par la méthode PEB et les consommations réelles (fonction des utilisateurs) n'est pas pris en compte. Le logiciel COT ne possède pas de moteur de calcul dynamique.

#### 2.7.2. Au niveau des coûts

La variabilité des coûts en fonction de situations particulières (localisation, accès, réglementation urbanistique locale, phasage des travaux...) n'est pas prise en compte.

### 3. Bâtiments de référence

La finalité essentielle d'un bâtiment de référence est qu'il soit représentatif du parc immobilier type et moyen. Ainsi, les bâtiments de référence définis reflètent aussi fidèlement que possible le parc immobilier wallon, de sorte que la méthode de calcul donne des résultats significatifs.

**54 bâtiments de référence** ont été analysés au niveau de l'impact des mesures sur :

- Le niveau  $E_w$  (PER, PEN) ;
- Le niveau  $E_{spec}$  (PER uniquement) ;
- Le niveau K (PER, PEN) ;
- Le coefficient de déperdition thermique (U) des parois modifiées.
- Le coût global actualisé (voir 2.2.2) ;

Le niveau de performance des bâtiments de référence existants dépend de leur période de construction. On observe des différences notables de qualité de l'enveloppe respectivement avant et après la mise en œuvre de la première (1985) et de la seconde (1996) réglementation thermique.









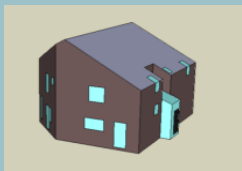




Les unités non résidentielles analysées dans l'étude sont des immeubles de bureaux, des écoles, des maisons de repos et des hôtels de taille et de géométrie variables. Les bâtiments sont représentatifs du bâti wallon. Les exigences de niveau  $E_w$  relatives aux bâtiments de référence sont calculées au prorata des surfaces des différentes parties fonctionnelles encodées dans les fichiers PEB.


La représentativité (en % du total du segment représenté par l'échantillon de cet étude) des principales typologies de bâtiments de référence sélectionnés pour l'étude est indiquée ci-dessous dans les tableaux. Les caractéristiques principales de chaque bâtiment analysé dans l'étude sont reprises dans les chapitres « Analyse des résultats ». Les bâtiments apparaissant en grisé, présentant des caractéristiques proches d'une typologie analysée, ou des différences peu pertinentes dans le cadre de la présente étude, n'ont pas été analysés en détail.

Les **données constructives détaillées** relatives aux bâtiments de référence sont reprises in extenso dans les **fiches descriptives des bâtiments de référence** répertoriées en Annexe A :

#### 3.1. Maisons unifamiliales existantes (HE)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 14 habitations individuelles existantes étudiées, représentatives du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

Bâtiments résidentiels existants						
	Maison 4 façades		Maison 3 façades		Maison mitoyenne	
<b>&lt; 1945</b> 46,38%	<b>HE1</b> 6,19%		<b>HE2</b> 4,12%		<b>HE3</b> 15,46%	
	<b>HE4</b> 4,12%				<b>HE5</b> 16,49%	
<b>De 1946 à 1970</b> 20,62%	<b>HE6</b> 10,31%				<b>HE8</b> 4,12%	
	<b>HE7</b> 6,19%					
<b>De 1971 à 1984</b> 15,46%	<b>HE9</b> 12,37%				<b>HE10</b> 3,09%	
<b>De 1985 à 1995</b> 10,31%	<b>HE11</b> 6,19%		<b>HE12</b> 2,06%		<b>HE13</b> 2,06%	

<b>De</b> <b>1996 à</b> <b>2008</b> 7,22%	<b>HE14</b> 7,22%					
--	----------------------	---	--	--	--	--

### 3.2. Maisons unifamiliales neuves (HN)


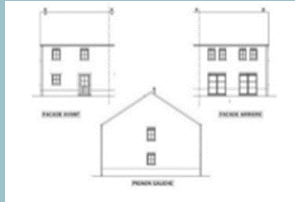

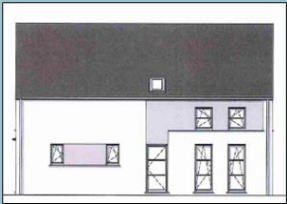
Pour les habitations individuelles neuves, trois techniques constructives (3 groupes) sont analysées d'un point de vue coût, à performance énergétique des parois équivalente :

**Maçonnerie traditionnelle** (HN1 T1 ; HN2 T1 ; HN3 T1 ; HN4 T1),

**Crépi sur isolant** (HN1 T1 ; HN2 T2 ; HN3 T2 ; HN4 T2),





**Ossature bois** (HN1 T1 ; HN2 T3 ; HN3 T3 ; HN4 T3).

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 4 habitations individuelles neuves étudiées, déclinées en trois techniques constructives, représentatives du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

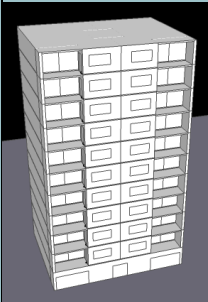


Bâtiments résidentiels neufs						
	Maison 4 façades		Maison 3 façades		Maison mitoyenne	
<b>&lt; 2010</b> 100%	<b>HN1</b> 29,5%		<b>HN3</b> 26,5%		<b>HN4</b> 14,5%	
	<b>HN2</b> 29,5%					

### 3.3. Immeubles à appartements existants (IAE)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 9 immeubles à appartements existants, étudiés, représentatifs du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

Immeubles à appartements existants					
	Immeubles à appartements		Dans une maison ou sur un commerce		
<b>&lt; 1919</b> 26,20%	<b>IAE1</b> 10,40%		<b>IAE2</b> 7,90%		
			<b>IAE3</b> 7,90%		
<b>De 1919 à 1945</b> 12,57%			<b>IAE4</b> 12,57%		
<b>De 1946 à 1970</b> 42,03%	<b>IAE5</b> 14,87%		<b>IAE7</b> 12,29%		



	<b>IAE6</b> 14,87%			
<b>Après 1990</b> 19,20%	<b>IAE9</b> 9,60%			
	<b>IAE10</b> 9,60%			


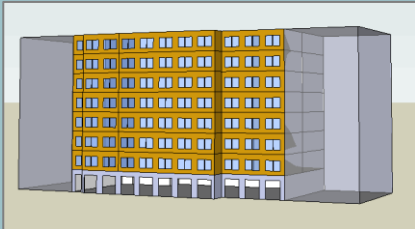
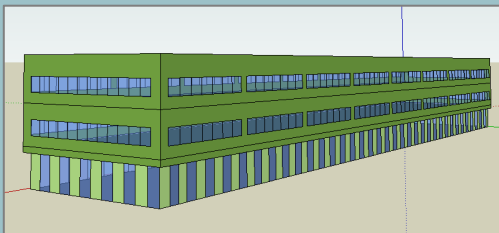
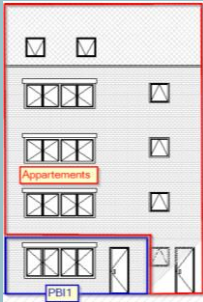
### 3.4. Immeuble à appartements neufs (IAN)

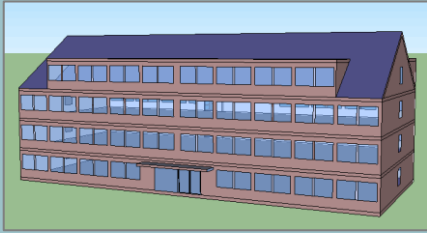
Le tableau ci-dessous reprend un aperçu de l'immeuble à appartements neuf étudié, représentatif du parc wallon. Une présentation détaillée de ce bâtiment se trouve en annexe A.

Immeubles à appartements neufs			
2014	IAN1		100%
Total			100%

### 3.5. Bureaux existants (BUE)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 5 immeubles de bureaux existants, étudiés, représentatifs du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

Immeubles de bureaux			
< 1919	BUE5		31,25%
De 1919 à 1945	BUE1		31,25%
De 1946 à 1970	BUE2		21%
De 1971 à 1984	BUE3		13,5%

De 1996 à 2008	BUE4		3%
Total			100%

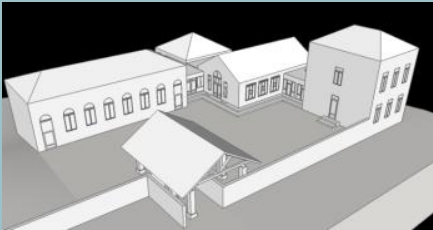

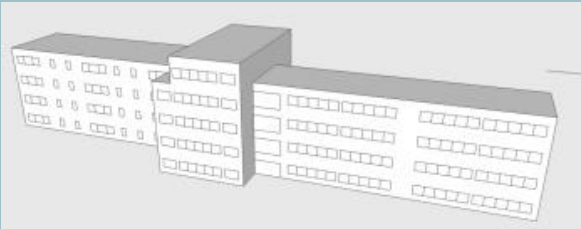

### 3.6. Bureaux neufs (BUN)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu de l'immeuble de bureaux neuf étudié, représentatif du parc wallon.  
Une présentation détaillée de ce bâtiment se trouve en annexe A.

Bâtiments de bureaux neufs			
Après 2008	BUN1		100%
Total			100%



### 3.7. Etablissements scolaires existants (EE)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 4 écoles existantes étudiées, représentatives du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

Etablissements scolaires existants			
<b>&lt; 1919</b> <b>&lt; 5.000 m<sup>2</sup></b>	EE1		89,82%
<b>1946 – 1970</b> <b>&lt; 5.000 m<sup>2</sup></b>	EE2		3,39%
<b>1971 -1995</b> <b>5.000 m<sup>2</sup> &gt;</b> <b>10.000 m<sup>2</sup></b>	EE3		3,39%
<b>1946 – 1970</b> <b>&gt; 10.000 m<sup>2</sup></b>	EE4		3,39%
<b>Total</b>			100%

### 3.8. Etablissements scolaires neufs (EN)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 2 écoles neuves étudiées, représentatives du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

Etablissements scolaires neufs			
> 2008 < 5.000 m <sup>2</sup>	EN1		40%
> 2008 < 5.000 m <sup>2</sup>	EN2		60%
<b>Total</b>			100%

### 3.9. Maisons de repos existantes (MRE)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 2 maisons de repos existantes étudiées, représentatives du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

### 3.10. Maison de repos neuves (MRN)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu de la maison de repos neuve étudiée, représentative du parc wallon. Une présentation détaillée de ce bâtiment se trouve en annexe A.

### 3.11. Hôtels existants (HOE)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu des 2 hôtels existants étudiés, représentatifs du parc wallon. Une présentation détaillée de ces bâtiments se trouve en annexe A.

### 3.12. Hôtels neufs (HON)

Le tableau ci-dessous reprend un aperçu de l'hôtel neuf étudié, représentatif du parc wallon. Une présentation détaillée de ce bâtiment se trouve en annexe A.



## 4. Analyse des résultats

Les résultats des calculs d'optimalité en fonction des coûts sont exprimés sous forme de tableaux et de graphiques dont la forme et le contenu sont standardisés afin de faciliter la lecture et la compréhension des résultats. Les **tableaux et graphiques** sont détaillés pour chaque bâtiment en annexe D : Graphes et tableaux de résultats.

Une combinaison de mesures située sur le Front de Pareto est une combinaison pour laquelle aucune autre combinaison calculée n'est à la fois plus performante et moins coûteuse en termes de  $E_W$  ou de  $E_{spec}$ .

Les combinaisons situées sur le Front de Pareto (ou dans son environnement immédiat) permettent de tirer des conclusions, concernant :

- L'écart entre le niveau de performance des combinaisons de mesures cost-optimum et les niveaux d'exigence en vigueur exprimé en % du niveau d'exigence ;
- La performance énergétique de l'enveloppe et des systèmes ;
- Le surcoût lié à certains choix constructifs.

Afin de faciliter la compréhension des résultats sans alourdir le rapport, l'ensemble des **groupes constructifs** correspondant aux différentes mesures appliquées dans chaque combinaison de variantes sont décrits en détail à l'**Annexe B : Groupes constructifs**. Il suffit de se reporter à cette annexe pour voir la composition détaillée des mesures enveloppe, symbolisées par la première lettre de chaque type de parois (F= fenêtres, M= murs, T=toits, S=sols).

*Exemple : Le groupe M2 correspond à l'isolation par l'extérieur d'un mur de façade creux, existant, par un isolant de type EPS/XPS finit par un enduit sur isolant. Les travaux connexes de modifications des seuils et de débords de toiture sont inclus dans le calcul du coût de la mesure.*

<b>M2</b>	Existant - Murs creux - iso <u>ext</u> + crépi	Crépi Isolation EPS/XPS Briques parement TC <u>maçonnées</u> Lame d'air non ventilée Blocs maçonnés Finition intérieure Travaux connexes : modifications de seuils Travaux connexes : débord de toiture, ...
-----------	--	---

Le **coût global actualisé** de chacune des combinaisons de mesures situées sur le Front de Pareto est calculé selon les **deux modes de calcul** (macro-économique et financier), sur base des coûts associés au remplacement des éléments du bâti (enveloppe & systèmes) dans le fichier PEB du bâtiment de référence.

**Pour les bâtiments existants**, les résultats ont été analysés dans une perspective de rénovation à long terme du patrimoine immobilier wallon, en phase avec les objectifs et priorités de la stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme (SRLT) des bâtiments soit :

- Priorité à la rénovation de l'enveloppe des bâtiments existants ;
- Optimisation des combinaisons enveloppe-systèmes dans un second temps ;

- Résultats en coûts globaux analysés du point de vue macroéconomique (approche la plus pertinente au niveau régional).

Pour un **bâtiment neuf**, l'investissement correspond au coût de l'ensemble des éléments constitutifs, y compris les mesures appliquées.

Les graphiques des combinaisons situées sur le Front de Pareto (voir annexe D et illustrations ci-dessous) présentent un (PEN) ou deux (PER) indicateurs du niveau de performance global du bâtiment :  $E_w$  et  $E_{spec}$  et leur impact respectif sur le coût global actualisé des mesures enveloppe-systèmes.

Pour chaque combinaison, les graphiques reprennent l'indicateur de performance (**PER :  $E_{spec}/E_w$  ; PEN :  $E_w$**  uniquement) en abscisse et le coût global actualisé (**CGA** en ordonnée).

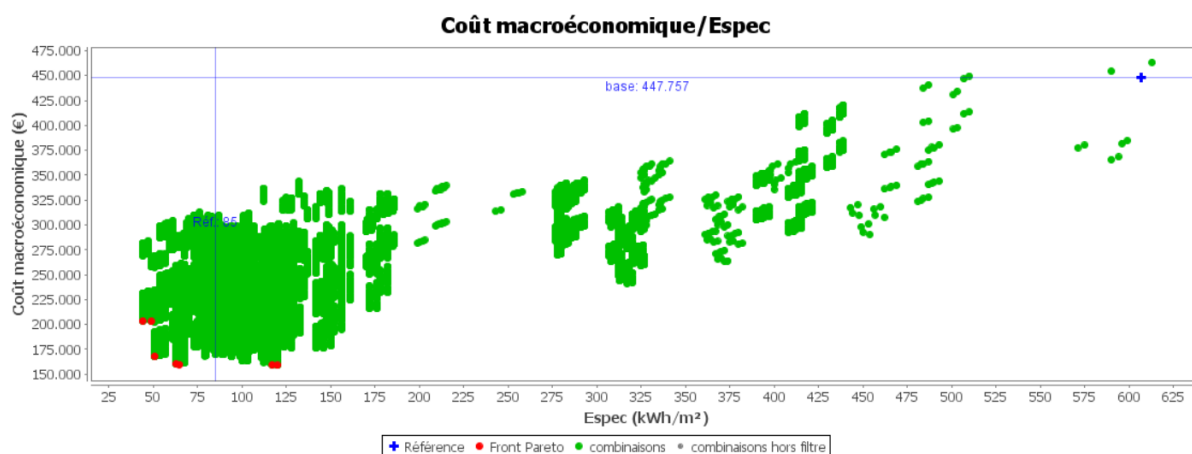
La différence entre le résultat du calcul des niveaux optimaux en fonction des coûts et les exigences minimales actuellement en vigueur est considérée comme importante lorsque ces exigences sont de plus de 15 % inférieures à l'optimum en fonction des coûts.

Les combinaisons proches du Front de Pareto ou apparaissant sur le graphique du Front de Pareto qui, à l'analyse, se révèlent techniquement non pertinentes (non viables) ou ne rencontrent pas les critères de confort minimum, sont écartées.

### Illustration de la méthodologie d'analyse des résultats

Les résultats de calcul du cost-optimum sont exprimés sous forme graphique et exportés dans un fichier Excel. L'analyse critique des résultats de calculs est effectuée au départ de ces deux supports.

Dans l'exemple ci-dessous (habitation existante HE1), le graphique reprend l'ensemble des combinaisons enveloppe-systèmes situées sur le Front de Pareto (en rouge). La croix bleue situe le bâtiment de référence (la base), l'axe bleu vertical symbolise le niveau d'exigence en vigueur ( $E_{spec}$  dans notre exemple) appliqué aux bâtiments neufs (renseigné à titre indicatif pour les bâtiments existants).



L'outil COT permettant d'exporter l'ensemble des résultats sous forme de tableaux Excel, la recherche des combinaisons viables est systématisée à l'aide de filtres et de clés de tri automatique des résultats. On identifie

donc rapidement la première combinaison viable de mesures enveloppe/systèmes située sur le FP affichant le CGA macroéconomique le plus bas. Dans notre exemple il s'agit de la combinaison n°307521 (F1, M1, P2, T2) affichant un niveau de performance cost-optimum Espec 120 kWh/m²an et un CGA macroéconomique de 158.837 €, de 65% inférieur à celui de la base, pour un investissement initial de 89.292 €. Cette combinaison est analysée en détail au point 5.1.4.

307520 3 T0.2 ;M0.24; fen1.1; EA2(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Etanchéité 2,ME0.24,Pext2,T0.20),S3' CHM-PAC air-eau avec stock; ST6(Mixte\_PAC air-eau 3.62 + ECS stockage,Mixte\_PAC air-eau 3.62 + ECS stockage,ST 6m2,Système d'émission [chauffage57]) (F1,M1,P2-P,T2)

307521 3 T0.2 ;M0.24; fen1.1; EA2(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Etanchéité 2,ME0.24,Pext2,T0.20),S4 CHM-CNC bio +ECS avec stock(Mixte\_CNcbio + ECS stockage,Mixte\_CNcbio + ECS stockage,Système d'émission [Radiateur]) (F1,M1,P2-P,T2)  
base

Première colonne du fichier résultats comprenant le détail des sets de mesures comprises dans la combinaison

Ce classement nous permet également d'identifier :

- la base (bleu foncé)
- la combinaison cost-optimum « absolu » (orange)
- la combinaison cost-optimum (bleu clair) répondant:
  - aux niveaux d'exigences Espec/Ew 2021 pour les bâtiments résidentiels neufs (QZEN)
  - à l'objectif de la stratégie rénovation à long terme pour les bâtiments résidentiels existants (SRLT)
  - aux niveaux d'exigences Ew 2021 pour les bâtiments tertiaires neufs (QZEN - PEB conforme)
  - aux exigences de valeurs U réglementaires en vigueur pour les bâtiments tertiaires existants (U conforme)

comme l'illustre le tableau ci-dessous.

Il est important de noter que les optimums U conformes évalués dans cette étude sont conformes aux exigences en vigueur, mais ne sont pas toujours aux niveaux des valeurs éligibles dans le plan UREBA (qui ont bel et bien été testées dans les sets de mesures de parois de cette étude).

COMBIN ATION	U_AVG_WA LL_EXT	U_AVG_WA LL_INT	U_AVG_RO OF	U_AVG_FLO OR	U_AVG_DO OR	U_AVG_CEIL ING	E_CHAR_SU RFACE	HEAT_NET_ NEEDS	HEAT_GENERATOR_TYPE	WATER_GENERATOR_TYPE	LEVEL_K	LEVEL_E	INVESTMENT _COST	COST_MACRO_ ECO	COST_FIN
307521 3	0,24	0	0,2	0,81	2	0	0	120	12903 GENERATOR_TYPE_CHAUDIERE_A_EAU_CHAUDE_NON_A_CONDENSATION	GENERATOR_TYPE_APPAREIL_A_COMBUSTION	35	66	89292	158837	178655
307535 4	0,2	0	0,2	0,81	2	0	0	117	12479 GENERATOR_TYPE_CHAUDIERE_A_EAU_CHAUDE_NON_A_CONDENSATION	GENERATOR_TYPE_APPAREIL_A_COMBUSTION	33	65	91828	159465	179025
307520 3	0,24	0	0,2	0,81	2	0	0	65	12903 GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	35	36	92306	159760	164598
307534 4	0,2	0	0,2	0,81	2	0	0	63	12479 GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	33	35	94815	160302	165250
307562 6	0,2	0	0,2	0,24	2	0	0	51	9477 GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	23	28	116167	167800	173778
307590 7	0,2	0	0,15	0,2	2	0	0	49	9019 GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	21	27	153372	202803	210942
307604 8	0,15	0	0,15	0,2	0,8	0	0	44	7837 GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	17	25	159433	203448	211867
307618 8	0,15	0	0,15	0,2	0,8	0	0	44	7837 GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	GENERATOR_TYPE_HEAT_PUMP	17	24	161917	205847	214381
base	2,2	0	1,76	0,81	4	0	0	607	56283 GENERATOR_TYPE_CHAUDIERE_A_EAU_C	GENERATOR_TYPE_CHAUFFAGE_E	171	335	0	447757	379011

**Optimum SRLT** : pour les bâtiments résidentiels existants

**Optimum**

**Base**

**Optimum Qzen** : pour les bâtiments résidentiel neufs

**Optimum**

**Base**

**Optimum U conforme** : pour les bâtiments tertiaires existants

<b>Optimum</b>	-
<b>Base</b>	-
<b>Optimum PEB conforme</b> : pour les bâtiments tertiaires neufs	
<b>Optimum</b>	-
<b>Base</b>	-

Cette méthode d'analyse et de présentation des résultats est appliquée de façon systématique à chacun des bâtiments étudiés dans la suite.

Les résultats sélectionnés en optimum sont ceux qui présentent le CGA le plus bas identifiés comme cost-optimum « absolus » dans la suite du rapport. Toutefois, il existe, dans de nombreux résultats, des cas dont le CGA est très proche de cet optimum (moins de 5% de différence), tout en présentant de meilleures performances énergétiques. Ces combinaisons auraient pu être considérées comme optimales étant donné la très faible différence de CGA.

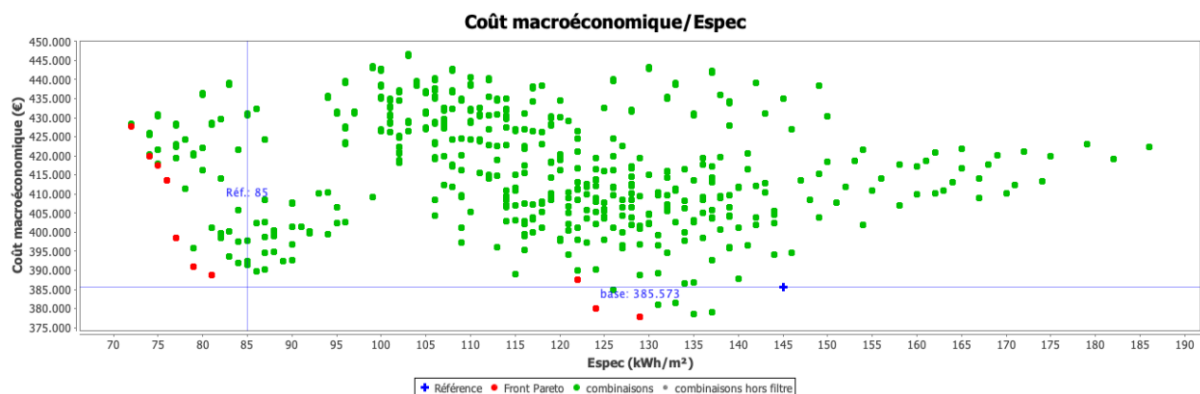
Ainsi, l'analyse critique comprend un point d'attention lorsque ce cas de figure se présente.

#### Spécificités pour les bâtiments neufs :

Un des objectifs de l'étude est d'étudier les écarts entre les exigences en vigueur (Ew45/90 et Espec 85) et le cost-optimum.

Pour effectuer les simulations des typologies de bâtiments neufs, nous avons modélisé les géométries des bâtiments de référence dans le logiciel PEB, sur lesquelles des variantes ont été appliquées.

La performance des géométries de référence ne correspond pas aux exigences QZEN actuelles, c'est pourquoi ces cas ne sont pas illustrés dans le rapport, à l'exception des graphiques issus de COT, où la ligne référence de la géométrie de base apparaît.



La méthodologie qui a été utilisée consiste donc à sélectionner le premier cas simulé qui respecte les exigences actuelles. Ce cas est repris dans les tableaux de résultats comme cas BASE, et est différent de la base illustrée dans les graphiques de COT.

Une combinaison cost-optimum QZEN/PEB conforme a également été mise en évidence.

Le cas cost-optimum “absolu” est le cas qui présente le CGA macro viable le plus faible.

## 5. Analyse des résultats des habitations unifamiliales existantes

### 5.1. HE1 - La maison vernaculaire - <1945

#### 5.1.1. Bâtiment de référence



#### Maison rurale à l'architecture vernaculaire

- 4 façades
- Murs pleins en pierre, simple vitrage
- Rez+1 + combles non aménagés
- Pas de cave
- Chauffage central mazout
- Boiler électrique ECS

• Valeur intrinsèque : 131.999 €

• Ach = 183 m<sup>2</sup>

• Vp = 501 m<sup>3</sup>

#### 5.1.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	40131
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	8

#### 5.1.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>171</b>	<b>- €</b>	<b>447 757.00 €</b>	<b>379 012.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	91773 fen0.6(Ch0.95-TV0.6/0.5-WE,Pext0.8) (F1,P2-P)					
	<b>5.11</b>	<b>0.85</b>	<b>160</b>	<b>13 682.00 €</b>	<b>443 324.00 €</b>	<b>378 581.00 €</b>
<b>Murs</b>	91769 Mur(ME0.15) (M1)					
	<b>2.2</b>	<b>0.15</b>	<b>78</b>	<b>43 720.00 €</b>	<b>307 167.00 €</b>	<b>273 415.00 €</b>
<b>Toitures</b>	91775 Toit(T0.20) (T2)					
	<b>1.76</b>	<b>0.2</b>	<b>133</b>	<b>23 454.00 €</b>	<b>396 058.00 €</b>	<b>341 918.00 €</b>
<b>Sols</b>	91778 Plancher(PlSol0.20) (S4)					
	<b>0.81</b>	<b>0.2</b>	<b>160</b>	<b>22 938.00 €</b>	<b>447 821.00 €</b>	<b>384 469.00 €</b>

Umoy,base : valeurs U moyennes des fenêtres, murs, toitures et sols du cas de base.

Umoy,costopt : valeurs U moyennes des fenêtres, murs, toitures et sols du cas cost-optimum.

Investissement COST : Coût d'investissement du cas cost-optimum

COST\_Macro\_eco : Coût macroéconomique (taux d'évolution énergie moyenne)

COST\_fin : Coût financier (taux d'évolution énergie moyenne)

5.1.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ /  $E_{spec}$ /K et U parois

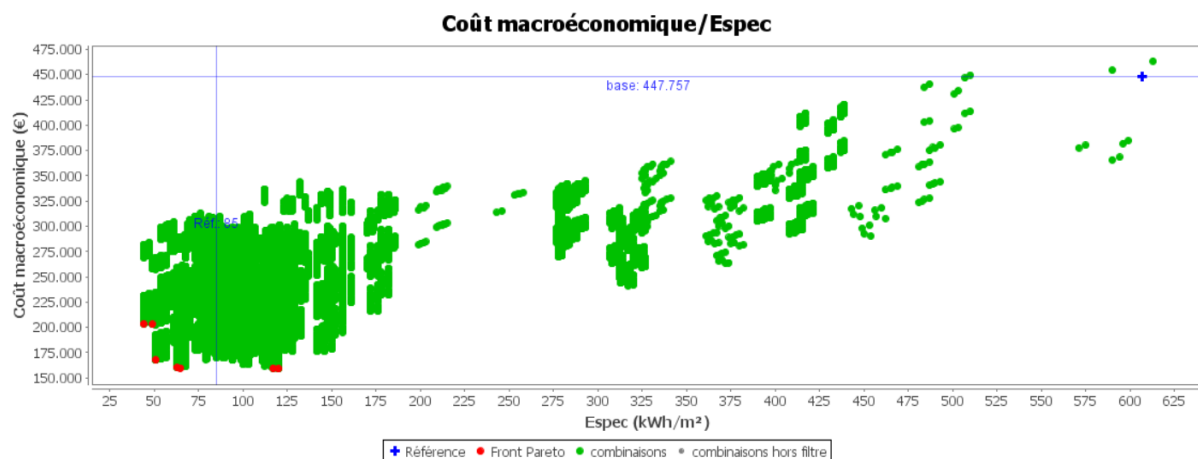
Base				
K	171		Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	56283	Fenêtres	5.11	
BNC [kWh/m².an]	306.05	Portes	4	
Ew	335	Murs	2.2	
Espec [kWh/m².an]	607	Toits	1.76	
CGA macro [€]	447 757 €	Sols	0.81	

Optimum				
K	35		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	12903	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	70.16	Portes	2	P2
Ew	66	Murs	0.24	M1
Espec [kWh/m².an]	120	Toits	0.2	T2
CGA macro [€]	158 837 €	Sols	0.81	-
Investissement [€]	89 292 €			
Combinaison n°	307521			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est maintenant produite par la chaudière biomasse avec stockage.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

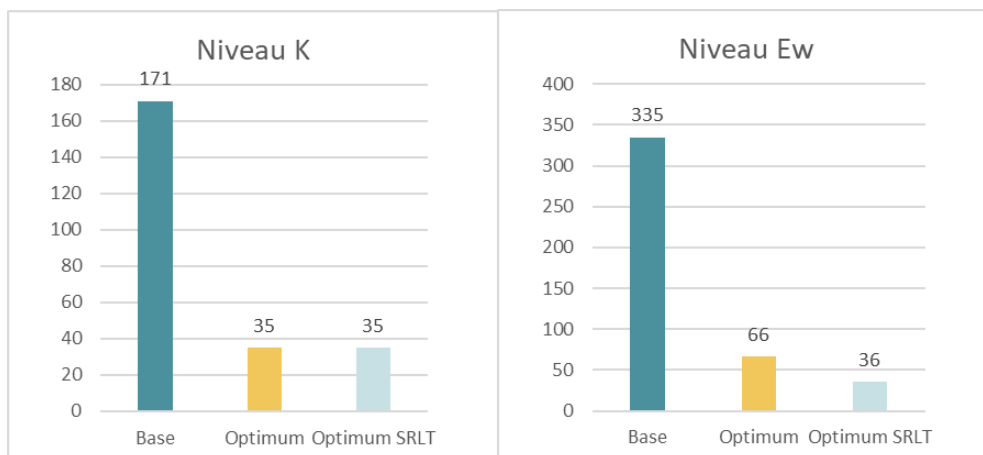
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

Optimum SRLT				
	K	35	Umoy [W/m².K]	Groupe
<b>BNC [kWh/an]</b>	12903		Fenêtres 1.43	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	70.16		Portes 2	P2
<b>Ew</b>	36		Murs 0.24	M1
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	65		Toits 0.2	T2
<b>CGA macro [€]</b>	159 760 €		Sols 0.81	-
<b>Investissement [€]</b>	92 306 €			
<b>Combinaison n°</b>	307520			

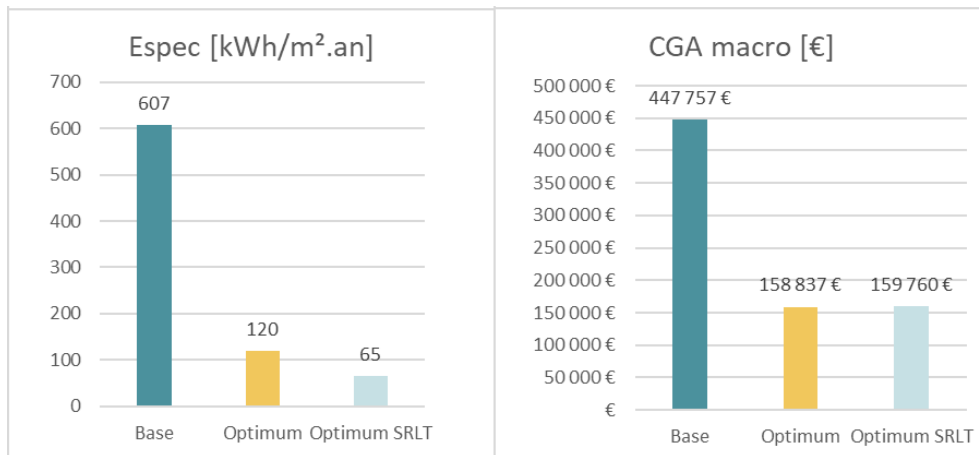
Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

A coût global macroéconomique (CGA) très proches (923 € de différence), ce cost-optimum SRLT présente des performances énergétiques (Espec 65 kWh/m<sup>2</sup>.an) bien meilleures que celles de l'optimum « absolu » (120 kWh/m<sup>2</sup>.an). Mais comme exposé au chapitre 4, le cas présenté comme optimum « absolu » est systématiquement le cas présentant le CGA le plus bas sur le front de Pareto, bien que le cost-optimum SRLT aurait pu être présenté comme tel.







Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 0,6% supérieur au cost-optimum « absolu », tout en permettant une réduction substantielle de la consommation d'énergie. Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

## 5.2. HE2 - La maison type ouvrière 3 façades - < 1945

### 5.2.1. Bâtiment de référence



#### Maison ouvrière citadine ou à proximité

- 3 façades
- Murs pleins en briques, simple vitrage
- Petits volumes : 2 pièces par niveau
- Annexes à l'arrière
- Rez +1 + combles non aménagés
- Pas de cave
- Chauffage local : poêle au gaz
- Chauffage eau-gaz
- Valeur intrinsèque : 106.375 €
- Ach = 104 m<sup>2</sup>
- Vp = 329 m<sup>3</sup>

### 5.2.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	71409
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	10

### 5.2.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>174</b>	<b>- €</b>	<b>279 157.00 €</b>	<b>285 705.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	305268 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>5.11</b>	<b>1.36</b>	<b>157</b>	<b>11 067.00 €</b>	<b>272 419.00 €</b>	<b>279 211.00 €</b>
<b>Murs</b>	305260 M0.15(ME0.15) (M1)					
	<b>2.29</b>	<b>0.15</b>	<b>86</b>	<b>26 338.00 €</b>	<b>196 302.00 €</b>	<b>202 287.00 €</b>
<b>Toitures</b>	305258 T0.20(PfGr0.20,TP0.20) (H2,T3)					
	<b>1.61666667</b>	<b>0.2</b>	<b>143</b>	<b>13 553.00 €</b>	<b>252 963.00 €</b>	<b>259 398.00 €</b>
<b>Sols</b>	305262 Pl0.20(PlSol0.20) (S4)					
	<b>0.83</b>	<b>0.2</b>	<b>160</b>	<b>18 284.00 €</b>	<b>279 772.00 €</b>	<b>287 014.00 €</b>

### 5.2.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub>/K et U parois

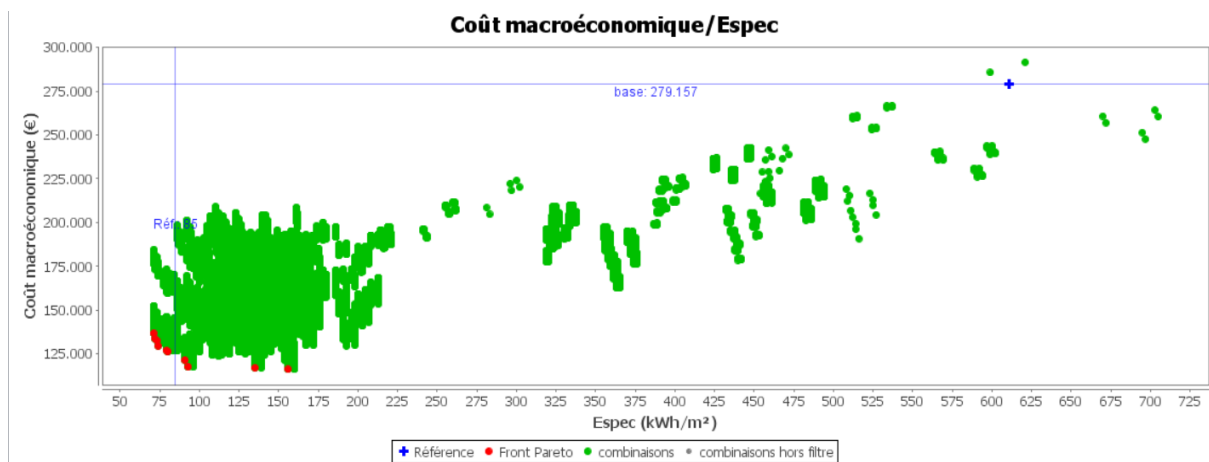
<b>Base</b>			
<b>K</b>	174	<b>U<sub>moy</sub> [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	37478	Fenêtres	5.11
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	359.43	Portes	4
<b>E<sub>w</sub></b>	317	Murs	2.29

<b>Espec [kWh/m².an]</b>	611	Toits	1.62
<b>CGA macro [€]</b>	279 157 €	Sols	0.83

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	39		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	9333	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	89.51	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	81	Murs	0.2	M1
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	156	Toits	0,2	H2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	116 148 €	Sols	0.83	-
<b>Investissement [€]</b>	65 597 €			
<b>Combinaison n°</b>	305897			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

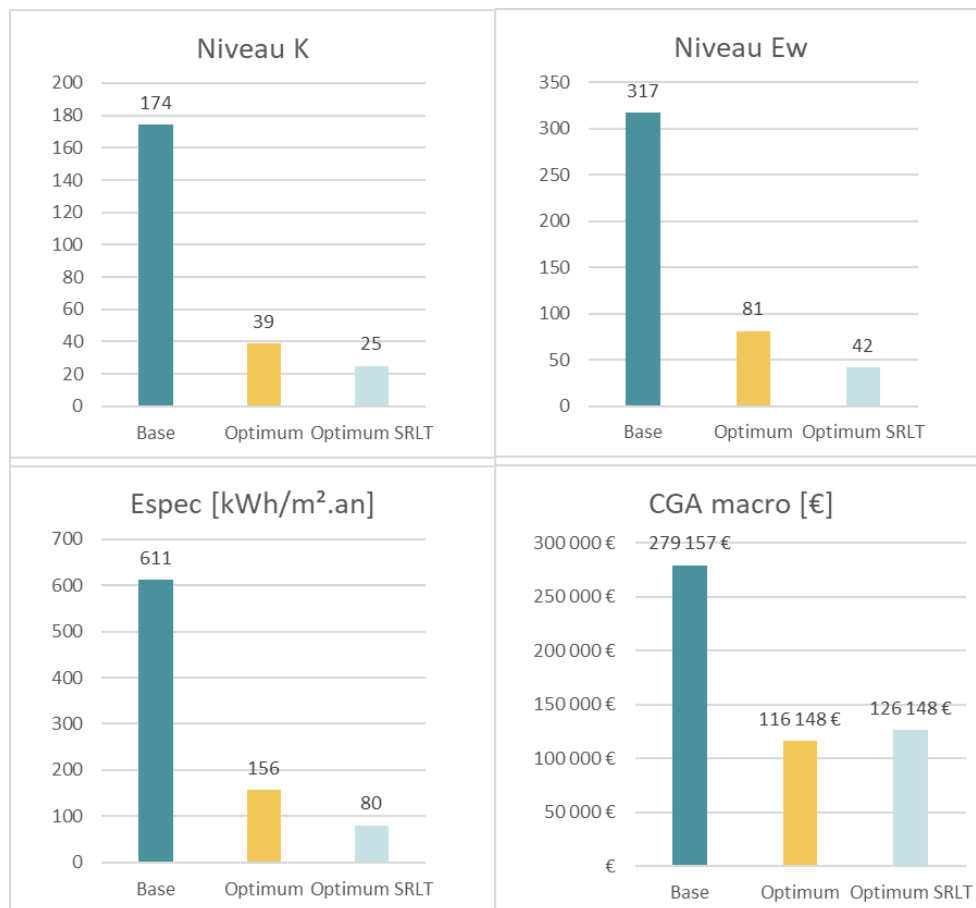
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m² de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
<b>K</b>	25		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>

<b>BNC [kWh/an]</b>	6939	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	66.55	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	42	Murs	0.2	M1
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	80	Toits	0.2	H2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	126 148 €	Sols	0.24	S4
<b>Investissement [€]</b>	80 117 €			
<b>Combinaison n°</b>	305363			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 8,6% supérieur au cost-optimum « absolu », tout en restant largement inférieur à celui du cas de base. Malgré cet écart, les objectifs de la stratégie rénovation sont tout de même rentables du point de vue du coût macroéconomique, lorsqu'on prend comme point de comparaison un cas de base inchangé.

### 5.3. HE3 - La maison type ouvrière mitoyenne - < 1945

#### 5.3.1. Bâtiment de référence



#### Maison ouvrière citadine ou à proximité

- 2 façades
- Murs pleins en briques, simple vitrage
- Petits volumes : 2 pièces par niveau
- Annexes à l'arrière
- Rez+1 + combles non aménagés
- Pas de cave
- Chauffage local : poêle au gaz
- Chauffage eau-gaz
- Valeur intrinsèque : 101.884 €
- Ach = 104 m<sup>2</sup>
- Vp = 329 m<sup>3</sup>

#### 5.3.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	71409
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	9

#### 5.3.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>137</b>	- €	189 084.00 €	193 569.00 €
<b>Fenêtres</b>	306895 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>5.11</b>	<b>1.43</b>	<b>116</b>	10 886.00 €	181 211.00 €	187 490.00 €
<b>Murs</b>	306889 M0.15(ME0.15) (M1)					
	<b>2.29</b>	<b>0.15</b>	<b>100</b>	9 028.00 €	161 098.00 €	166 849.00 €
<b>Toitures</b>	306892 T0.20(PfGr0.20,TP0.20) (H2,T3)					
	<b>1.61666667</b>	<b>0.2</b>	<b>98</b>	13 553.00 €	163 232.00 €	169 678.00 €
<b>Sols</b>	306887 P10.20(PISol0.20) (S4)					
	<b>0.83</b>	<b>0.2</b>	<b>120</b>	18 284.00 €	189 972.00 €	197 968.00 €

5.3.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et U parois

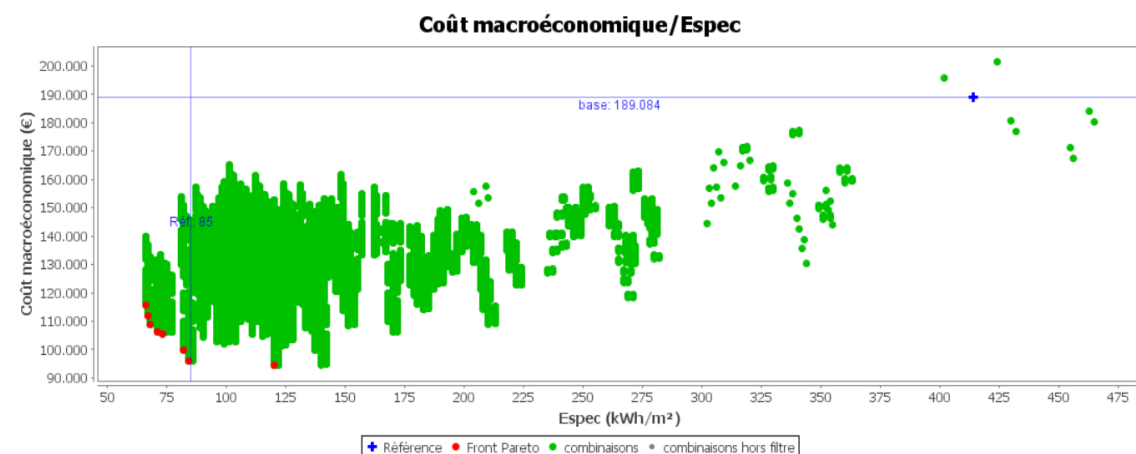
Base				
<b>K</b>	137		<b>Umoy [W/m².K]</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	24108	Fenêtres	5.11	
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	231.21	Portes	4	
<b>E<sub>w</sub></b>	248	Murs	2.29	
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m².an]</b>	414	Toits	1.62	
<b>CGA macro [€]</b>	189 084 €	Sols	0.83	

Optimum				
<b>K</b>	41		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	8121	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	77.88	Portes	2	P2
<b>E<sub>w</sub></b>	72	Murs	0.2	M1
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m².an]</b>	120	Toits	0.2	H2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	94 334 €	Sols	0.83	-
<b>Investissement [€]</b>	42 113 €			
<b>Combinaison n°</b>	307529			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).



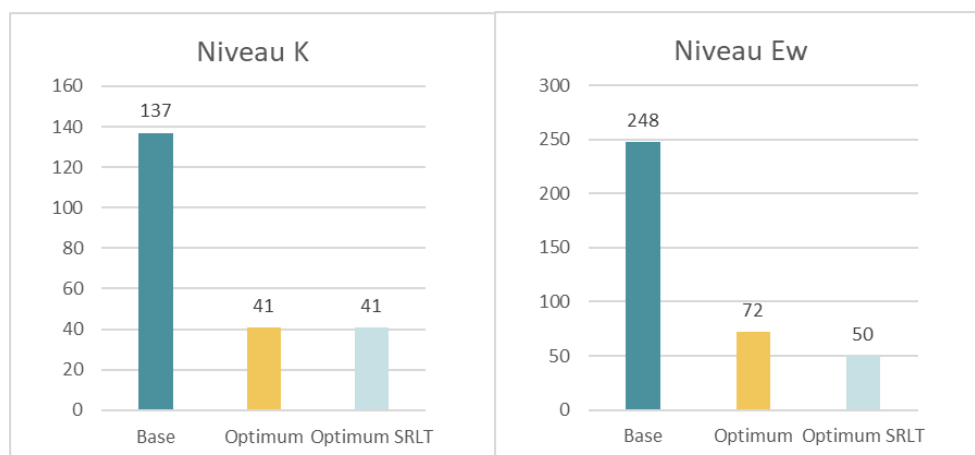
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

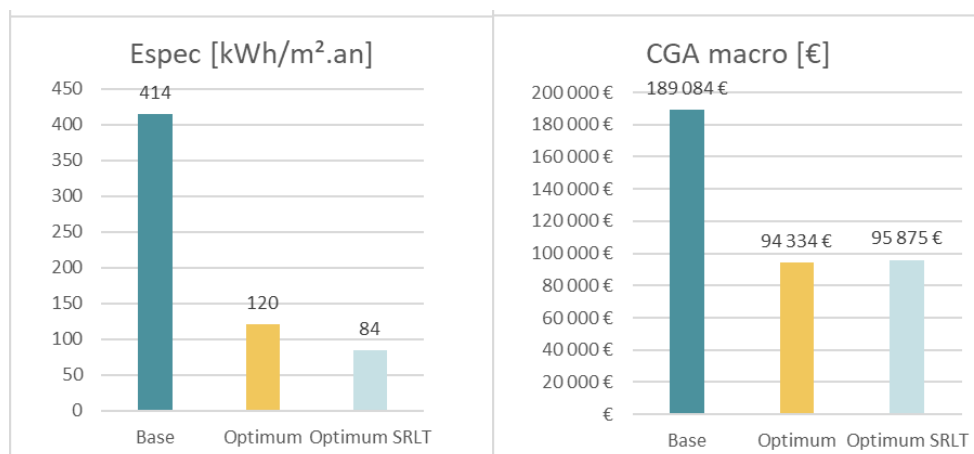
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation avec une production instantanée pour l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	8121	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	77.88	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	50	Murs	0.2	M1
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	84	Toits	0.2	H2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	95 875 €	Sols	0.83	-
<b>Investissement [€]</b>	46 799 €			
<b>Combinaison n°</b>	307533			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.





Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 1,6% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.



## 5.4. HE4 - La maison villageoise - < 1945

### 5.4.1. Bâtiment de référence



#### Maison villageoise de l'entre-deux guerres

- 4 façades
- Volumétrie assez simple et grande
- Murs pleins et souvent très épais
- Matériaux industriels : architecture sans ornementation
- Simple vitrage
- Rez+1 + combles non aménagés, sur caves
- Chauffage central gaz
- Chauffage eau-gaz
- Valeur intrinsèque : 195.495 €
- Ach = 228 m<sup>2</sup>
- Vp = 727 m<sup>3</sup>

### 5.4.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	554385
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	4

### 5.4.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>147</b>	- €	<b>577 273.00 €</b>	<b>590 410.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	307786 fen0.6(Ch0.95-TV0.6/0.5-WE,Pcave0.8,Pext0.8) (F1,P2-P,P3-P)					
	<b>5.11</b>	<b>0.86</b>	<b>128</b>	<b>28 845.00 €</b>	<b>557 719.00 €</b>	<b>575 779.00 €</b>
<b>Murs</b>	307777 M0.15(ME0.15,Mcave0.15,Meanc0.15) (M1,M12,M14)					
	<b>1.62</b>	<b>0.15</b>	<b>82</b>	<b>57 194.00 €</b>	<b>435 701.00 €</b>	<b>456 319.00 €</b>
<b>Toitures</b>	307778 T0.15(PfGr0.15) (H2)					
	<b>1.77</b>	<b>0.2</b>	<b>115</b>	<b>19 625.00 €</b>	<b>498 735.00 €</b>	<b>513 693.00 €</b>
<b>Sols</b>	307784 Pl0.24(PlSol0.24,Plcave0.24) (S1,S4)					
	<b>0.95</b>	<b>0.24</b>	<b>133</b>	<b>24 053.00 €</b>	<b>557 897.00 €</b>	<b>575 067.00 €</b>

5.4.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et  $U$  parois

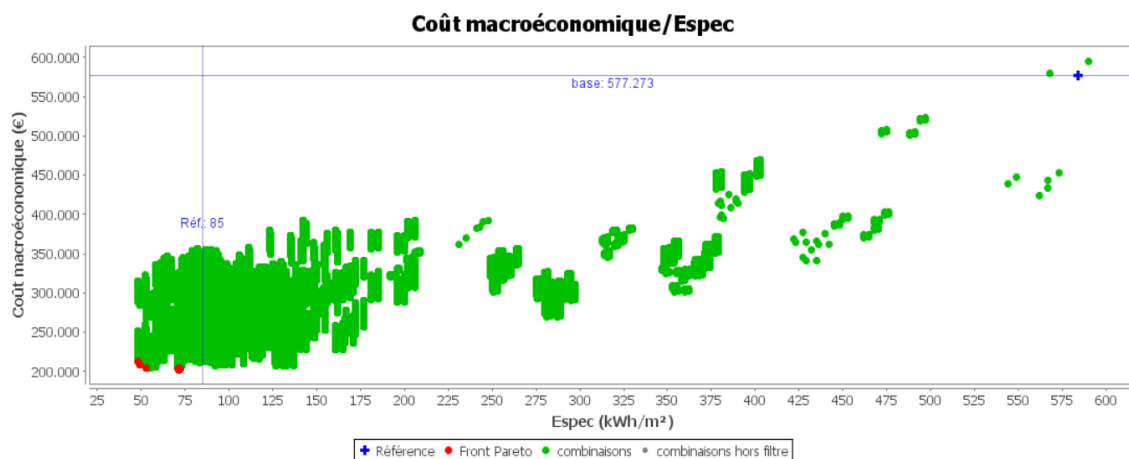
Base				
<b>K</b>	147	<b>Umoy [W/m².K]</b>		
<b>BNC [kWh/an]</b>	65882	Fenêtres	5.11	
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	288.96	Portes	5	
<b>Ew</b>	346	Murs	1.62	
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	584	Toits	1.77	
<b>CGA macro [€]</b>	577 273 €	Sols	0.95	

Optimum				
<b>K</b>	38	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	17660	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	77.46	Portes	2	P2, P3
<b>Ew</b>	42	Murs	0.2	M1, M12, M14
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	71	Toits	0.2	H2
<b>CGA macro [€]</b>	206 184 €	Sols	0.95	-
<b>Investissement [€]</b>	116 992 €			
<b>Combinaison n°</b>	308970			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



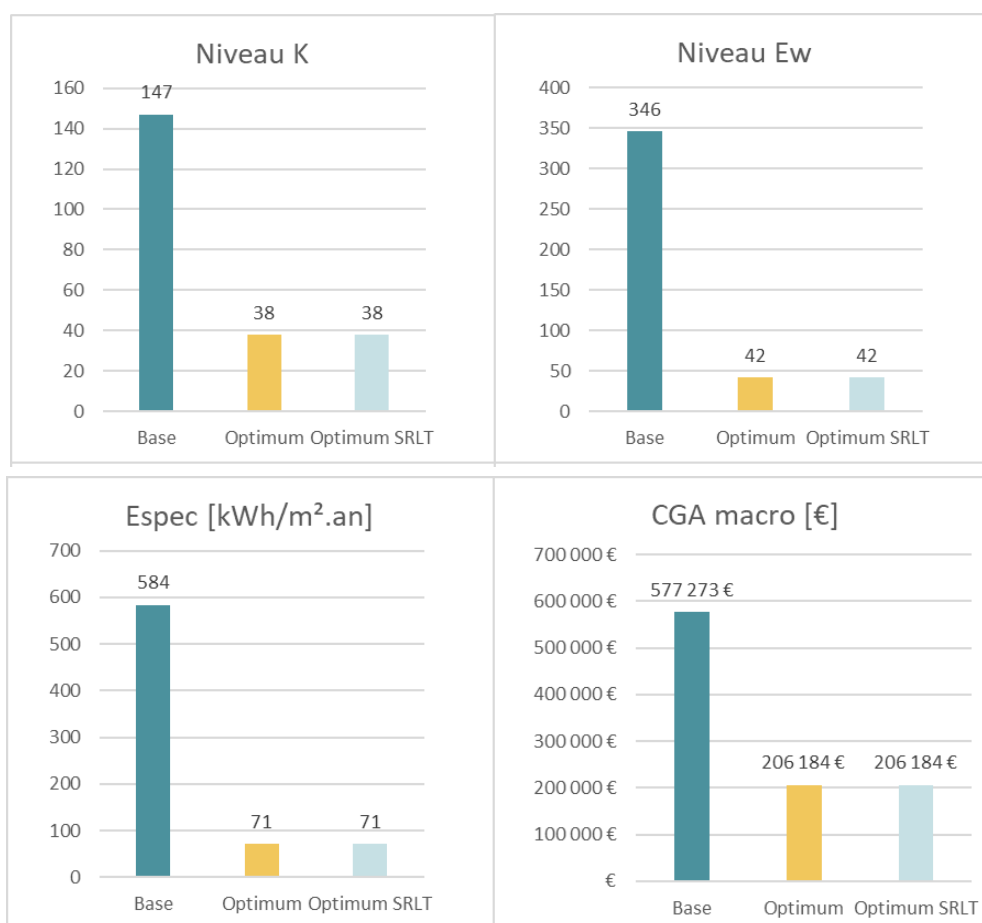
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

### **Optimum SRLT**

La combinaison cost-optimum SRLT est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » respecte les objectifs de la SRLT (Espec, max 85 kWh/m<sup>2</sup>.an).



Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est cost-optimum.

## 5.5. HE5 - La maison urbaine mitoyenne - < 1945

### 5.5.1. Bâtiment de référence



#### Maison urbaine du début du 20<sup>ème</sup> plus grande que les maisons ouvrières

- 2 façades
- Façade à rue détaillée et ornementée (pierres, loggias, balcon)
- Murs pleins en briques, simple vitrage
- Annexes arrières
- Rez+2 + combles non aménagés, sur caves
- Chauffage central gaz
- Eau chaude sanitaire sur chaudière
- Valeur intrinsèque: 171.012 €
- Ach = 225 m<sup>2</sup>
- Vp = 865 m<sup>3</sup>

### 5.5.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	120315
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	6

### 5.5.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>151</b>	<b>- €</b>	<b>500 145.00 €</b>	<b>512 193.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	308326 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>5.13</b>	<b>1.43</b>	<b>114</b>	<b>40 919.00 €</b>	<b>452 094.00 €</b>	<b>470 070.00 €</b>
<b>Murs</b>	308327 M0.15(ME0.15) (M1)					
	<b>2.39</b>	<b>0.15</b>	<b>100</b>	<b>27 937.00 €</b>	<b>394 932.00 €</b>	<b>412 149.00 €</b>
<b>Toitures</b>	308321 T0.2(PfGr0.20,T0.20,TP0.20) (H2,T2,T3)					
	<b>2.31</b>	<b>0.2</b>	<b>121</b>	<b>19 308.00 €</b>	<b>438 710.00 €</b>	<b>453 191.00 €</b>
<b>Sols</b>	308331 Pl0.2(PlSol0.20,Plcave0.20) (S1,S4)					
	<b>0.61</b>	<b>0.2</b>	<b>144</b>	<b>10 859.00 €</b>	<b>491 444.00 €</b>	<b>505 464.00 €</b>

5.5.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et U parois

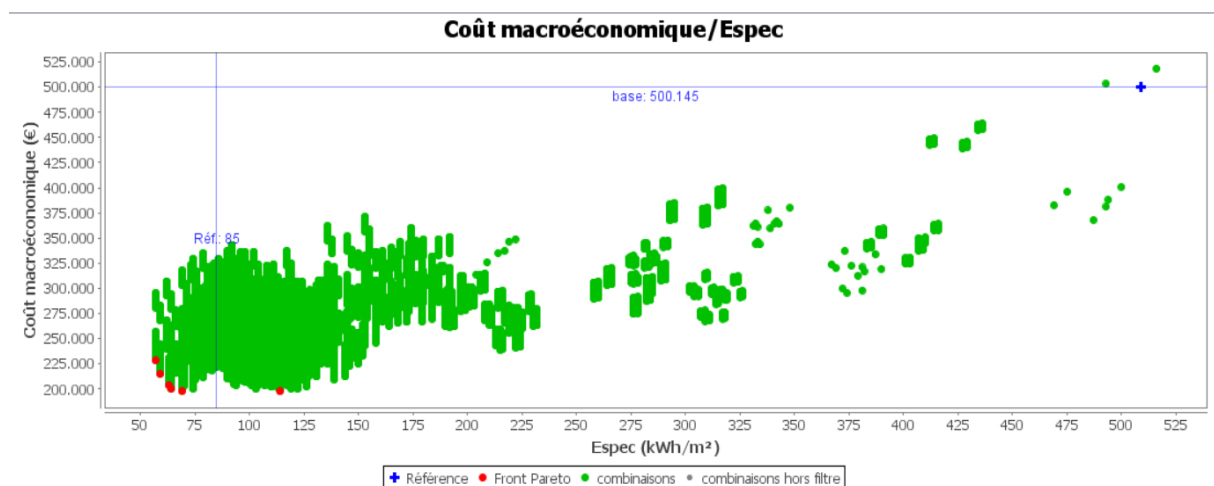
Base				
	K	151	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	56206	Fenêtres	5.13	
BNC [kWh/m².an]	250.19	Portes	4	
Ew	369	Murs	2.39	
Espec [kWh/m².an]	509	Toits	2.31	
CGA macro [€]	500 145 €	Sols	0.61	

Optimum				
	K	33	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	13487	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	60.04	Portes	2	P2
Ew	83	Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	114	Toits	0.2	H2, T2, T3
CGA macro [€]	197 544 €	Sols	0.61	-
Investissement [€]	115 757 €			
Combinaison n°	309518			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



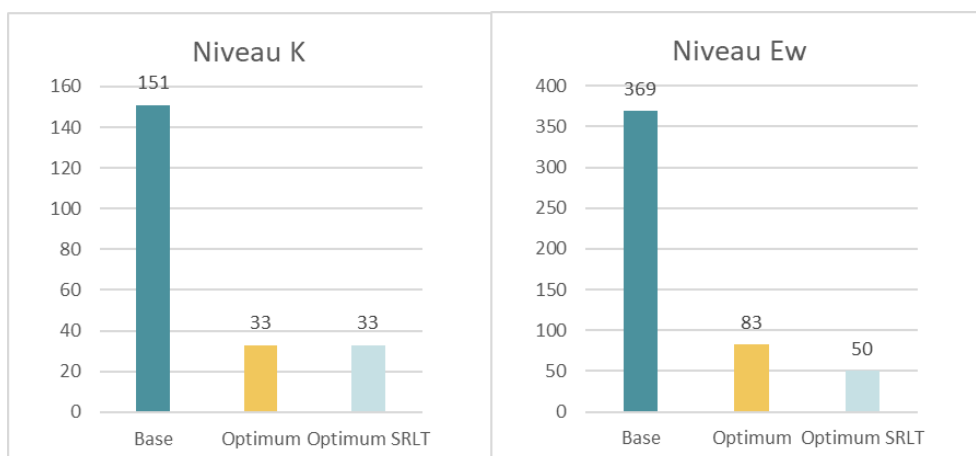
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

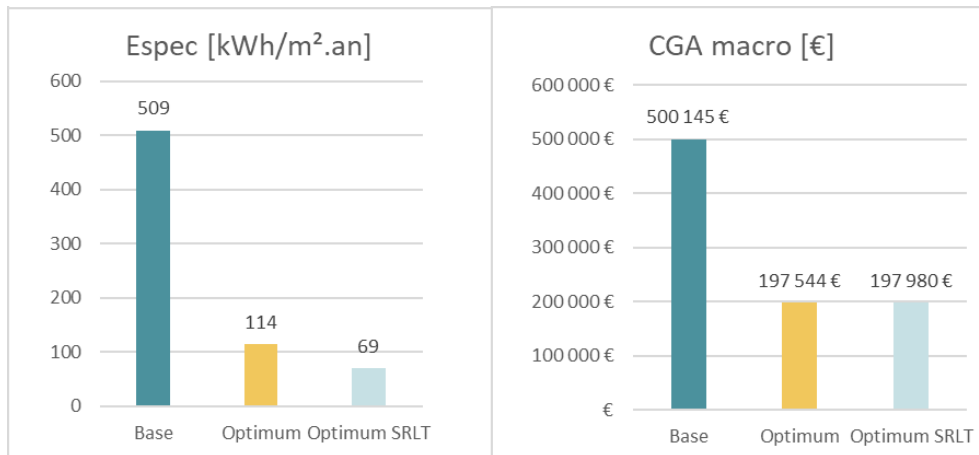
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

Optimum SRLT				
K	33		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	13487	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	60.04	Portes	2	P2
Ew	50	Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	69	Toits	0.2	H2, T2, T3
CGA macro [€]	197 980 €	Sols	0.61	-
Investissement [€]	116 980 €			
Combinaison n°	309516			

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

A coût global macroéconomique (CGA) très proches (436 € de différence), ce cost-optimum SRLT présente des performances énergétiques (Espec 69 kWh/m<sup>2</sup>.an) bien meilleures que celles de l'optimum « absolu » (114 kWh/m<sup>2</sup>.an). Mais comme exposé au chapitre 4, le cas présenté comme optimum « absolu » est systématiquement le cas présentant le CGA le plus bas sur le front de Pareto, bien que le cost-optimum SRLT aurait pu être présenté comme tel.





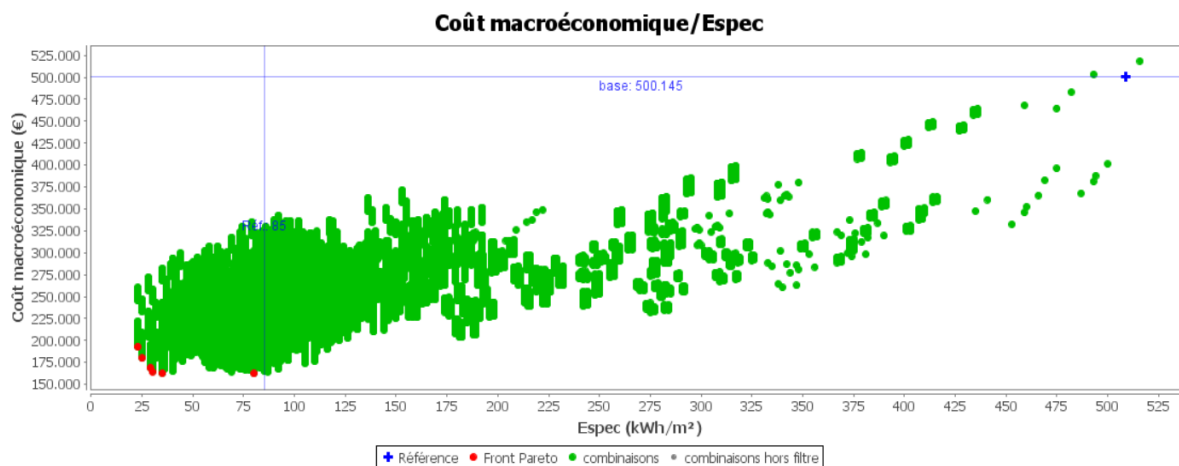
Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 0,2% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

#### 5.5.5. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / Espec avec une installation photovoltaïque

Opt. PV		-		
K	33		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	13487	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	60.04	Portes	2	P2
Ew	58	Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	80	Toits	0.20	H2, T2, T3
CGA macro [€]	162 115 €	Sols	0.61	-
Investissement [€]	127 513 €			
Combinaison n°	310442			

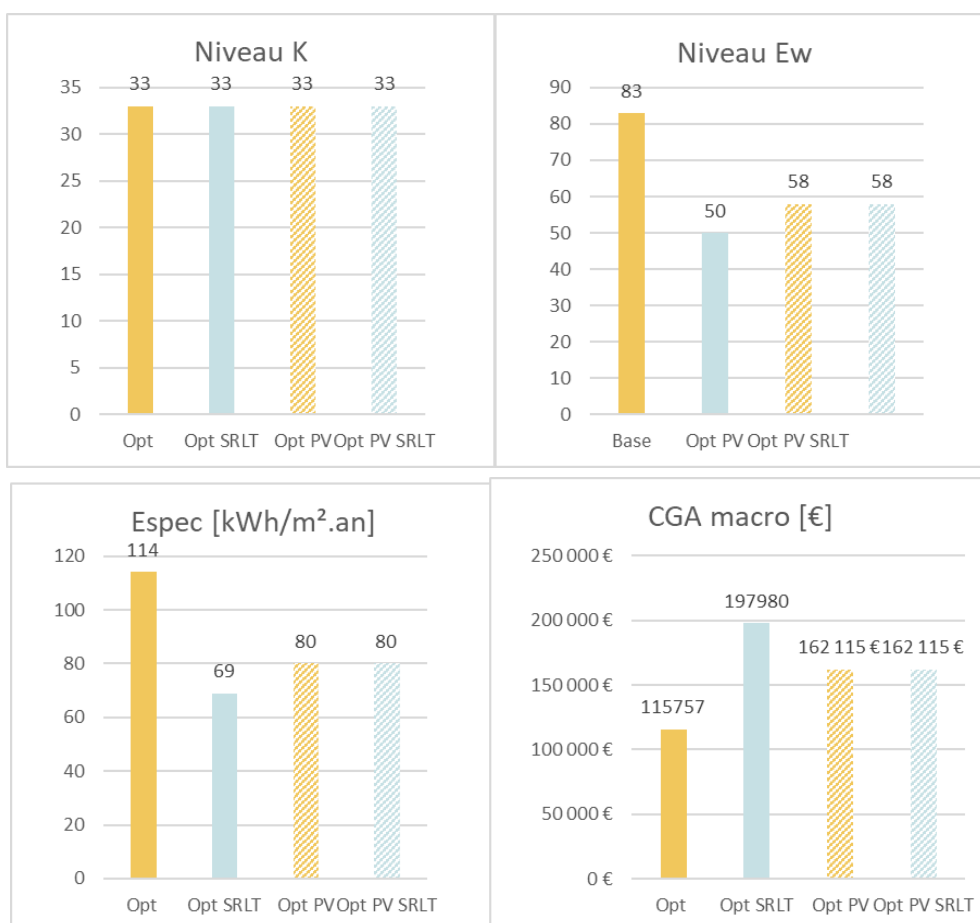
Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 3.75 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.



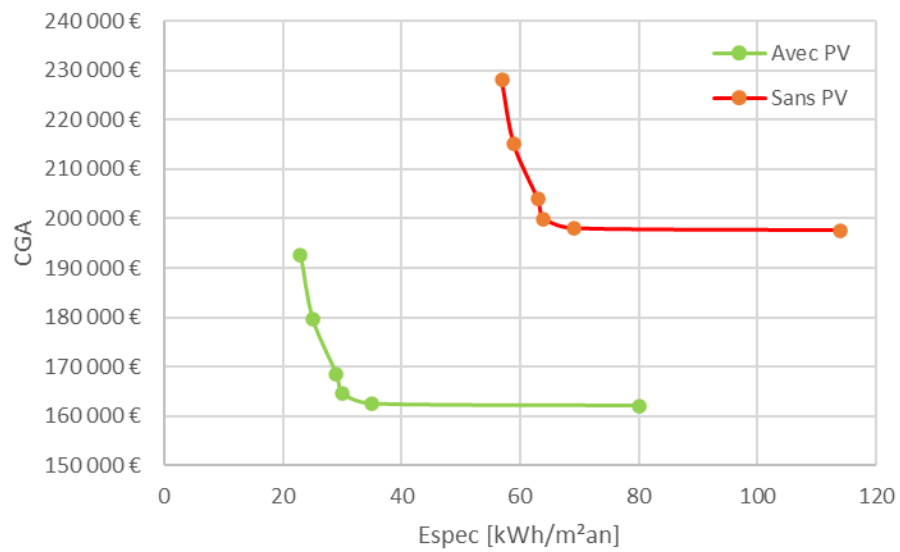
### Opt. PV SRLT

L'optimum SRLT avec panneaux solaires photovoltaïques est le même cas que l'optimum avec panneaux solaires photovoltaïques.





Comparaison des Fronts de Pareto avec sans installation photovoltaïque :



Avec l'installation de 3.75 kWc sur cette habitation, l'ensemble du front de Pareto se déplace vers la gauche pour l'amélioration du Espec de 34 kWh/m².an et vers le bas de 35.425 € de CGA macroéconomique de moins.

## 5.6. HE6 - La villa des premières extensions urbaines – 1946-1970

### 5.6.1. Bâtiment de référence



#### Géométrie assez complexe

- 4 façades
- Volumes annexes et jeux de matériaux
- Murs creux, simple vitrage
- Rez + combles aménagés, sur caves
- Chauffage central mazout
- Eau chaude sanitaire sur chaudière avec stockage
- Valeur intrinsèque : 142.219 €
- $A_{ch} = 124 \text{ m}^2$
- $V_p = 419 \text{ m}^3$

### 5.6.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	518199
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	11

### 5.6.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>175</b>	- €	376 247.00 €	309 847.00 €
<b>Fenêtres</b>	309495 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pcave2,Peanc2.0,Pext2) (F1,P2-P,P3-P,P5-P)					
	<b>5.11</b>	<b>1.43</b>	<b>157</b>	<b>17 452.00 €</b>	<b>366 700.00 €</b>	<b>308 707.00 €</b>
<b>Murs</b>	309500 M0.15(ME0.15,Mcave0.15,Meanc0.15) (M1,M12,M14)					
	<b>1.61</b>	<b>0.15</b>	<b>122</b>	<b>30 883.00 €</b>	<b>312 412.00 €</b>	<b>269 138.00 €</b>
<b>Toitures</b>	309491 T0.2(T0.20,TP0.20) (T2,T3)					
	<b>1.7</b>	<b>0.2</b>	<b>129</b>	<b>27 281.00 €</b>	<b>320 242.00 €</b>	<b>274 202.00 €</b>
<b>Sols</b>	309499 Pl0.15(PlE0.15,Plcave0.15) (S1,S5)					
	<b>1.62</b>	<b>0.15</b>	<b>139</b>	<b>7 466.00 €</b>	<b>319 465.00 €</b>	<b>265 917.00 €</b>

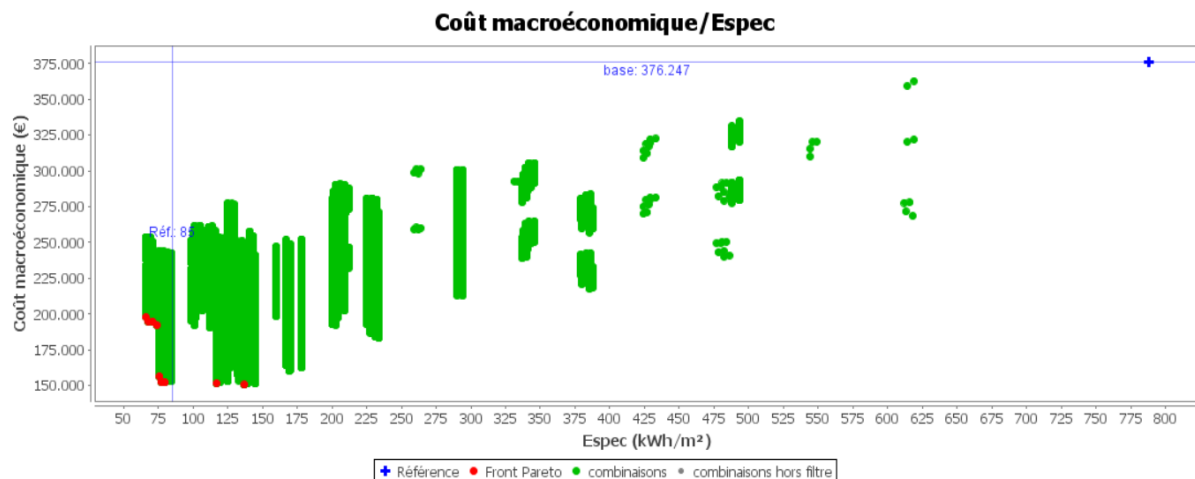
### 5.6.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub>/ K et U parois

Base			
	K	175	U <sub>moy</sub> [W/m².K]
<b>BNC [kWh/an]</b>		51874	Fenêtres 5.11
<b>BNC [kWh/m².an]</b>		418.51	Portes 3.74
<b>E<sub>w</sub></b>		389	Murs 1.61
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m².an]</b>		788	Toits 1.7
<b>CGA macro [€]</b>		376 247 €	Sols 1.62

Optimum					
	K	27		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	9478		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	76.47		Portes	2	P2, P3, P5
Ew	68		Murs	0.2	M1, M12, M14
Espec [kWh/m².an]	137		Toits	0.2	T2, T3
CGA macro [€]	150 584 €		Sols	0.24	S1, S5
Investissement [€]	96 245 €				
Combinaison n°	310431				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière biomasse avec un stockage.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m² de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

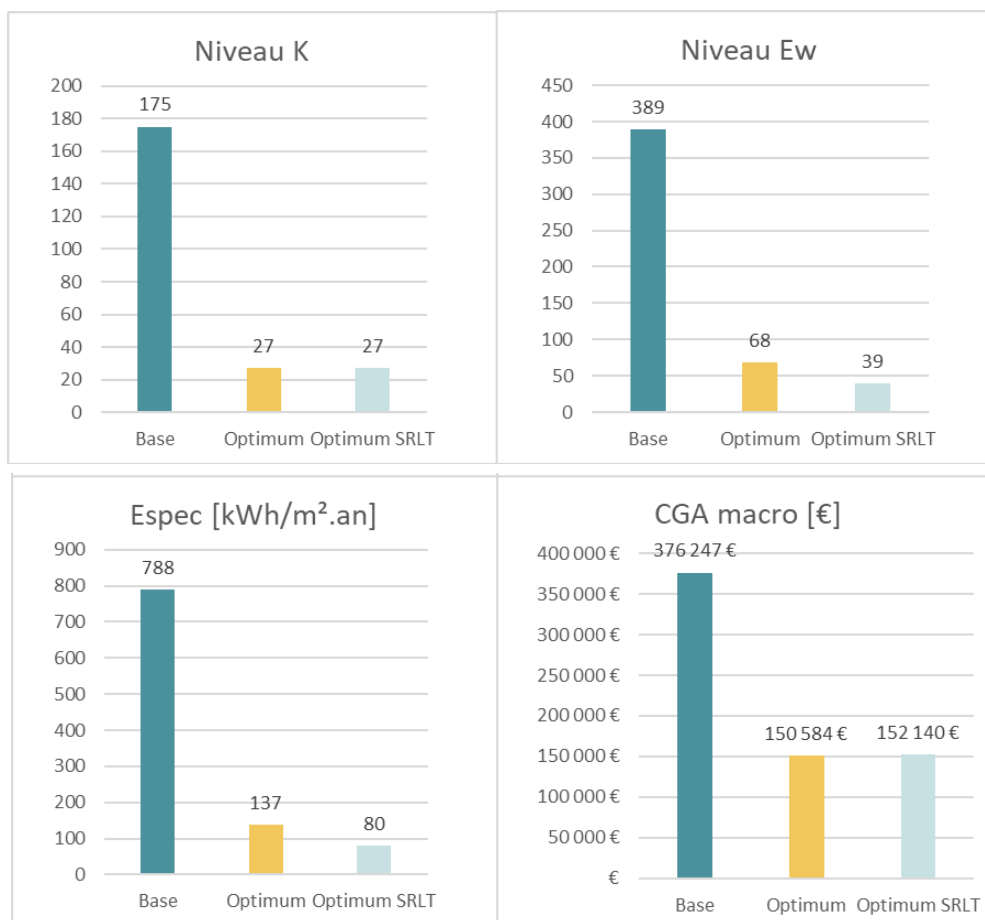
Optimum SRLT					
	K	27	Umoy [W/m².K]	Groupe	
BNC [kWh/an]	9478		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	76.47		Portes	2	P2, P3, P5
Ew	39		Murs	0.2	M1, M12, M14
Espec [kWh/m².an]	80		Toits	0.2	T2, T3

<b>CGA macro [€]</b>	152 140 €	Sols	0.24	S1, S5
<b>Investissement [€]</b>	93 007 €			
<b>Combinaison n°</b>	310429			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.

A coût global macroéconomique (CGA) très proches (1.556 € de différence), ce cost-optimum SRLT présente des performances énergétiques (Espec 80 kWh/m<sup>2</sup>.an) bien meilleures que celles de l'optimum « absolu » (137 kWh/m<sup>2</sup>.an). Mais comme exposé au chapitre 4, le cas présenté comme optimum « absolu » est systématiquement le cas présentant le CGA le plus bas sur le front de Pareto, bien que le cost-optimum SRLT aurait pu être présenté comme tel.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 1,0% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

## 5.7. HE7 - La villa de plain-pied – 1946-1970

### 5.7.1. Bâtiment de référence



#### Périphérie de la ville

- 4 façades
- Construite milieu du 20ème siècle (règles urbanistiques de certains lotissements imposant une hauteur maximale de construction)
- Murs creux, simple vitrage
- REZ + combles non aménagés, partiellement sur caves + garage
- Chauffage central mazout
- Eau chaude sanitaire sur boiler électrique
- Valeur intrinsèque : 152.556 €
- Ach = 120 m<sup>2</sup>
- Vp = 329 m<sup>3</sup>

### 5.7.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures :	823953
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	8

### 5.7.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>145</b>	<b>- €</b>	<b>334 394.00 €</b>	<b>281 590.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	308875 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pcave2,Pext2) (F1,P2-P,P3-P)					
	<b>5.11</b>	<b>1.43</b>	<b>121</b>	<b>22 399.00 €</b>	<b>317 973.00 €</b>	<b>272 793.00 €</b>
<b>Murs</b>	308871 M0.15(ME0.15,Mcave0.15,Meanc0.15) (M1,M12,M14)					
	<b>0.94</b>	<b>0.15</b>	<b>121</b>	<b>24 591.00 €</b>	<b>318 225.00 €</b>	<b>275 079.00 €</b>
<b>Toitures</b>	308869 T0.15(PfGr0.15) (H2)					
	<b>1.77</b>	<b>0.15</b>	<b>95</b>	<b>20 627.00 €</b>	<b>264 960.00 €</b>	<b>229 212.00 €</b>
<b>Sols</b>	308874 Pl0.2(PlSol0.20,Plcave0.20) (S1,S4)					
	<b>0.84</b>	<b>0.2</b>	<b>125</b>	<b>31 448.00 €</b>	<b>332 089.00 €</b>	<b>288 049.00 €</b>

5.7.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$  /  $E_{spec}$  / K et U parois

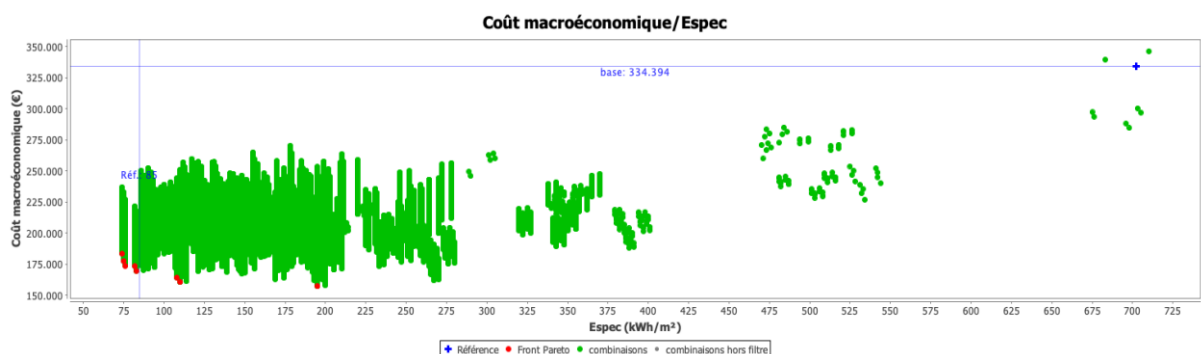
Base				
	K	145	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	43133	Fenêtres	5.11	
BNC [kWh/m².an]	360.04	Portes	4	
Ew	291	Murs	1.07	
Espec [kWh/m².an]	702	Toits	1.77	
CGA macro [€]	252 344 €	Sols	0.84	

Optimum				
	K	49	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	14308	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	119.43	Portes	1.71	P2, P3
Ew	81	Murs	0.2	M1, M12, M14
Espec [kWh/m².an]	195	Toits	0.2	H2
CGA macro [€]	157 240 €	Sols	0.84	-
Investissement [€]	82 702 €			
Combinaison n°	310063			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière gaz avec un stockage.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



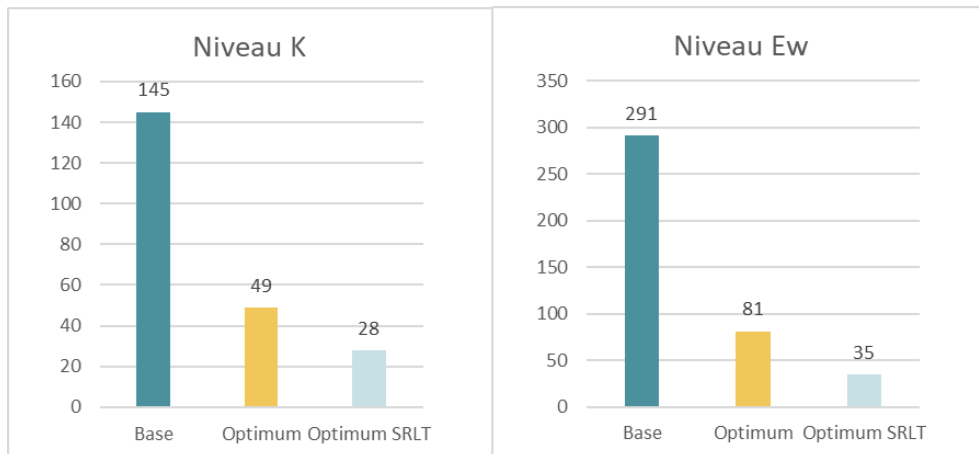
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et portes et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

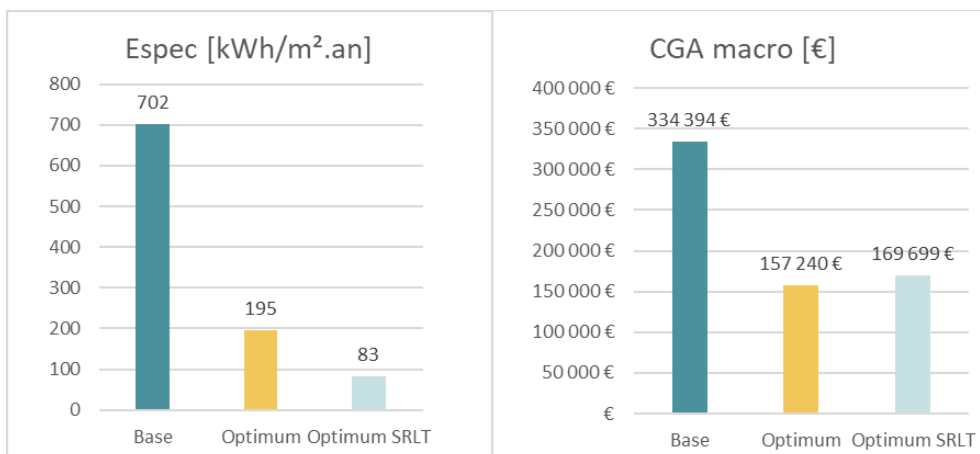
Optimum SRLT					
	K	28	Umoy [W/m².K]	Groupe	
BNC [kWh/an]	8976		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	74.92		Portes	2	P2, P3
Ew	35		Murs	0.2	M1, M12, M14
Espec [kWh/m².an]	83		Toits	0.15	H2
CGA macro [€]	169 699 €		Sols	0.2	S1, S4
Investissement [€]	111 096 €				
Combinaison n°	310117				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.







Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 7,9% supérieur au cost optimum « absolu », tout en restant largement inférieur à celui du cas de base. Malgré cet écart, les objectifs de la stratégie rénovation sont tout de même rentables du point de vue du coût macroéconomique, lorsqu'on prend comme point de comparaison un cas de base inchangé.

## 5.8. HE8 - La maison bel étage mitoyenne – 1946-1970

### 5.8.1. Bâtiment de référence



#### Maison de type bel-étage avec garage

- 2 façades
- Volumétrie simple avec annexes arrière
- Murs creux, simple vitrage
- REZ+1 + combles non aménagés, sur garage
- Chauffage central gaz
- Chauffe-eau gaz
- Valeur intrinsèque : 150.727 €
- Ach = 127 m<sup>2</sup>
- Vp = 353 m<sup>2</sup>

### 5.8.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	176475
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	8

### 5.8.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement_COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>158</b>	- €	271 359.00 €	278 075.00 €
<b>Fenêtres</b>	309418 fen0.6(Ch0.95-TV0.6/0.5-WE,Pext0.8) (F2,P1-BA)					
	<b>5.11</b>	<b>0.85</b>	<b>134</b>	23 588.00 €	266 424.00 €	273 384.00 €
<b>Murs</b>	309423 M0.15(ME0.15) (M6)					
	<b>0.93</b>	<b>0.15</b>	<b>140</b>	34 266.00 €	283 589.00 €	292 539.00 €
<b>Toitures</b>	309414 T0.24(PfGr0.24,T0.24) (H3,T1)					
	<b>1.71</b>	<b>0.24</b>	<b>118</b>	17 927.00 €	237 055.00 €	243 803.00 €
<b>Sols</b>	309421 Pl0.15(Pleanc0.15) (S2)					
	<b>2.28</b>	<b>0.15</b>	<b>100</b>	8 950.00 €	204 158.00 €	209 628.00 €

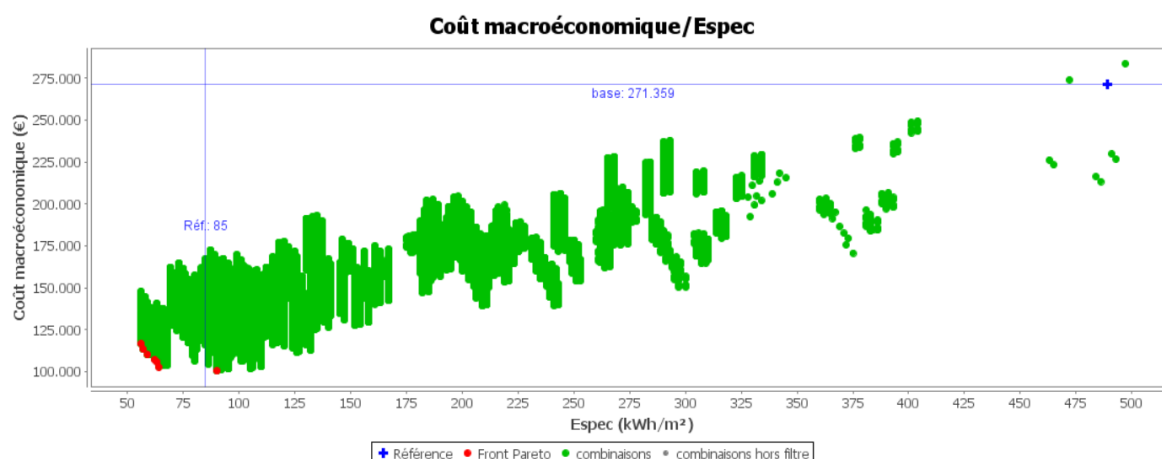
### 5.8.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub> / K et U parois

Base			
	K	158	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]
<b>BNC [kWh/an]</b>		31297	Fenêtres 5.11
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>		246.74	Portes 4
<b>E<sub>w</sub></b>		286	Murs 0.93
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>		489	Toits 1.71
<b>CGA macro [€]</b>		271 359 €	Sols 2.28

<b>Optimum</b>				
	K	25	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	6605	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	52.07	Portes	2	P2-P
Ew	53	Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	90	Toits	0.2	H2, T2
CGA macro [€]	100 386 €	Sols	0.24	S2
Investissement [€]	50 973 €			
Combinaison n°	310617			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et portes et l'isolation thermique de l'ensemble des parois déperdition.

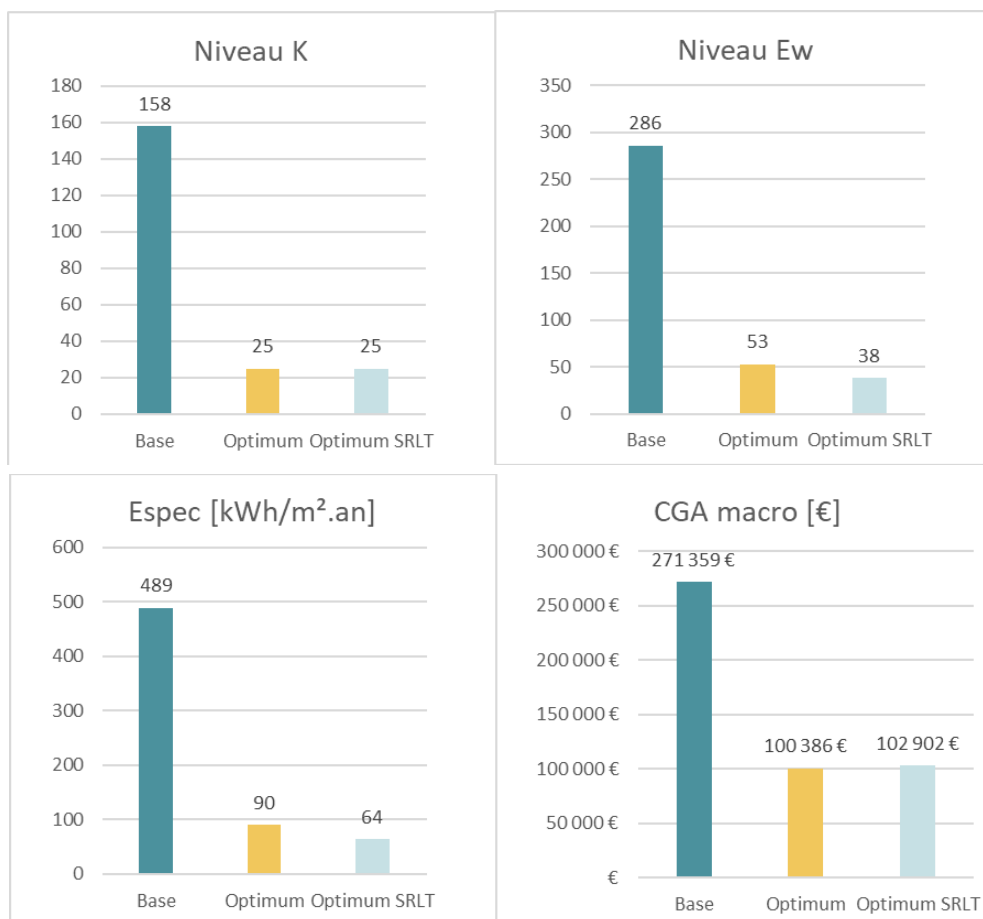
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m² de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
	K	25	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	6605	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	52.07	Portes	2	P2
Ew	38	Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	64	Toits	0.2	H2, T2

<b>CGA macro [€]</b>	102 902 €	Sols	0.24	S2
<b>Investissement [€]</b>	55 480 €			
<b>Combinaison n°</b>	310621			

Caractéristiques techniques :

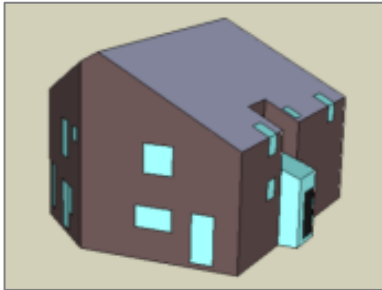
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 2,5% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

## 5.9. HE9 - La villa 4 façades de type lotissement – 1971-1984

### 5.9.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- Murs creux et toiture très légèrement isolée, simple vitrage
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés
- Pas de cave
- Chauffage central mazout
- Eau chaude sur boiler électrique
- Valeur intrinsèque : 261.966 €
- $A_{ch} = 220 \text{ m}^2$
- $V_p = 625 \text{ m}^3$

### 5.9.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	189777
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	9

### 5.9.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>110</b>	- €	357 794.00 €	307 679.00 €
<b>Fenêtres</b>	310514 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)	5.25	1.43	79	31 080.00 €	322 903.00 €
<b>Murs</b>	310512 M0.2(ME0.20) (M1)	0.86	0.2	85	38 529.00 €	343 240.00 €
<b>Toitures</b>	310516 T0.2(PfGr0.20,T0.20) (H2,T2)	0.88	0.2	95	18 552.00 €	342 598.00 €
<b>Sols</b>	310508 Pl0.2(PlSol0.20) (S4)	0.73	0.2	98	32 520.00 €	364 842.00 €

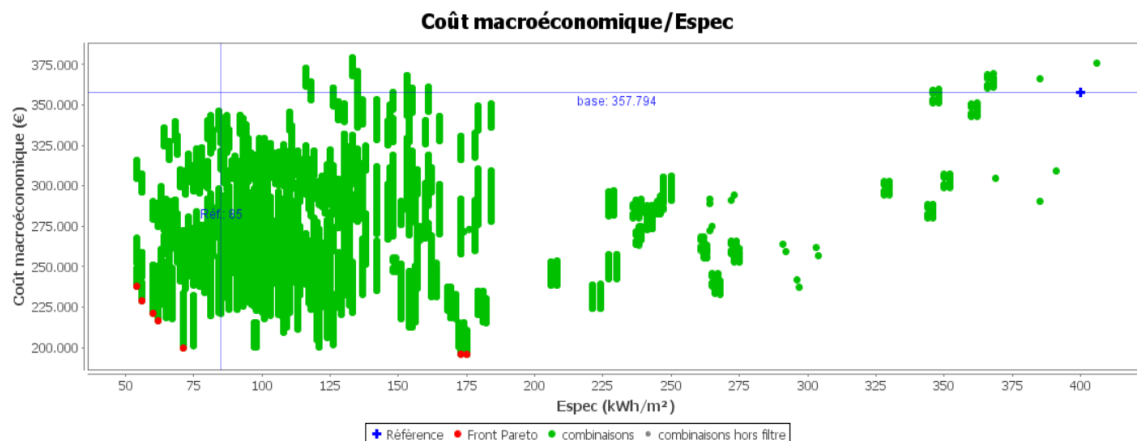
### 5.9.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub> / K et U parois

<b>Base</b>			
	K	110	U <sub>moy</sub> [W/m².K]
<b>BNC [kWh/an]</b>		42878	Fenêtres 5.25
<b>BNC [kWh/m².an]</b>		194.62	Portes 4
<b>E<sub>w</sub></b>		231	Murs 0.86
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m².an]</b>		400	Toits 0.88
<b>CGA macro [€]</b>		357 794 €	Sols 0.73

<b>Optimum</b>				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	66	Fenêtres	1.43	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	24298	Portes	2	P2
Ew	101	Murs	0.86	-
Espec [kWh/m².an]	175	Toits	0.24	H2, T2
CGA macro [€]	195 515 €	Sols	0.73	-
Investissement [€]	73 967 €			
Combinaison n°	312220			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et portes et l'isolation thermique du toit.

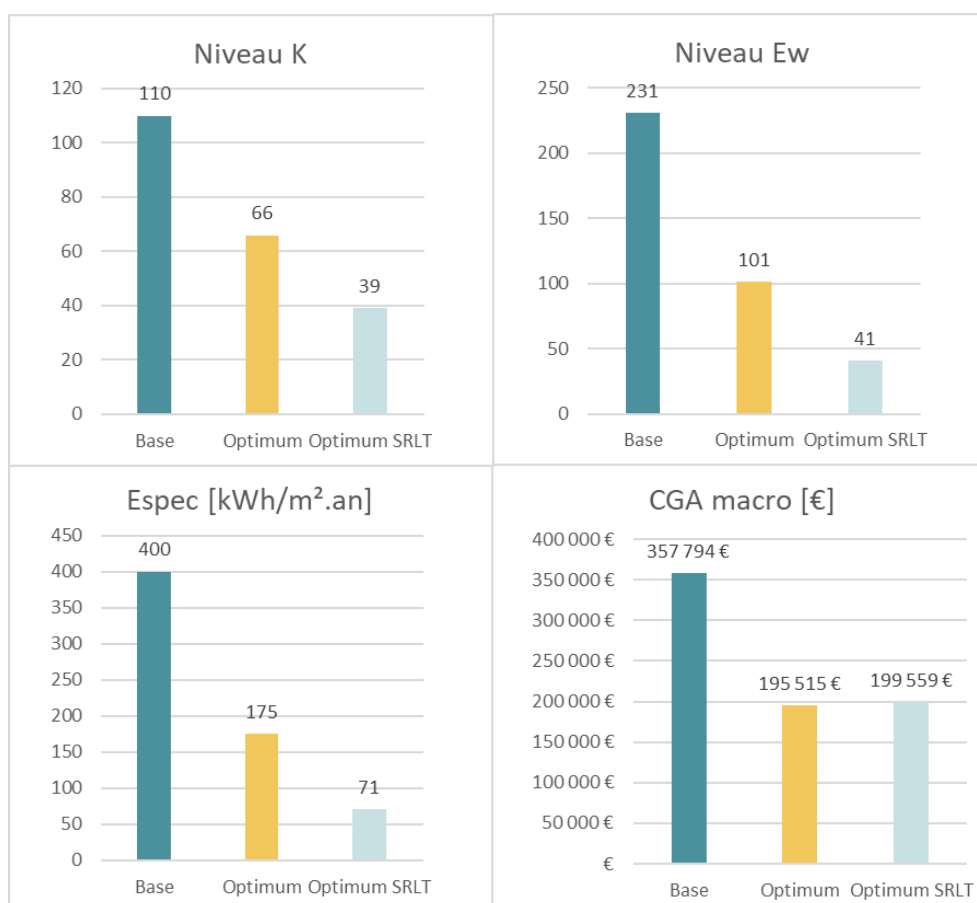
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 6m² de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	39	Fenêtres	1.37	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	15216	Portes	2	P2
Ew	69.06	Murs	0.2	M1

<b>Espec [kWh/m².an]</b>	71	Toits	0.2	H1, T2
<b>CGA macro [€]</b>	199 559 €	Sols	0.73	-
<b>Investissement [€]</b>	113 815 €			
<b>Combinaison n°</b>	312246			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 2,1% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

## 5.10. HE10 - La maison type barre de logement social – 1971-1984

### 5.10.1. Bâtiment de référence



**Construite à proximité de grandes villes dans un groupe d'habitations +/- identiques**

- 2 façades
- Murs creux et toiture très légèrement isolée, double vitrage
- REZ+2, garage au rez-de-chaussée
- Chauffage central au gaz
- Chauffe-eau au gaz
- Valeur intrinsèque : 120.482 €
- Ach = 95 m<sup>2</sup>
- Vp = 259 m<sup>3</sup>

### 5.10.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	139893
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	7

### 5.10.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement_COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>139</b>	- €	<b>179 741.00 €</b>	<b>183 198.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	309498 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Peanc2.0,Pext2) (F1,P2-P,P5-P)					
	<b>3.06</b>	<b>1.43</b>	<b>122</b>	<b>15 943.00 €</b>	<b>180 971.00 €</b>	<b>184 540.00 €</b>
<b>Murs</b>	309499 M0.2(ME0.20,Meanc0.20) (M1,M14)					
	<b>1.54</b>	<b>0.2</b>	<b>93</b>	<b>14 065.00 €</b>	<b>151 807.00 €</b>	<b>156 140.00 €</b>
<b>Toitures</b>	309492 T0.24(TP0.24) (T3)					
	<b>0.94</b>	<b>0.24</b>	<b>124</b>	<b>12 435.00 €</b>	<b>179 177.00 €</b>	<b>183 562.00 €</b>
<b>Sols</b>	309494 Pl0.2(PlSol0.20,Plcanc0.20) (S2,S4)					
	<b>1.64</b>	<b>0.2</b>	<b>109</b>	<b>6 198.00 €</b>	<b>156 804.00 €</b>	<b>160 039.00 €</b>

### 5.10.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub> / K et U parois

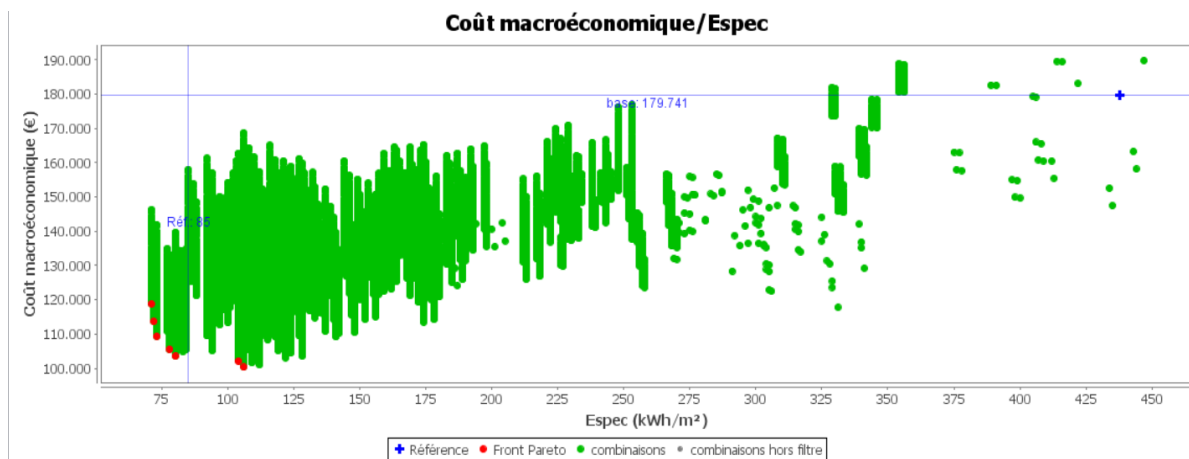
<b>Base</b>			
<b>K</b>		<b>Umoy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	
	139		
<b>BNC [kWh/an]</b>	20723	<b>Fenêtres</b>	3.06
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	217.75	<b>Portes</b>	4
<b>E<sub>w</sub></b>	240	<b>Murs</b>	1.54
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	438	<b>Toits</b>	0.94
<b>CGA macro [€]</b>	179 741 €	<b>Sols</b>	1.64



Optimum					
	K	31		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	5424		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	56.99		Portes	2	P2, P5
Ew	59		Murs	0.2	M1, M14
Espec [kWh/m².an]	106		Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	100 341 €		Sols	0.24	S2, S4
Investissement [€]	58 622 €				
Combinaison n°	310149				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière gaz avec un stockage.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et portes et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition.

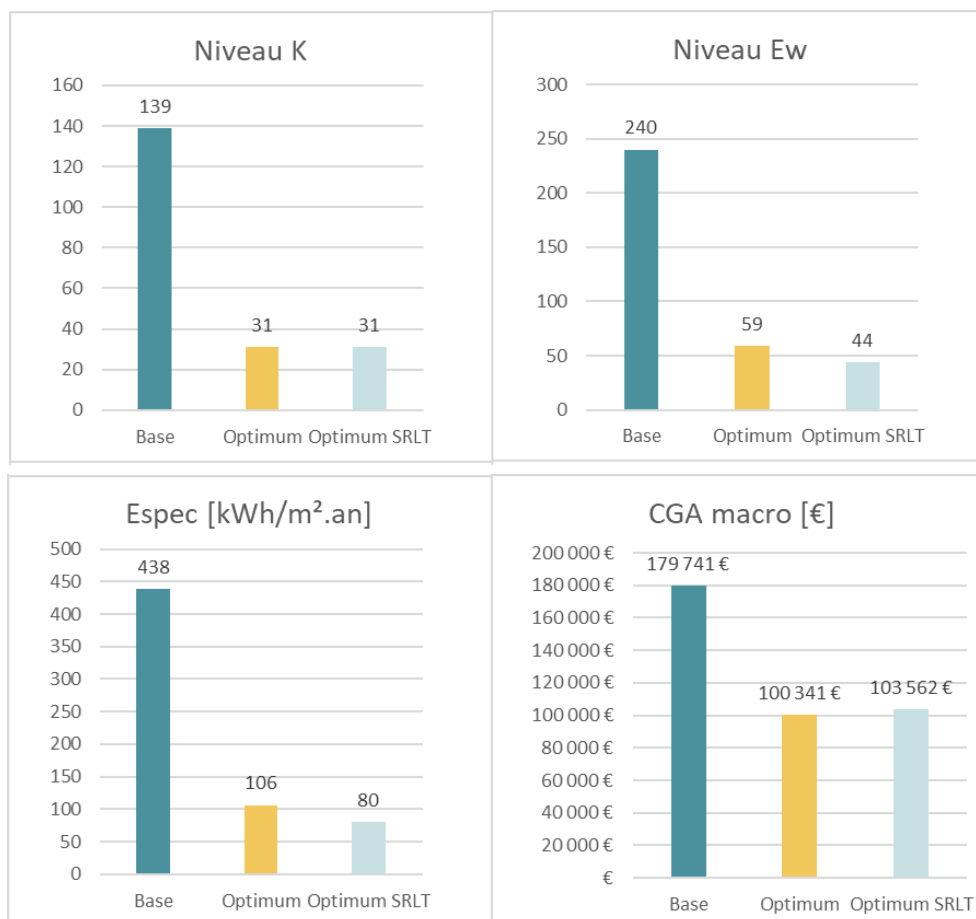
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation avec une production instantanée de l'eau chaude sanitaire.

Optimum SRLT					
	K	31		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	5424		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	56.99		Portes	2	P2, P5
Ew	44		Murs	0.2	M1, M14
Espec [kWh/m².an]	80		Toits	0.2	T3

<b>CGA macro [€]</b>	103 562 €	Sols	0.24	S2, S4
<b>Investissement [€]</b>	63 333 €			
<b>Combinaison n°</b>	310153			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 3,2% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visé pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

## 5.11. HE11 - La villa 4 façades K70 – 1985-1995

### 5.11.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- Murs creux, toiture et plancher très légèrement isolés, double vitrage
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur vide ventilés
- Pas de cave
- Chauffage central au mazout
- Eau chaude sanitaire sur boiler électrique
- Valeur intrinsèque: 223.715 €
- Ach = 196 m<sup>2</sup>
- Vp = 559 m<sup>3</sup>

### 5.11.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	117507
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	10

### 5.11.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>73</b>	- €	<b>219 239.00 €</b>	<b>192 923.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	308874 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>2.23</b>	<b>1.43</b>	<b>66</b>	<b>25 768.00 €</b>	<b>234 963.00 €</b>	<b>215 193.00 €</b>
<b>Murs</b>	308871 M0.2(ME0.20) (M1)					
	<b>0.7</b>	<b>0.2</b>	<b>54</b>	<b>33 766.00 €</b>	<b>221 968.00 €</b>	<b>209 353.00 €</b>
<b>Toitures</b>	308868 T0.15(T0.15) (T2)					
	<b>0.55</b>	<b>0.15</b>	<b>63</b>	<b>26 700.00 €</b>	<b>228 981.00 €</b>	<b>211 760.00 €</b>
<b>Sols</b>	308878 Pl0.2(PlE0.20,Plvv0.20) (S3,S5)					
	<b>0.78</b>	<b>0.2</b>	<b>61</b>	<b>5 819.00 €</b>	<b>205 822.00 €</b>	<b>184 704.00 €</b>

5.11.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et  $U$  parois

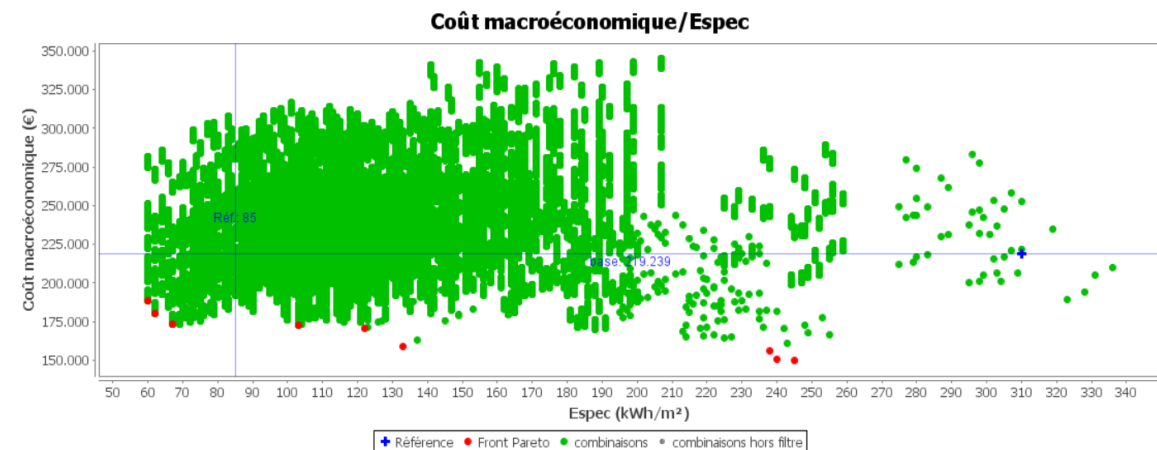
Base				
	K	73	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	
BNC [kWh/an]	26873		Fenêtres	2.23
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	137.27		Portes	4
Ew	173		Murs	0.7
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	310		Toits	0.55
CGA macro [€]	219 239 €		Sols	0.78

Optimum				
	K	73	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	26873		Fenêtres	2.23
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	137.27		Portes	4
Ew	137		Murs	0.7
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	245		Toits	0.55
CGA macro [€]	149 754 €		Sols	0.78
Investissement [€]	19 983 €			
Combinaison n°	309419			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 12 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>.
- Ventilation du cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe. L'étanchéité à l'air n'est donc pas améliorée.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire.

En analysant le Front de Pareto, on constate qu'il existe une autre combinaison intéressante, parce qu'elle permet de diminuer drastiquement le Espec (de 245 kWh/m<sup>2</sup>.an dans le cost-optimum absolu, à 133

kWh/m<sup>2</sup>.an), tout en maîtrisant l'augmentation du CGA macroéconomique (dont l'écart par rapport au cost optimum absolu est seulement de 5,9%).

Cette solution prévoit une PAC air-eau, avec stockage pour l'ECS et l'installation de 6m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques. C'est la combinaison de systèmes la plus performante des variantes étudiées, en termes de consommation en énergie primaire.

Cette maison plus récente et soumise aux premières réglementations thermiques est caractérisée par la présence d'une isolation thermique existante dans les parois ( $U_{murs} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $U_{toit} = 0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$  ;  $U_{sols} = 0,78 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Les combinaisons permettant d'envisager une réduction plus conséquente du Espec impliquent un complément d'isolation a posteriori ; des travaux importants d'un point de vue financier, qui ne permettent pas une rentabilité macroéconomique aussi intéressante que dans les cas d'habitations initialement non isolées.

<b>Optimum SRLT</b>					
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	<b>Groupe</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	10667	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1	
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	54.49	Portes	2	P2	
<b>Ew</b>	39	Murs	0.2	M1	
<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	69	Toits	0.2	T2	
<b>CGA macro [€]</b>	173 437 €	Sols	0.24	S3, S5	
<b>Investissement [€]</b>	111 840 €				
<b>Combinaison n°</b>	309530				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 15,8% supérieur au cost-optimum « absolu », tout en restant inférieur à celui du cas de base. Cela démontre qu'il reste rentable de rénover ce type de bâtiment jusqu'à l'objectif en énergie primaire visé par la stratégie rénovation.

## 5.12. HE12 - La maison 3 façades K70 – 1985-1995

### 5.12.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 3 façades
- Murs creux, toiture et plancher très légèrement isolés, double vitrage
- REZ+1 mansardé, sur vide ventilés
- Garage annexe
- Chauffage central au mazout
- Eau chaude sanitaire sur chaudière
- Valeur intrinsèque : 165.547€
- Ach = 105 m<sup>2</sup>
- Vp = 337 m<sup>3</sup>

### 5.12.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	117507
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	16

### 5.12.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>68</b>	- €	<b>109 251.00 €</b>	<b>91 943.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	309497 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>2.23</b>	<b>1.38</b>	<b>61</b>	<b>14 258.00 €</b>	<b>116 221.00 €</b>	<b>99 490.00 €</b>
<b>Murs</b>	309502 M0.2(ME0.20,Meanc0.20) (M1,M14)					
	<b>0.76</b>	<b>0.2</b>	<b>49</b>	<b>18 265.00 €</b>	<b>108 799.00 €</b>	<b>96 890.00 €</b>
<b>Toitures</b>	309492 T0.15(T0.15) (T2)					
	<b>0.47</b>	<b>0.15</b>	<b>59</b>	<b>16 023.00 €</b>	<b>117 628.00 €</b>	<b>103 336.00 €</b>
<b>Sols</b>	309495 Pl0.24(Plvv0.24) (S3)					
	<b>0.6</b>	<b>0.24</b>	<b>60</b>	<b>2 440.00 €</b>	<b>104 614.00 €</b>	<b>89 342.00 €</b>

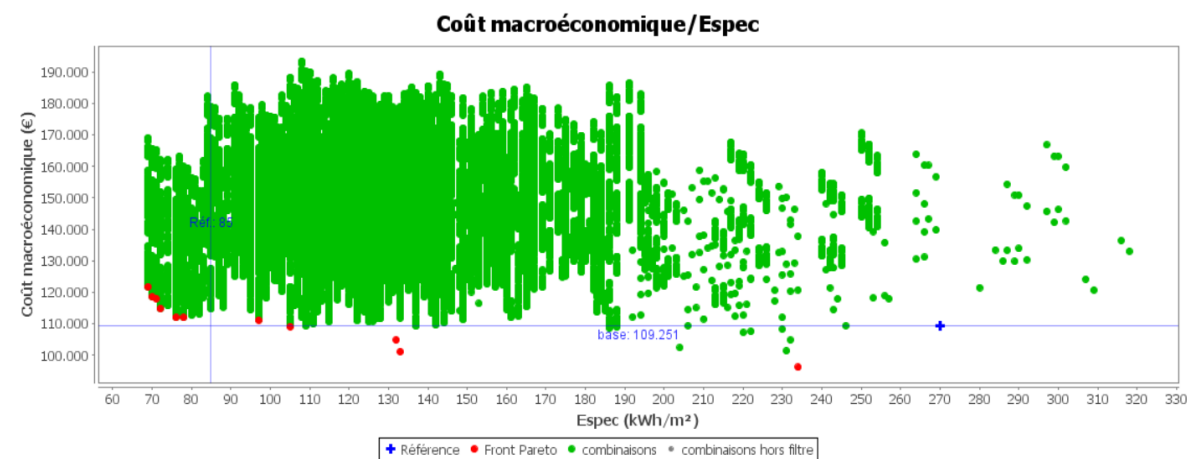
### 5.12.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub>/ K et U parois

Base			
	K	68	U <sub>moy</sub> [W/m <sup>2</sup> .K]
<b>BNC [kWh/an]</b>		15620	Fenêtres 2.23
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>		148.48	Portes 4
<b>E<sub>w</sub></b>	146		Murs 0.76
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	270		Toits 0.47
<b>CGA macro [€]</b>		109 251 €	Sols 0.6

<b>Optimum</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	68			
	15620	Fenêtres	2.23	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	148.48	Portes	4	-
<b>Ew</b>	126	Murs	0.76	-
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	234	Toits	0.47	-
<b>CGA macro [€]</b>	96 155 €	Sols	0.6	-
<b>Investissement [€]</b>	16 974 €			
<b>Combinaison n°</b>	310589			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 12 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe. L'étanchéité à l'air n'est donc pas améliorée.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire.

En analysant le Front de Pareto, on constate qu'il existe une autre combinaison intéressante, parce qu'elle permet de diminuer drastiquement le Espec (de 234 kWh/m².an dans le cost-optimum absolu, à 133kwh/m².an), tout en maîtrisant l'augmentation du CGA macroéconomique (dont l'écart par rapport au cost optimum absolu est seulement de 5,1%).

Cette solution prévoit une PAC air-eau, avec stockage pour l'ECS et l'installation de 6m² de panneaux solaires thermiques. C'est la combinaison de systèmes la plus performante des variantes étudiées, en termes de consommation en énergie primaire.

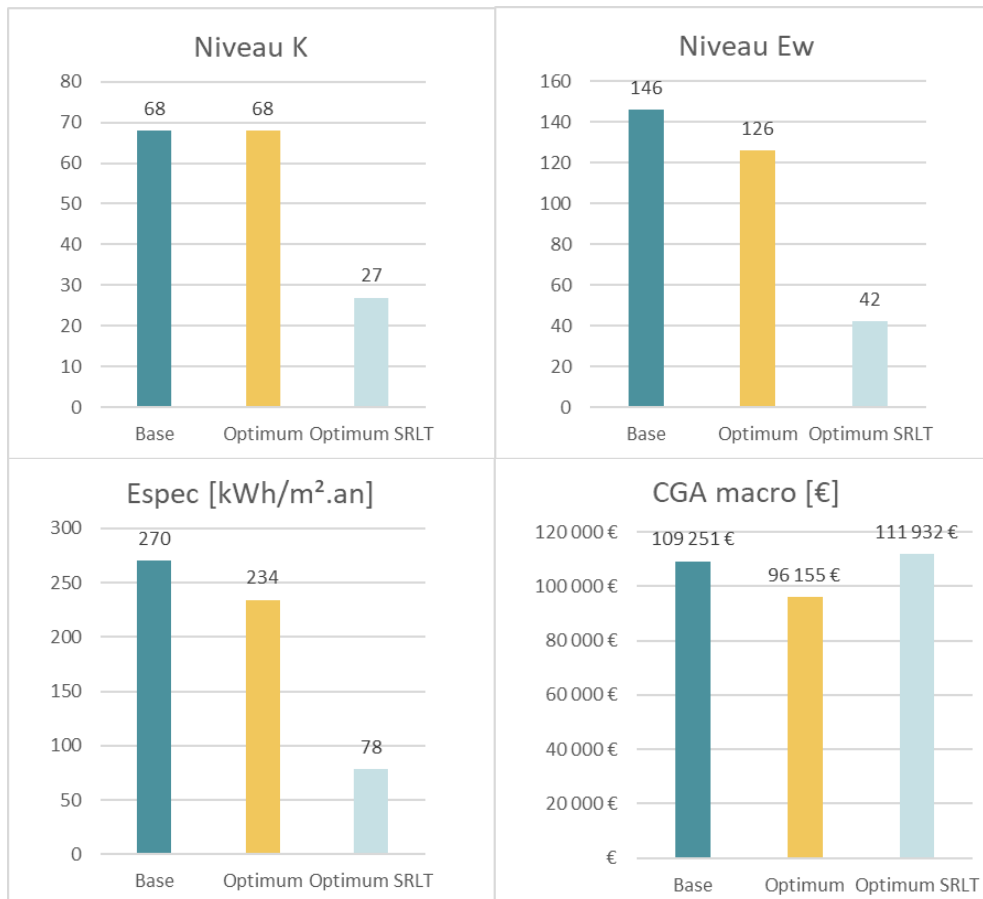


Cette maison plus récente et soumise aux première règlementations thermiques est caractérisée par la présence d'une isolation thermique existante dans les parois ( $U_{murs} = 0,76 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{toit} = 0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $U_{sols} = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Les combinaisons permettant d'envisager une réduction plus conséquente du Espec impliquent un complément d'isolation a posteriori ; des travaux nécessitant un investissement important, qui ne permettent pas d'envisager une rentabilité macroéconomique aussi intéressante que dans les cas d'habitations initialement non isolées.

<b>Optimum SRLT</b>				
<b>K</b>	27		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	6883	Fenêtres	1.38	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	65.43	Portes	2	P2-P
<b>Ew</b>	42	Murs	0.2	M1, M14
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	78	Toits	0.2	T2
<b>CGA macro [€]</b>	111 932 €	Sols	0.24	S3
<b>Investissement [€]</b>	64 422 €			
<b>Combinaison n°</b>	310699			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 14,1% supérieur au cost-optimum « absolu ». Il est également supérieur à celui du cas de base. Ce bâtiment ne permet donc pas actuellement d'atteindre l'objectif de la stratégie rénovation avec des travaux rentables.

### 5.13. HE13 - La maison mitoyenne bel-étage K70 – 1985-1995

#### 5.13.1. Bâtiment de référence



#### Maison de type bel-étage avec garage

- 2 façades
- Volumétrie simple avec annexes arrière
- Murs creux, plancher du grenier et plancher du sol légèrement isolé, double vitrage
- -1, REZ+1+ combles non aménagés, sur garage
- Chauffage central au mazout
- ECS sur la chaudière
- Valeur intrinsèque: 270.482 €
- Ach = 229 m<sup>2</sup>
- Vp = 598 m<sup>3</sup>

#### 5.13.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de coût calculées:	234975
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP:	14

#### 5.13.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>63</b>	<b>- €</b>	<b>141 480.00 €</b>	<b>126 143.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	311057 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>2.23</b>	<b>1.39</b>	<b>48</b>	<b>42 865.00 €</b>	<b>161 167.00 €</b>	<b>148 207.00 €</b>
<b>Murs</b>	311055 M0.2(ME0.20,Ms0.20) (M1,M16)					
	<b>0.59</b>	<b>0.2</b>	<b>55</b>	<b>14 587.00 €</b>	<b>146 499.00 €</b>	<b>134 455.00 €</b>
<b>Toitures</b>	311054 T0.24(PfGr0.24,T0.24) (H1,T2)					
	<b>0.35</b>	<b>0.24</b>	<b>61</b>	<b>6 011.00 €</b>	<b>144 713.00 €</b>	<b>130 237.00 €</b>
<b>Sols</b>	311060 Pl0.2(PlSol0.20) (S4)					
	<b>0.41</b>	<b>0.2</b>	<b>58</b>	<b>22 425.00 €</b>	<b>158 299.00 €</b>	<b>145 706.00 €</b>

#### 5.13.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub>/ K et U parois

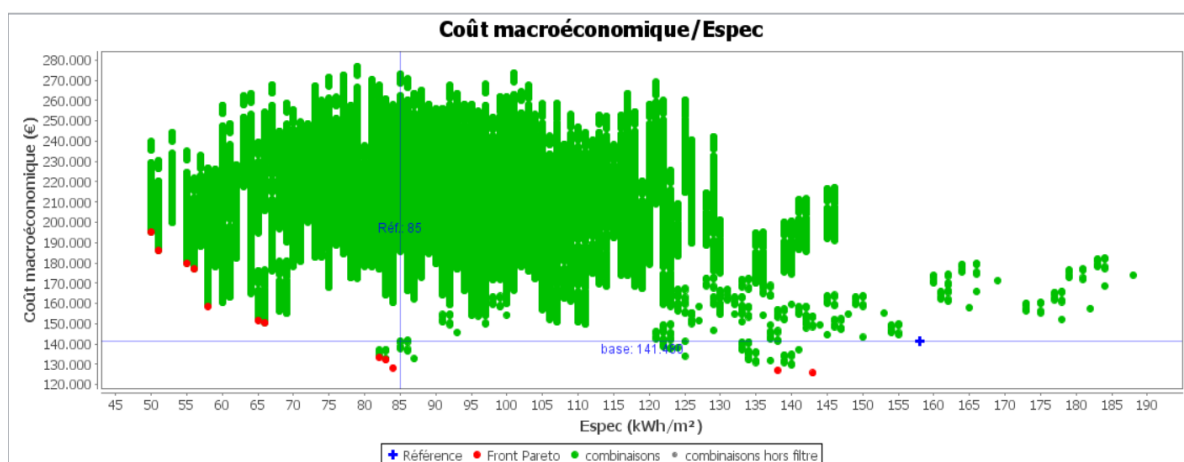
<b>Base</b>			
	<b>K</b>	<b>63</b>	<b>Umoy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>		18234	Fenêtres 2.23
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>		79.63	Portes 4

<b>Ew</b>	111	Murs	0.59
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	158	Toits	0.39
<b>CGA macro [€]</b>	141 480 €	Sols	0.41

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	63	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	18234	Fenêtres	2.23	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	79.63	Portes	4	-
<b>Ew</b>	100	Murs	0.59	-
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	143	Toits	0.35	-
<b>CGA macro [€]</b>	125 737 €	Sols	0.41	-
<b>Investissement [€]</b>	17 067 €			
<b>Combinaison n°</b>	311603			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 10 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe. L'étanchéité à l'air n'est donc pas améliorée.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire.

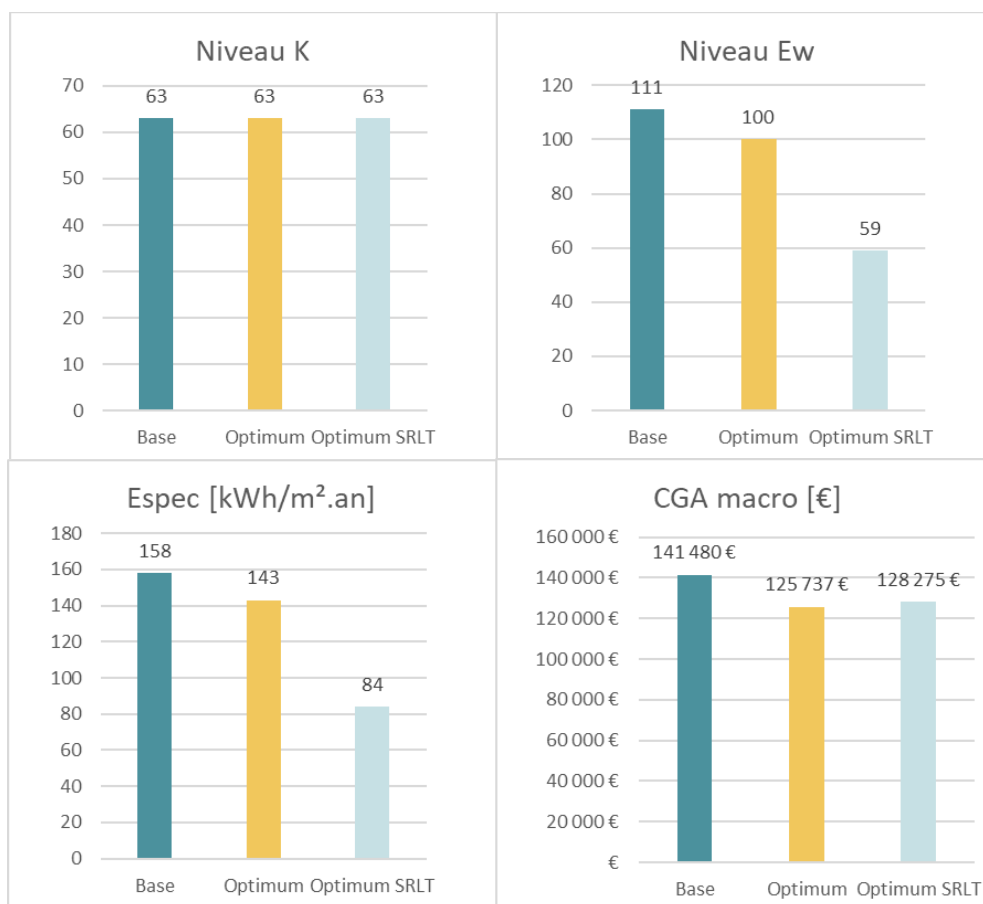
<b>Optimum SRLT</b>				
<b>K</b>	63	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	18234	Fenêtres	2.23	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	79.63	Portes	4	-
<b>Ew</b>	59	Murs	0.59	-
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	84	Toits	0.35	-

<b>CGA macro [€]</b>	128 275 €
<b>Investissement [€]</b>	23 260 €
<b>Combinaison n°</b>	311602

Sols 0.41 -

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 10 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air- eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 2,0% supérieur au cost-optimum « absolu » et inférieure au CGA de base. Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visée pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum et est rentable avec des travaux uniquement sur les systèmes.

## 5.14. HE14 - La villa 4 façades K55 – 1996-2008

### 5.14.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- Murs creux, toiture et plancher isolés, double vitrage
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur vide ventilés
- Chauffage central mazout
- ECS sur chaudière
- Valeur intrinsèque : 254.927 €
- Ach = 174 m<sup>2</sup>
- Vp = 479 m<sup>3</sup>

### 5.14.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	234975
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	13

### 5.14.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement_COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>54</b>	<b>- €</b>	<b>115 972.00 €</b>	<b>97 130.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	309956 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>1.92</b>	<b>1.37</b>	<b>49</b>	<b>25 786.00 €</b>	<b>133 962.00 €</b>	<b>117 230.00 €</b>
<b>Murs</b>	309949 M0.2(ME0.20,Meanc0.20) (M1,M14)					
	<b>0.49</b>	<b>0.2</b>	<b>44</b>	<b>29 462.00 €</b>	<b>132 043.00 €</b>	<b>118 444.00 €</b>
<b>Toitures</b>	309947 T0.24(PfGr0.24,T0.24) (H1,T2)					
	<b>0.30</b>	<b>0.24</b>	<b>53</b>	<b>11 646.00 €</b>	<b>125 417.00 €</b>	<b>107 720.00 €</b>
<b>Sols</b>	309953 Pl0.24(Plvv0.24) (S3)					
	<b>0.49</b>	<b>0.24</b>	<b>49</b>	<b>3 575.00 €</b>	<b>112 323.00 €</b>	<b>95 513.00 €</b>

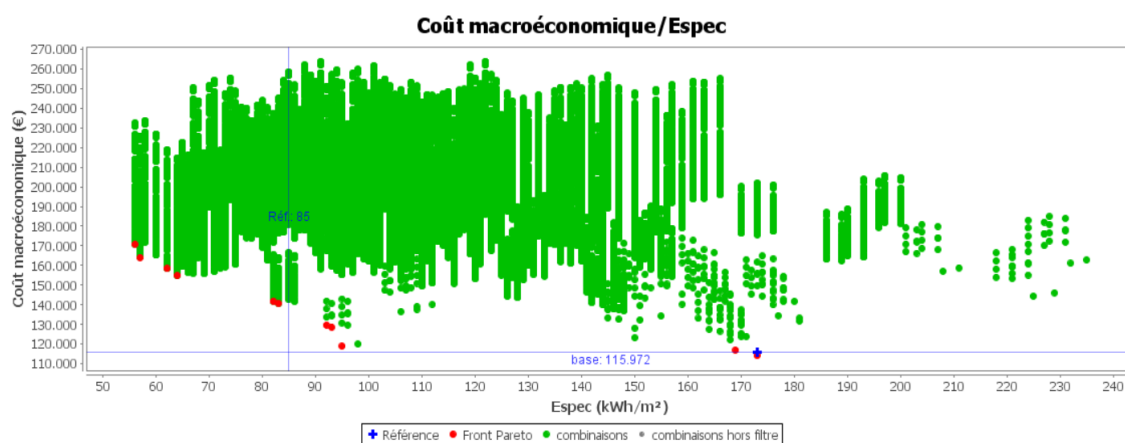
### 5.14.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub> / K et U parois

<b>Base</b>			
<b>K</b>		<b>Umoy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	19232	<b>Fenêtres</b>	1.92
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	110.24	<b>Portes</b>	4
<b>E<sub>w</sub></b>	92	<b>Murs</b>	0.49
<b>E<sub>spec</sub> [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	173	<b>Toits</b>	0.33
<b>CGA macro [€]</b>	115 972 €	<b>Sols</b>	0.49

<b>Optimum</b>					
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	54				
	19232	Fenêtres	1.92		-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	110.24	Portes	4		-
<b>Ew</b>	92	Murs	0.49		-
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	173	Toits	0.30		-
<b>CGA macro [€]</b>	114 078 €	Sols	0.49		-
<b>Investissement [€]</b>	17 494 €				
<b>Combinaison n°</b>	309965				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 9 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par une chaudière biomasse avec stockage.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière biomasse avec un ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire.

En analysant le graphique, on constate que seul le cost optimum « absolu » présente un CGA macroéconomique inférieur au cas de base. Il existe toutefois, dans une perspective de réduction de la consommation énergétique sans augmenter anormalement le cout macroéconomique, une combinaison intéressante sur le front de Pareto. Cette combinaison présente un Espec de 95 kWh/m².an (supérieur de 11,8% à l'objectif SRLT de 85 kWh/m².an), pour un CGA supérieur de 4,25% au CGA du cost-optimum absolu.

Cette solution prévoit une PAC air-eau, avec stockage pour l'ECS et l'installation de 6m² de panneaux solaires thermiques. C'est la combinaison de systèmes la plus performante des variantes étudiées, en termes de consommation en énergie primaire.

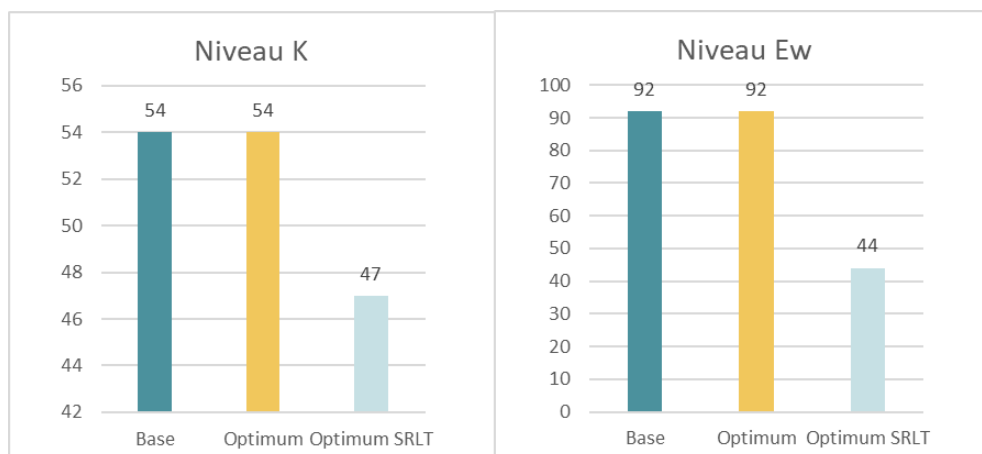
Cette maison plus récente et soumise aux premières réglementations thermiques est caractérisée par la présence d'une isolation thermique existante dans les parois (Umurs = 0,49 W/m²K ; Utoit = 0,33 W/m²K ; Usols

= 0,49 W/m<sup>2</sup>K). Les combinaisons permettant d'envisager une réduction plus conséquente du Espec impliquent un complément d'isolation a posteriori ; des travaux nécessitant un investissement important, qui ne permettent pas une rentabilité macroéconomique aussi intéressante que dans les cas d'habitations initialement non isolées.

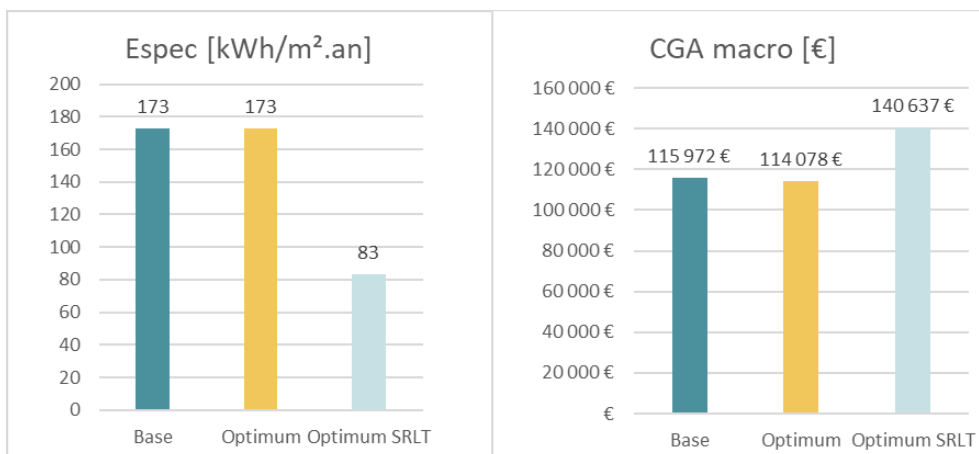
<b>Optimum SRLT</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	47			
	15655	Fenêtres	1.43	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	89.74	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	44	Murs	0.49	-
<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	83	Toits	0.24	H1, T2
<b>CGA macro [€]</b>	140 637 €	Sols	0.49	-
<b>Investissement [€]</b>	58 677 €			
<b>Combinaison n°</b>	310034			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.







Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 18,9% supérieur au cost-optimum « absolu ». Il est également supérieur au à celui du cas de base. Ce bâtiment ne permet donc pas actuellement d'atteindre l'objectif de la stratégie rénovation avec des travaux rentables.

### 5.15. Observations globales pour les HE

L'isolation d'un plancher sur sol n'apparaît presque jamais dans les combinaisons cost-optimum. Même non isolé, un plancher sur sol possède déjà souvent une valeur U inférieure à  $1\text{W/m}^2\text{K}$ .

Le complément d'isolation thermique (a posteriori) de parois déjà un peu isolées fait systématiquement augmenter le coût macroéconomique, si un système de chauffage performant est installé. Si on conserve un système de production peu performant, le complément a posteriori d'isolation thermique de parois pré-isolées, peut s'avérer rentable. Ce constat a été fait sur l'analyse des U de parois de bâtiments pour lesquels on conservait le système de chauffage existant. L'analyse réalisée sur les différentes typologies ci-dessus ne doit donc pas se conclure par le fait qu'il ne faut pas réisoler des parois déjà partiellement isolées. Il faut également rester critique sur la qualité (actuelle) de l'isolation thermique mise en œuvre à l'époque des premières réglementations thermiques.

### 5.16. Analyse transversale des résultats des habitations unifamiliales existantes

Voir annexe E

## 6. Analyse des résultats des habitations unifamiliales neuves

### 6.1. HN1 T1 - Maison neuve 4 façades maçonnerie traditionnelle

#### 6.1.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque : 307.497 €
- Ach = 166 m<sup>2</sup>
- Vp = 559 m<sup>3</sup>

Base			
K	19	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	
BNC [kWh/an]	3451	Fenêtres	0.87
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	20.82	Portes	0.8
Ew	45	Murs	0.15
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	80	Toits	0.15
CGA macro [€]	436 332 €	Sols	0.15
Combinaisons n°	69937		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un v50 = 2 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>.
- Ventilation de type mécanique double flux (amenées et extractions) avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

#### 6.1.2. Combinaisons calculées

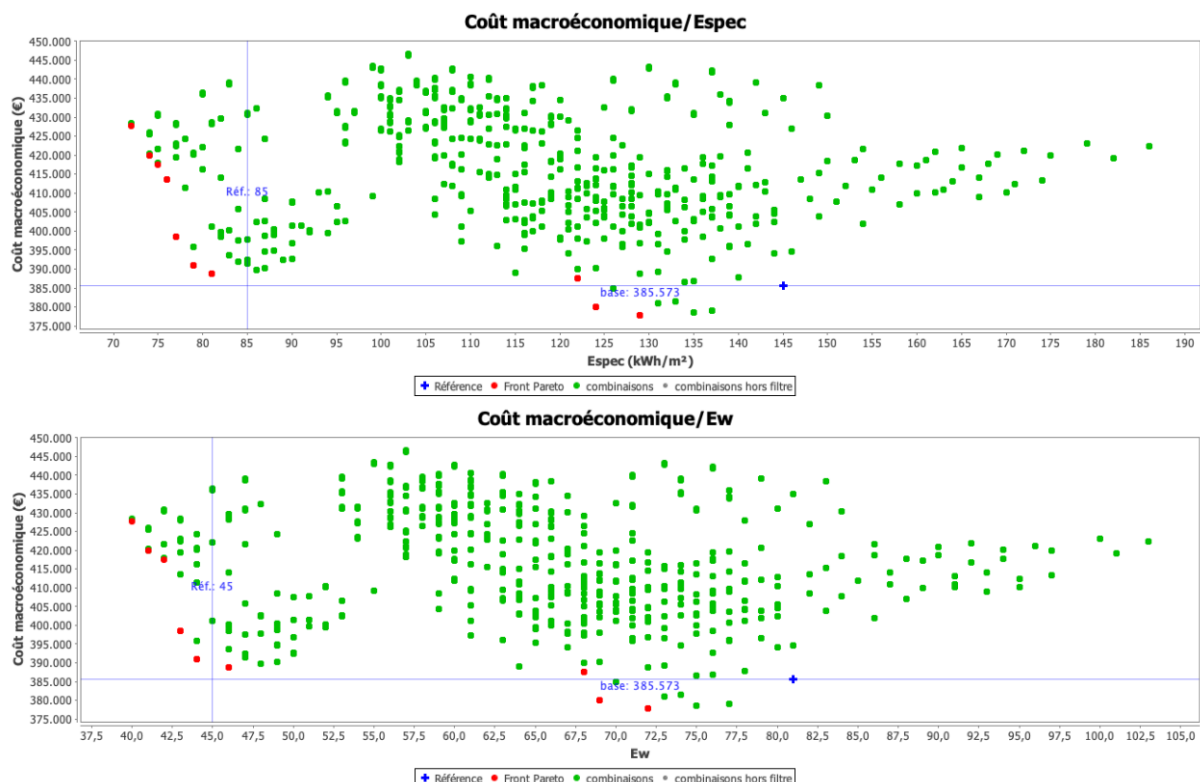
Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	78

6.1.3. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ /  $E_{spec}$ /K et U parois

Optimum				
	K	27	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	10433	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit
BNC [kWh/m².an]	62.95	Portes	2	P1-PVC
Ew	46	Murs	0.2	M9
Espec [kWh/m².an]	81	Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	388 830 €	Sols	0.2	S2, S3
Investissement [€]	317 536 €			
Combinaison n°	69607			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, Evacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



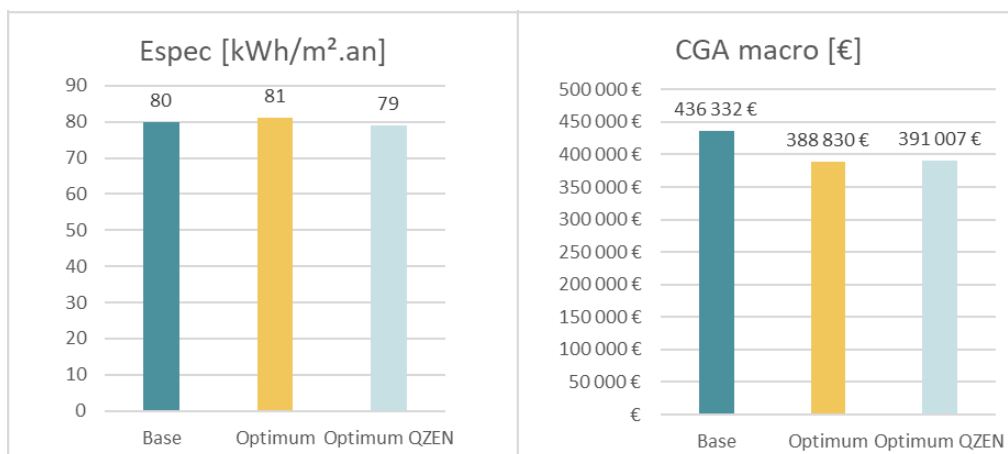
À la lecture du graphique, il apparaît que l'optimum (Espec 128) correspond à un cas où les systèmes de production de chauffage et d'ECS restent alimentés par du mazout. Comme expliqué au point 2.2.4, la

politique mise en place en Wallonie concernant l'interdiction progressive de l'installation de chaudières au mazout, dans le neuf puis l'existant, implique que ces solutions ne peuvent être considérées comme viables à un horizon de 30 ans. Par conséquent, les auteurs de l'étude ont sélectionné la 1<sup>ère</sup> combinaison, sur le Front de Pareto, qui proposait un remplacement du vecteur énergétique pour la production de chauffage et d'ECS (Espec 81).

<b>Optimum QZEN</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	9785	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	59.04	Portes	2	P1-PVC
<b>Ew</b>	44	Murs	0.2	M9
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	79	Toits	0.2	T3
<b>CGA macro [€]</b>	391 007 €	Sols	0.2	S2, S3
<b>Investissement [€]</b>	321 729 €			
<b>Combinaison n°</b>	69816			

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.





Nous constatons que le cost-optimum est quasi similaire en termes de performance énergétique et de cout global actualisé que le cost-optimum Qzen (respectant les exigences énergétiques des habitations neuves). Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 0,56 % supérieur au cost-optimum « absolu », tout en permettant une réduction substantielle de la consommation d'énergie (-4% du niveau Ew et - 2,5 % du niveau Espec ). Pour cette typologie, donc, l'exigence en énergie primaire appliquée aux habitations neuves est quasi cost-optimum.

Nous constatons que la mise en place d'un système de ventilation plus performant (Système C+ (amenées naturelles, extractions mécaniques), facteur de réduction 0.9) permet au cas cost-optimum « absolu » de devenir le cost-optimum Qzen.

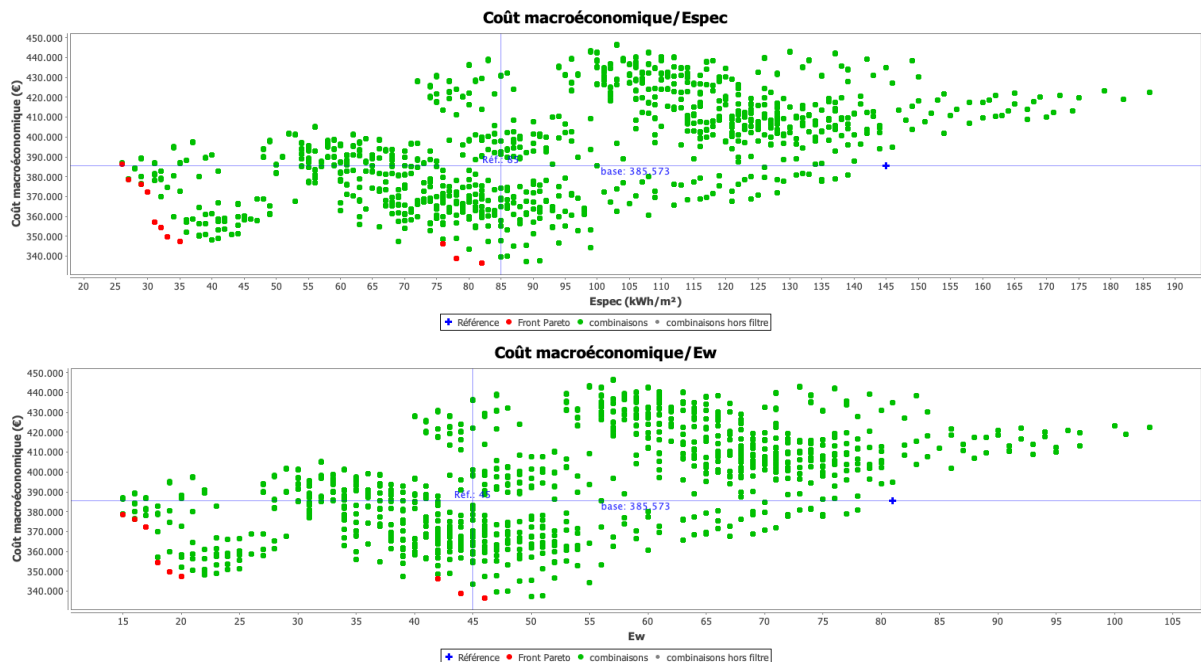
#### 6.1.4. Niveau de performance cost-optimum Ew/ E<sub>spec</sub> avec une installation photovoltaïque

Opt PV				
	K	27	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	10433	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit
BNC [kWh/m².an]	62.95	Portes	2	P1-PVC
Ew	20	Murs	0.2	M9
Espec [kWh/m².an]	35	Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	347 432 €	Sols	0.2	S2, S3
Investissement [€]	323 414 €			
Combinaison n°	70321			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.

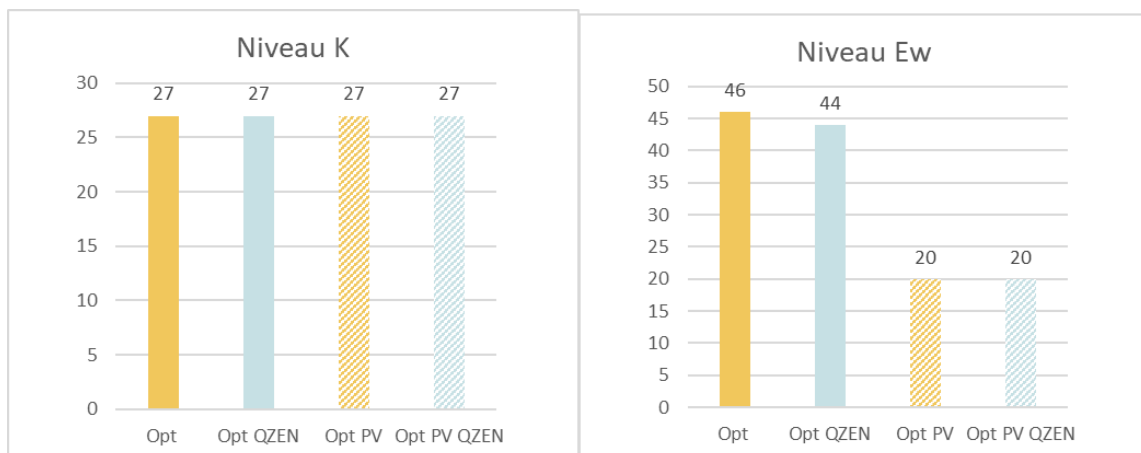
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 3.75 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.

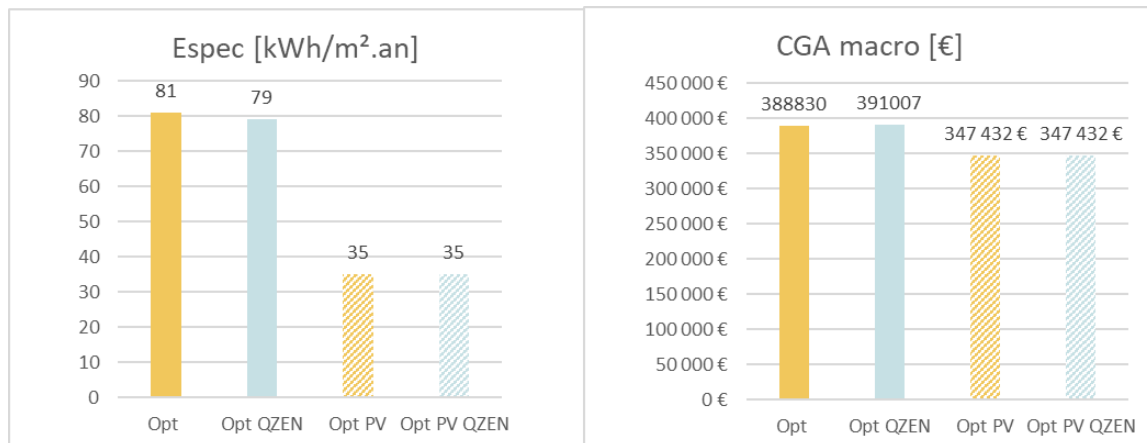


À la lecture du graphique, il apparaît que l'optimum correspond à un cas où les systèmes de production de chauffage et d'ECS restent alimentés par du mazout (Espec 78). Comme expliqué au point 2.2.4, la politique mise en place en Wallonie concernant l'interdiction progressive de l'installation de chaudières au mazout, dans le neuf puis l'existant, implique que ces solutions ne peuvent être considérées comme viables à un horizon de 30 ans. Par conséquent, les auteurs de l'étude ont sélectionné la 1<sup>ère</sup> combinaison, sur le Front de Pareto, qui proposait un remplacement du vecteur énergétique pour la production de chauffage et d'ECS (Espec 35).

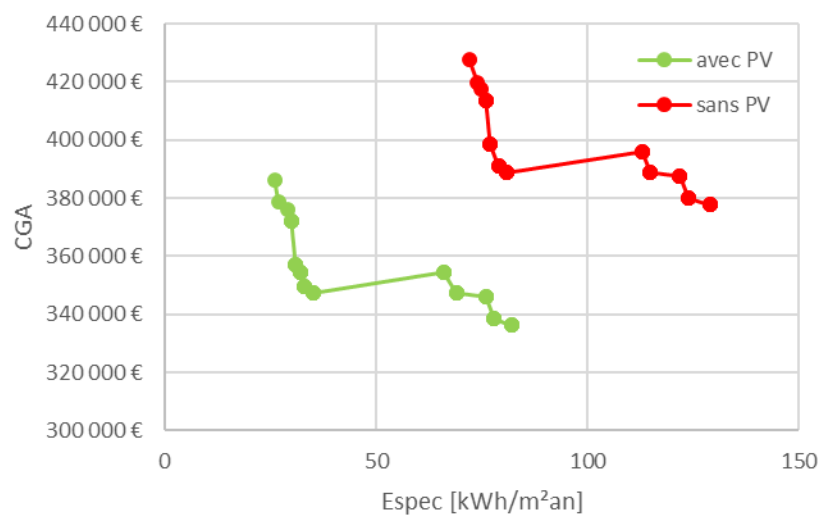
### Opt PV QZEN

L'optimum SRLT avec panneaux solaires photovoltaïques est le même cas que l'optimum avec panneaux solaires photovoltaïques.





Comparaison des Fronts de Pareto avec sans installation photovoltaïque :

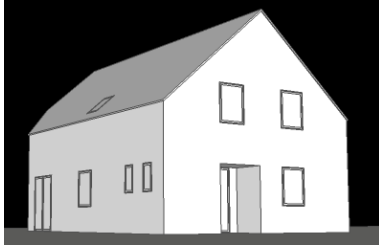


Avec l'installation de 3.75 kWc sur cette habitation, l'ensemble du front de Pareto se déplace vers la gauche pour l'amélioration du Espec de 46 kWh/m².an et vers le bas de 41.398 € de CGA macroéconomique de moins.



## 6.2. HN1 T2 - Maison neuve 4 façades crépi sur isolant

### 6.2.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque : 285.972 €
- Ach = 166 m<sup>2</sup>
- Vp = 559 m<sup>3</sup>

Base			
	K	31	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]
BNC [kWh/an]	10584	Fenêtres	1.43
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	63.86	Portes	2
Ew	45	Murs	0.24
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	80	Toits	0.24
CGA macro [€]	369 290 €	Sols	0.24
Combinaison n°	69720		

- Etanchéité à l'air caractérisée par un v50 = 2 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>.
- Ventilation à la demande : Alimentation naturelle, Evacuation mécanique, Facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air eau.
- 6m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

### 6.2.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	122

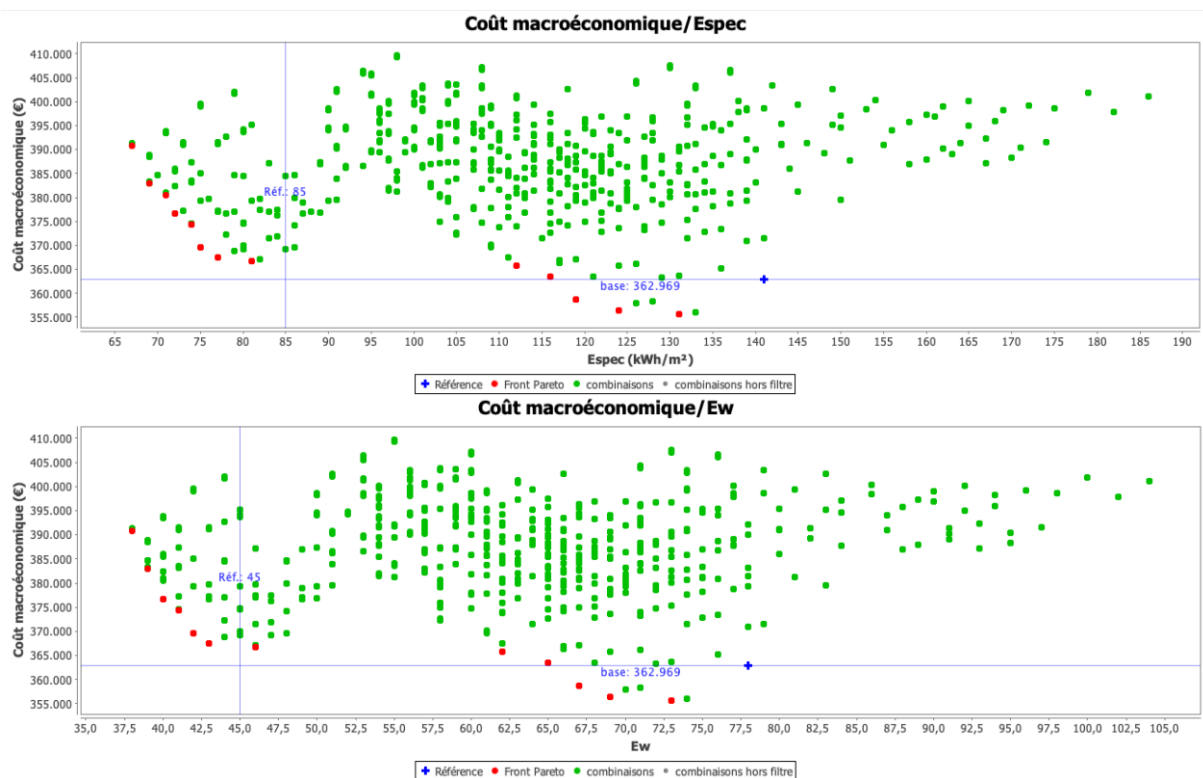
### 6.2.3. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub>/K et U parois

Optimum				
	K	30	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	10941	Fenêtres	1.43	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	66.01	Portes	2	P1 - PVC
Ew	46	Murs	0.24	M3
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	81	Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	366 670 €	Sols	0.24	S2, S3

**Investissement [€]** 292 585 €  
**Combinaison n°** 69579

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



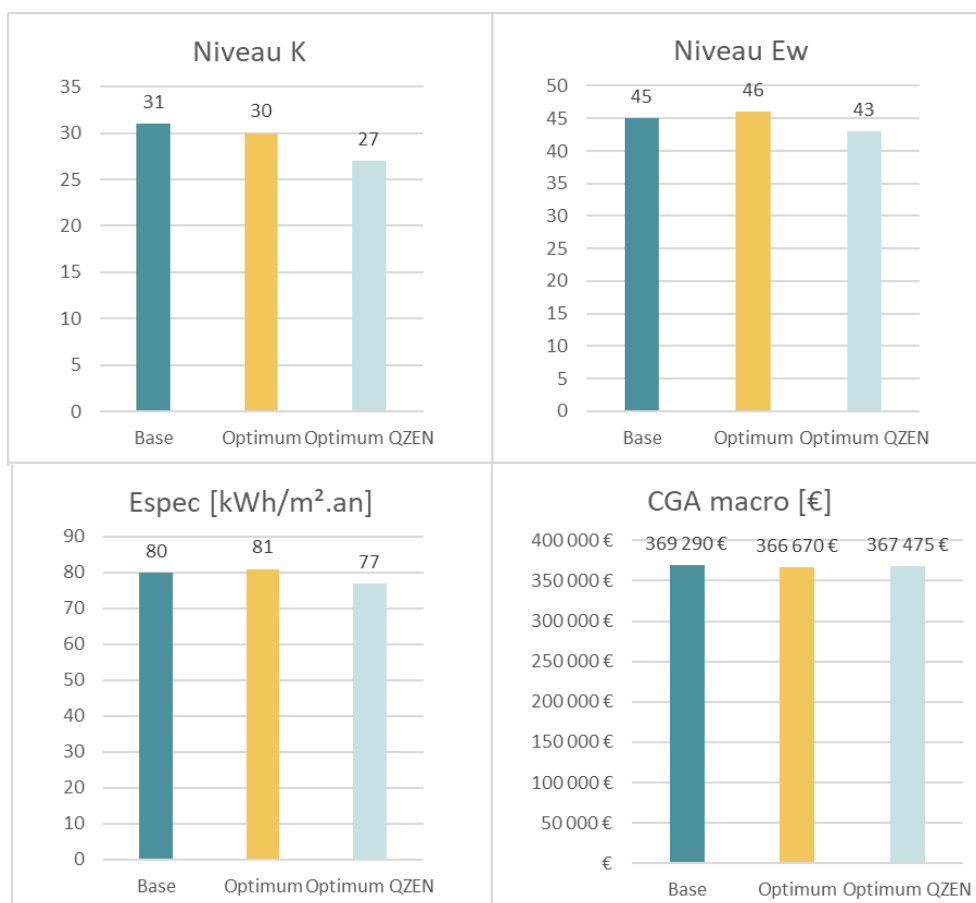
À la lecture du graphique, il apparaît que l'optimum (Espec 132) correspond à un cas où les systèmes de production de chauffage et d'ECS restent alimentés par du mazout. Comme expliqué au point 2.2.4, la politique mise en place en Wallonie concernant l'interdiction progressive de l'installation de chaudières au mazout, dans le neuf puis l'existant, implique que ces solutions ne peuvent être considérées comme viables à un horizon de 30 ans. Par conséquent, les auteurs de l'étude ont sélectionné la 1<sup>ère</sup> combinaison, sur le Front de Pareto, qui proposait un remplacement du vecteur énergétique pour la production de chauffage et d'ECS (Espec 81).

Optimum QZEN				
<b>K</b>	27	<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	10433	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1

<b>BNC [kWh/m².an]</b>	62.95	Portes	2	P1 - PVC
<b>Ew</b>	43	Murs	0.2	M3
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	77	Toits	0.2	T3
<b>CGA macro [€]</b>	367 475 €	Sols	0.2	S2, S3
<b>Investissement [€]</b>	297 432 €			
<b>Combinaison n°</b>	69607			

#### Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Nous constatons que le cost-optimum est quasi similaire en termes de performance énergétique et de cout global actualisé que le cost-optimum Qzen (respectant les exigences énergétiques des habitations neuves).

Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 0,22 % supérieur au cost-optimum « absolu », tout en permettant une réduction substantielle de la consommation d'énergie (-6 % du niveau Ew et - 5 % du niveau Espec). Pour cette typologie, donc, l'exigence en énergie primaire appliquée aux habitations neuves est quasi cost-optimum.

Nous constatons que les valeurs U des parois de l'enveloppe du cost-optimum Qzen sont légèrement plus performantes (fenêtres, murs et planchers).

### 6.3. HN1 T3 - Maison neuve 4 façades ossature bois

#### 6.3.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque : 332.096 €
- $A_{ch} = 166 \text{ m}^2$
- $V_p = 559 \text{ m}^3$

Base			
	K		Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	9948	Fenêtres	1.36
BNC [kWh/m².an]	60.02	Portes	2
Ew	45	Murs	0.2
Espec [kWh/m².an]	80	Toits	0.2
CGA macro [€]	421 318 €	Sols	0.2
Combinaison n°	69378		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

#### 6.3.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	90

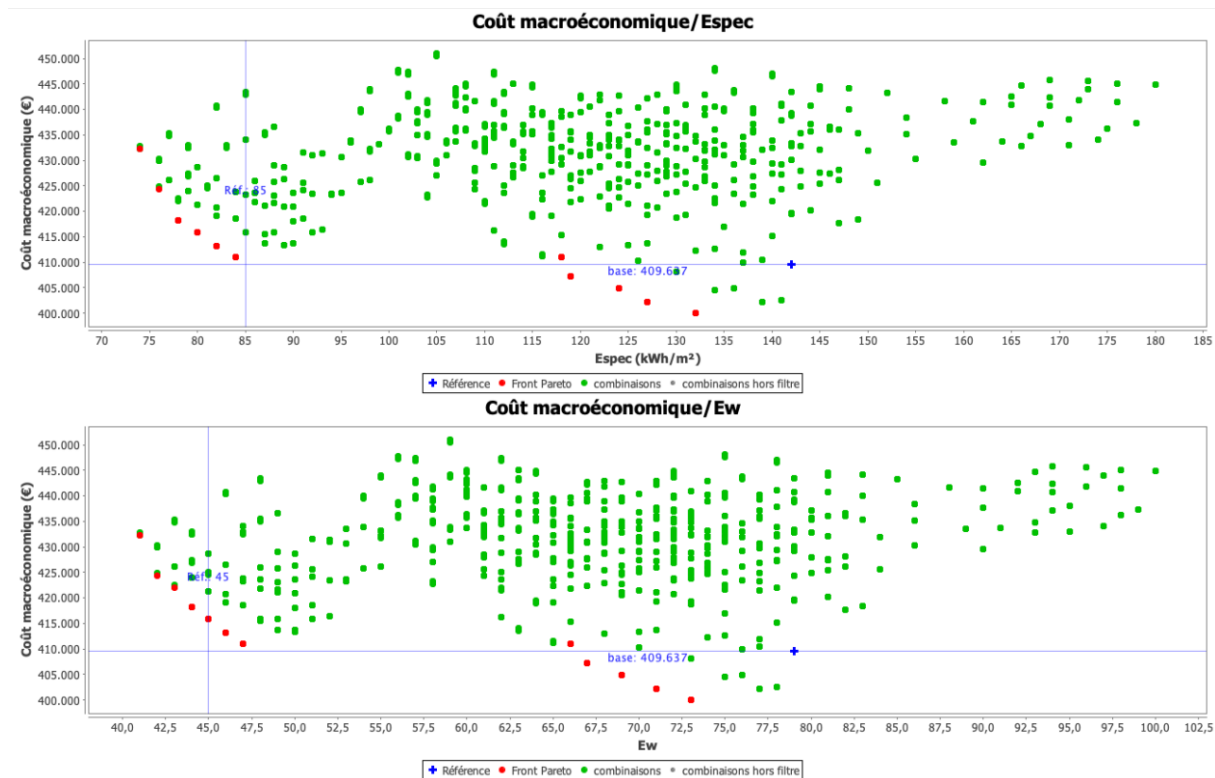
#### 6.3.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

Optimum				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	10599	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	63.95	Portes	2	P1 - PVC
Ew	47	Murs	0.2	M4

<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	84	Toits	0.2	T3
<b>CGA macro [€]</b>	411 102 €	Sols	0.2	S2, S3
<b>Investissement [€]</b>	337 864 €			
<b>Combinaison n°</b>	69145			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

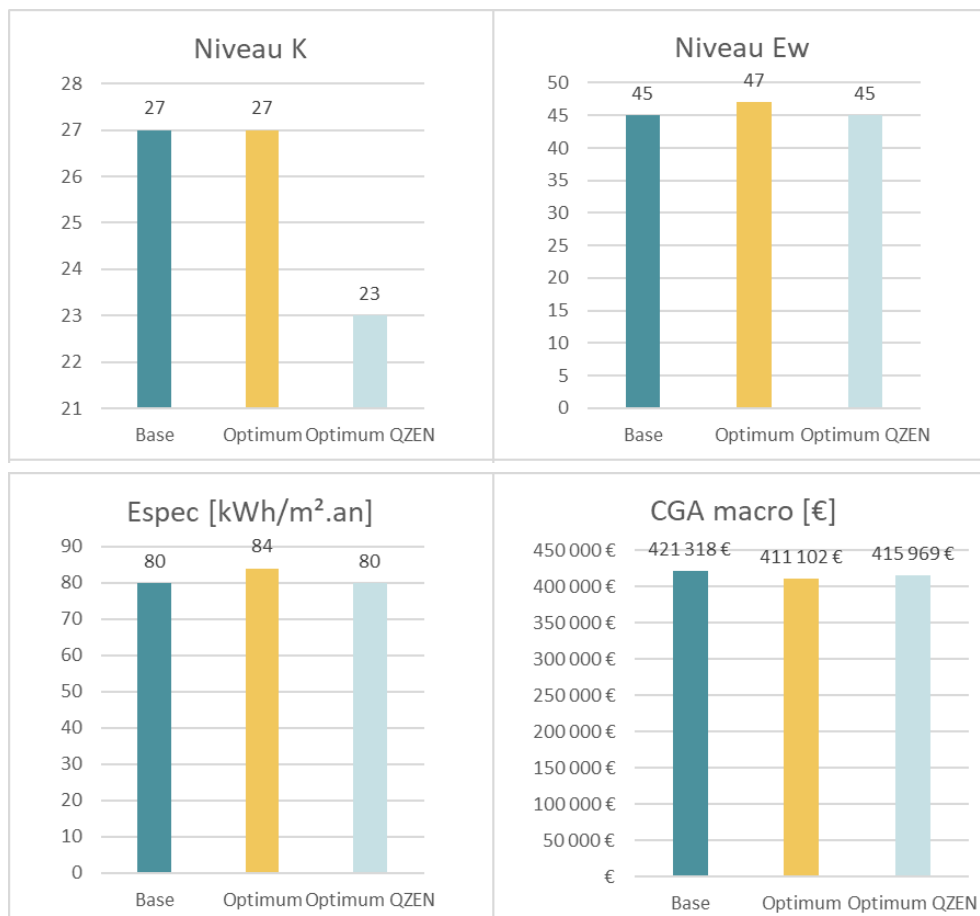


À la lecture du graphique, il apparaît que l'optimum (Espec 132) correspond à un cas où les systèmes de production de chauffage et d'ECS restent alimentés par du mazout. Comme expliqué au point 2.2.4, la politique mise en place en Wallonie concernant l'interdiction progressive de l'installation de chaudières au mazout, dans le neuf puis l'existant, implique que ces solutions ne peuvent être considérées comme viables à un horizon de 30 ans. Par conséquent, les auteurs de l'étude ont sélectionné la 1<sup>ère</sup> combinaison, sur le Front de Pareto, qui proposait un remplacement du vecteur énergétique pour la production de chauffage et d'ECS (Espec 84).

Optimum QZEN					
	K	23		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	9428		Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	56.88		Portes	2	P1 - PVC
Ew	45		Murs	0.15	M4
Espec [kWh/m².an]	80		Toits	0.15	T3
CGA macro [€]	415 969 €		Sols	0.15	S2, S3
Investissement [€]	346 451 €				
Combinaison n°	69173				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Nous constatons que le cost-optimum est quasi similaire en termes de performance énergétique et de cout global actualisé que le cost-optimum Qzen (respectant les exigences énergétiques des habitations neuves).

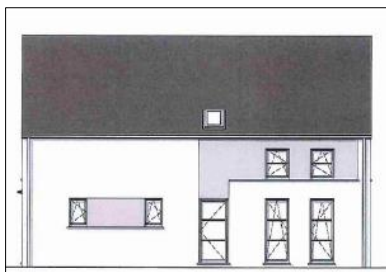
Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 1,17 % supérieur au cost-optimum « absolu », tout en permettant une réduction substantielle de la consommation d'énergie (-4 % du niveau Ew et - 5 % du niveau Espec). Pour cette typologie, donc, l'exigence en énergie primaire appliquée aux habitations neuves est quasi cost-optimum.

Nous constatons que les valeurs U des parois de l'enveloppe du cost-optimum Qzen sont légèrement plus performantes (murs, toitures et planchers).



## 6.4. HN2 T1 - Maison neuve 4 façades avec cave maçonnerie traditionnelle

### 6.4.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur caves
- Valeur intrinsèque: 331.869 €
- $A_{ch} = 181 \text{ m}^2$
- $V_p = 531 \text{ m}^3$

Base			
	K		Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	6515	Fenêtres	1.43
BNC [kWh/m².an]	36.08	Portes	1.69
Ew	45	Murs	0.24
Espec [kWh/m².an]	82	Toits	0.2
CGA macro [€]	430 853 €	Sols	0.24
Combinaison n°	68843		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation mécanique, double flux (amenées et extractions) avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air- eau.

### 6.4.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	27393
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	134

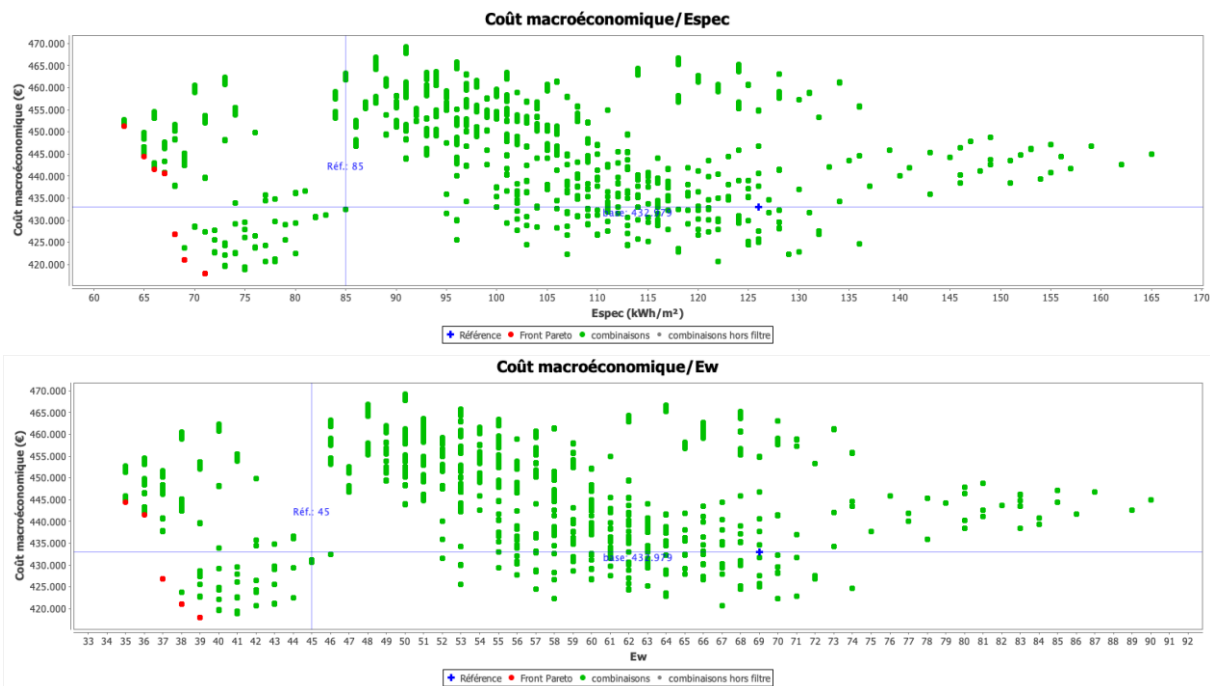
### 6.4.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ /K et U parois

Optimum				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	10669	Fenêtres	1.37	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	59.09	Portes	1.69	P1-Bois,P3-PVC

<b>Ew</b>	39	Murs	0.2	M9, M12, M16
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	71	Toits	0.2	T3, S12
<b>CGA macro [€]</b>	417 864 €	Sols	0.2	S1, S4
<b>Investissement [€]</b>	349 497 €			
<b>Combinaison n°</b>	68683			

Caractéristiques techniques :

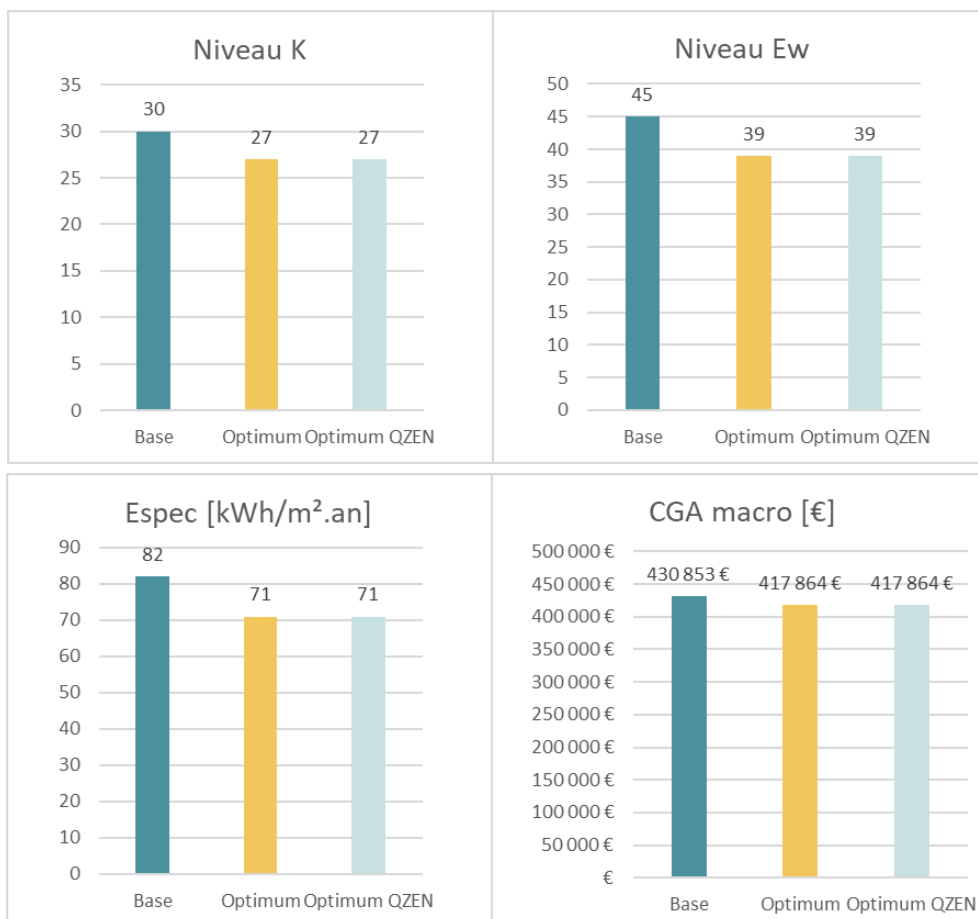
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



### Optimum QZEN

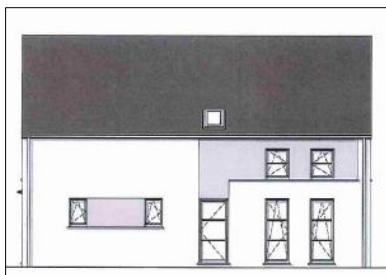
La combinaison cost-optimum QZEN est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » respecte les exigences énergétiques des habitations neuves (Qzen).



## 6.5. HN2 T2 - Maison neuve 4 façades avec cave crépi sur isolant

### 6.5.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur caves
- Valeur intrinsèque: 308.638 €
- $A_{ch} = 181 \text{ m}^2$
- $V_p = 531 \text{ m}^3$

Base			
	K	30	Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	6515	Fenêtres	1.43
BNC [kWh/m².an]	36.08	Portes	1.69
Ew	45	Murs	0.24
Espec [kWh/m².an]	82	Toits	0.2
CGA macro [€]	407 386 €	Sols	0.24
Combinaison n°	69305		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation mécanique double flux (amenées et extractions) avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.

### 6.5.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	27393
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	166

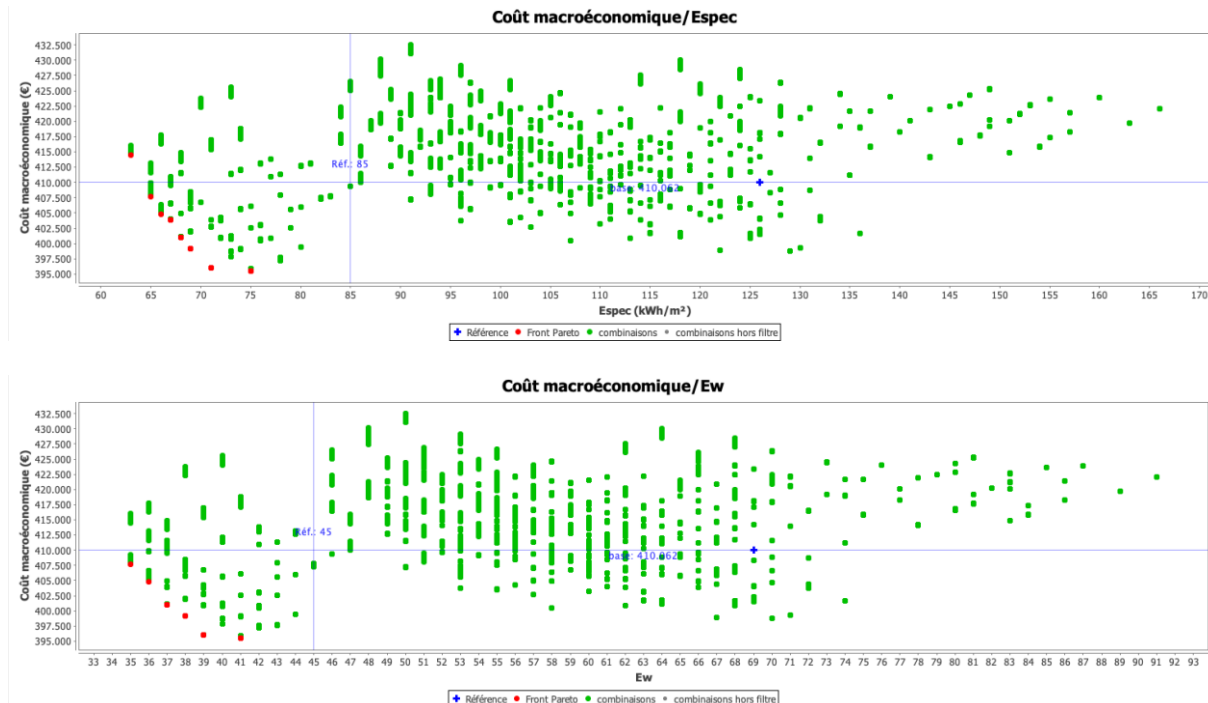
### 6.5.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

Optimum				
	K	30	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	11295	Fenêtres	1.43	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	62.56	Portes	1.69	P1-Bois, P3-PVC
Ew	41	Murs	0.24	M3, M12, M16

<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	75	Toits	0.2	T3, S11
<b>CGA macro [€]</b>	395 458 €	Sols	0.24	S1, S4
<b>Investissement [€]</b>	323 002 €			
<b>Combinaison n°</b>	69117			

Caractéristiques techniques :

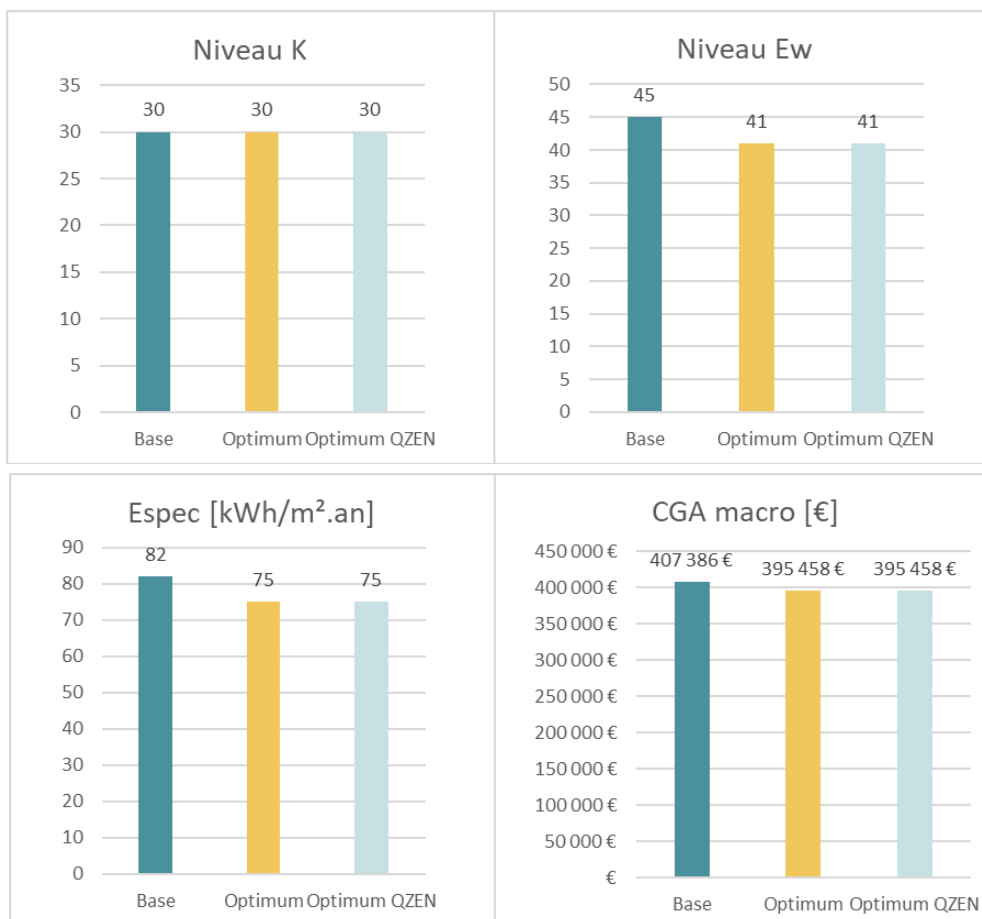
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



### Optimum QZEN

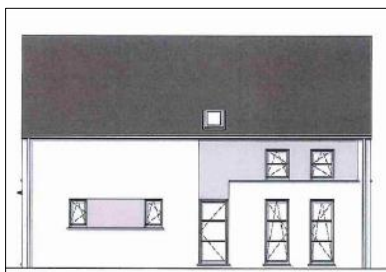
La combinaison cost-optimum QZEN est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » respecte les exigences énergétiques des habitations neuves (Qzen).



## 6.6. HN2 T3 - Maison neuve 4 façades avec cave ossature bois

### 6.6.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple

- 4 façades
- REZ+1 mansardé + combles non aménagés, sur caves
- Valeur intrinsèque: 358.418 €
- Ach = 181 m<sup>2</sup>
- Vp = 531 m<sup>3</sup>

Base			
	K		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]
BNC [kWh/an]	6655	Fenêtres	1.43
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	36.86	Portes	2
Ew	45	Murs	0.24
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	82	Toits	0.2
CGA macro [€]	464 948 €	Sols	0.24
Combinaison n°	69331		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un v50 = 2 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>.
- Ventilation mécanique double flux (amenées et extractions) avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.

### 6.6.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	27393
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	102

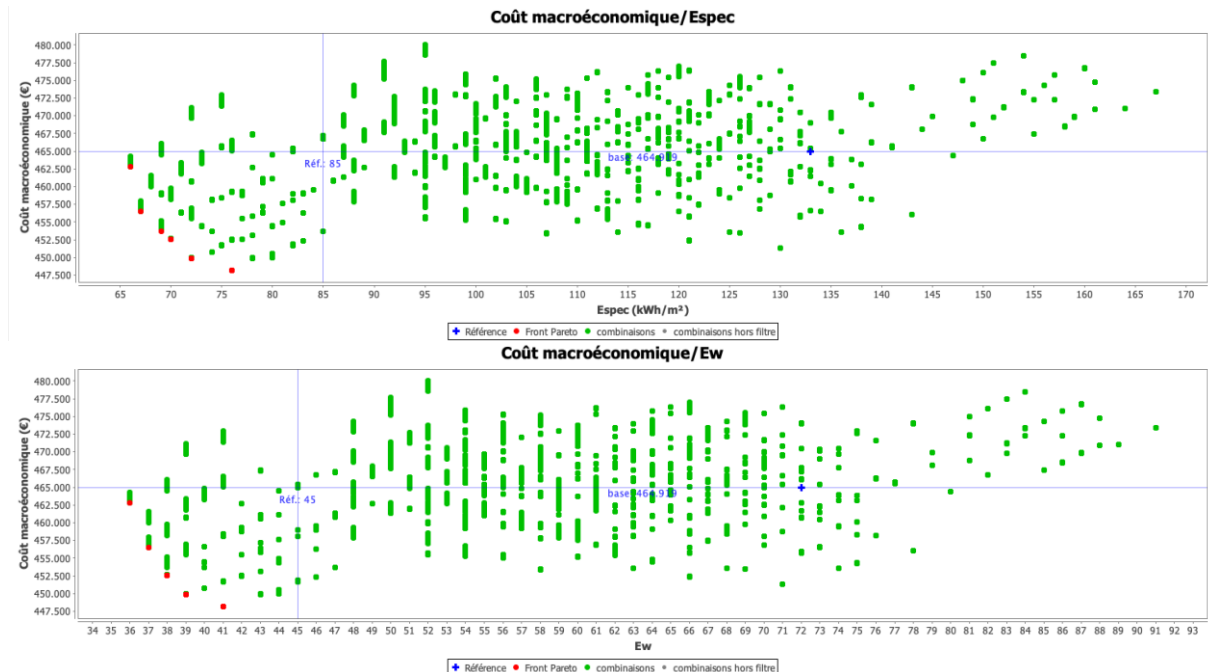
### 6.6.3. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub> / E<sub>spec</sub>/K et U parois

Optimum				
	K		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	10812	Fenêtres	1.37	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	59.88	Portes	2	P1-Bois, P3-PVC
Ew	41	Murs	0.2	M4, M12, M16

<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	76	Toits	0.2	T3, S12
<b>CGA macro [€]</b>	448 128€	Sols	0.2	S1, S4
<b>Investissement [€]</b>	374 818 €			
<b>Combinaison n°</b>	69145			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

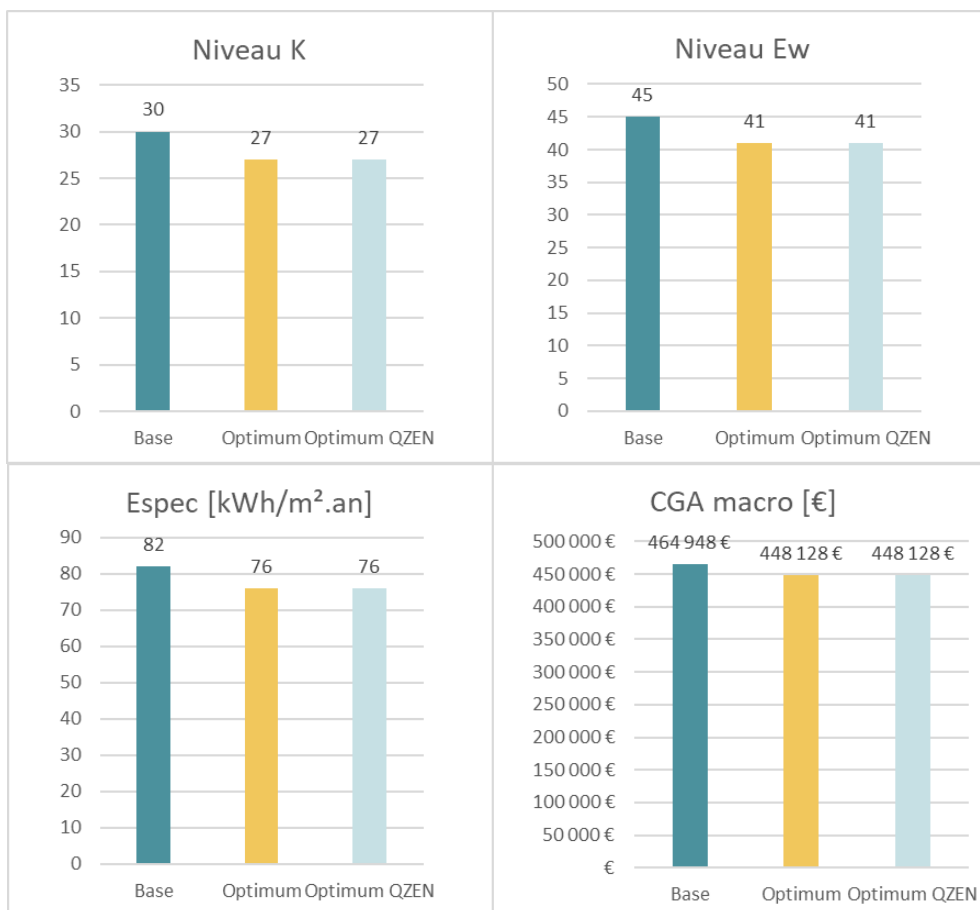


### Optimum QZEN

La combinaison cost-optimum QZEN est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » respecte les exigences énergétiques des habitations neuves (Qzen).





## 6.7. HN3 T1- Maison neuve 3 façades maçonnerie traditionnelle

### 6.7.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple et compacte

- 3 façades
- REZ+1 + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque: 271.371 €
- $A_{ch} = 140 \text{ m}^2$
- $V_p = 403 \text{ m}^3$

Base			
	K	24	Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	3364	Fenêtres	1.36
BNC [kWh/m².an]	24.03	Portes	2
Ew	45	Murs	0.2
Espec [kWh/m².an]	80	Toits	0.2
CGA macro [€]	353 211 €	Sols	0.2
Combinaison n°	71599		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation mécanique : alimentation et évacuation mécanique, double flux avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

### 6.7.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	26

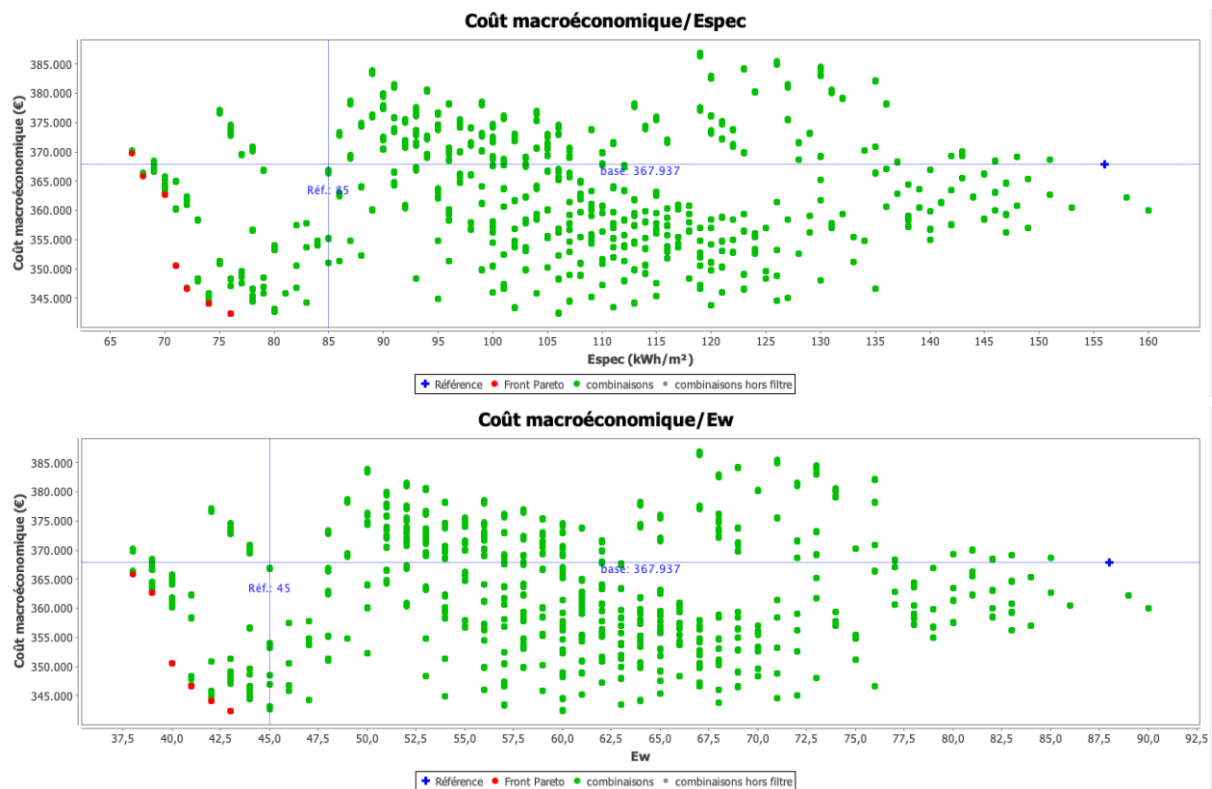
### 6.7.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

Optimum				
	K	24	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	7411	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	52.94	Portes	2	P1 - PVC
Ew	43	Murs	0.2	M8, M9

<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	76	Toits	0.2	S12
<b>CGA macro [€]</b>	342 299 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	282 881 €			
<b>Combinaison n°</b>	71388			

Caractéristiques techniques :

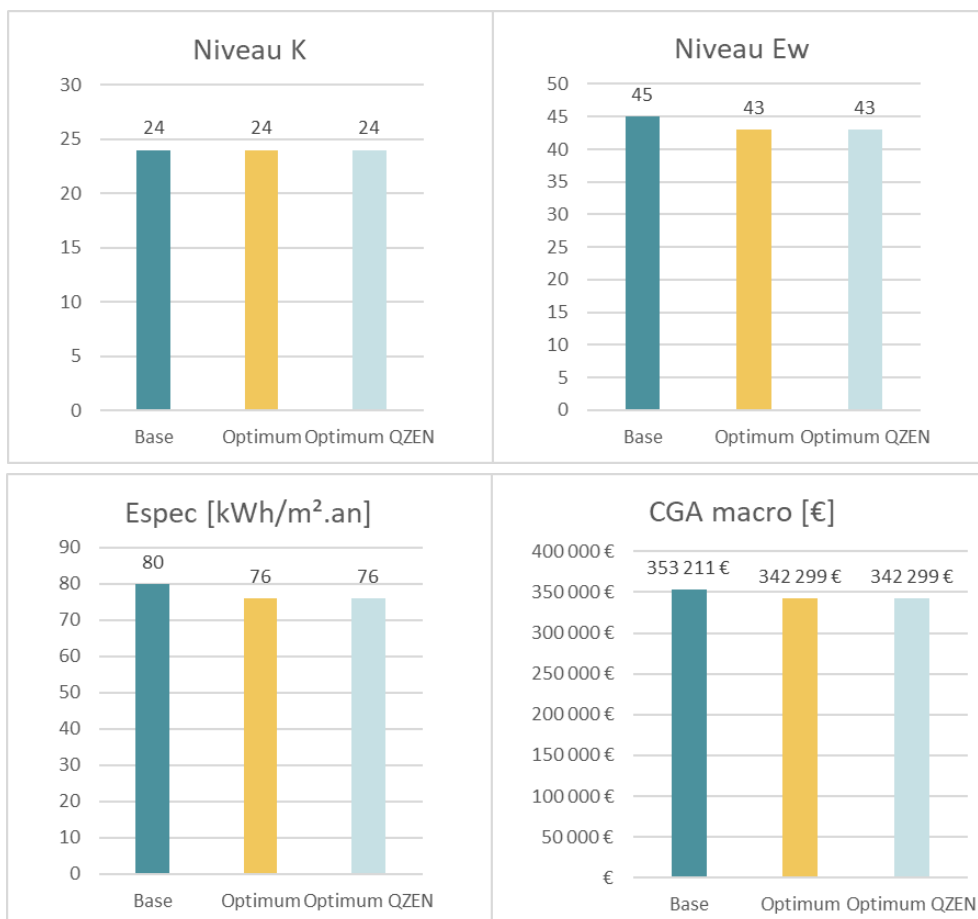
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



### Optimum QZEN

La combinaison cost-optimum QZEN est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » est inférieur aux exigences énergétiques des habitations neuves (Qzen).



## 6.8. HN3 T2- Maison neuve 3 façades crépi sur isolant

### 6.8.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple et compacte

- 3 façades
- REZ+1 + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque : 252.375 €
- $A_{ch} = 140 \text{ m}^2$
- $V_p = 403 \text{ m}^3$

Base			
	K	20	Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	2622	Fenêtres	1.36
BNC [kWh/m².an]	18.73	Portes	2
Ew	45	Murs	0.15
Espec [kWh/m².an]	79	Toits	0.15
CGA macro [€]	337 991 €	Sols	0.15
Combinaison n°	71218		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation mécanique, alimentation et extraction mécaniques, double flux avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

### 6.8.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	48

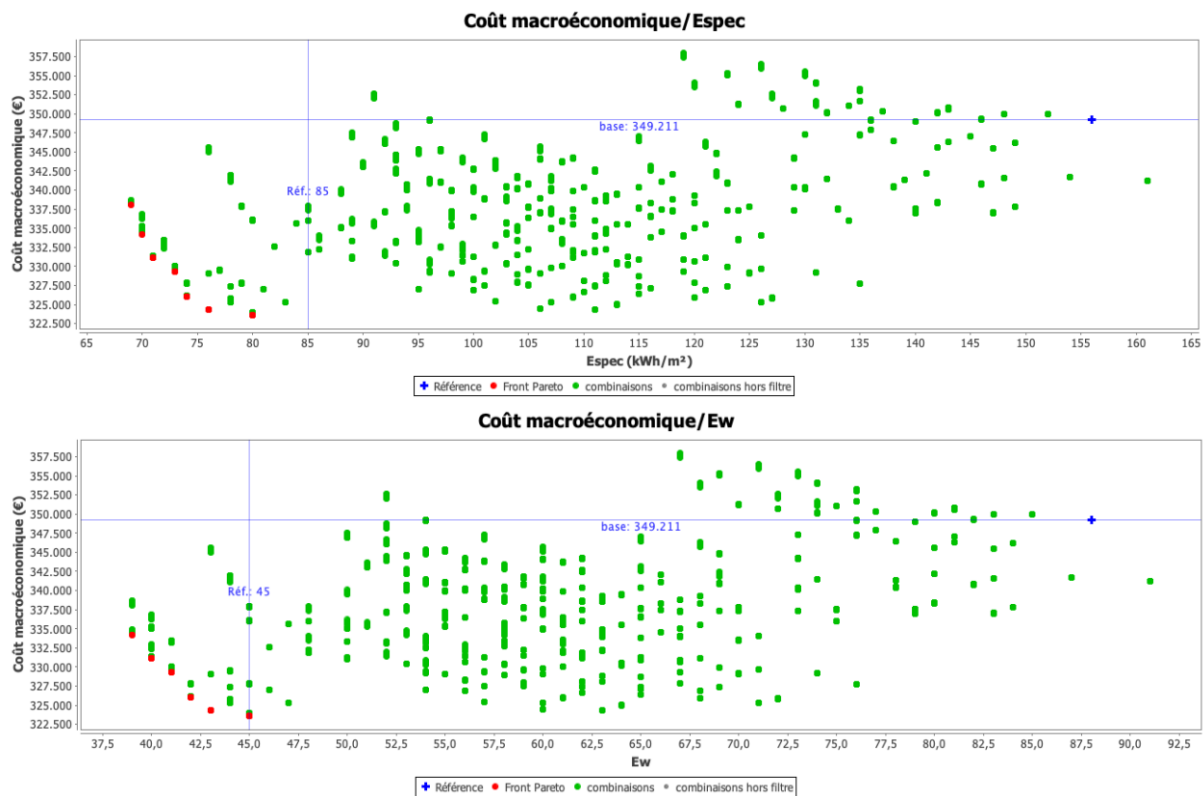
### 6.8.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

Optimum				
	K	27	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	7795	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	55.68	Portes	2	P1 - PVC

<b>Ew</b>	45	Murs	0.24	M3-M8
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	80	Toits	0.2	S12
<b>CGA macro [€]</b>	323 562 €	Sols	0.24	S3
<b>Investissement [€]</b>	261 544 €			
<b>Combinaison n°</b>	70932			

Caractéristiques techniques :

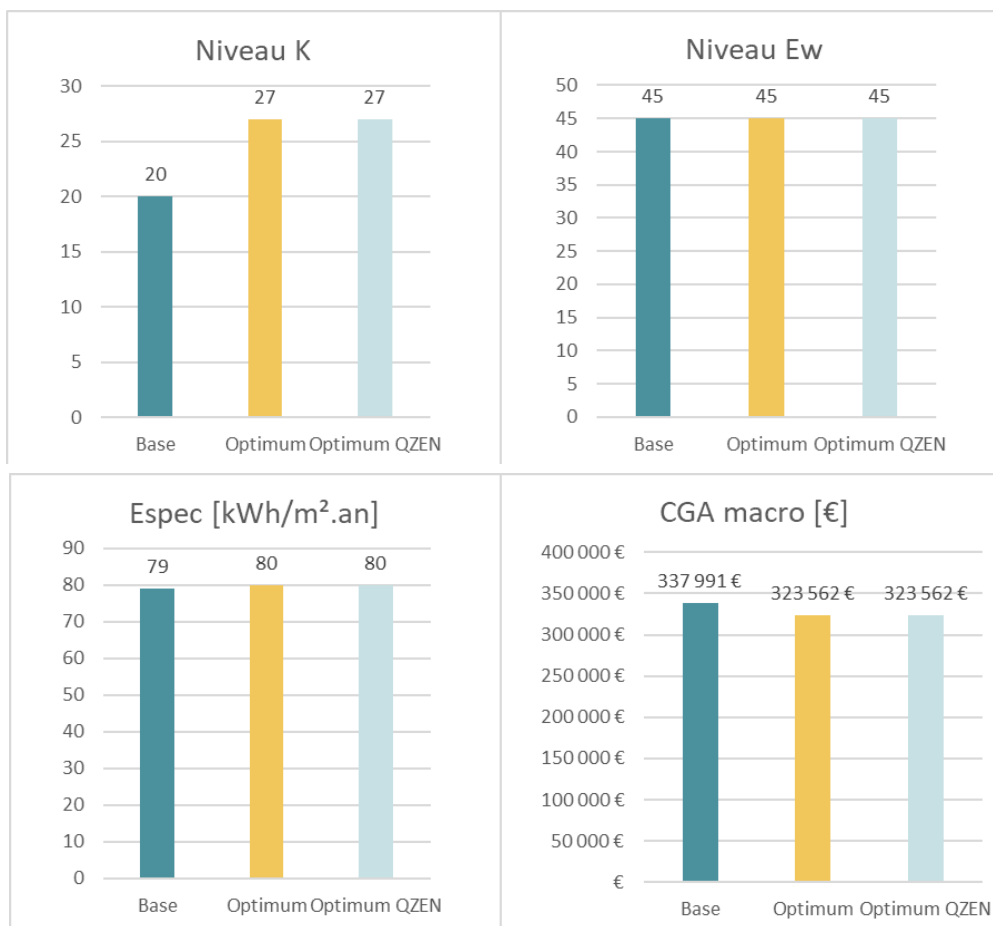
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



### Optimum QZEN

La combinaison cost-optimum QZEN est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » est inférieur aux exigences énergétiques des habitations neuves (Qzen).



## 6.9. HN3 T3 - Maison neuve 3 façades ossature bois

### 6.9.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie assez simple et compacte

- 3 façades
- REZ+1 + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque : 293.080 €
- $A_{ch} = 140 \text{ m}^2$
- $V_p = 403 \text{ m}^3$

Base			
	K	17	Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	2151	Fenêtres	0.85
BNC [kWh/m².an]	15.36	Portes	0.8
Ew	45	Murs	0.15
Espec [kWh/m².an]	79	Toits	0.15
CGA macro [€]	380 116 €	Sols	0.15
Combinaison n°	7728		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation mécanique, alimentation et extraction mécaniques, double flux avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.

### 6.9.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	40

### 6.9.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

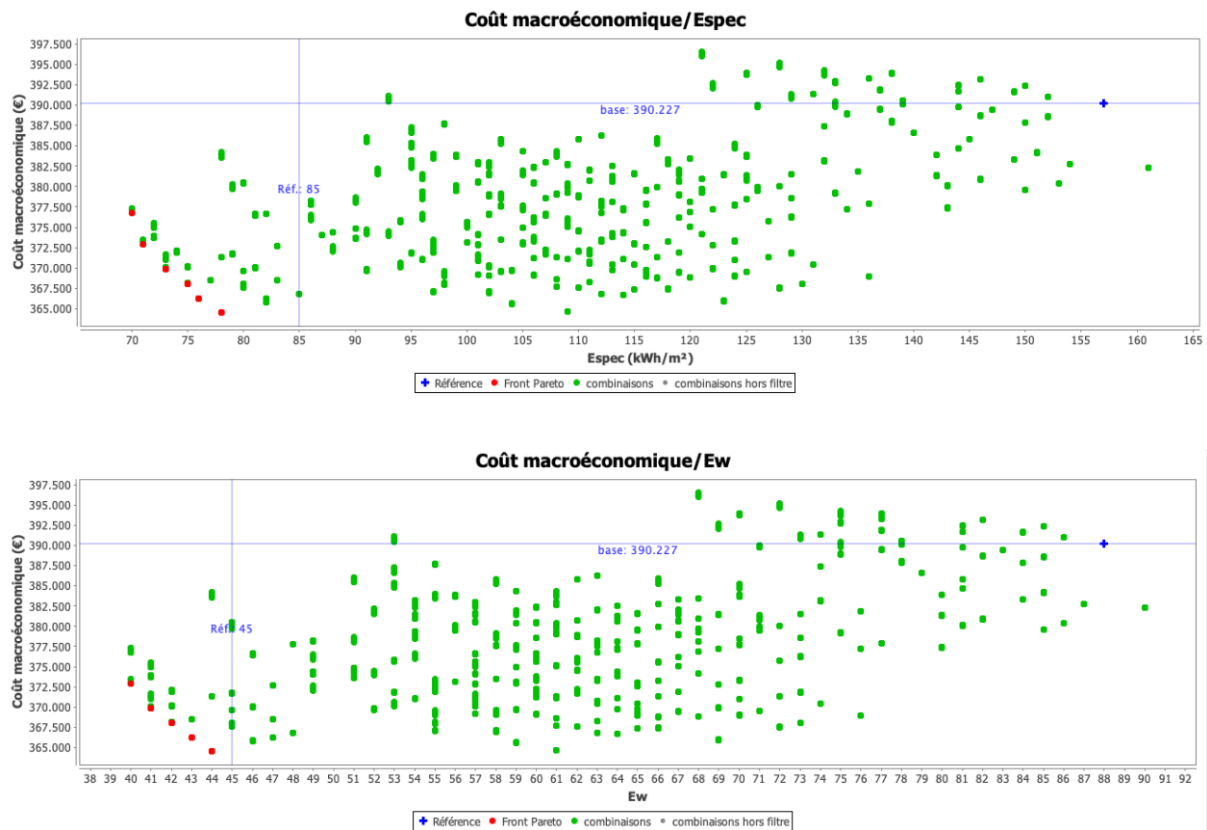
Optimum				
	K	24	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	7532	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	53.80	Portes	2	P1 - PVC
Ew	44	Murs	0.2	M4, M7



<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	78	Toits	0.2	S12
<b>CGA macro [€]</b>	364 505 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	303 791 €			
<b>Combinaison n°</b>	71422			

Caractéristiques techniques :

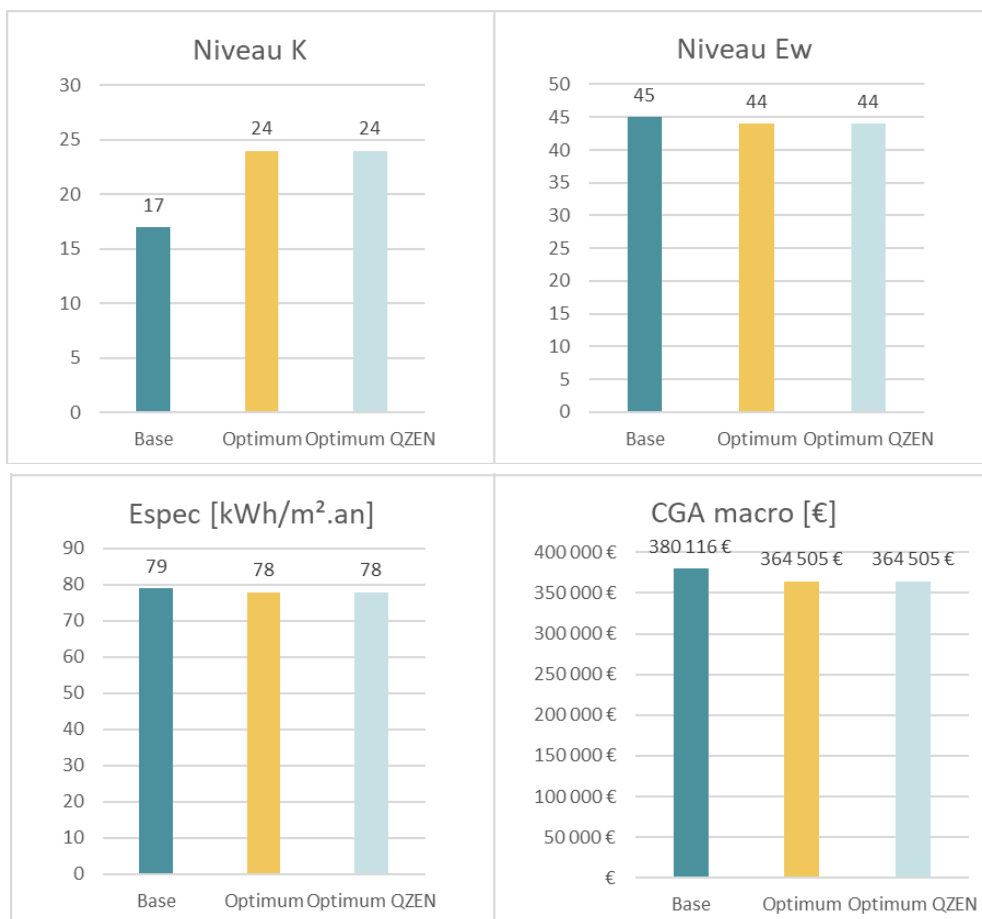
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



### Optimum QZEN

La combinaison cost-optimum QZEN est le cost-optimum.

Le cost-optimum « absolu » est inférieur aux exigences énergétiques des habitations neuves (Qzen).



## 6.10. HN4 T1 - Maison mitoyenne neuve maçonnerie traditionnelle

### 6.10.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie simple et compacte

- 2 façades
- REZ+1 + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque : 272.129 €
- $A_{ch} = 144 \text{ m}^2$
- $V_p = 415 \text{ m}^3$

Base			
	K		Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	27	Fenêtres	1.36
BNC [kWh/m².an]	6889	Portes	2
Ew	47.84	Murs	0.2
Espec [kWh/m².an]	45	Toits	0.2
CGA macro [€]	75	Sols	0.2
Combinaison n°	350 241 €		
	71631		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : Alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

### 6.10.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	22

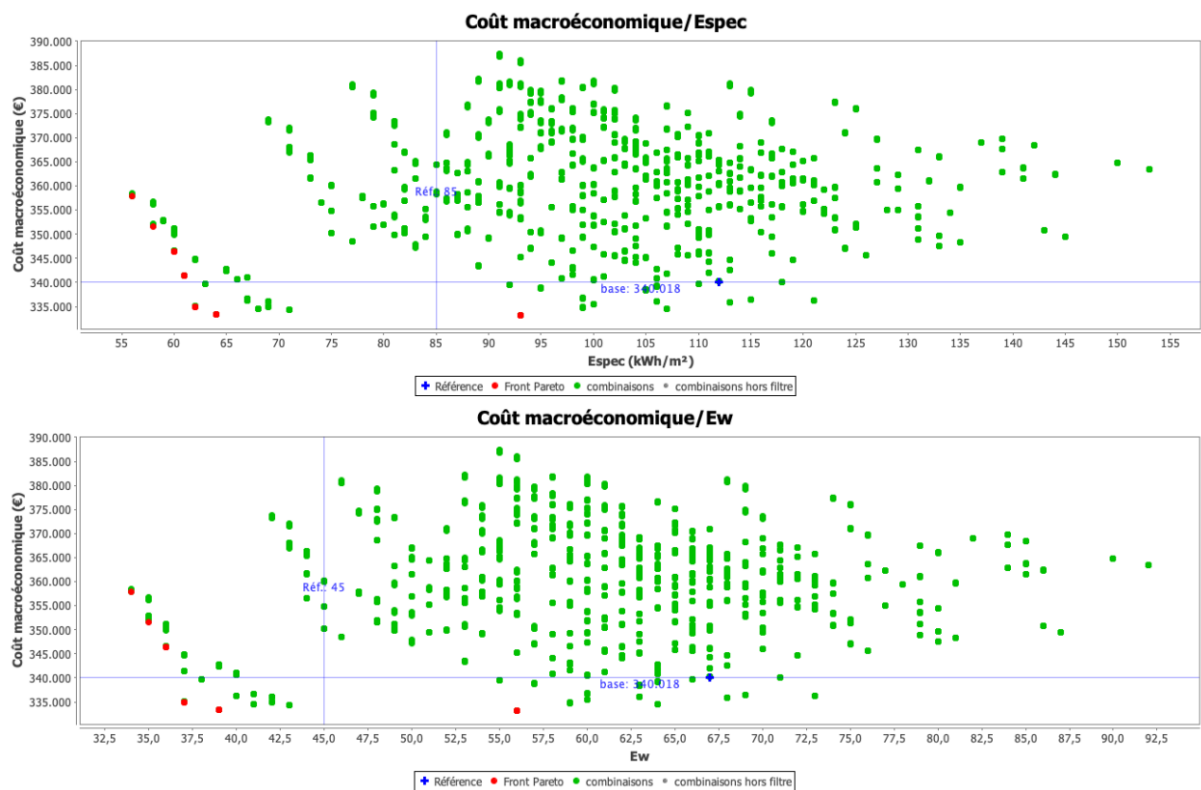
### 6.10.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

Optimum				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	27	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	7438	Portes	2	P1 - PVC
Ew	51.65	Murs	0.2	M8, M9
Espec [kWh/m².an]	56	Toits	0.2	S12
	93			

<b>CGA macro [€]</b>	333 107 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	276 839 €			
<b>Combinaison n°</b>	71417			

Caractéristiques techniques :

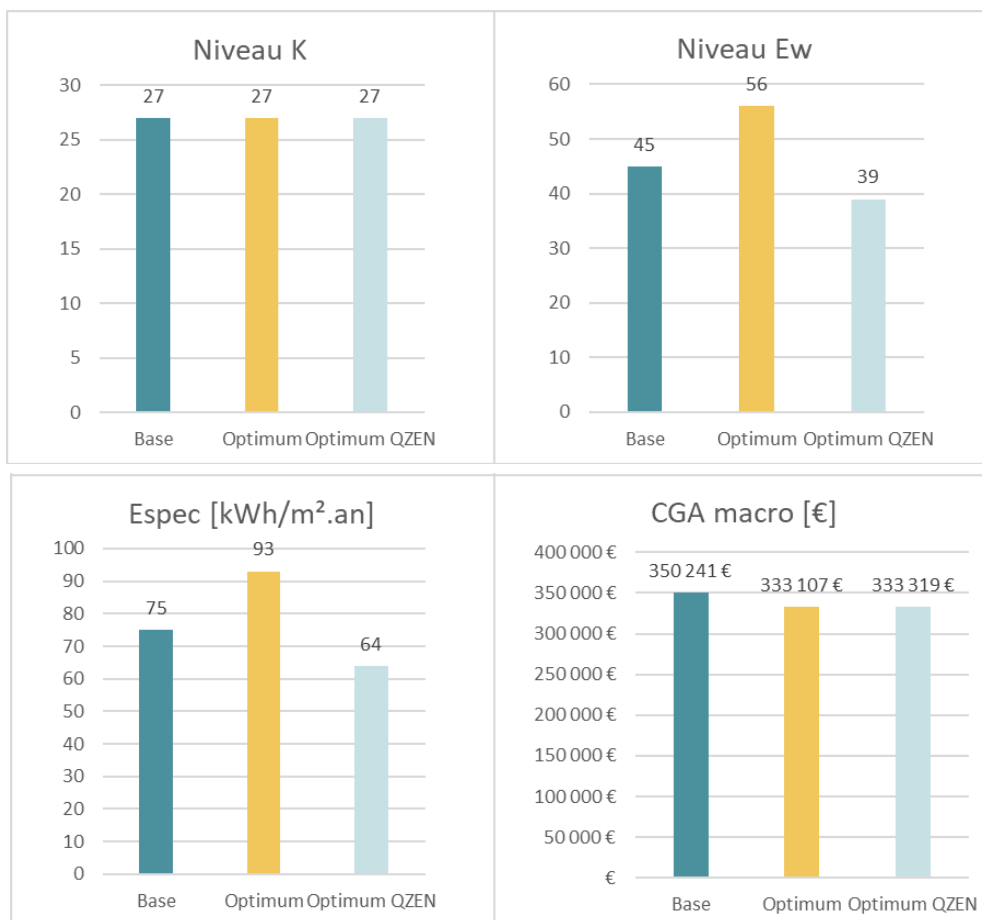
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



<b>Optimum QZEN</b>				
<b>K</b>	27	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	7438	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	51.65	Portes	2	P1 - PVC
<b>Ew</b>	39	Murs	0.2	M8-M9
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	64	Toits	0.2	S12
<b>CGA macro [€]</b>	333 319 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	283 691 €			
<b>Combinaison n°</b>	71421			

### Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Nous constatons que le cost-optimum est quasi similaire en termes de cout global actualisé au cost-optimum Qzen. Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 0,06 % supérieur au cost-optimum « absolu ».

La différence de performance énergétique entre la combinaison cost-optimum « absolu » et cost-optimum Qzen est par contre importante : environ 30 % de diminution du niveau Ew et – 21 % du niveau Espec.

Pour un investissement supplémentaire de 2%, l'économie en énergie est de 30%.

Cette différence est expliquée par la mise en œuvre d'un système de production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire nettement plus performant dans la combinaison cost-optimum Qzen (PAC air-eau mixte).

## 6.11. HN4 T2 – Maison mitoyenne neuve crépi sur isolant

### 6.11.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie simple et compacte

- 2 façades
- REZ+1 + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque: 253.080 €
- $A_{ch} = 144 \text{ m}^2$
- $V_p = 415 \text{ m}^3$

Base			
	K		Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	6889	Fenêtres	1.36
BNC [kWh/m².an]	47.84	Portes	2
Ew	45	Murs	0.2
Espec [kWh/m².an]	75	Toits	0.2
CGA macro [€]	335 854 €	Sols	0.2
Combinaison n°	71631		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

### 6.11.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	39

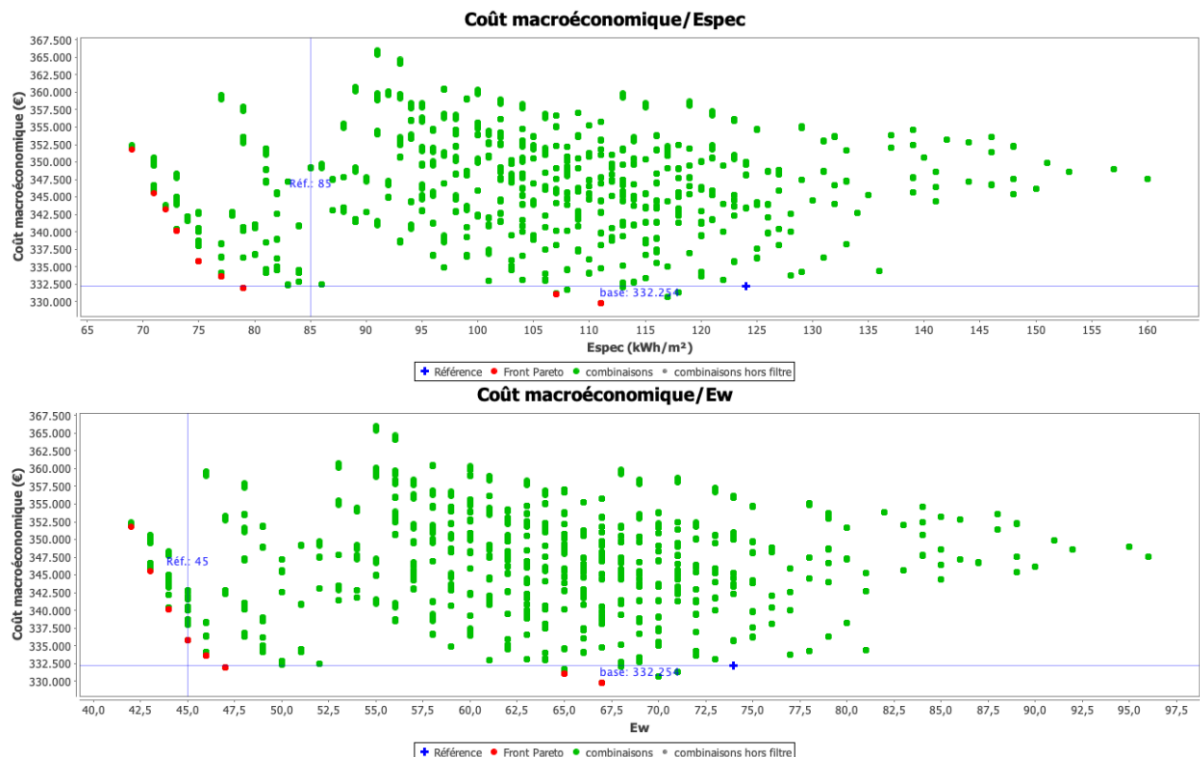
### 6.11.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ / K et U parois

Optimum				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	7438	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	51.65	Portes	2	P1 - PVC
Ew	67	Murs	0.2	M3, M8

<b>Espec [kWh/m².an]</b>	111	Toits	0.2	S12
<b>CGA macro [€]</b>	329 748 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	258 445 €			
<b>Combinaison n°</b>	71341			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière gaz avec un stockage.

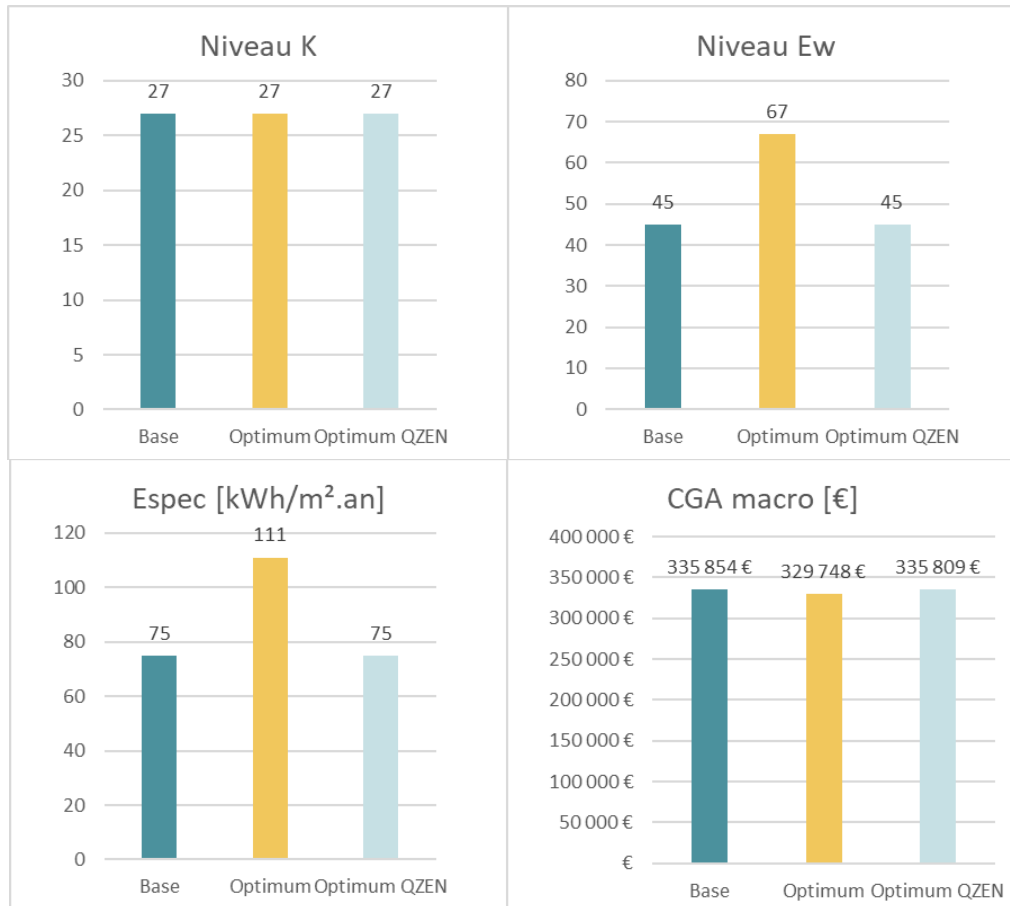


<b>Optimum QZEN</b>				
<b>K</b>	27		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	6889	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	47.84	Portes	2	P1 - PVC
<b>Ew</b>	45	Murs	0.2	M3, M8
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	75	Toits	0.2	S12
<b>CGA macro [€]</b>	335 809 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	278 574 €			
<b>Combinaison n°</b>	71631			



## Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Nous constatons que le cost-optimum est quasi similaire en termes de cout global actualisé au cost-optimum Qzen. Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 1,8 % supérieur au cost-optimum « absolu ».

La différence de performance énergétique entre la combinaison cost-optimum « absolu » et cost-optimum Qzen est importante : environ 33 % de diminution du niveau Ew.

Pour un investissement supplémentaire de 7%, l'économie en énergie est de l'ordre de 33 % et – 32 % du niveau Espec.

Cette différence est expliquée par la mise en œuvre d'un système de production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire nettement plus performant dans la combinaison cost-optimum Qzen (PAC air-eau

mixte). De plus, un système de ventilation plus performant (Système C+ (amenées naturelles, extractions mécaniques, avec régulation), facteur de réduction 0.9) est présent dans la combinaison cost-optimum Qzen.

## 6.12. HN4 T3 – Maison mitoyenne neuve ossature bois

### 6.12.1. Bâtiment de référence



#### Volumétrie simple et compacte

- 2 façades
- REZ+1 + combles non aménagés, sur vide ventilé
- Valeur intrinsèque: 293.899 €
- $A_{ch} = 144 \text{ m}^2$
- $V_p = 415 \text{ m}^3$

Base			
<b>K</b>	23	<b>Umoy [W/m².K]</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	6349	Fenêtres	1.36
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	44.09	Portes	2
<b>Ew</b>	45	Murs	0.15
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	75	Toits	0.15
<b>CGA macro [€]</b>	376 633 €	Sols	0.15
<b>Combinaison n°</b>	72141		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

### 6.12.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	3425
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	27

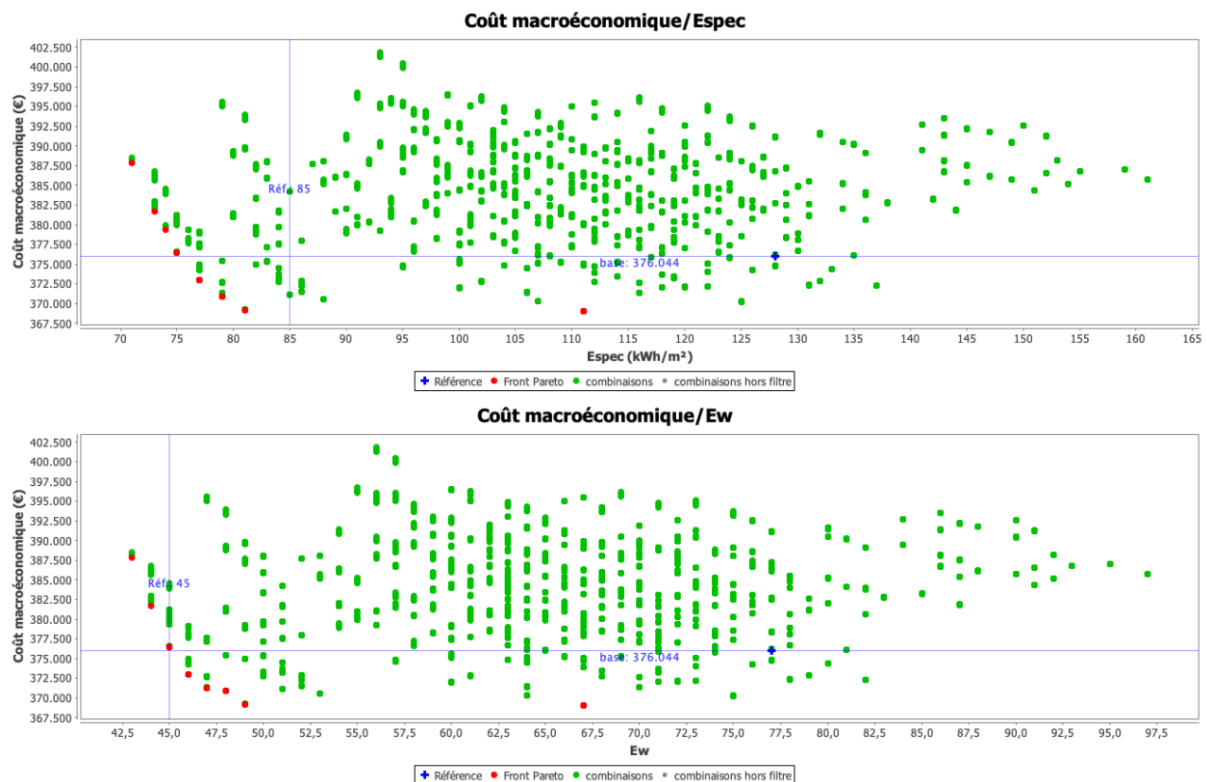
### 6.12.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w / E_{spec}/K$ et U parois

Optimum				
<b>K</b>	27	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	7576	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	52.61	Portes	2	P1 - PVC
<b>Ew</b>	67	Murs	0.2	M4, M7
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	111	Toits	0.2	S12

<b>CGA macro [€]</b>	368 994 €	Sols	0.2	S3
<b>Investissement [€]</b>	298 003 €			
<b>Combinaison n°</b>	71879			

Caractéristiques techniques :

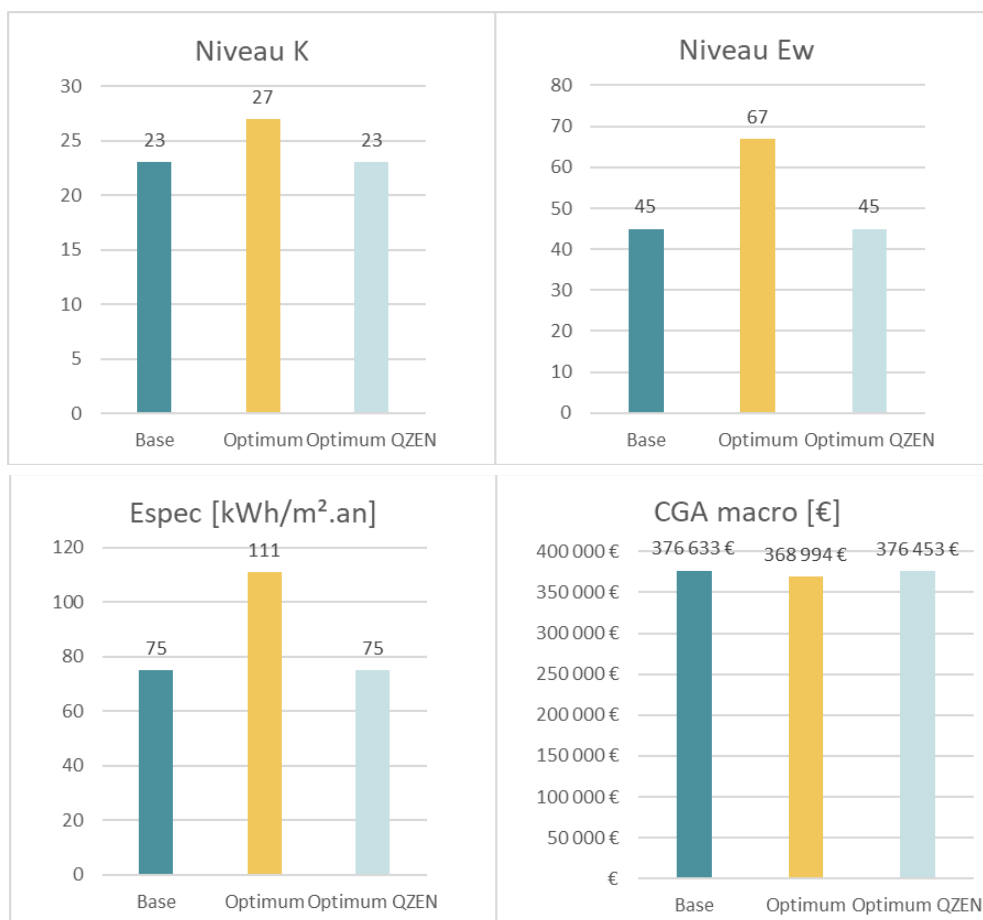
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Alimentation naturelle, évacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- $6 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



<b>Optimum QZEN</b>				
<b>K</b>	23	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	6349	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	44.09	Portes	2	P1 - PVC
<b>Ew</b>	45	Murs	0.15	M4, M7
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	75	Toits	0.15	S12
<b>CGA macro [€]</b>	376 453 €	Sols	0.15	S3
<b>Investissement [€]</b>	319 884 €			
<b>Combinaison n°</b>	72141			

## Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS).
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau.
- 6 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Nous constatons que le cost-optimum est quasi similaire en termes de cout global actualisé au cost-optimum Qzen. Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 1,98 % supérieur au cost-optimum « absolu ».

La différence de performance énergétique entre la combinaison cost-optimum « absolu » et cost-optimum Qzen est importante : environ 33 % de diminution du niveau Ew.

Pour un investissement supplémentaire de 7%, l'économie en énergie est de l'ordre de 33 % et – 32 % du niveau Espec.

Cette différence est générée par la mise en œuvre d'un système de production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire nettement plus performant dans la combinaison cost-optimum Qzen (PAC air-eau mixte). De plus, un système de ventilation plus performant (Système C+ (amenées naturelles, extractions mécaniques, avec régulation), facteur de réduction 0.9) est présent dans la combinaison cost-optimum Qzen.

### 6.13. Analyse transversale des résultats des habitations unifamiliales neuves

Voir annexe E

## 7. Analyse des résultats des immeubles à appartements existants

### 7.1. IAE1 - Immeuble à appartements d'avant 1919

#### 7.1.1. Bâtiment de référence



#### 5 niveaux = 10 appartements

- Bâtiment en partie mitoyen
- Garage et chaufferie au rez-de-chaussée
- Murs pleins en briques, double vitrage
- Chauffage central collectif au mazout
- Eau chaude sanitaire sur la chaudière, échangeur externe, boucle ECS
- Valeur intrinsèque : 709.351 €
- Ach = 912 m<sup>2</sup>
- Vp = 3.475 m<sup>3</sup>

#### 7.1.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	12831
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	11

#### 7.1.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>144</b>	- €	<b>1 661 025.00 €</b>	<b>1 373 616.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	301418 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>2.97</b>	<b>1.43</b>	<b>128</b>	<b>161 397.00 €</b>	<b>1 702 549.00 €</b>	<b>1 465 145.00 €</b>
<b>Murs</b>	301410 M0.15(ME0.15,Meanc0.15) (M1,M14)					
	<b>2.12</b>	<b>0.15</b>	<b>75</b>	<b>166 770.00 €</b>	<b>1 288 304.00 €</b>	<b>1 157 250.00 €</b>
<b>Toitures</b>	301407 Toit(TP0.24) (T3)					
	<b>2.00527041</b>	<b>0.24</b>	<b>118</b>	<b>63 717.00 €</b>	<b>1 484 480.00 €</b>	<b>1 253 450.00 €</b>
<b>Sols</b>	301413 Pl0.2(PlE0.20,Plcave0.20,Plcanc0.20) (S1,S2,S5)					
	<b>0.81</b>	<b>0.2</b>	<b>138</b>	<b>10 209.00 €</b>	<b>1 623 586.00 €</b>	<b>1 348 318.00 €</b>

7.1.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et U parois

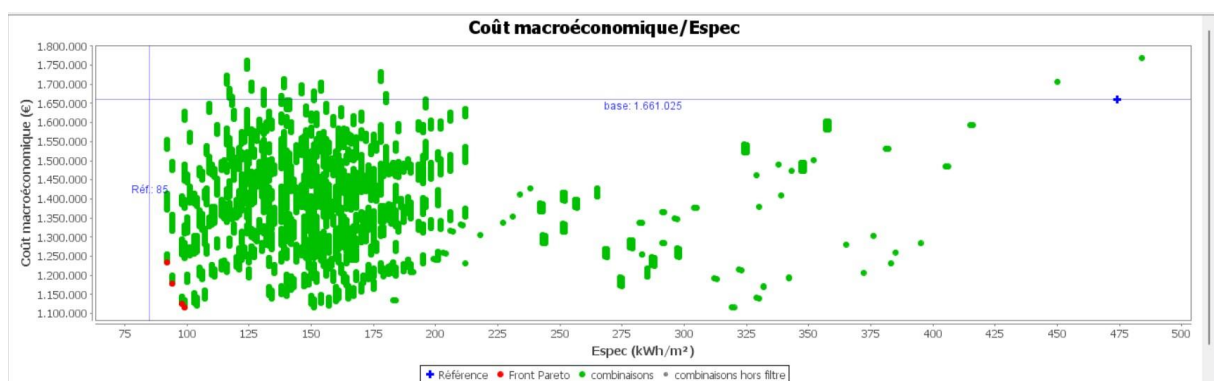
Base				
K	144	Umoy [W/m².K]		
BNC [kWh/an]	198422	Fenêtres	2.97	
BNC [kWh/m².an]	217.62	Portes	4	
Ew	314	Murs	2.12	
Espec [kWh/m².an]	474	Toits	2.01	
CGA macro [€]	1 661 025 €	Sols	0.81	

Optimum				
K	26	Umoy [W/m².K]		Groupe
BNC [kWh/an]	48579	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	53.28	Portes	2	P2
Ew	67	Murs	0.2	M1, M14
Espec [kWh/m².an]	99	Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	1 115 471 €	Sols	0.24	S1, S2, S5
Investissement [€]	652 344 €			
Combinaison n°	301489			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- 20 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



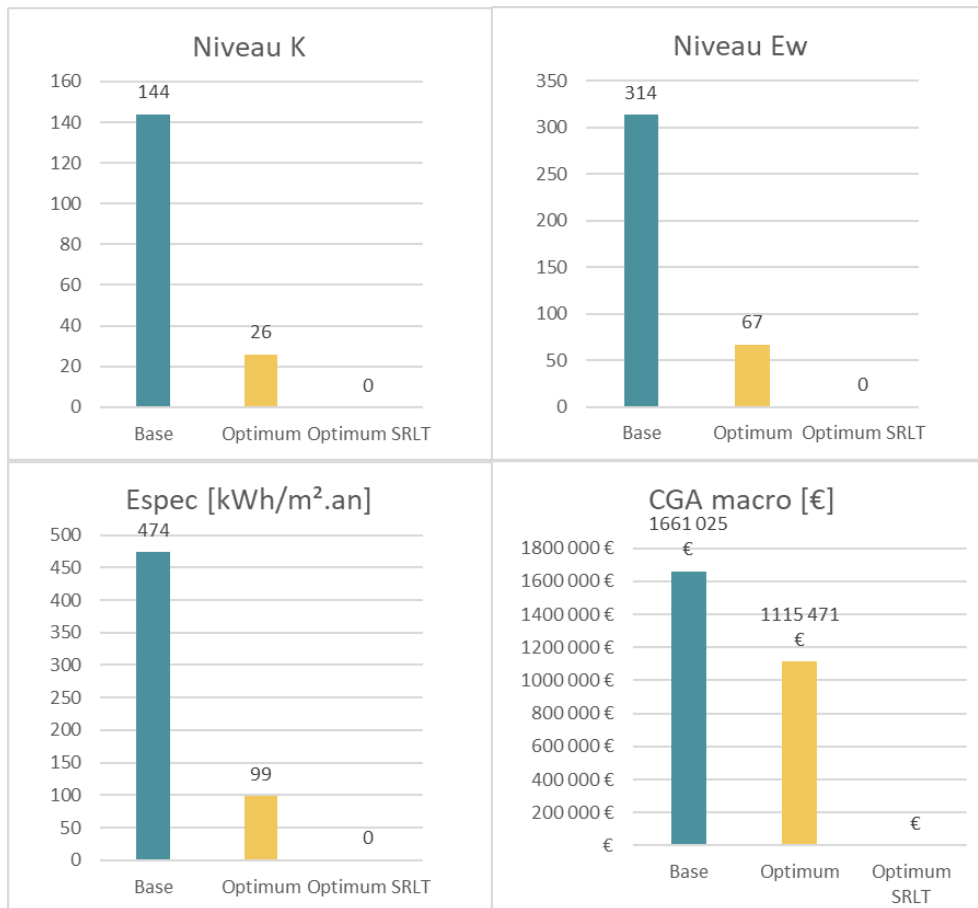
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois déperdition.



La chaudière mazout collective existante est remplacée par une PAC air-eau collective, avec ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 20m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

### Optimum SRLT

Ce cas ne présente pas de combinaisons respectant l'objectif de la SRLT sur le front de Pareto (FP).



#### 7.1.5. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ avec une installation photovoltaïque

Opt PV				
	K	26	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	48579		Fenêtres	F1
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	53.28		Portes	P2
Ew	44		Murs	M1, M14
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	65		Toits	T3
CGA macro [€]	982 935 €		Sols	S1, S2, S5
Investissement [€]	708 408 €			
Combinaison n°	302593			

Caractéristiques techniques :

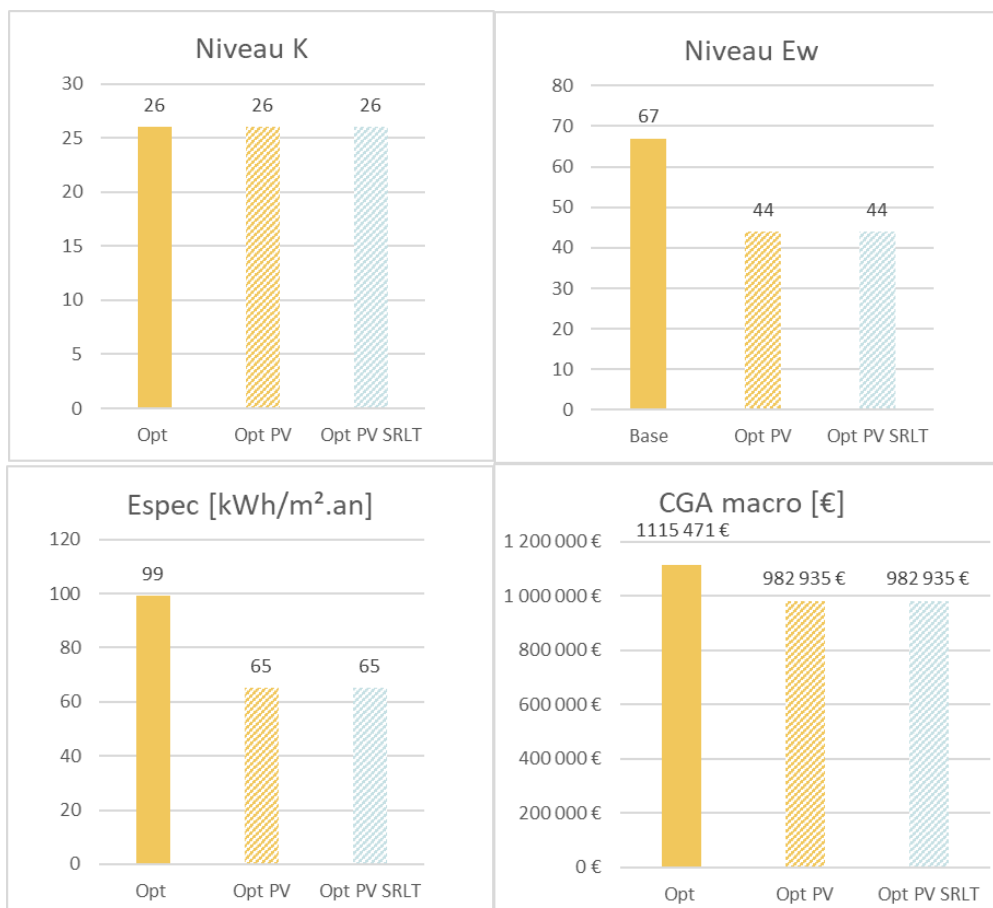
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- 20 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 15 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.

<b>Opt PV SRLT</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	48579	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	53.28	Portes	2	P2-P
<b>Ew</b>	44	Murs	0.2	M1, M14
<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	65	Toits	0.2	T3
<b>CGA macro [€]</b>	982 935 €	Sols	0.24	S1, S2, S5
<b>Investissement [€]</b>	708 408 €			
<b>Combinaison n°</b>	302593			

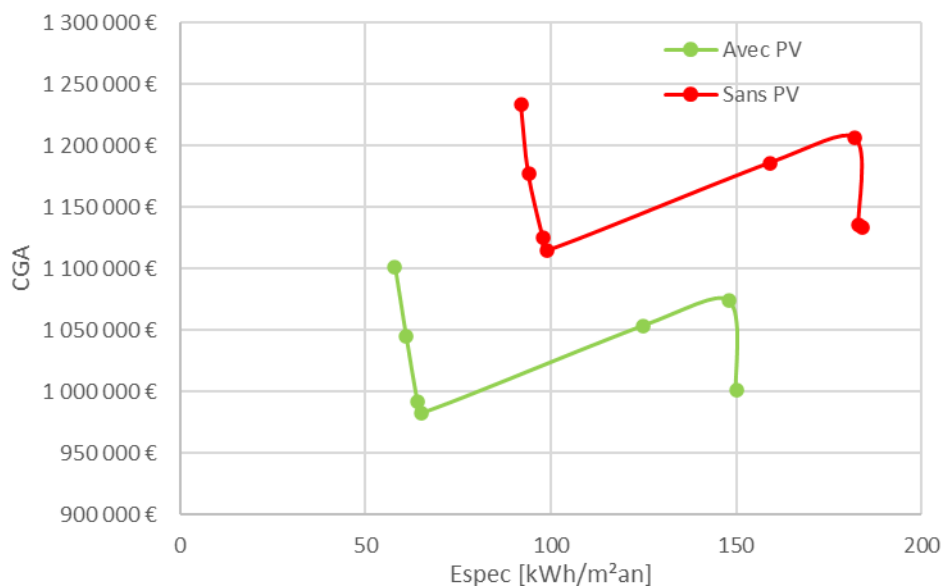
Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- 20 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 15 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.

Aucun cas ne permet d'atteindre l'objectif en énergie primaire de la stratégie rénovation. Ce cas a été étudié avec 15 kWc d'installation photovoltaïques. Une combinaison cost-optimum stratégie rénovation est obtenue, présentant un CGA macroéconomique de 11,4% inférieur à celui du cost optimum « absolu », pour un Espec de 65 kWh/m<sup>2</sup>.an.



Comparaison des Fronts de Pareto avec sans installation photovoltaïque :



Avec l'installation de 15 kWc sur cet immeuble, l'ensemble du front de Pareto se déplace vers la gauche pour l'amélioration du Espec de 34 kWh/m².an et vers le bas de 132.536 € de CGA macroéconomique de moins.

## 7.2. IAE2 - Maison divisée en appartements (< 1919)

### 7.2.1. Bâtiment de référence



#### 4 niveaux = 3 appartements :

- rez-de-chaussée : un appartement
- 1er étage : un appartement
- 2e et 3e étages : duplex
- Bâtiment en partie mitoyen
- 3 volumes adjacents (bâtiment principal + annexes)
- Murs pleins en briques, double vitrage
- Chauffage central individuel : chaudière gaz à condensation dans chaque appartement
- Eau chaude sanitaire via la chaudière, production instantanée
- Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque: 266.719 €
- Ach = 345 m<sup>2</sup>
- Vp = 1.370 m<sup>3</sup>

### 7.2.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	43113
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	6

### 7.2.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>151</b>	- €	<b>702 582.00 €</b>	<b>714 749.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	301705 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>2.97</b>	<b>1.43</b>	<b>141</b>	<b>46 874.00 €</b>	<b>724 254.00 €</b>	<b>738 215.00 €</b>
<b>Murs</b>	301707 M0.15(ME0.15,Meanc0.15) (M1,M14)					
	<b>2</b>	<b>0.15</b>	<b>78</b>	<b>89 770.00 €</b>	<b>541 993.00 €</b>	<b>556 280.00 €</b>
<b>Toitures</b>	301702 Toit(T0.20) (T2)					
	<b>1.95018576</b>	<b>0.2</b>	<b>115</b>	<b>41 410.00 €</b>	<b>609 602.00 €</b>	<b>621 293.00 €</b>
<b>Sols</b>	301711 Pl0.2(PlSol0.20,Plcave0.20) (S1,S4)					
	<b>0.77</b>	<b>0.2</b>	<b>142</b>	<b>29 579.00 €</b>	<b>702 671.00 €</b>	<b>715 986.00 €</b>

7.2.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et U parois

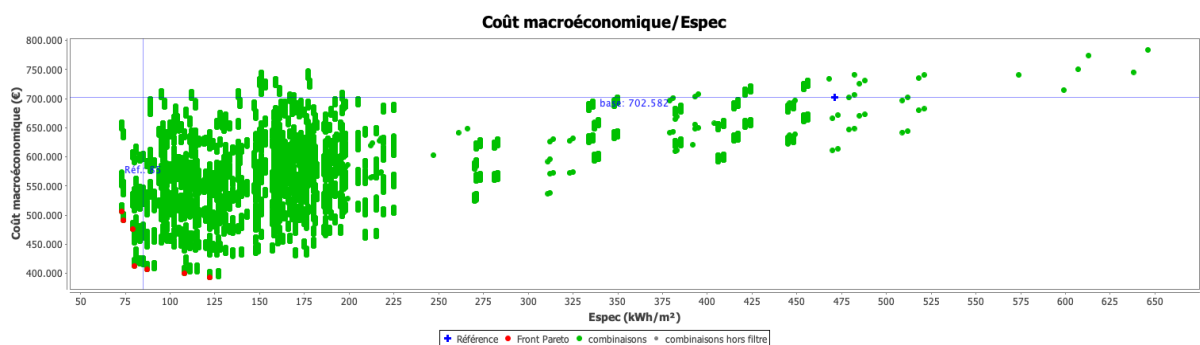
Base				
	K	151	Umoy [W/m².K]	
	BNC [kWh/an]	105475	Fenêtres	2.97
	BNC [kWh/m².an]	305.84	Portes	4
	Ew	276	Murs	2
	Espec [kWh/m².an]	471	Toits	1.95
	CGA macro [€]	702 582 €	Sols	0.77

Optimum				
	K	33	Umoy [W/m².K]	Groupe
	BNC [kWh/an]	25674	Fenêtres	F1, Ftoit1
	BNC [kWh/m².an]	74.45	Portes	P2
	Ew	71	Murs	M1, M14
	Espec [kWh/m².an]	122	Toits	T2
	CGA macro [€]	392 738 €	Sols	-
	Investissement [€]	216 837 €		
	Combinaison n°	301546		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation individuelle.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz individuelle (sans stockage).



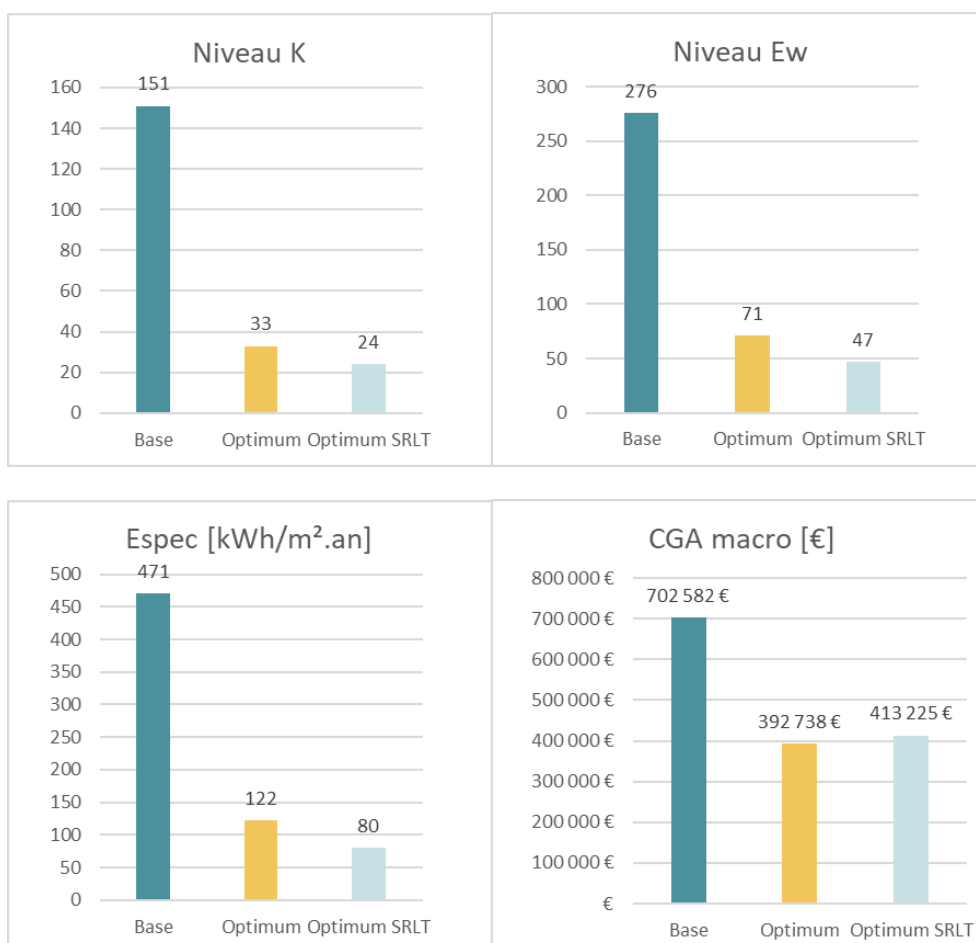
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois déperdition, excepté le plancher.

Les chaudières gaz individuelles existantes sont remplacées par des chaudières gaz récentes à condensation, avec une production instantanée de l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	20999	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	60.89	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	47	Murs	0.2	M1, M14
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	80	Toits	0.2	T2
<b>CGA macro [€]</b>	413 225 €	Sols	0.24	S1, S4
<b>Investissement [€]</b>	261 865 €			
<b>Combinaison n°</b>	301553			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS) individuelle.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air eau individuelle.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 5,2% supérieur au cost optimum « absolu », tout en restant largement inférieur à celui du cas de base. Malgré cet écart, les objectifs de la stratégie rénovation sont rentables du point de vue du coût macroéconomique, lorsqu'on prend comme point de comparaison un cas de base inchangé.

### 7.3. IAE3 - Maison divisée en appartements & service au rez-de-chaussée (< 1919)

#### 7.3.1. Bâtiment de référence



#### 4 niveaux = 3 appartements + 1 commerce

- Bâtiment en partie mitoyen
- Annexes latérales
- Murs pleins en briques, simple vitrage
- Chauffage central individuel au gaz
- ECS sur chaudière, instantanée
- Pas de système de ventilation

• Valeur intrinsèque : 287.826 €

• Ach = 237 m<sup>2</sup>

• Vp = 934 m<sup>3</sup>

#### 7.3.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	45195
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	4

#### 7.3.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U moy, base	U moy, costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>151</b>	<b>- €</b>	<b>467 298.00 €</b>	<b>474 051.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	302218 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>5.17</b>	<b>1.43</b>	<b>125</b>	<b>30 244.00 €</b>	<b>448 237.00 €</b>	<b>455 236.00 €</b>
<b>Murs</b>	302212 Mur(ME0.15) (M1)					
	<b>2.07</b>	<b>0.15</b>	<b>82</b>	<b>46 571.00 €</b>	<b>358 938.00 €</b>	<b>367 774.00 €</b>
<b>Toitures</b>	302207 T0.20(T0.20,TP0.20) (T2,T3)					
	<b>1.67</b>	<b>0.2</b>	<b>120</b>	<b>28 935.00 €</b>	<b>418 394.00 €</b>	<b>425 175.00 €</b>
<b>Sols</b>	302213 Plancher(Plcave0.24) (S1)					
	<b>1.17</b>	<b>0.93</b>	<b>147</b>	<b>736.00 €</b>	<b>468 034.00 €</b>	<b>474 831.00 €</b>

#### 7.3.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>/ E<sub>spec</sub>/K et U parois

<b>Base</b>			
	<b>K</b>	<b>151</b>	<b>U moy [W/m<sup>2</sup>.K]</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>		55517	Fenêtres 5.17
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>		234.26	Portes 4

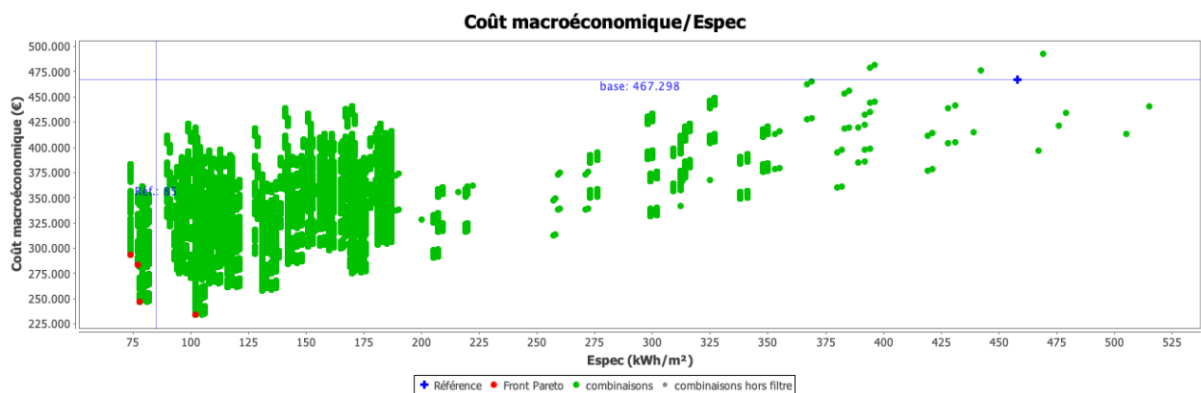


<b>Ew</b>	294	Murs	2.07
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	458	Toits	1.67
<b>CGA macro [€]</b>	467 298 €	Sols	1.17

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	27	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	11979	Fenêtres	1.37	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	50.55	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	66	Murs	0.2	M1
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	102	Toits	0.2	T2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	270 484 €	Sols	1.17	-
<b>Investissement [€]</b>	173 104 €			
<b>Combinaison n°</b>	302052			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation individuelle.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz individuelle (sans stockage).



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

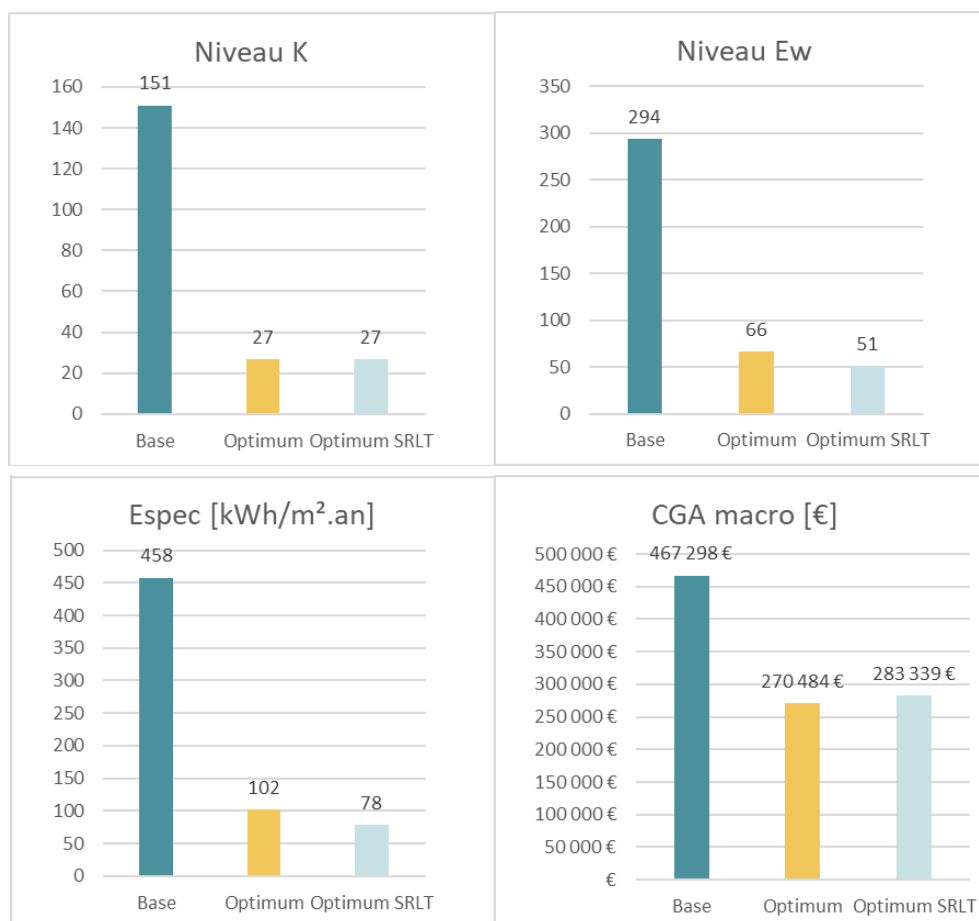
Les chaudières gaz individuelles existantes sont remplacées par des chaudières gaz récentes à condensation, avec une production instantanée de l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
<b>K</b>	27	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	11979	Fenêtres	1.37	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	50.55	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	51	Murs	0.2	M1

<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	78	Toits	0.2	T2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	283 339 €	Sols	1.17	-
<b>Investissement [€]</b>	186 903 €			
<b>Combinaison n°</b>	302053			

Caractéristiques techniques :

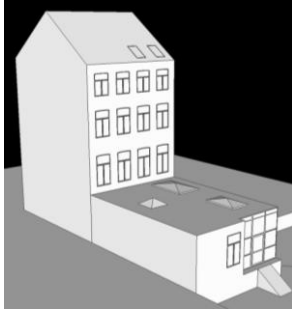
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS) individuelle.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau individuelle.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 4,8% supérieur au cost optimum « absolu », tout en restant largement inférieur à celui du cas de base. Malgré cet écart, les objectifs de la stratégie rénovation sont rentables du point de vue du coût macroéconomique, lorsqu'on prend comme point de comparaison un cas de base inchangé.

## 7.4. IAE4 - Maison divisée en appartements de 1919-1945

### 7.4.1. Bâtiment de référence



#### 5 niveaux = 5 appartements sur caves

- Bâtiment en partie mitoyen
- Annexes arrière
- Murs pleins en briques, simple vitrage
- Chauffage central collectif gaz
- Eau chaude sanitaire sur chaudière, instantanée
- Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque : 412.074 €
- Ach = 417 m<sup>2</sup>
- Vp = 2.050 m<sup>3</sup>

### 7.4.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	60585
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	9

### 7.4.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costop</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>112</b>	- €	<b>720 408.00 €</b>	<b>752 042.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	302931 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>4.62</b>	<b>1.38</b>	<b>78</b>	<b>86 764.00 €</b>	<b>657 628.00 €</b>	<b>681 058.00 €</b>
<b>Murs</b>	302924 Mur(ME0.24) (M1)					
	<b>2.21</b>	<b>0.24</b>	<b>83</b>	<b>33 330.00 €</b>	<b>647 771.00 €</b>	<b>682 673.00 €</b>
<b>Toitures</b>	302921 T0.20(T0.20,TP0.20) (T2,T3)					
	<b>1.06</b>	<b>0.2</b>	<b>96</b>	<b>51 285.00 €</b>	<b>710 134.00 €</b>	<b>745 260.00 €</b>
<b>Sols</b>	302927 Pl0.2(PlSol0.20,Plcave0.20) (S1,S4)					
	<b>0.67</b>	<b>0.2</b>	<b>103</b>	<b>32 878.00 €</b>	<b>729 703.00 €</b>	<b>763 351.00 €</b>

7.4.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w/E_{spec}/K$  et U parois

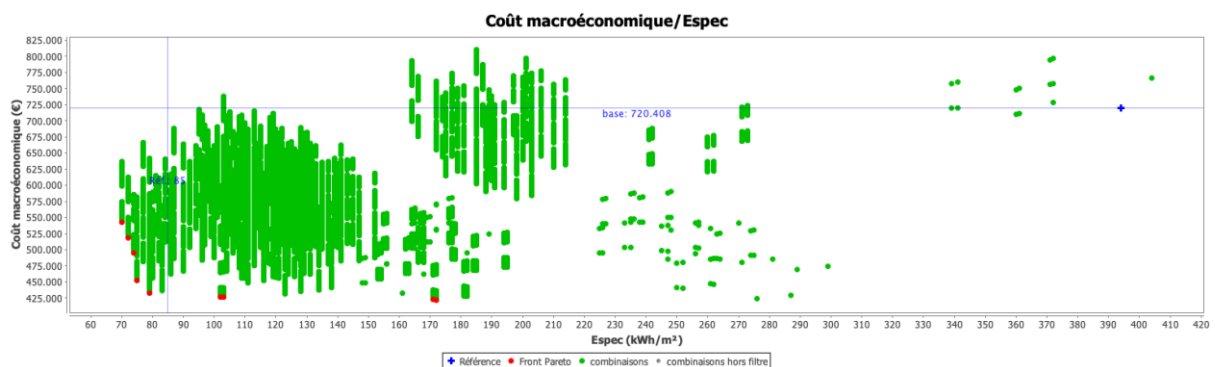
Base				
	K	112	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	69516		Fenêtres	4.62
BNC [kWh/m².an]	166.51		Portes	4
Ew	281		Murs	2.21
Espec [kWh/m².an]	394		Toits	1.06
CGA macro [€]	720 408 €		Sols	0.67

Optimum				
	K	64	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	40451		Fenêtres	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	96.89		Portes	P2
Ew	127		Murs	-
Espec [kWh/m².an]	172		Toits	T2, T3
CGA macro [€]	422 103 €		Sols	-
Investissement [€]	192 050 €			
Combinaison n°	302683			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière biomasse collective avec stockage.
- 14 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



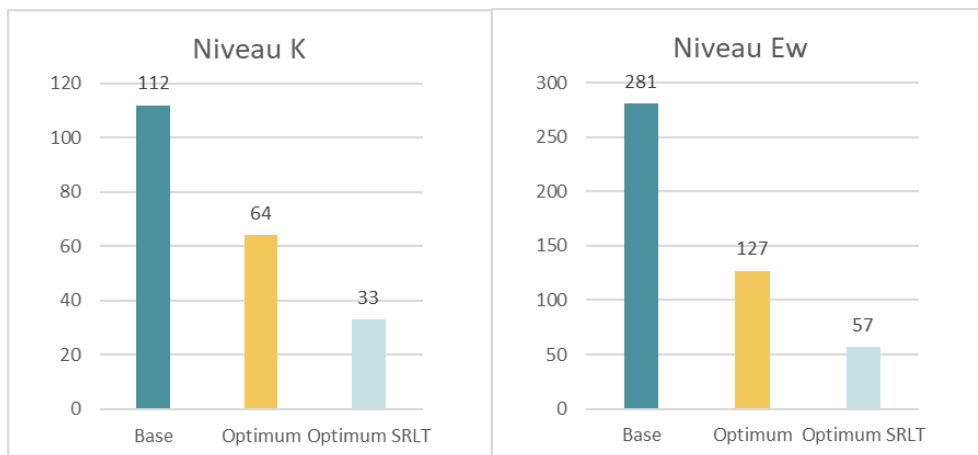
La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et portes et l'isolation thermique du toit.

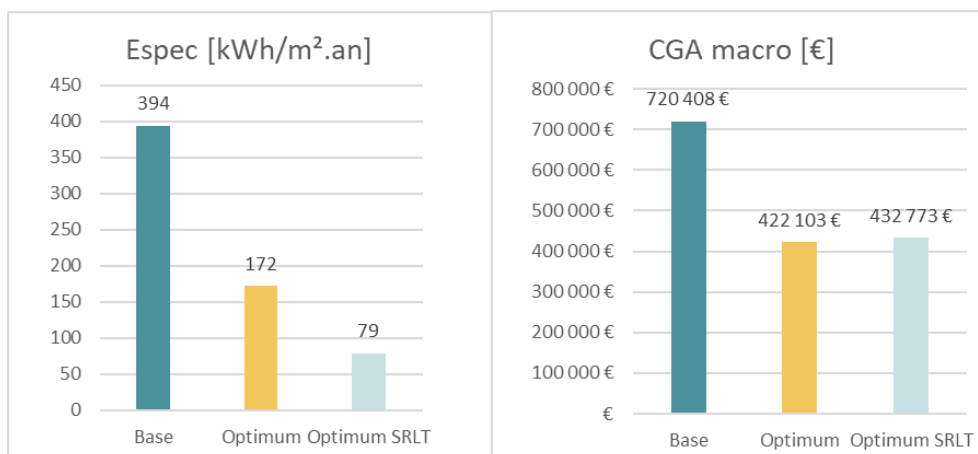
La chaudière mazout collective existante est remplacée par une chaudière biomasse, avec ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 14m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

<b>Optimum SRLT</b>				
<b>K</b>	33		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
<b>BNC [kWh/an]</b>	24727	Fenêtres	1.38	F1, Ftoit1
<b>BNC [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	59.23	Portes	2	P2
<b>Ew</b>	57	Murs	0.2	M1
<b>Espec [kWh/m<sup>2</sup>.an]</b>	79	Toits	0.2	T2, T3
<b>CGA macro [€]</b>	432 773 €	Sols	0.67	-
<b>Investissement [€]</b>	271 263 €			
<b>Combinaison n°</b>	302701			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- 14 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.





Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 2,5% supérieur au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'objectif en énergie primaire visée pour la stratégie rénovation est quasi cost-optimum.

## 7.5. IAE5 - Immeuble à appartements de 1946-1970

### 7.5.1. Bâtiment de référence



#### 9 niveaux = 16 appartements

- Bâtiment en partie mitoyen
- Murs pleins en briques + structure béton
- Double vitrage
- Chauffage central collectif au mazout
- Eau chaude sanitaire sur boiler électrique individuel
- Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque : 1.423.376 €
- Ach = 1.382 m<sup>2</sup>
- Vp = 4.330 m<sup>3</sup>

### 7.5.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	12831
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	12

### 7.5.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>133</b>	- €	<b>1 482 019.00 €</b>	<b>1 123 679.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	302468 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>3.62</b>	<b>1.43</b>	<b>108</b>	<b>185 344.00 €</b>	<b>1 831 639.00 €</b>	<b>1 662 532.00 €</b>
<b>Murs</b>	302461 Mur(ME0.15) (M1)					
	<b>2.31</b>	<b>0.15</b>	<b>67</b>	<b>156 585.00 €</b>	<b>1 484 066.00 €</b>	<b>1 396 553.00 €</b>
<b>Toitures</b>	302462 Toit(TP0.24) (T3)					
	<b>1.75</b>	<b>0.24</b>	<b>120</b>	<b>56 914.00 €</b>	<b>1 796 368.00 €</b>	<b>1 600 654.00 €</b>
<b>Sols</b>	302470 Pl0.24(PlE0.24,Plcave0.24,Planc0.24) (S1,S2,S5)					
	<b>1.39</b>	<b>0.64</b>	<b>126</b>	<b>19 313.00 €</b>	<b>1 812 834.00 €</b>	<b>1 605 847.00 €</b>

7.5.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$  /  $E_{spec}$  / K et U parois

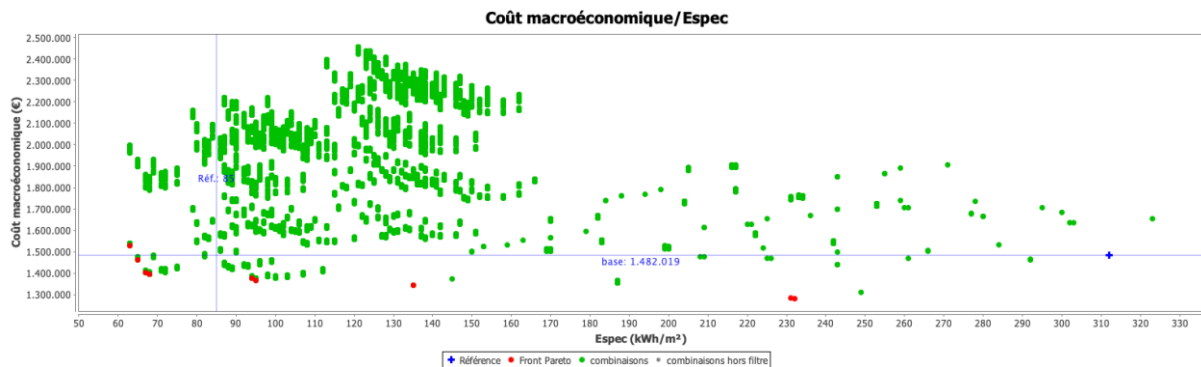
Base				
K	133		Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	218287	Fenêtres	3.62	
BNC [kWh/m².an]	158.00	Portes	4	
Ew	226	Murs	2.31	
Espec [kWh/m².an]	312	Toits	1.75	
CGA macro [€]	1 482 019 €	Sols	1.39	

Optimum				
K	120		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	201050	Fenêtres	3.62	-
BNC [kWh/m².an]	145.52	Portes	4	-
Ew	170	Murs	2.31	-
Espec [kWh/m².an]	232	Toits	0.24	T3
CGA macro [€]	1 281 354 €	Sols	1.39	-
Investissement [€]	181 689 €			
Combinaison n°	302205			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 15 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite via un boiler thermodynamique.



Pour cette typologie, le cost-optimum ne prévoit que l'isolation de la toiture. L'importante surface vitrée du bâtiment peut justifier le manque de rentabilité purement économique de l'opération qui consisterait à remplacer toutes les fenêtres.

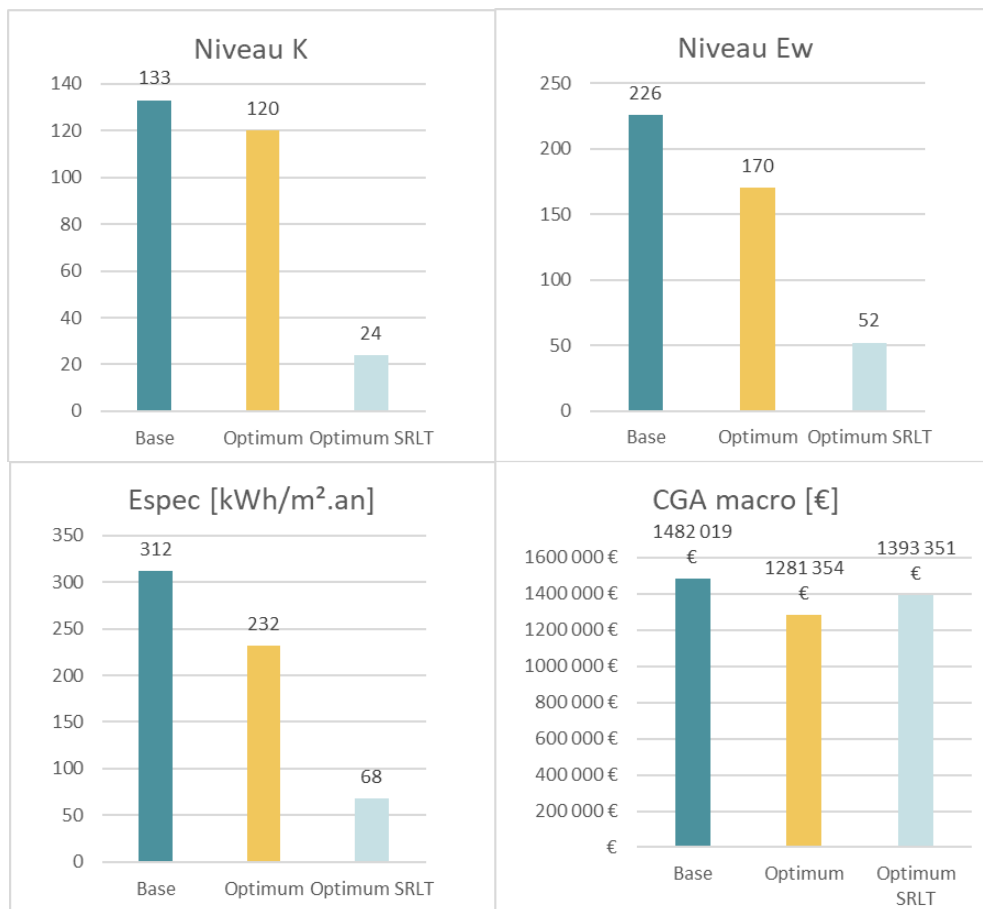
La chaudière mazout collective est remplacée par une chaudière biomasse. En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire, les chauffe-eaux électriques individuels existants sont remplacés par des boilers thermodynamiques.



Optimum SRLT					
	K	24		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	57446		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	41.58		Portes	2	P2
Ew	52		Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	68		Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	1 393 351 €		Sols	0.64	S2, S5
Investissement [€]	865 666 €				
Combinaison n°	302247				

Caractéristiques techniques :

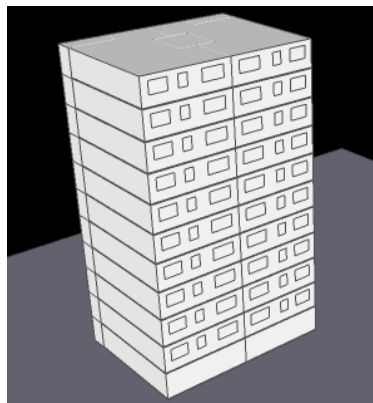
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS) collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite via un boiler thermodynamique individuel.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 8,7% supérieur au cost optimum « absolu », tout en restant inférieur à celui du cas de base. Malgré cet écart, les objectifs de la stratégie rénovation sont rentables du point de vue du coût macroéconomique, lorsqu'on prend comme point de comparaison un cas de base inchangé.

## 7.6. IAE6 - Immeuble à appartements de 1946-1970

### 7.6.1. Bâtiment de référence



#### Onze niveaux = 20 appartements

- Bâtiment mitoyen
- Façade avant orientée sud, la façade arrière orientée nord
- Rez-de-chaussée : garages
- Chaque étage comprend 2 logements de 2 chambres
- Chauffage central collectif - chaudière gaz atmosphérique
- Eau chaude sanitaire instantanée via un chauffe-eau gaz dans chaque appartement
- Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque : 2.085.581€
- Ach = 2.132 m<sup>2</sup>
- Vp = 6.564 m<sup>3</sup>

### 7.6.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	51135
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	11

### 7.6.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>127</b>	<b>- €</b>	<b>2 543 466.00 €</b>	<b>2 640 471.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	301416 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Peanc2.0,Pext2) (F1,P2-P,P5-P)					
	<b>5.2</b>	<b>1.36</b>	<b>80</b>	<b>298 389.00 €</b>	<b>2 128 247.00 €</b>	<b>2 197 246.00 €</b>
<b>Murs</b>	301411 M0.15(ME0.15,Meanc0.15) (M1,M14)					
	<b>1.94</b>	<b>0.15</b>	<b>85</b>	<b>177 006.00 €</b>	<b>2 141 060.00 €</b>	<b>2 256 173.00 €</b>
<b>Toitures</b>	301407 Toit(TP0.24) (T3)					
	<b>1.05</b>	<b>0.24</b>	<b>122</b>	<b>68 421.00 €</b>	<b>2 526 224.00 €</b>	<b>2 626 658.00 €</b>
<b>Sols</b>	301414 Pl0.2(PlSol0.20,Pleanc0.20) (S2,S4)					
	<b>1.39</b>	<b>0.2</b>	<b>119</b>	<b>27 276.00 €</b>	<b>2 438 522.00 €</b>	<b>2 534 065.00 €</b>

7.6.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$  /  $E_{spec}$  / K et U parois

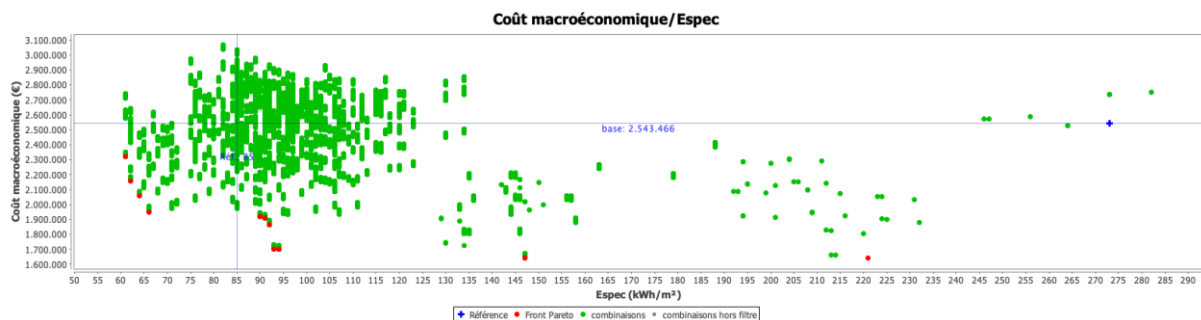
Base				
	K	127	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	281258	Fenêtres	5.2	
BNC [kWh/m².an]	131.92	Portes	4	
Ew	217	Murs	1.94	
Espec [kWh/m².an]	273	Toits	1.05	
CGA macro [€]	2 543 466 €	Sols	1.39	

Optimum				
	K	127	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	281258	Fenêtres	5.2	-
BNC [kWh/m².an]	131.92	Portes	4	-
Ew	176	Murs	1.94	-
Espec [kWh/m².an]	221	Toits	1.05	-
CGA macro [€]	1 640 628 €	Sols	1.39	-
Investissement [€]	62 338 €			
Combinaison n°	301128			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 15 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par un chauffe-eau gaz individuel.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe.

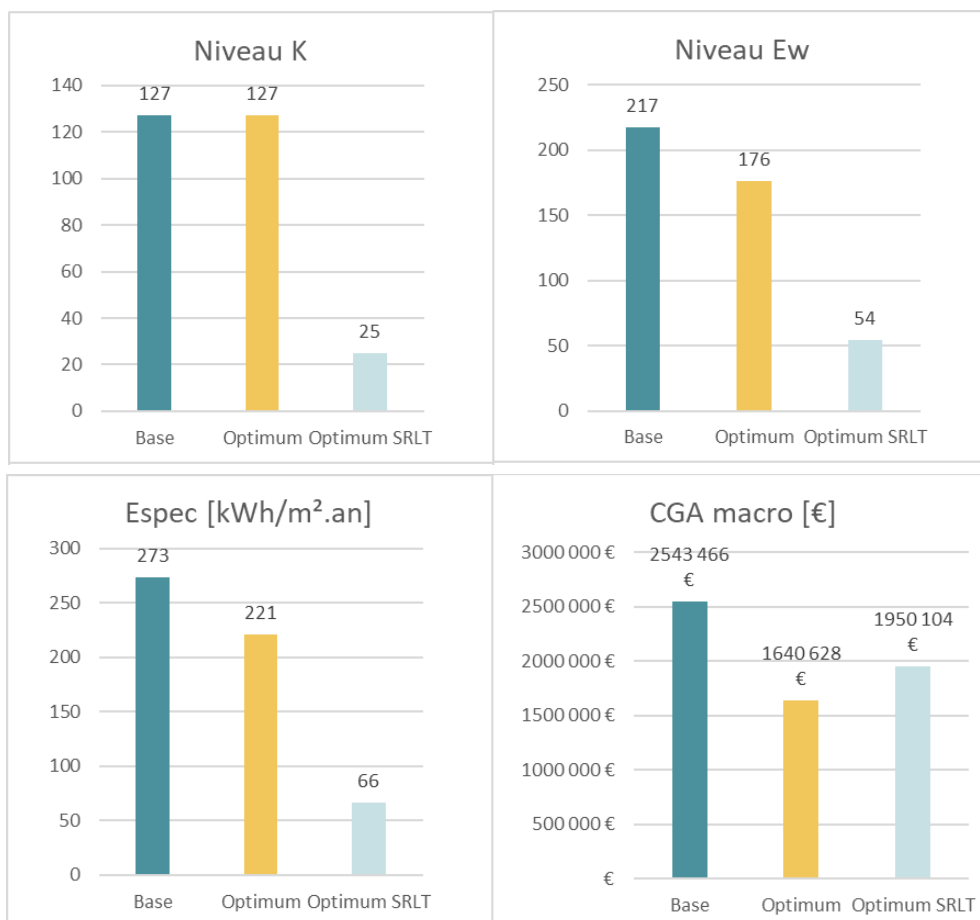
La chaudière mazout collective est remplacée par une chaudière biomasse. En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire, les chauffe-eaux gaz individuels existants ne sont pas remplacés.

Optimum SRLT				
	K	25	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	79862	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	37.46	Portes	2	P2, P5
Ew	54	Murs	0.2	M1, M14
Espec [kWh/m².an]	66	Toits	0.2	T3

<b>CGA macro [€]</b>	1 950 104 €	Sols	0.24	S2, S4
<b>Investissement [€]</b>	1 234 494 €			
<b>Combinaison n°</b>	301194			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- Producteur ECS du cas de base (chauffe-eau instantané).



En analysant le Front de Pareto, on constate qu'il existe une autre combinaison intéressante, parce qu'elle permet de diminuer drastiquement le Espec (de 221 kWh/m².an dans le cost-optimum absolu, à 147 kWh/m².an), tout en maîtrisant l'augmentation du CGA macroéconomique (dont l'écart par rapport au cost optimum absolu est seulement de 0,1%). Cette solution prévoit une isolation du toit à 0,24 W/m²K et un remplacement des fenêtres ( $U_w = 1,43 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Un second point sur le Front de Pareto est également à mettre en évidence car il présente un Espec de 94 kWh/m<sup>2</sup>.an (et se rapproche donc un peu plus de l'objectif de la stratégie rénovation à 85 kWh/m<sup>2</sup>.an), tout en affichant un CGA macroéconomique faiblement (3,6%) supérieur au CGA du cost-optimum absolu. Par rapport au point précédent, l'évolution fondamentale est l'utilisation, pour la production de chauffage, d'une pompe à chaleur air-eau collective (émission de chaleur par ventilo-convecteurs).

## 7.7. IAE7 - Maison divisée en appartements de 1946-1970

### 7.7.1. Bâtiment de référence



#### 3 niveaux = 3 appartements

- Bâtiment mitoyen sur cave
- Annexes arrières
- Murs creux
- Simple vitrage
- Chauffage central collectif au gaz
- Eau chaude sanitaire individuelle gaz instantané
- Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque : 201.378€
- Ach = 187 m<sup>2</sup>
- Vp = 547 m<sup>3</sup>

### 7.7.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	76755
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	6

### 7.7.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>158</b>	- €	<b>248 735.00 €</b>	<b>254 984.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	301123 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>6.71</b>	<b>1.43</b>	<b>120</b>	<b>20 568.00 €</b>	<b>226 316.00 €</b>	<b>232 677.00 €</b>
<b>Murs</b>	301116 Mur(ME0.24) (M1)					
	<b>2.14</b>	<b>0.24</b>	<b>111</b>	<b>16 974.00 €</b>	<b>218 110.00 €</b>	<b>225 968.00 €</b>
<b>Toitures</b>	301115 T0.15(PfGr0.15,TP0.15) (H2,T3)					
	<b>2.08</b>	<b>0.15</b>	<b>128</b>	<b>12 671.00 €</b>	<b>229 933.00 €</b>	<b>236 274.00 €</b>
<b>Sols</b>	301121 Pl0.24(PlE0.24,PlSol0.24,Plcave0.24) (S1,S4,S5)					
	<b>1.14</b>	<b>0.24</b>	<b>141</b>	<b>4 794.00 €</b>	<b>239 200.00 €</b>	<b>245 713.00 €</b>

7.7.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w / E_{spec} / K$  et  $u$  parois

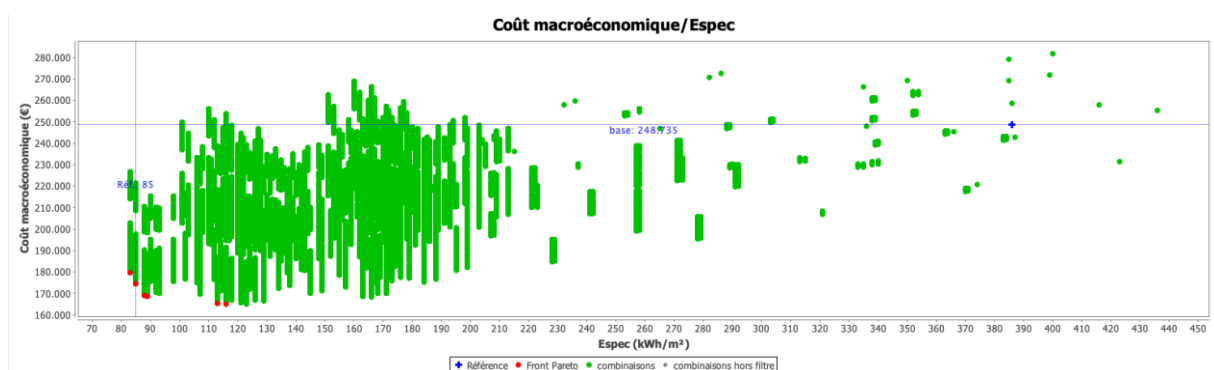
Base				
	K	158	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	35032	Fenêtres	6.71	
BNC [kWh/m².an]	237.30	Portes	4	
Ew	223	Murs	2.14	
Espec [kWh/m².an]	386	Toits	2.08	
CGA macro [€]	248 735 €	Sols	1.14	

Optimum				
	K	25	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	7403	Fenêtres	1.37	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	50.15	Portes	2	P2
Ew	68	Murs	0.2	M1
Espec [kWh/m².an]	116	Toits	0.2	T3
CGA macro [€]	165 133 €	Sols	0.24	S1, S4, S5
Investissement [€]	84 847 €			
Combinaison n°	300897			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite via un boiler thermodynamique individuel.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et portes et l'isolation thermique de l'ensemble des parois déperdition.

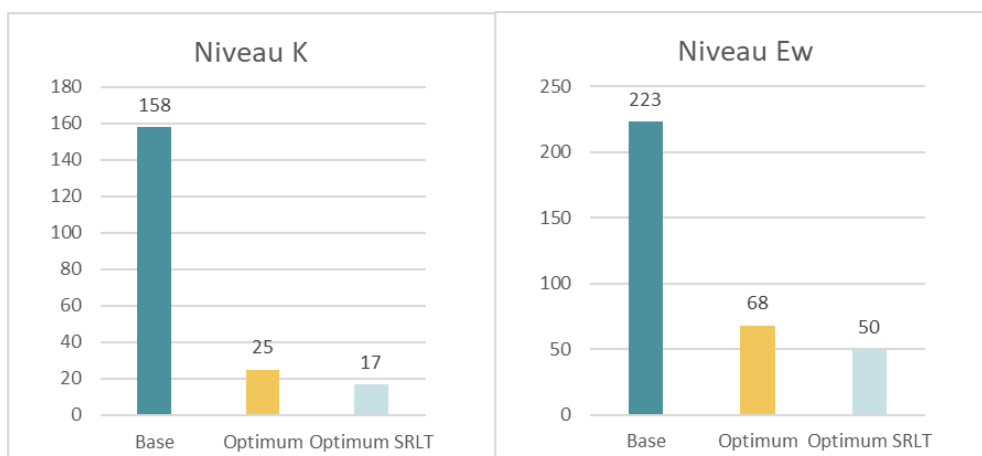


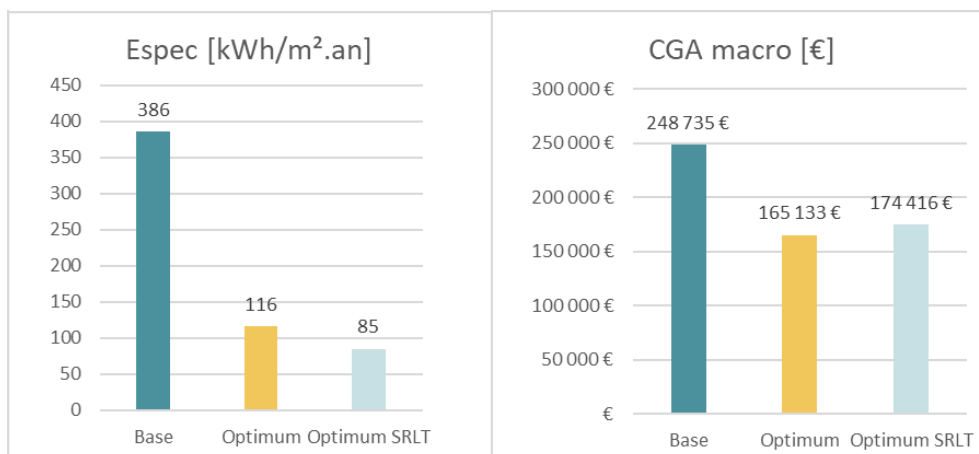
Les chaudières gaz individuelles existantes sont remplacées par des chaudières gaz récentes à condensation. En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire, les chauffe-eaux gaz individuels existants sont remplacés par des boilers thermodynamiques.

Optimum SRLT					
	K	17		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	6063		Fenêtres	0.87	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	41.07		Portes	0.8	P2
Ew	50		Murs	0.15	M1
Espec [kWh/m².an]	85		Toits	0.15	T3
CGA macro [€]	174 416 €		Sols	0.2	S1, S4, S5
Investissement [€]	104 804 €				
Combinaison n°	300933				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite via un boiler thermodynamique.





Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 5,6% supérieur au cost optimum « absolu », tout en restant largement inférieur à celui du cas de base. Malgré cet écart, les objectifs de la stratégie rénovation sont rentables du point de vue du coût macroéconomique, lorsqu'on prend comme point de comparaison un cas de base inchangé.

## 7.8. IAE9 - Immeuble à appartements d'après 1990

### 7.8.1. Bâtiment de référence



#### 5 niveaux = 5 appartements

- Bâtiment 4 façades de 1994 en partie sur cave
- Murs creux, toiture et plancher légèrement isolés
- Double vitrage
- Chauffage central collectif au mazout
- Eau chaude sanitaire via chaudière avec stockage
- Système de ventilation de type A : pulsion et extraction d'air naturelle
- Valeur intrinsèque : 451.533 €
- $A_{ch} = 379 \text{ m}^2$
- $V_p = 1.129 \text{ m}^3$

### 7.8.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	286503
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	13

### 7.8.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>68</b>	- €	<b>310 915.00 €</b>	<b>263 672.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	301413 fen0.6(Ch0.95-DV0.8/0.5-WE,Ftoit2,Pext0.8) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>2.25</b>	<b>1.01</b>	<b>59</b>	<b>45 447.00 €</b>	<b>331 040.00 €</b>	<b>286 141.00 €</b>
<b>Murs</b>	301412 M0.2(ME0.20,Mcave0.20,Ms0.20) (M1,M12,M16)					
	<b>0.81</b>	<b>0.2</b>	<b>36</b>	<b>83 745.00 €</b>	<b>318 320.00 €</b>	<b>295 841.00 €</b>
<b>Toitures</b>	301409 T0.15(PfGr0.15,T0.15) (H2,T2)					
	<b>0.5</b>	<b>0.15</b>	<b>63</b>	<b>22 930.00 €</b>	<b>319 587.00 €</b>	<b>277 183.00 €</b>
<b>Sols</b>	301416 Pl0.2(PlSol0.20,Plcave0.20) (S1,S4)					
	<b>0.42</b>	<b>0.2</b>	<b>65</b>	<b>22 889.00 €</b>	<b>326 046.00 €</b>	<b>281 846.00 €</b>

7.8.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ /  $E_{spec}$ /K et U parois

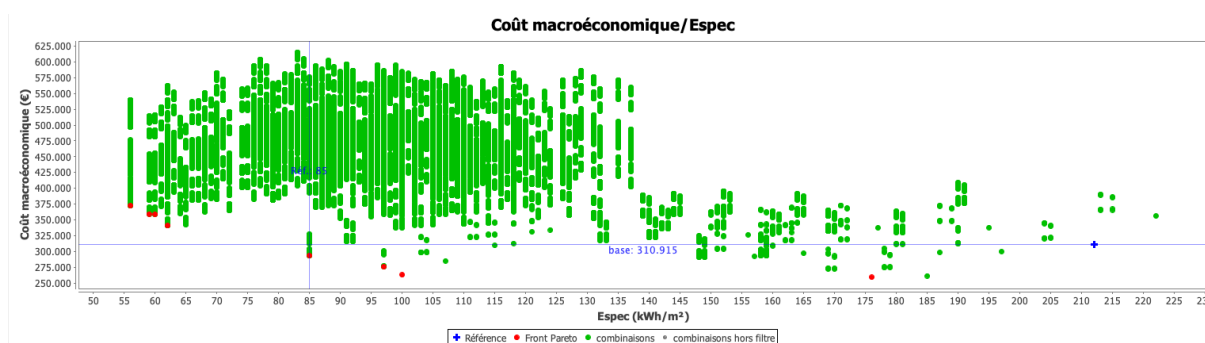
Base				
	K	68	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	39029		Fenêtres	2.25
BNC [kWh/m².an]	102.92		Portes	4
Ew	122		Murs	0.81
Espec [kWh/m².an]	212		Toits	0.5
CGA macro [€]	310 915 €		Sols	0.42

Optimum				
	K	68	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	39029		Fenêtres	2.25
BNC [kWh/m².an]	102.92		Portes	4
Ew	101		Murs	0.81
Espec [kWh/m².an]	176		Toits	0.81
CGA macro [€]	258 904 €		Sols	0.42
Investissement [€]	48 683 €			
Combinaison n°	301129			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière biomasse collective avec stockage.
- 14 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



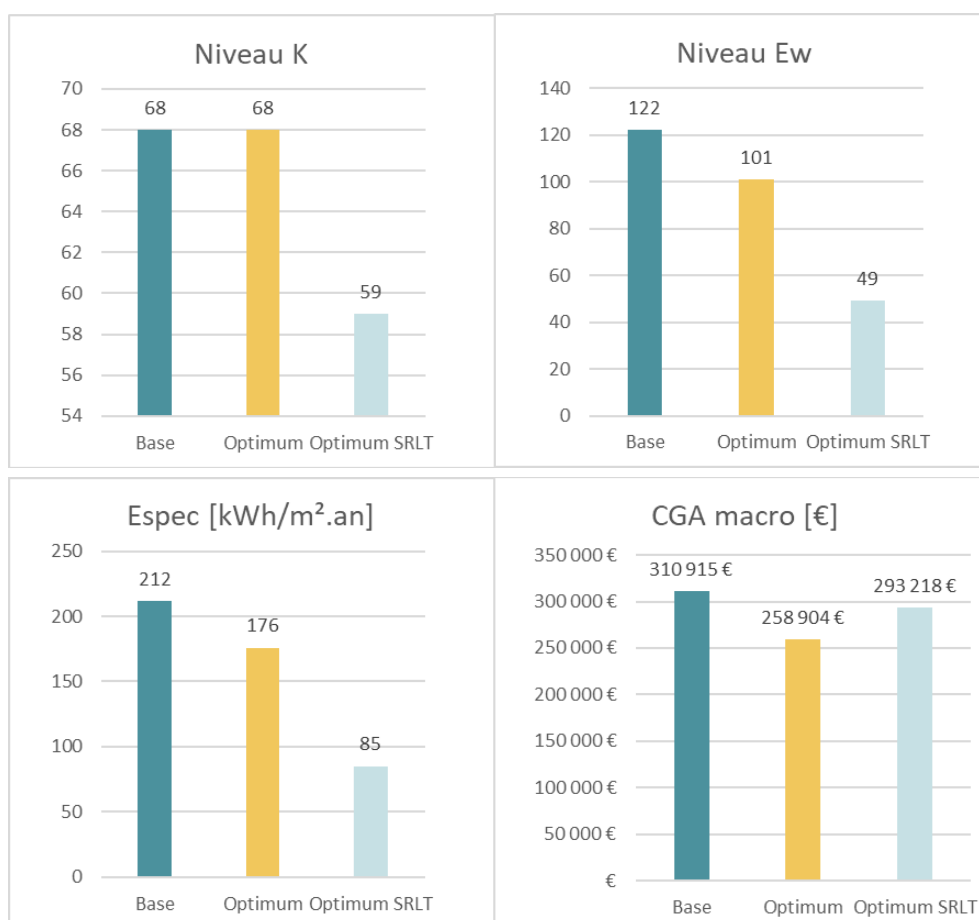
La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe.

La chaudière mazout collective existante est remplacée par une chaudière biomasse, avec ballon de stockage pour l'eau chaude sanitaire. 14m² de panneaux solaires thermiques permettent de produire une partie de l'eau chaude sanitaire.

Optimum SRLT					
	K	59		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	32554		Fenêtres	1.43	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	85.85		Portes	2	P2
Ew	49		Murs	0.81	-
Espec [kWh/m².an]	85		Toits	0.24	H1, T2
CGA macro [€]	293 218 €		Sols	0.42	-
Investissement [€]	120 438 €				
Combinaison n°	301171				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- 14 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



Le cost-optimum correspond à une combinaison présentant un Espec de 176 kWh/m<sup>2</sup>.an, ce qui est plus de 2 fois supérieur à l'objectif de la SRLT.

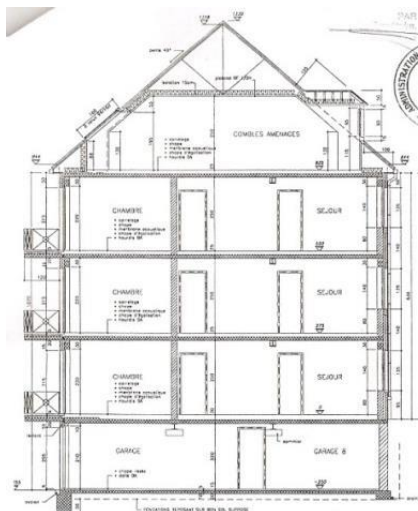
En analysant le Front de Pareto, on constate qu'il existe une combinaison plus intéressante, parce qu'elle permet de diminuer drastiquement le Espec (de 176 kWh/m<sup>2</sup>.an dans le cost-optimum absolu, à 100 kWh/m<sup>2</sup>.an), tout en maîtrisant l'augmentation du CGA macroéconomique (dont l'écart par rapport au cost optimum absolu est seulement de 1,5%).

Cette solution prévoit une PAC air-eau collective, avec stockage pour l'ECS et l'installation de 14m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques. C'est la combinaison de systèmes la plus performante des variantes étudiées, en termes de consommation en énergie primaire.

Ce bâtiment plus récent et soumis aux premières réglementations thermiques est caractérisé par la présence d'une isolation thermique existante dans les parois (Umurs = 0,81 W/m<sup>2</sup>K ; Utoit = 0,81 W/m<sup>2</sup>K ; Usols = 0,42 W/m<sup>2</sup>K). Les combinaisons permettant d'envisager une réduction plus conséquente du Espec impliquent un complément d'isolation a posteriori ; des travaux importants d'un point de vue financier, qui ne permettent pas d'envisager une rentabilité macroéconomique aussi intéressante que dans les cas d'habitations initialement non isolées.

## 7.9. IAE10 - Immeuble d'appartements d'après 1990

### 7.9.1. Bâtiment de référence



#### 5 niveaux = 10 appartements

- Bâtiment 4 façades
- Sous-sol (rez-de-cour) : duplex, caves, 2 garages
- Rez-de-chaussée : un appartement, 7 garages
- Etages : 8 appartements
- Chauffage central individuel - chaudière gaz non à condensation dans chaque appartement
- Eau chaude sanitaire via la chaudière avec stockage
- Système de ventilation de type C : amenées d'air naturelles et extractions mécaniques
- Valeur intrinsèque : 1.653.390 €
- Ach = 920 m<sup>2</sup>
- Vp = 2.931 m<sup>3</sup>

### 7.9.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	142215
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	18

### 7.9.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>78</b>	<b>- €</b>	<b>971 359.00 €</b>	<b>1 004 360.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	301038 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit1,Pext2) (F1,Ftoit1,P2-P)					
	<b>2.93</b>	<b>1.36</b>	<b>65</b>	<b>123 031.00 €</b>	<b>994 615.00 €</b>	<b>1 026 557.00 €</b>
<b>Murs</b>	301033 M0.2(ME0.20,Mcave0.20,Meanc0.20) (M1,M12,M14)					
	<b>0.9</b>	<b>0.2</b>	<b>53</b>	<b>133 683.00 €</b>	<b>958 108.00 €</b>	<b>1 002 100.00 €</b>
<b>Toitures</b>	301030 T0.24(PfGr0.24,T0.24,TP0.24) (H1,T2,T3)					
	<b>1.07261952</b>	<b>0.24</b>	<b>76</b>	<b>44 211.00 €</b>	<b>1 006 041.00 €</b>	<b>1 041 807.00 €</b>
<b>Sols</b>	301034 Pl0.2(PlE0.20,PlSol0.20,Plcave0.20,Planc0.20) (S1,S2,S4,S5)					
	<b>1.03</b>	<b>0.2</b>	<b>65</b>	<b>31 280.00 €</b>	<b>907 625.00 €</b>	<b>941 649.00 €</b>

7.9.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$  /  $E_{spec}$  / K et U parois

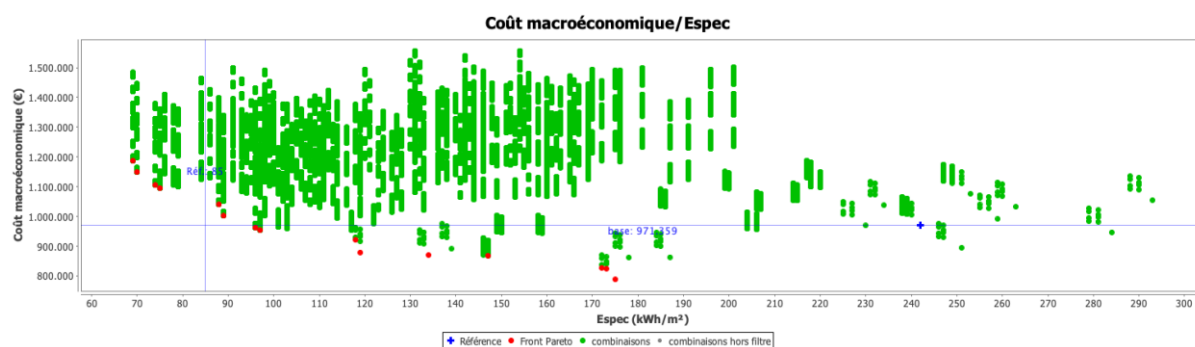
Base				
K	78	Umoy [W/m².K]		
BNC [kWh/an]	107789	Fenêtres	2.93	
BNC [kWh/m².an]	117.14	Portes	4	
Ew	147	Murs	0.9	
Espec [kWh/m².an]	242	Toits	1.07	
CGA macro [€]	971 359 €	Sols	1.03	

Optimum				
K	78	Umoy [W/m².K]		
BNC [kWh/an]	107789	Fenêtres	2.93	-
BNC [kWh/m².an]	117.14	Portes	4	-
Ew	106	Murs	0.9	-
Espec [kWh/m².an]	175	Toits	1.07	-
CGA macro [€]	788 572 €	Sols	1.03	-
Investissement [€]	108 989 €			
Combinaison n°	300832			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit 10 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une chaudière gaz à condensation individuelle.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz individuelle (sans stockage).



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun travail sur l'enveloppe.

Les chaudières gaz individuelles existantes sont remplacées par des chaudières gaz récentes à condensation, avec une production instantanée de l'eau chaude sanitaire.

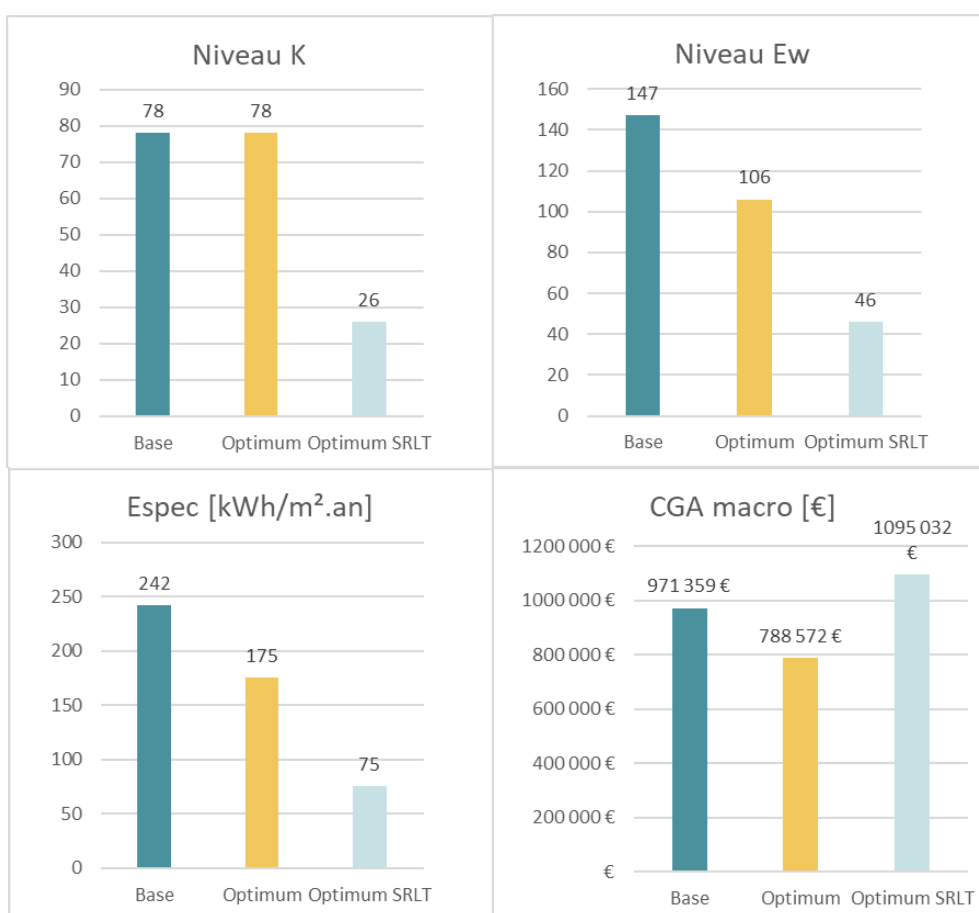
Optimum SRLT				
K	26	Umoy [W/m².K]		
BNC [kWh/an]	44758	Fenêtres	1.36	F1, Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	48.64	Portes	2	P2
Ew	46	Murs	0.2	M1, M12
Espec [kWh/m².an]	75	Toits	0.2	H1, T2, T3



<b>CGA macro [€]</b>	1 095 032 €	Sols	0.24	S1, S2, S4, S5
<b>Investissement [€]</b>	731 419 €			
<b>Combinaison n°</b>	300881			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau mixte (chauffage et ECS) individuelle.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau individuelle.



Le cost-optimum correspond à une combinaison présentant un Espec de 175 kWh/m².an, ce qui est plus de 2 fois supérieur à l'objectif de la SRLT. Il existe une série de combinaisons qui présentent des résultats de performance énergétique plus intéressants, et des CGA macroéconomiques inférieurs à celui du cas de base – mais sensiblement plus élevés que le CGA cost-optimum.

Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum SRLT est 38,9% supérieur au cost optimum « absolu », tout en restant inférieur à celui du cas de base. Cet écart élevé indique qu'il n'est aujourd'hui par rentable de rénover le bâtiment aux objectifs visée par la stratégie rénovation.

## 7.10. Analyse transversale des résultats des immeubles d'appartements existants

Voir annexe E

## 8. Analyse des résultats des immeubles à appartements neufs

### 8.1. IAN1 - Immeuble de 6 appartements neuf

#### 8.1.1. Bâtiment de référence



#### 4 niveaux dont sous-sol = 6 appartements

- Bâtiment 4 façades de 2014 sur cave
- Murs creux, toiture et plancher isolés
- Valeur intrinsèque : 1.285.551 €
- Etanchéité à l'air :  $6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$
- Ach :  $641 \text{ m}^2$
- Vp =  $2.163 \text{ m}^3$

Base			
K	22	Umoy [ $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ ]	
BNC [ $\text{kWh}/\text{an}$ ]	26613	Fenêtres	1.37
BNC [ $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{an}$ ]	41.52	Portes	2
Ew	45	Murs	0.15
Espec [ $\text{kWh}/\text{m}^2.\text{an}$ ]	71	Toits	0.15
CGA macro [€]	1 975 996 €	Sols	0.15
Combinaison n°	74441		

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v50 = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Alimentation naturelle, Evacuation mécanique, sans régulation.
- La production de chauffage est maintenant assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- $18 \text{ m}^2$  de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.

#### 8.1.2. Combinaisons calculées

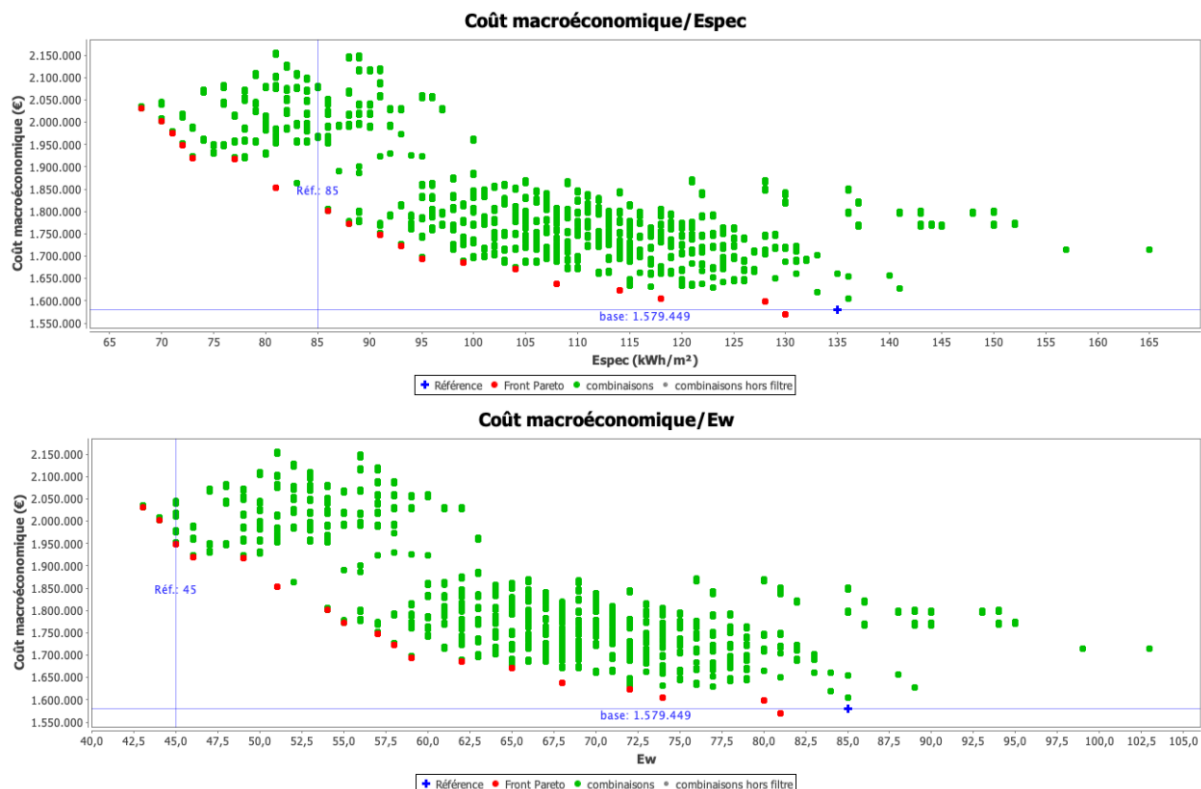
Nombre de combinaisons de mesures calculées :	14753
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	160

8.1.3. Niveau de performance cost-optimum  $E_w/E_{spec}/K$  et  $U$  parois

Optimum				
	K	31	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	35823		Fenêtres	1.83
BNC [kWh/m².an]	55.89		Portes	2
Ew	80		Murs	0.22
Espec [kWh/m².an]	128		Toits	0.21
CGA macro [€]	1 598 572 €		Sols	0.24
Investissement [€]	1 303 918 €			
Combinaison n°	74241			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit  $v_{50} = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière biomasse collective avec stockage.
- 18 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.



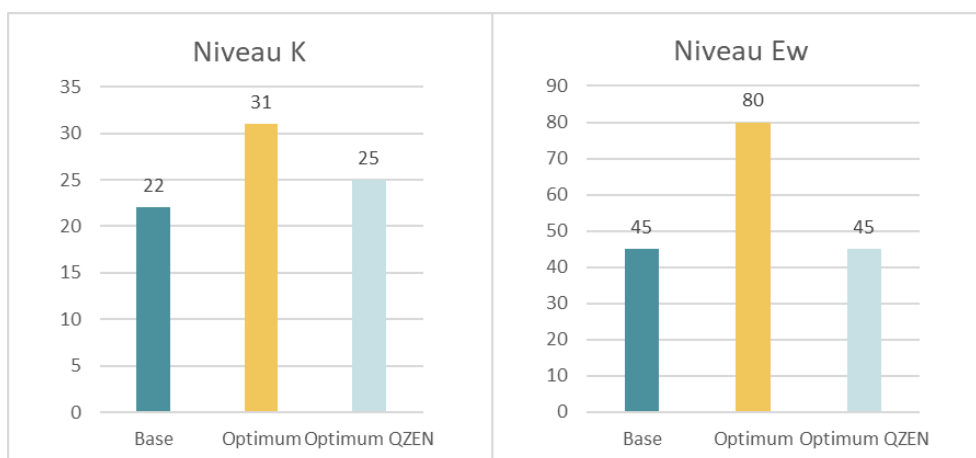
À la lecture du graphique, il apparaît que l'optimum (Espec 130) correspond à un cas où les systèmes de production de chauffage et d'ECS restent alimentés par du mazout. Comme expliqué au point 2.2.4, la politique mise en place en Wallonie concernant l'interdiction progressive de l'installation de chaudières au mazout, dans le neuf puis l'existant, implique que ces solutions ne peuvent être considérées comme viables à

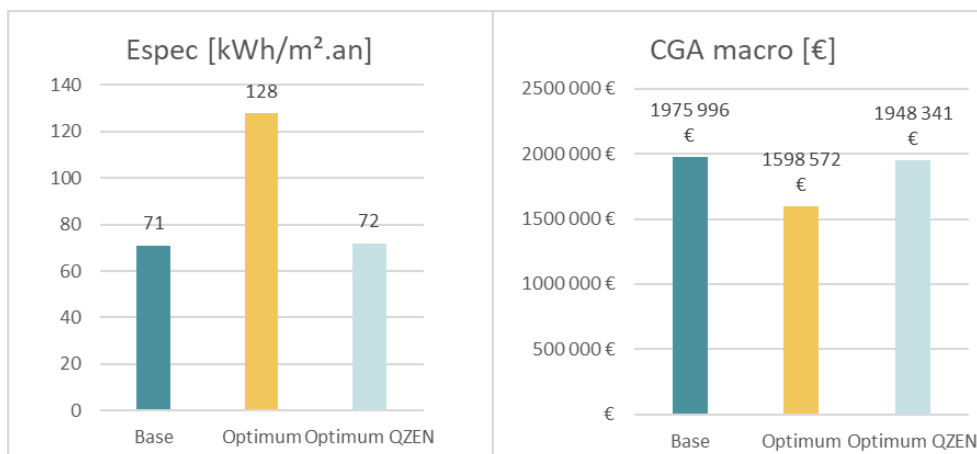
un horizon de 30 ans. Par conséquent, les auteurs de l'étude ont sélectionné la 1<sup>ère</sup> combinaison, sur le Front de Pareto, qui proposait un remplacement du vecteur énergétique pour la production de chauffage et d'ECS (Espec 128).

<b>Optimum QZEN</b>				
<b>K</b>	25	<b>Umoy [W/m².K]</b>		
<b>BNC [kWh/an]</b>	29232	Fenêtres	1.37	F1-Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	45.60	Portes	2	P1 - ALU
<b>Ew</b>	45	Murs	0.2	M9-M12-M16
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	72	Toits	0.2	T3
<b>CGA macro [€]</b>	1 948 341 €	Sols	0.2	S1-S5
<b>Investissement [€]</b>	1 715 135 €			
<b>Combinaison n°</b>	74413			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une PAC air-eau collective.
- L'émission de chaleur est assurée par un chauffage surfacique.
- L'ECS est produite par la PAC air-eau collective.
- 18 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.





Nous constatons que le cost-optimum s'écarte fortement du cost-optimum Qzen en termes de performance énergétique et de cout global actualisé.

En effet, le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum Qzen est 18 % supérieur au cost-optimum « absolu » pour une amélioration du niveau Espec de 44 %.

La différence d'investissement est 24% supérieure pour la combinaison cost-optimum Qzen.

Une enveloppe, un système de ventilation et des systèmes de production de chaleur (chauffage + eau chaude sanitaire) permettent à la combinaison cost-optimum Qzen de respecter les exigences des immeubles à appartements neufs.

#### 8.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ / $E_{spec}$ avec une installation photovoltaïque

OptPV				
	K	31	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	35823		Fenêtres	1.83 F1-Ftoit1
BNC [kWh/m².an]	55.89		Portes	2 P1 - P3
Ew	50		Murs	0.22 M9-M12-M16
Espec [kWh/m².an]	80		Toits	0.21 T3
CGA macro [€]	1 437 570 €		Sols	0.24 S1-S5
Investissement [€]	1 331 950 €			
Combinaison n°	74698			

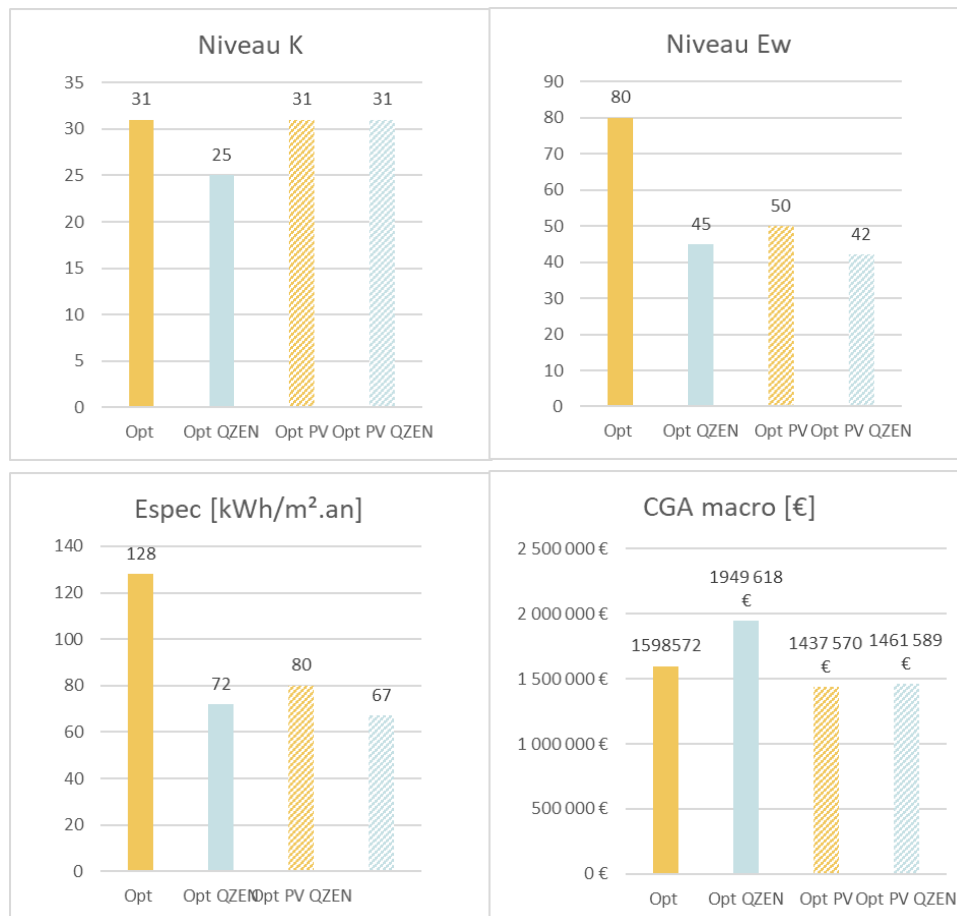
Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation à la demande : alimentation naturelle, évacuation mécanique, facteur de réduction = 0.9.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière biomasse collective avec stockage.
- 18 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 15 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.

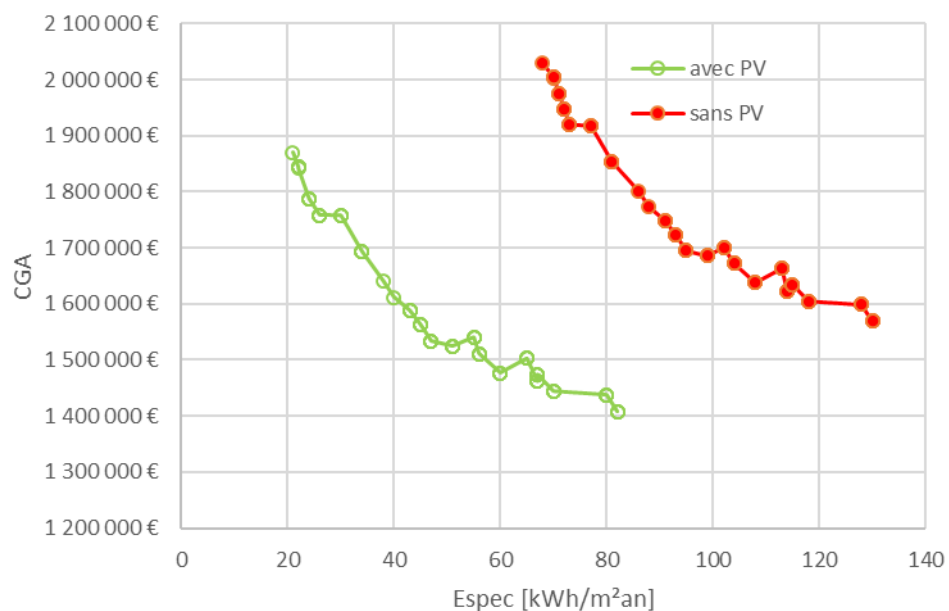
<b>Opt PV QZEN</b>		<b>-</b>		
<b>K</b>	<b>31</b>	<b>Umoy [W/m².K]</b>		
<b>BNC [kWh/an]</b>	17838	Fenêtres	1.83	F1-Ftoit1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	27.83	Portes	2	P1-PVC
<b>Ew</b>	42	Murs	0.22	M9-M12-M16
<b>Espec [kWh/m².an]</b>	67	Toits	0.21	T3
<b>CGA macro [€]</b>	1 461 589 €	Sols	0.24	S1-S5
<b>Investissement [€]</b>	1 332 113 €			
<b>Combinaison n°</b>	74615			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation mécanique, alimentations et extractions mécaniques, double flux avec échangeur,  $\eta=80\%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière biomasse collective.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite par la chaudière biomasse collective avec stockage.
- 18 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 15 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.



Comparaison des Fronts de Pareto avec sans installation photovoltaïque :



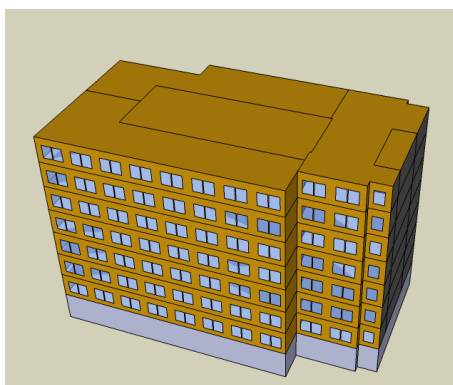
Avec l'installation de 15 kWc sur cette habitation, l'ensemble du front de Pareto se déplace vers la gauche pour l'amélioration du Espec de 48 kWh/m².an et vers le bas de 161.002 € en moyenne de CGA macroéconomique de moins.



## 9. Analyse des résultats des immeubles de bureaux existants

### 9.1. BUE1 - Grand bureau existant (avant 1945)

#### 9.1.1. Bâtiment de référence



#### Construit en zone urbaine non résidentielle

- Immeuble compact mitoyen de 7 niveaux
- Parking ouvert au rez-de-chaussée
- Mitoyen sur ses deux façades latérales
- Murs pleins en briques, simple vitrage
- Chauffage central gaz
- Chauffe-eau gaz
- Refroidissement : Climatisation par une machine à compression (EER 2)
- Ventilation : amenées naturelles, extractions mécaniques
- Valeur intrinsèque : 3 732 991 €
- Ach = 5 725 m<sup>2</sup>
- Vp = 15 533 m<sup>3</sup>

#### 9.1.2. Combinaisons calculées

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	4032
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	10

#### 9.1.3. Niveau de performance cost-optimum U des parois

Les combinaisons cost-optimum des U de parois sont reprises dans le tableau ci-dessous :

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>149</b>	- €	<b>4 451 545.00 €</b>	<b>4 661 169.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	314383 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE) (F1)					
	<b>5.11</b>	<b>1.36</b>	<b>118</b>	<b>259 112.00 €</b>	<b>4 100 621.00 €</b>	<b>4 297 406.00 €</b>
<b>Murs</b>	314379 M0.24(ME0.24) (M1)					
	<b>2.13</b>	<b>0.24</b>	<b>112</b>	<b>165 670.00 €</b>	<b>4 123 324.00 €</b>	<b>4 367 500.00 €</b>
<b>Toitures</b>	314377 T0.24(TP0.24) (T3)					
	<b>2.9</b>	<b>0.24</b>	<b>120</b>	<b>144 153.00 €</b>	<b>4 143 453.00 €</b>	<b>4 370 413.00 €</b>
<b>Sols</b>	314384 P10.24(PIE0.24) (S5)					
	<b>2.98</b>	<b>0.24</b>	<b>119</b>	<b>159 025.00 €</b>	<b>4 143 675.00 €</b>	<b>4 373 338.00 €</b>

9.1.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base					
	K	149		Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]		616 064	Fenêtres	5.11	
BNC [kWh/m².an]		121	Portes	/	
BNECS [kWh/an]		9 343	Murs	2.13	
BNF [kWh/an]		15 043	Toits	2.9	
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]		152 449	Sols	2.98	
Ew		415			
CGA macro [€]		4 451 545 €			

Optimum					
	K	50		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]		203 138	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]		40	Portes	/	/
BNF [kWh/an]		16 195	Murs	0.2	M1
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]		46 907	Toits	0.2	T3
Ew		120	Sols	2.98	-
CGA macro [€]		2 227 404 €			
Investissement [€]		863 729 €			
Combinaison n°		313915			

Caractéristiques techniques :

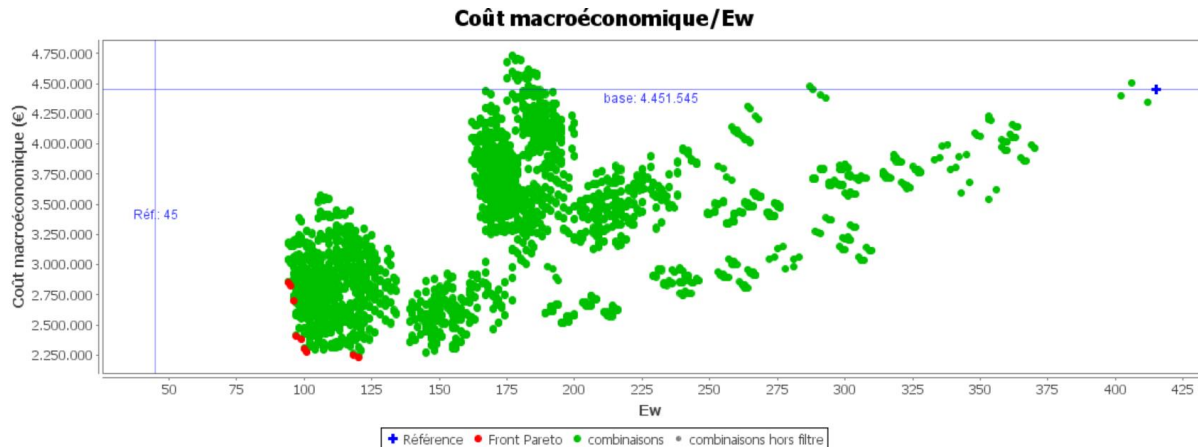
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, extractions mécaniques).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par la chaudière gaz avec un stockage.
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 67% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 8% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. Ce système assure également le refroidissement. L'eau chaude sanitaire est produite par une chaudière gaz à condensation existante avec stockage. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

La combinaison correspondant au cost-optimum « U conformes » prévoit également une isolation des planchers et un renforcement de l'isolation des toitures

À noter que la quasi-totalité des combinaisons testées sont rentables par rapport au cas de base.

<b>Optimum U<sub>conforme</sub></b>					
	<b>K</b>			<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	19	63 454	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	12		Portes	/	/
<b>BNF [kWh/an]</b>		52 732	Murs	0.2	M1
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>		46 907	Toits	0.15	T3
<b>Ew</b>		101	Sols	0.2	S5
<b>CGA macro [€]</b>		2 274 468 €			
<b>Investissement [€]</b>		993 975 €			
<b>Combinaison n°</b>		313675			

Caractéristiques techniques :

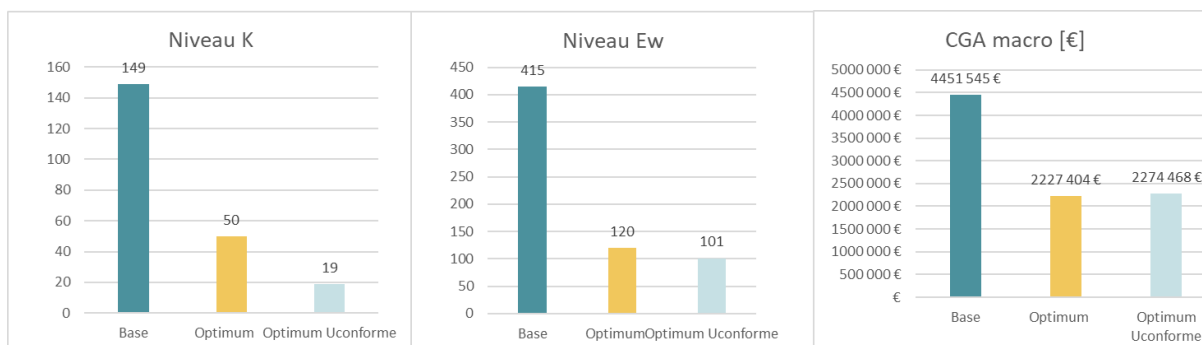
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base.
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'ECS est produite par la chaudière gaz avec un stockage.
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 90% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 251% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



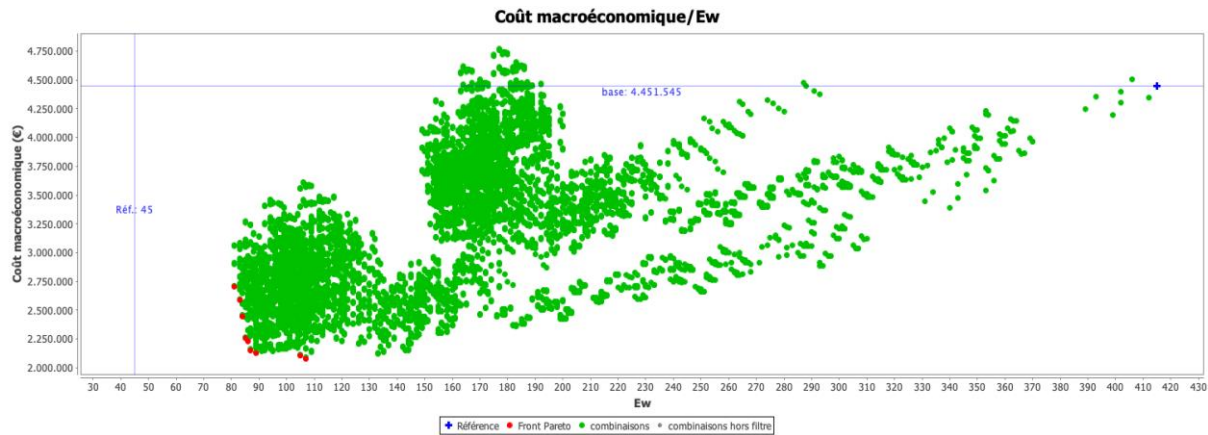
Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum « U conformes » est 2,1 % supérieur au cost-optimum « absolu », mais reste inférieur de 48,9 % au CGA du cas de base inchangé. Il est donc rentable, tout en permettant une réduction de 15 % de l'indicateur Ew, par rapport au cost-optimum « absolu ». Pour cette typologie, donc, l'optimum « U conformes » est quasi cost-optimum.

#### 9.1.5. Niveau de performance cost-optimum Ew avec une installation photovoltaïque

Optimum PV					
	K	50		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]		203 138	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]		40	Portes	/	/
BNF [kWh/an]		16 195	Murs	0.2	M1
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]		46 907	Toits	0.2	T3
Ew		107	Sols	2.98	-
CGA macro [€]		2 077 643 €			
Investissement [€]		903 426 €			
Combinaison n°		315795			

Caractéristiques techniques :

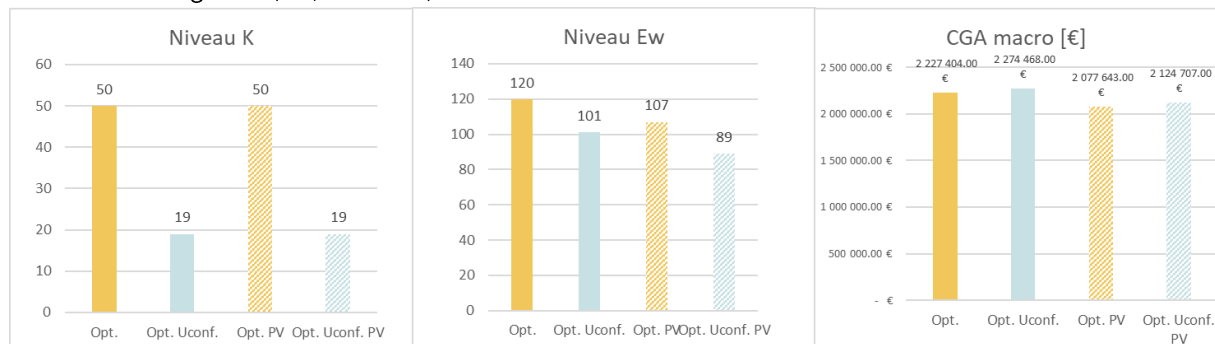
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, extractions mécaniques).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par la chaudière gaz avec un stockage.
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4W/m² - L500).



<b>Optimum U<sub>conforme</sub> PV</b>					
	<b>K</b>	<b>19</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	63 454		Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	12		Portes	/	/
<b>BNF [kWh/an]</b>	52 732		Murs	0.2	M1
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	46 907		Toits	0.15	T3
<b>Ew</b>	89		Sols	0.2	S5
<b>CGA macro [€]</b>	2 124 707 €				
<b>Investissement [€]</b>	1 033 672 €				
<b>Combinaison n°</b>	315379				

#### Caractéristiques techniques :

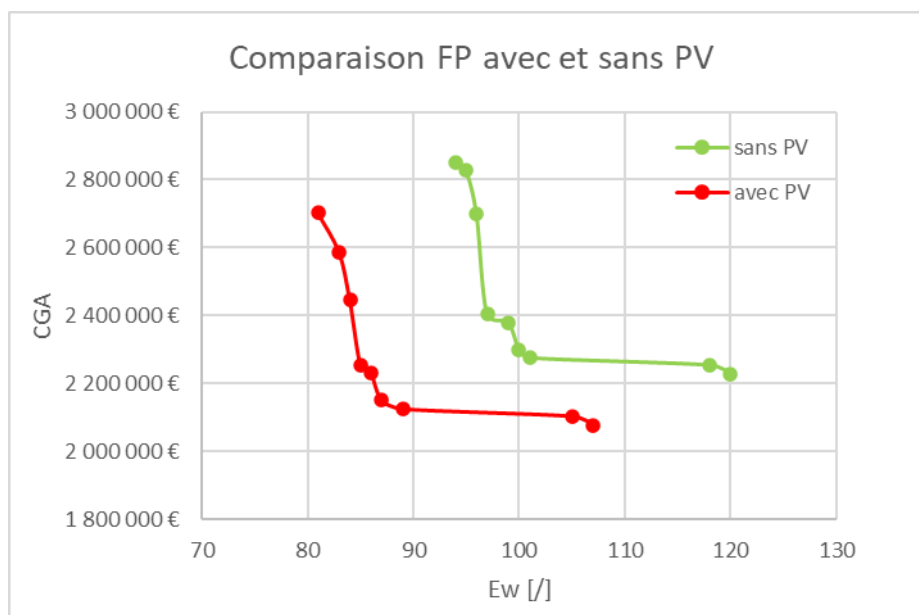
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, extractions mécaniques).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62)
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par une chaudière gaz avec un stockage.
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Climatisation : pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).



Dans les 2 optimums sélectionnés (« absolu » et « U conformes »), une installation de 25 kWc sur cet immeuble implique une amélioration du Ew de 13 points, pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150.000 €. La diminution du Ew est de 12 points dans l'optimum « U conformes ».

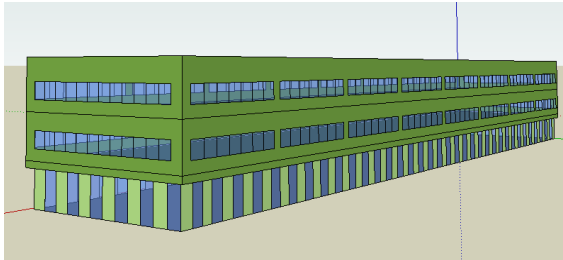
À noter que, dans toutes les simulations PV, les résultats indiquent un simple décalage du FP (diminution constante du CGA et des niveaux Ew). Les conclusions que nous avons tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :



## 9.2. BUE2 - Petit bureau existant (1970)

### 9.2.1. Bâtiment de référence



- Construit dans les années 1970, implanté dans un parc industriel
- Immeuble peu compact, 3 niveaux
- Libre sur ses 4 façades
- Murs creux, double vitrage
- Chauffage central gaz
- Eau chaude sanitaire par boiler électrique et chauffe-eau gaz
- Refroidissement : Climatisation par une machine à compression (EER 2)
- Ventilation : amenées naturelles, extractions mécaniques
- Valeur intrinsèque : 4 168 327 €
- Ach = 4 953 m<sup>2</sup>
- Vp = 18 352 m<sup>3</sup>

### 9.2.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	12 240
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	15

### 9.2.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>78</b>	- €	5 298 436.00 €	5 763 545.00 €
<b>Fenêtres</b>	315391 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE) (F1)					
	<b>3.85</b>	<b>1.36</b>	<b>53</b>	<b>480 832.00 €</b>	<b>5 081 677.00 €</b>	<b>5 576 569.00 €</b>
<b>Murs</b>	315387 M0.24(ME0.24) (M1)					
	<b>0.95</b>	<b>0.24</b>	<b>67</b>	<b>203 541.00 €</b>	<b>5 284 750.00 €</b>	<b>5 790 656.00 €</b>
<b>Toitures</b>	315385 T0.20(T0.20) (T2)					
	<b>0.81</b>	<b>0.2</b>	<b>69</b>	<b>234 015.00 €</b>	<b>5 369 017.00 €</b>	<b>5 885 110.00 €</b>
<b>Sols</b>	315390 Pl0.24(PlE0.24,PlSol0.24) (S4,S5)					
	<b>0.62</b>	<b>0.24</b>	<b>72</b>	<b>289 031.00 €</b>	<b>5 494 014.00 €</b>	<b>6 022 311.00 €</b>

### 9.2.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>

Base			
	K	78	U <sub>moy</sub> [W/m <sup>2</sup> .K]
BNC [kWh/an]	626 165	Fenêtres	3.85

<b>BNC [kWh/m².an]</b>	126	Portes	0
<b>BNECS [kWh/an]</b>	4 372	Murs	0.95
<b>BNF [kWh/an]</b>	36 385	Toits	0.81
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	198 280	Sols	0.62
<b>Ew</b>	186		
<b>CGA macro [€]</b>	5 298 436 €		

Optimum		-		
	K	78	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	643 558	Fenêtres	3.85	-
BNC [kWh/m².an]	130	Portes	/	-
BNF [kWh/an]	31 448	Murs	0.95	-
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	61 009	Toits	0.81	-
Ew	83	Sols	0.62	-
CGA macro [€]	3 271 728 €			
Investissement [€]	324 005 €			
Combinaison n°	314593			

\*Pour ce bâtiment de bureaux, les portes sont encodées comme des fenêtres.

Caractéristiques techniques :

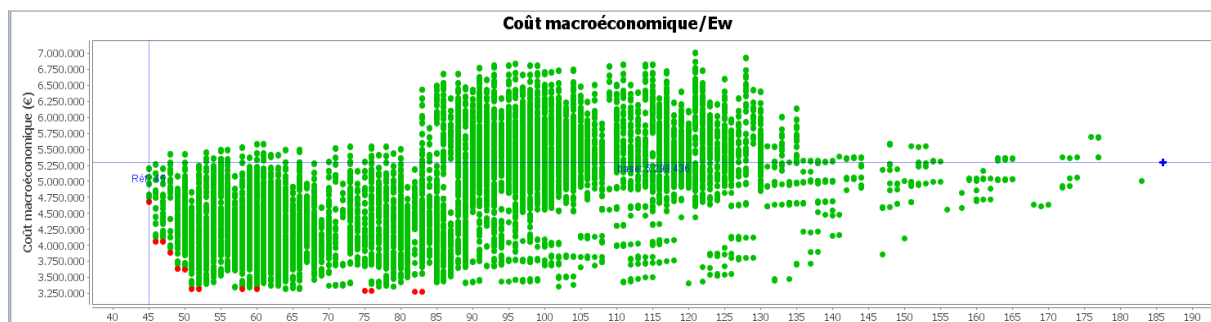
- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit  $v_{50}$  de  $9.5 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, extractions mécaniques).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par la chaudière gaz avec un stockage.
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont augmenté de 3% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 14% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun remplacement des portes et fenêtres, ni aucune isolation thermique des parois de déperdition.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. Ce système assure également le refroidissement. L'eau



chaude sanitaire est produite par une chaudière gaz à condensation existante avec stockage. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

Bien que dans ce scénario cost-optimum les travaux ne concernent que les systèmes, d'autres scénarii comprenant une amélioration de l'enveloppe permettent d'atteindre une bien meilleure performance énergétique sans pour autant diminuer la rentabilité des investissements sur la période d'évaluation.

En effet, le Front de Pareto relativement plat du graphique démontre que plusieurs scénarii de rénovation permettent d'atteindre des résultats  $E_w$  quasi-optimum. Par exemple, le scénario présentant un niveau  $E_w$  de 51 n'a un CGA que de 1.5 % supérieur au cost-optimum « absolu ». Ce scénario comprend une amélioration de l'isolation du toit et des murs à 0,2 W/m<sup>2</sup>.K et le changement des châssis par de nouveaux, équipés de double vitrage ( $U_g = 1.0$  W/m<sup>2</sup>.K ;  $U_w = 1,38$  W/m<sup>2</sup>.K). La production de froid et de chaud est similaire au CO. L'ECS quant à elle est assurée par un boiler thermodynamique.

Optimum U conforme					
	K	25		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	123 261		Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	25		Portes	/	/
BNF [kWh/an]	58 406		Murs	0.2	M1
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	61 009		Toits	0.2	T2
Ew	49		Sols	0.24	S4-S5
CGA macro [€]	3 631 633 €				
Investissement [€]	1 668 817 €				
Combinaison n°	315283				

Caractéristiques techniques :

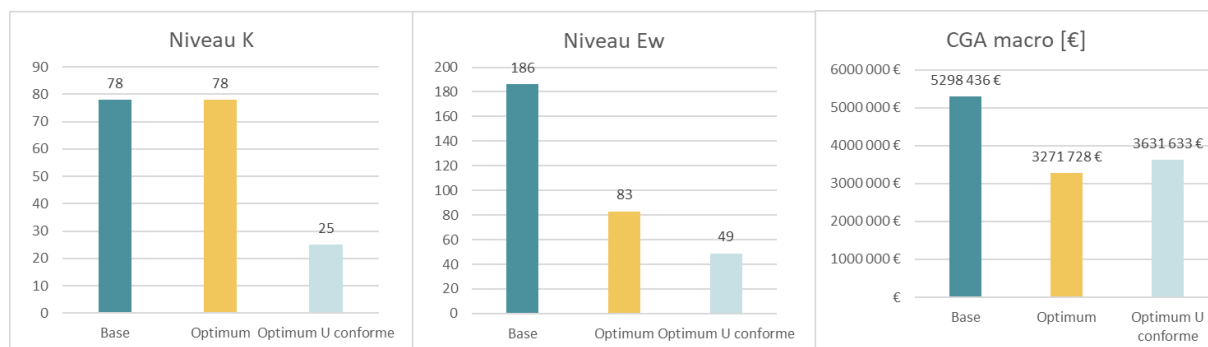
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2$  m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>. Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80$  %, équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite via un boiler thermodynamique.
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4W/m<sup>2</sup> - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 80% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 61% par rapport au cas de base.

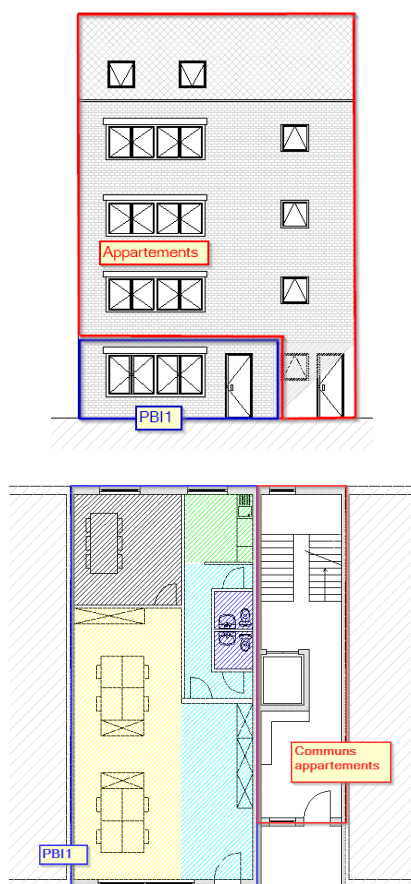
La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



L'optimum « U conformes » est caractérisé par des résultats énergétiques indéniablement meilleurs que l'optimum « absolu » mais avec une augmentation du CGA macroéconomique de 11,0% par rapport à l'optimum - ce qui reste largement inférieur (-31,5 %) au CGA du cas de base.

### 9.3. BUE3 - Petit bureau existant (1984)

#### 9.3.1. Bâtiment de référence



- Situé au rez d'un immeuble existant
- Bâtiment mitoyen sur caves
- Murs creux, planchers très légèrement isolés
- Double vitrage
- Chauffage central gaz
- Eau chaude sanitaire par boiler électrique
- Ventilation : amenées naturelles, évacuations naturelles
- Refroidissement : Climatisation par une machine à compression (EER 2)
- Valeur intrinsèque : 143 706 €
- Ach = 105 m<sup>2</sup>
- Vp = 337 m<sup>3</sup>

#### 9.3.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	48 456
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	10

#### 9.3.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>54</b>	<b>- €</b>	<b>57 083.00 €</b>	<b>61 612.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	315179 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>2.92</b>	<b>1.36</b>	<b>45</b>	<b>10 242.00 €</b>	<b>63 399.00 €</b>	<b>69 692.00 €</b>
<b>Murs</b>	315210 M0.20(ME0.20),PI0.24(PIcave0.24) (M1,S1)					
	<b>0.58</b>	<b>0.2</b>	<b>33</b>	<b>8 805.00 €</b>	<b>58 108.00 €</b>	<b>64 333.00 €</b>
<b>Toitures</b>	0					
	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>
<b>Sols</b>	315186 PI0.24(PIcave0.24) (S1)					
	<b>0.55</b>	<b>0.24</b>	<b>38</b>	<b>2 652.00 €</b>	<b>54 016.00 €</b>	<b>58 988.00 €</b>

### 9.3.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$

<b>Base</b>			
	K	54	Umoy [W/m².K]
<b>BNC [kWh/an]</b>	7 429		Fenêtres 2.92
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	71		Portes 2.8
<b>BNECS [kWh/an]</b>	113		Murs 0.58
<b>BNF [kWh/an]</b>	210		Toits /
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	2 855		Sols 0.55
<b>Ew</b>	151		
<b>CGA macro [€]</b>	57 083 €		

\*Ce bureau ne présente pas de toit/plafond parce qu'il se trouve au rez-de-chaussée d'un immeuble à appartements - le plafond du rez-de-chaussée est donc considéré « mitoyen » et n'intervient pas dans les calculs énergétiques.

<b>Optimum</b>				
	K	54	Umoy [W/m².K]	Groupe
<b>BNC [kWh/an]</b>	7 733		Fenêtres 2.92	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	73		Portes 2.8	-
<b>BNF [kWh/an]</b>	170		Murs 0.58	-
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	878		Toits /*	-
<b>Ew</b>	114		Sols 0.55	-
<b>CGA macro [€]</b>	41 608 €			
<b>Investissement [€]</b>	2 359 €			
<b>Combinaison n°</b>	315178			

Caractéristiques techniques :

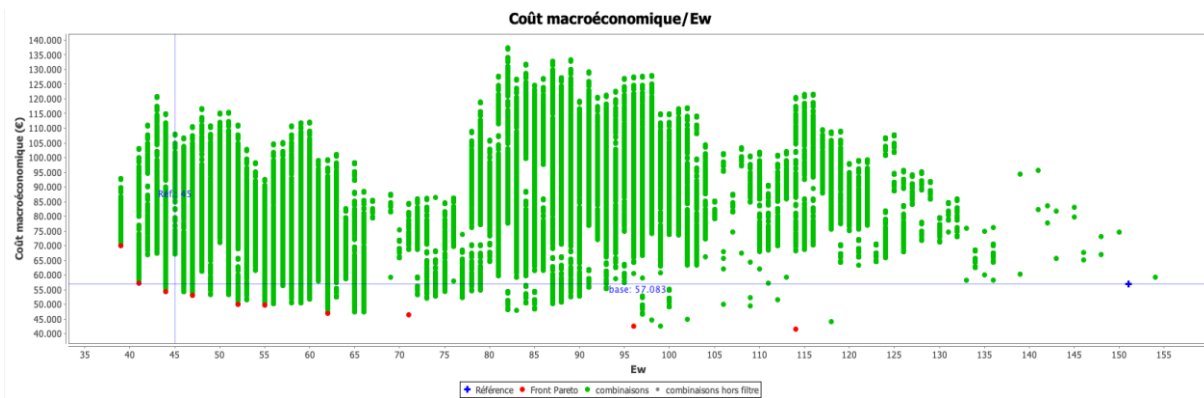
- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit  $v_{50}$  de  $8.5 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, évacuations naturelles).
- Production de chaleur identique au cas de base (chaudière gaz).
- Émission de chaleur identique au cas de base (radiateurs).
- Système eau chaude sanitaire identique au cas de base (boiler électrique).
- Refroidissement du cas de base (machine à compression).
- Éclairage LED ( $4\text{W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont augmenté de 4% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 19% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



Bien que la plupart des solutions ressortant du Front de Pareto de ce bâtiment soient rentables, la majorité des combinaisons de mesures testées ne sont pas rentables sur la période d'évaluation.

Cela est probablement dû au niveau de performance énergétique du cas de base. Les parois sont déjà isolées, bien qu'insuffisamment par rapport à la législation actuelle, et les systèmes sont relativement performants.

La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit uniquement le remplacement de l'éclairage par du LED.

Il est toutefois visible sur le graphique qu'un scénario voit le  $E_w$  diminuer de 18 points, tout en limitant l'augmentation du CGA optimum de seulement 2.2 %, tout en restant rentable. Ce résultat est obtenu en remplaçant l'éclairage existant par du LED et le corps de chauffe par une chaudière mixte (chauffage + eau chaude sanitaire) à condensation sans stockage.

Optimum U conforme				
	K	22	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	2 936	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	28	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	184	Murs	0.2	M1
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	878	Toits	/	/
Ew	62	Sols	0.2	S1
CGA macro [€]	47 034 €			
Investissement [€]	23 353 €			
Combinaison n°	315206			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.

- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenée naturelle, évacuation naturelle).
- Production de chaleur identique au cas de base (chaudière gaz).
- Émission de chaleur identique au cas de base (radiateurs).
- Système eau chaude sanitaire identique au cas de base (boiler électrique).
- Refroidissement du cas de base (machine à compression).
- Éclairage LED (4W/m<sup>2</sup> - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

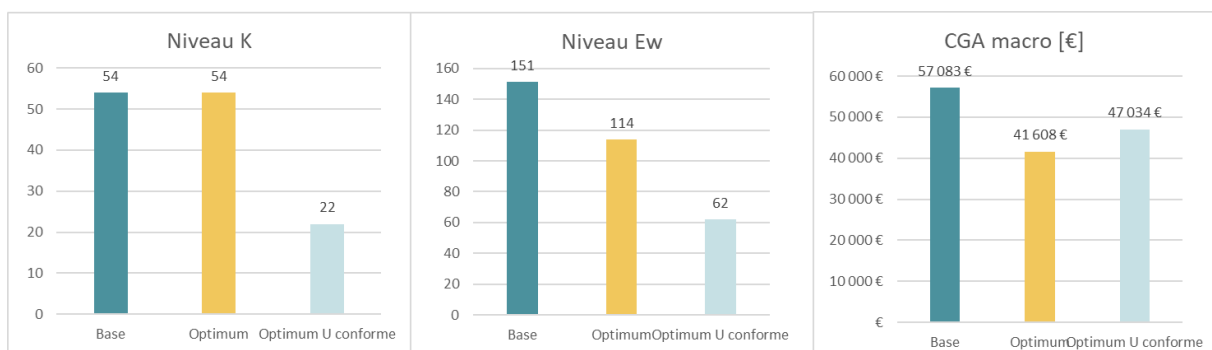
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 60% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 12% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.

La combinaison correspondant au cost-optimum qui permet d'atteindre des valeurs U conformes aux exigences prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition.

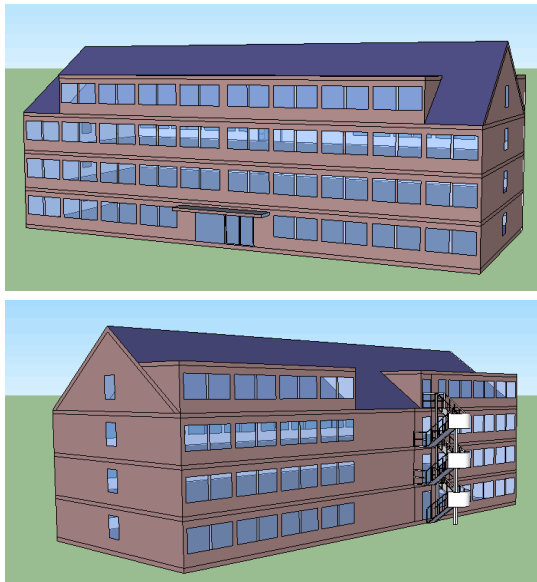
L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.



L'optimum « U conformes » est caractérisé par des résultats énergétiques indéniablement meilleurs que l'optimum « absolu ». Par contre, une augmentation du CGA macroéconomique de 13,0 % par rapport à l'optimum en découle - ce qui reste largement inférieur (-17,6 %) au CGA du cas de base et est donc rentable. À noter que, bien que la différence de CGA par rapport au cost-optimum « absolu » soit relativement élevée (+13 %), il ne représente qu'un surplus, en valeur absolue, de 5 426 euros.

## 9.4. BUE4 - Bureau existant (1996)

### 9.4.1. Bâtiment de référence



- Construit en périphérie urbaine
- Bâtiment compact 4 niveaux sur caves
- Libre sur ses 4 façades
- Murs creux, toiture et planchers isolés
- Double vitrage
- Chauffage central gaz
- Chauffe-eau gaz
- Refroidissement : Climatisation par une machine à compression (EER 2.5)
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupération de chaleur
- Valeur intrinsèque : 2 723 316 €
- Ach = 2 247 m<sup>2</sup>
- Vp = 7 272 m<sup>3</sup>

### 9.4.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	12 600
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	16

### 9.4.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			49	- €	1 337 524.00 €	1 458 600.00 €
<b>Fenêtres</b>	315391 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE) (F1)					
	2.49	1.36	39	178 960.00 €	1 444 792.00 €	1 599 881.00 €
<b>Murs</b>	315389 M0.24(ME0.24) (M1)					
	0.51	0.24	43	117 236.00 €	1 436 075.00 €	1 586 221.00 €
<b>Toitures</b>	315385 T0.24(T0.24,TP0.24) (T2,T3)					
	0.48	0.24	45	107 209.00 €	1 431 777.00 €	1 577 904.00 €
<b>Sols</b>	315395 Pl0.24(PlCave0.24) (S1)					
	0.59	0.24	44	6 330.00 €	1 319 744.00 €	1 444 023.00 €

### 9.4.4. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub>

Base			
	K	49	U <sub>moy</sub> [W/m <sup>2</sup> .K]
BNC [kWh/an]	130 869		Fenêtres 2.49

<b>BNC [kWh/m².an]</b>	58	Portes	/
<b>BNECS [kWh/an]</b>	1 423	Murs	0.51
<b>BNF [kWh/an]</b>	12 474	Toits	0.48
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	65 794	Sols	0.59
<b>Ew</b>	174		
<b>CGA macro [€]</b>	1 337 524 €		

<b>Optimum</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	49	Fenêtres	2.49	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	137 461	Portes	/	/
<b>BNF [kWh/an]</b>	61	Murs	0.51	-
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	10 186	Toits	0.48	-
<b>Ew</b>	20 244	Sols	0.59	-
<b>CGA macro [€]</b>	81			
<b>Investissement [€]</b>	854 340 €			
<b>Combinaison n°</b>	124 620 €			
	314593			

Caractéristiques techniques :

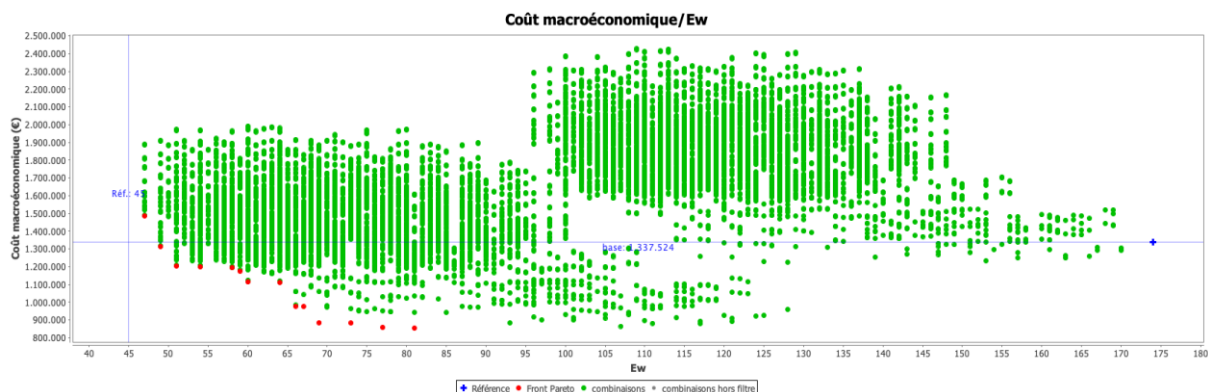
- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit un  $v_{50}$  de  $7 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ .
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupération de chaleur).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- Système eau chaude sanitaire identique au cas de base (chauffe-eau gaz).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED ( $4\text{W}/\text{m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont augmenté de 5% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 18% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum ne prévoit aucun remplacement des portes et fenêtres, ni aucune isolation thermique supplémentaire des parois de déperdition.



Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. Ce système assure également le refroidissement. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

Même si la solution cost optimale consiste uniquement à remplacer le système de production de chaleur et de froid et à remplacer l'éclairage, toutes les combinaisons situées sur le Front de Pareto, excepté une, sont rentables. Parmi elles, il y a des combinaisons qui comprennent l'isolation de toutes les parois, combinées à des mesures systèmes. Donc, malgré une rentabilité moindre, isoler toutes les parois de ce bâtiment peut rester rentable et permettre d'atteindre des performances élevées.

Par exemple, un Ew de 51 peut être atteint en rénovant l'ensemble des parois, en remplaçant les systèmes chauffage- refroidissement et eau chaude par une PAC air-eau réversible et un boiler thermodynamique, en plaçant de l'éclairage LED et une ventilation double flux, tout en restant rentable par rapport au cas de base.

<b>Optimum U conforme</b>					
	<b>K</b>			<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	21	61 882	Fenêtres	1.36	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	28		Portes	/	/
<b>BNF [kWh/an]</b>	21 547		Murs	0.2	M1
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	20 244		Toits	0.15	T2-T3
<b>Ew</b>	59		Sols	0.2	S1
<b>CGA macro [€]</b>		1 175 560 €			
<b>Investissement [€]</b>		553 864 €			
<b>Combinaison n°</b>		314684			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupération de chaleur).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par un boiler thermodynamique.
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

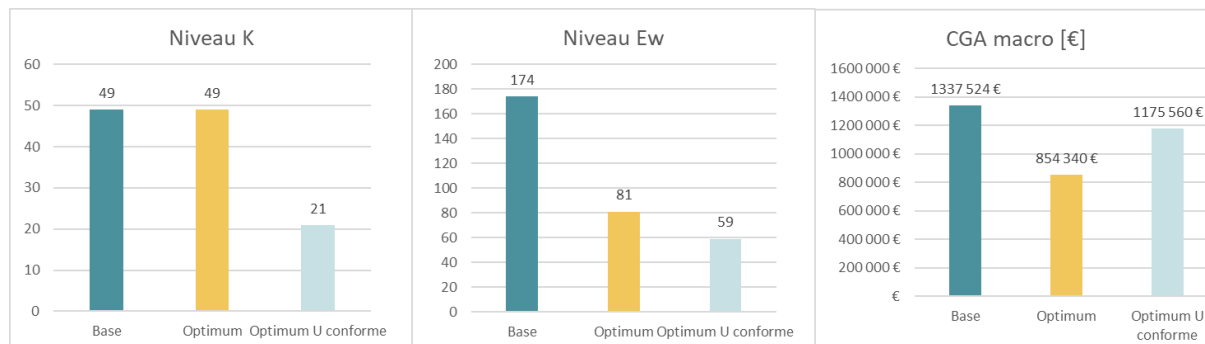
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 53% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 73% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.

La combinaison correspondant au cost-optimum qui permet d'atteindre des valeurs U conformes aux exigences en vigueur prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition.

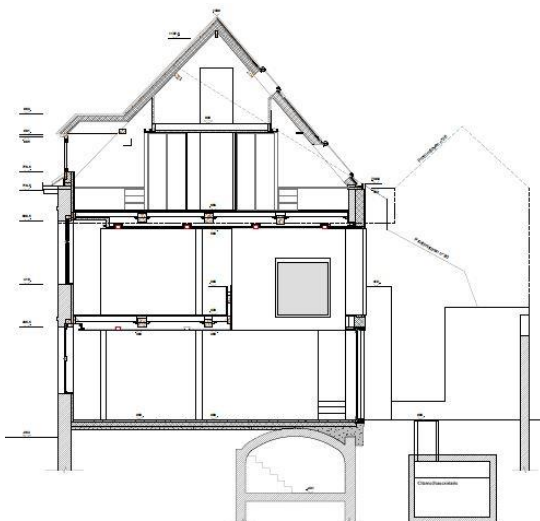
Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. L'eau chaude sanitaire est produite par un boiler thermodynamique. Le refroidissement est également assuré par la pompe à chaleur air-eau réversible. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.



L'optimum « U conformes » est caractérisé par des résultats énergétiques indéniablement meilleurs que l'optimum « absolu ». Par contre, une augmentation du CGA macroéconomique de 37,6% par rapport à l'optimum en découle - ce qui reste inférieur (-12,1%) au CGA du cas de base et donc rentable.

## 9.5. BUE5 - Bureau existant (<1945)

### 9.5.1. Bâtiment de référence



- Maison de maître du 18<sup>e</sup> siècle
- Transformée début 1990 en bureaux
- Bâtiment mitoyen
- Murs pleins isolés, planchers non isolés, toiture légèrement isolée
- Double vitrage
- Chauffage central gaz
- Eau chaude sanitaire : boiler gaz
- Pas de système de refroidissement.
- Ventilation : amenées naturelles, extractions mécaniques
- Valeur intrinsèque : 151 683 €
- Ach = 278 m<sup>2</sup>
- Vp = 934 m<sup>3</sup>

### 9.5.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	230 904
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	15

### 9.5.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	Umoy,base	Umoy,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>81</b>	<b>- €</b>	<b>208 391.00 €</b>	<b>228 455.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	315398 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit 1,Pext2) (F1,F4,P2-P)					
	<b>3.52</b>	<b>1.52</b>	<b>57</b>	<b>49 928.00 €</b>	<b>244 495.00 €</b>	<b>276 655.00 €</b>
<b>Murs</b>	315401 M0.20(ME0.20,Mcave0.2) (M1,M12)					
	<b>0.56</b>	<b>0.2</b>	<b>72</b>	<b>26 752.00 €</b>	<b>226 872.00 €</b>	<b>252 555.00 €</b>
<b>Toitures</b>	315407 T0.20(T0.20) (T2)					
	<b>0.48</b>	<b>0.2</b>	<b>75</b>	<b>28 907.00 €</b>	<b>231 570.00 €</b>	<b>257 738.00 €</b>
<b>Sols</b>	315405 Pl0.24(PlCave0.24,PlSol0.24) (S1,S4)					
	<b>0.92</b>	<b>0.24</b>	<b>70</b>	<b>16 116.00 €</b>	<b>214 573.00 €</b>	<b>238 030.00 €</b>

#### 9.5.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$

<b>Base</b>				
<b>K</b>	81		<b>Umoy [W/m².K]</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	28 829	Fenêtres	3.52	
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	104	Portes	2.28	
<b>BNECS [kWh/an]</b>	225	Murs	0.56	
<b>BNF [kWh/an]</b>	1 317	Toits	0.48	
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	6 121	Sols	0.92	
<b>Ew</b>	195			
<b>CGA macro [€]</b>	208 391 €			

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	81		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	29 373	Fenêtres	3.52	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	105	Portes	2.28	-
<b>BNF [kWh/an]</b>	1 004	Murs	0.56	-
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	1 883	Toits	0.48	-
<b>Ew</b>	136	Sols	0.92	-
<b>CGA macro [€]</b>	146 761 €			
<b>Investissement [€]</b>	23 682 €			
<b>Combinaison n°</b>	316017			

Caractéristiques techniques :

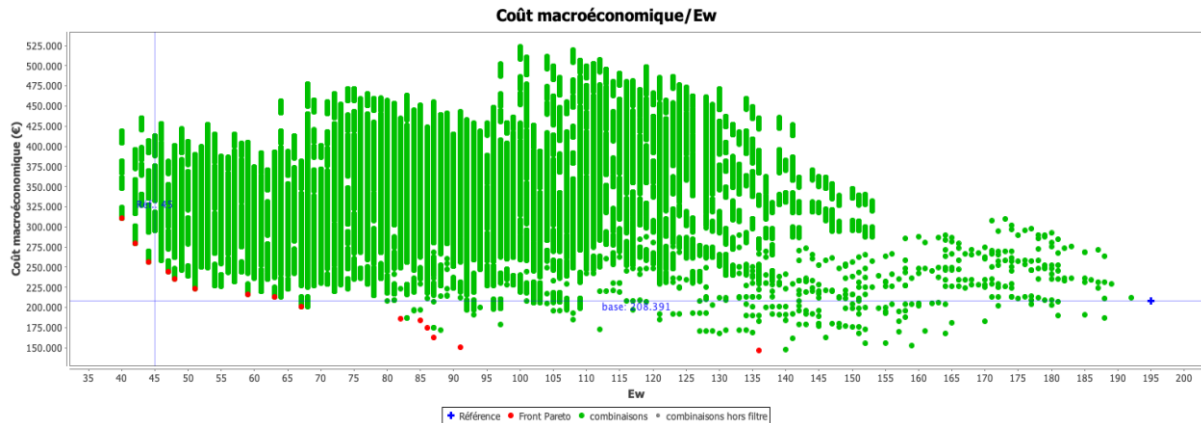
- Etanchéité à l'air identique à celle du cas de base, soit un  $v_{50}$  de 12 m³/h.m².
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, extractions mécaniques).
- La production de chauffage est assurée par une nouvelle chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est identique au cas de base (radiateurs).
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont augmenté de 2% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 24% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement de la production de chauffage, de refroidissement et d'eau chaude sanitaire et le remplacement de l'éclairage par du LED.

Pour ce bâtiment, la plupart des solutions ne sont pas rentables lorsqu'on les compare au CGA du cas de base inchangé. Il semble que les quelques solutions rentables ne concernent que des mesures systèmes, et parfois l'isolation du toit. Un point du Front Pareto, situé à Ew67, prévoit également le remplacement des châssis, mais présente un CGA plus élevé que l'optimum, quasi équivalent au CGA du cas de base inchangé.

Il est toutefois visible sur le graphique qu'un scénario voit  $E_w$  diminuer drastiquement, tout en gardant un CGA macro-économique très proche de celui de cet optimum « absolu ». Le point situé à Ew 91 présente une augmentation de 2,5% du CGA. Ce résultat, comparé à l'optimum « absolu », est obtenu en remplaçant la production de chaud et de froid par une PAC air eau réversible.

Optimum U conforme					
	K	30		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	9 887		Fenêtres	1.49	F1-F4
BNC [kWh/m².an]	36		Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	2 921		Murs	0.2	M1-M12
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	1 883		Toits	0.15	T2
Ew	51		Sols	0.2	S1-S4
CGA macro [€]	223 613 €				
Investissement [€]	148 568 €				
Combinaison n°	315691				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (amenées naturelles, extractions mécaniques).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- La production d'eau chaude sanitaire est inchangée par rapport au cas de base (boiler gaz sans stockage).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).

- Éclairage LED (4W/m<sup>2</sup> - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

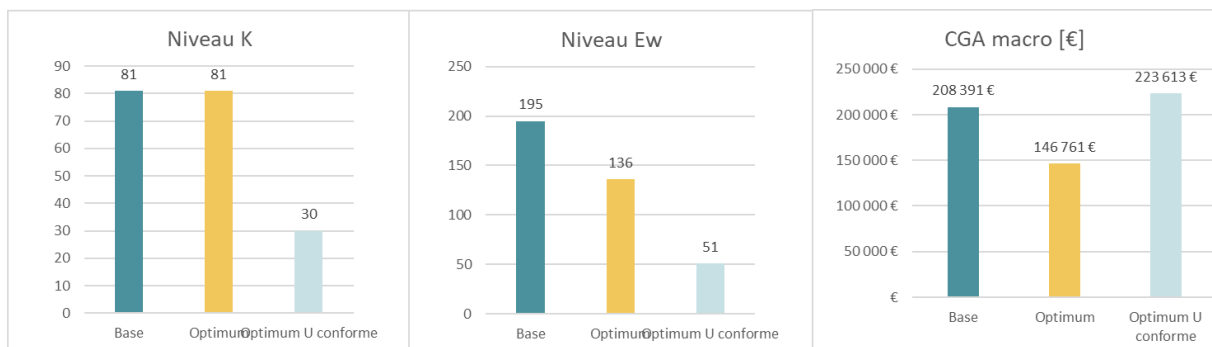
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 66% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 122% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.

La combinaison correspondant au cost-optimum qui permet d'atteindre des valeurs U conformes aux exigences en vigueur prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. L'eau chaude sanitaire est produite par le chauffe-eau gaz existant. Le refroidissement est également assuré par la pompe à chaleur air-eau réversible. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.



L'optimum « U conformes » est caractérisé par une amélioration énergétique de 85 points Ew par rapport à l'optimum « absolu ». Cette amélioration entraîne une augmentation du CGA macroéconomique de 52,4 % par rapport à l'optimum et de +7,3 % par rapport au CGA du cas de base, ce qui rend donc cette solution non rentable sur la période d'évaluation.

## 10. Analyse des résultats des immeubles de bureaux neufs

### 10.1. BUN1 - bâtiment de bureau 4 façades, neuf

#### 10.1.1. Bâtiment de référence



- Bâtiment 4 façades
- 3 niveaux dont parking et locaux techniques au rez-de-chaussée
- Murs crépi, toiture et plancher isolés
- Double vitrage
- Chauffage central gaz à condensation
- Echaude sanitaire par chauffe-eau gaz
- Refroidissement : Climatisation par une machine à compression (EER 3)
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupération de chaleur
- Protections solaires intérieures
- Etanchéité à l'air =  $4\text{ m}^3/\text{h.m}^2$
- Valeur intrinsèque : 3 384 197 €
- $A_{ch} = 1\,668\text{ m}^2$
- $V_p = 5\,503\text{ m}^3$

#### 10.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	40 675
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	22

#### 10.1.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ et K du bâtiment

Base			
	K		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]
BNC [kWh/an]	55 996	Fenêtres	1.49
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	39	Portes	1.49
BNECS [kWh/an]	3 114	Murs	0.24
BNF [kWh/an]	16 275	Toits	0.24
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	11 911	Sols	0.24
$E_w$	45		
CGA macro [€]	3 945 867 €		



<b>Optimum</b>					
	<b>K</b>			<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	32	55 996	Fenêtres	1.49	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	39		Portes	1.49	-
<b>BNF [kWh/an]</b>		16 275	Murs	0.24	M3-M13-M16
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>		11 911	Toits	0.24	T1-T3
	<b>Ew</b>	<b>56</b>	Sols	0.24	S1-S2-S5
<b>CGA macro [€]</b>		3 910 713 €			
<b>Investissement [€]</b>		3 361 767 €			
<b>Combinaison n°</b>		317825			

Caractéristiques techniques :

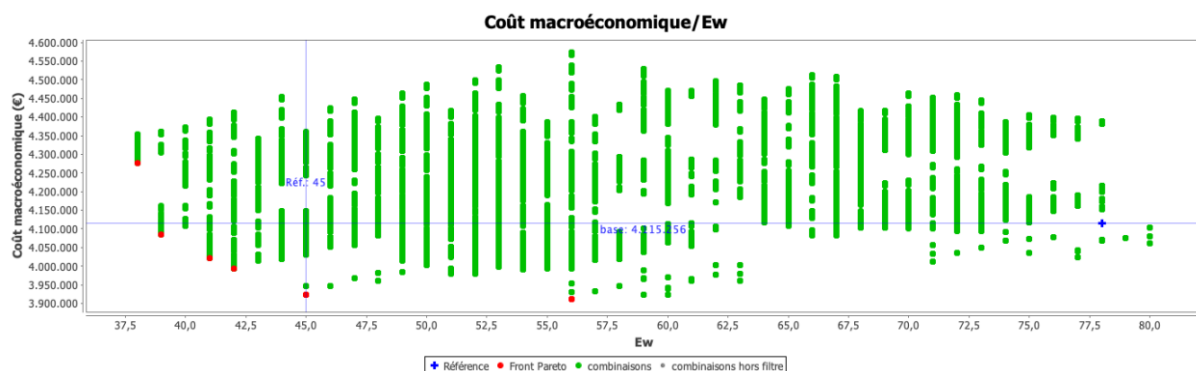
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . La performance de l'enveloppe permet d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage sont inchangés.

Les besoins nets de refroidissement sont inchangés.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage est inchangée.



Le cost-optimum ne permet pas d'atteindre un niveau  $E_w$  45. L'optimum « absolu » n'est donc pas « PEB conforme ».



<b>Optimum PEB conforme</b>				
	<b>K</b>	32	<b>Umoy [W/m².K]</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>		55 996	Fenêtres	1.49 F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>		39	Portes	1.49 -
<b>BNF [kWh/an]</b>		16 275	Murs	0.24 M3-M13-M16
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>		11 911	Toits	0.24 T1-T3
<b>Ew</b>		45	Sols	0.24 S1-S2-S5
<b>CGA macro [€]</b>		3 922 998 €		
<b>Investissement [€]</b>		3 380 720 €		
<b>Combinaison n°</b>		317549		

Caractéristiques techniques :

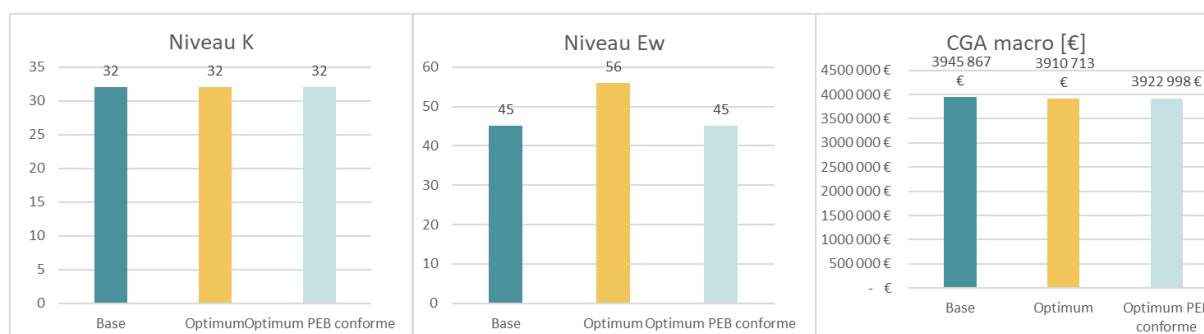
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . La performance de l'enveloppe permet d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80\%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-eau (EER 3.8).
- Eclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage sont inchangés.

Les besoins nets de refroidissement sont inchangés.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage est inchangée.



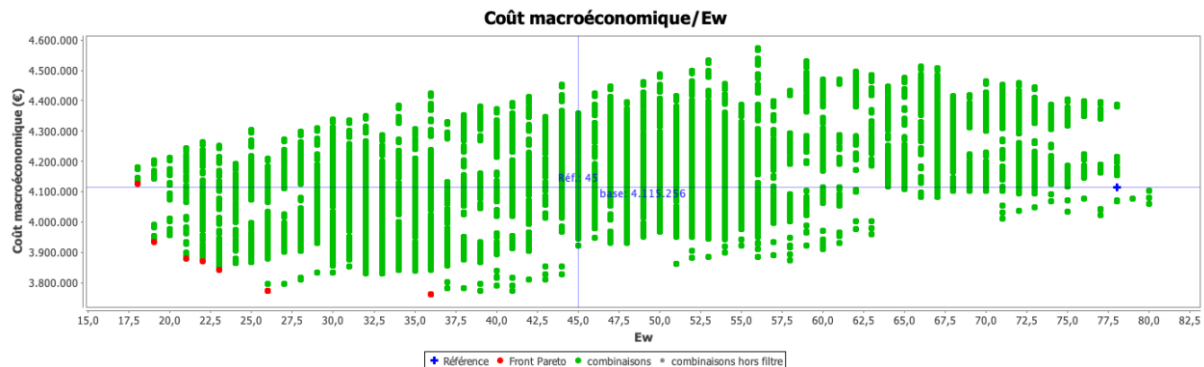
La combinaison correspondant au cost-optimum « PEB conforme » prévoit une production de chaleur par une chaudière gaz à condensation, qui produit également l'eau chaude sanitaire (sans stockage). Le refroidissement est également assuré par la pompe à chaleur air-eau réversible. L'ensemble de l'éclairage est du LED. Le CGA obtenu, bien que 0,3 % plus élevé que le CGA du cost optimum « absolu », reste 0,6 % inférieur au CGA du cas de base. Ces très faibles différences de CGA indiquent qu'il est donc possible d'atteindre les exigences actuelles avec des solutions cost optimales.

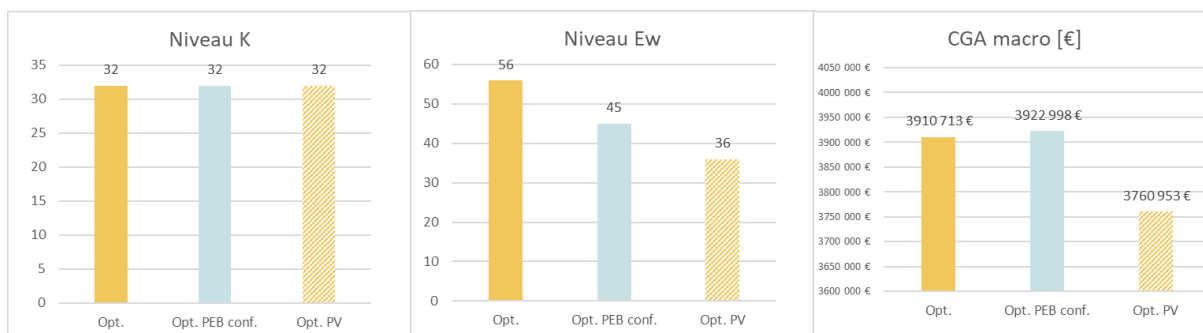
#### 10.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque

Optimum PV					
	K	32		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	55 996		Fenêtres	1.49	F1
BNC [kWh/m².an]	39		Portes	1.49	
BNF [kWh/an]	16 275		Murs	0.24	M3-M13-M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	11 911		Toits	0.24	T1-T3
Ew	36		Sols	0.24	S1-S2-S5
CGA macro [€]	3 760 953 €				
Investissement [€]	3 401 464 €				
Combinaison n°	320525				

#### Caractéristiques techniques :

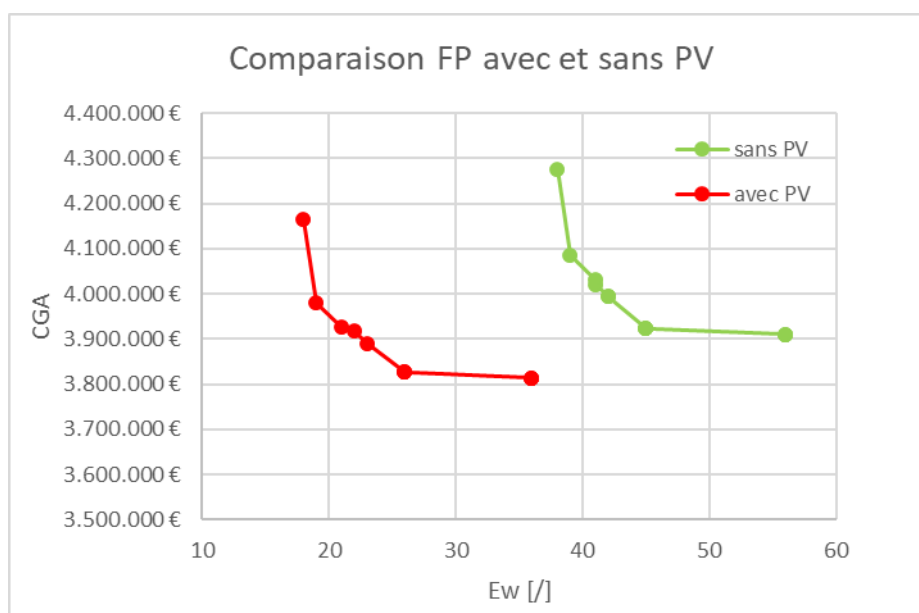
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 4 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . La performance de l'enveloppe permet d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80\%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques** sont installés.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).





Avec l'installation de 25 kWc sur cet immeuble, l'amélioration du  $E_w$  est de 20 points pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150 000 € (-3,8 % par rapport à l'optimum absolu).

Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :

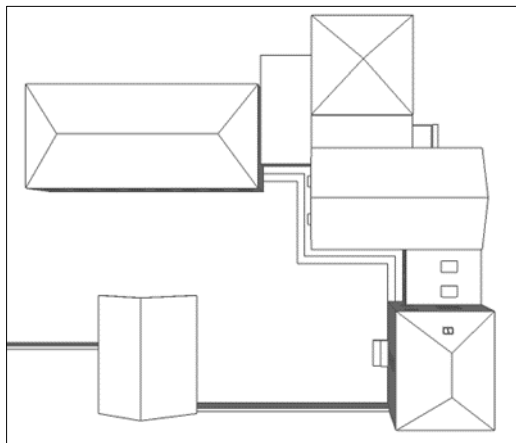
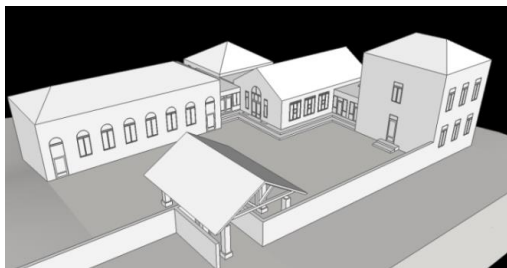


À noter que, dans toutes les simulations PV, les résultats indiquent un simple décalage du FP (diminution constante du CGA et des niveaux  $E_w$ ). Les conclusions que nous avons tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

## 11. Analyse des résultats des écoles existantes

### 11.1. EE1 – Ecole maternelle/primaire (<1945) de surface < 5000 m<sup>2</sup>

#### 11.1.1. Bâtiment de référence



- Construite début du 20<sup>e</sup> siècle, agrandie en 1994
- Plusieurs bâtiments
- Murs pleins non isolés (volume initial) et murs creux isolés (annexe), planchers non isolés, toitures en partie isolées
- Simple et double vitrage
- Chauffage central mazout
- Refroidissement : climatisation par une machine à compression de froid (EER 2.5)
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupérateur de chaleur
- Eau chaude sanitaire : chaudière mazout avec stockage
- Valeur intrinsèque : 1 355 687 €
- Ach = 1 159 m<sup>2</sup>
- Vp = 4 590 m<sup>3</sup>

#### 11.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	378 648
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	22

#### 11.1.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U moy, base	U moy, costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>107</b>	<b>- €</b>	<b>1 195 861.00 €</b>	<b>1 018 739.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	314496 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Ftoit 2,Pext2) (F1,F4,P2-P)					
	<b>3.42</b>	<b>1.42</b>	<b>94</b>	<b>125 533.00 €</b>	<b>1 223 268.00 €</b>	<b>1 066 590.00 €</b>
<b>Murs</b>	314494 M0.24(ME0.24,Mcave0.24,Ms0.24) (M1,M12,M16)					
	<b>1.39</b>	<b>0.24</b>	<b>69</b>	<b>166 569.00 €</b>	<b>1 133 462.00 €</b>	<b>1 018 609.00 €</b>
<b>Toitures</b>	314488 T0.20(PfGr0.2,T0.20,TP0.20) (H1,T2,T3)					
	<b>1.54</b>	<b>0.2</b>	<b>83</b>	<b>117 066.00 €</b>	<b>1 158 296.00 €</b>	<b>1 020 064.00 €</b>
<b>Sols</b>	314498 Pl0.24(PlCave0.24,PlSol0.24) (S1,S4)					
	<b>0.54</b>	<b>0.24</b>	<b>102</b>	<b>76 821.00 €</b>	<b>1 236 775.00 €</b>	<b>1 071 644.00 €</b>

#### 11.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$

<b>Base</b>				
<b>K</b>	107	<b>U moy [W/m².K]</b>		
<b>BNC [kWh/an]</b>	230 897	Fenêtres	3.42	
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	199	Portes	4	
<b>BNECS [kWh/an]</b>	11 842	Murs	1.39	
<b>BNF [kWh/an]</b>	1 510	Toits	1.54	
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	22 077	Sols	0.54	
<b>Ew</b>	197			
<b>CGA macro [€]</b>	1 195 861 €			

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	32	<b>U moy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	75 962	Fenêtres	1.43	F1-F4
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	66	Portes	2	P2-P
<b>BNF [kWh/an]</b>	5 053	Murs	0.24	M1-M12-M16
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	6 793	Toits	0.2	H1-T2-T3
<b>Ew</b>	58	Sols	0.54	-
<b>CGA macro [€]</b>	908 752 €			
<b>Investissement [€]</b>	484 872 €			
<b>Combinaison n°</b>	315011			

Caractéristiques techniques :

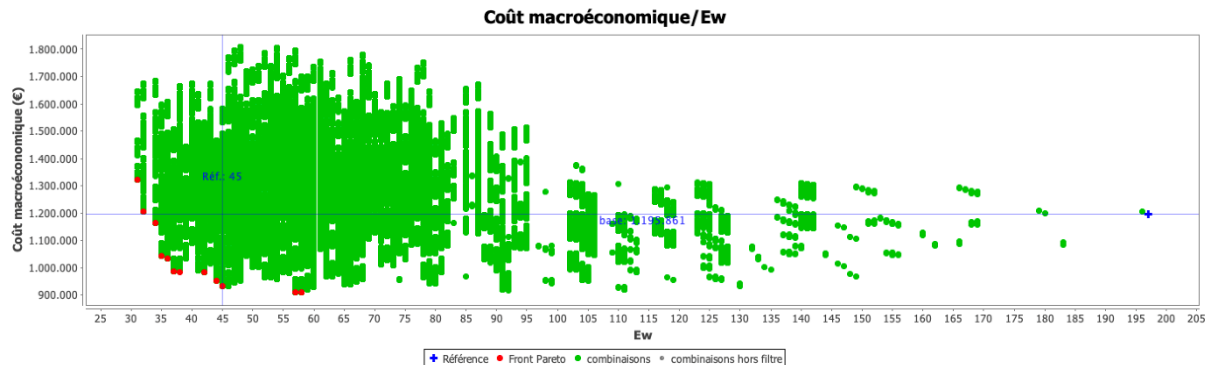
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation du cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupérateur de chaleur).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 67% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 235% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation. Ce système assure également la production d'eau chaude sanitaire. Le refroidissement est assuré par une PAC air-air. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

Il existe une solution, dont le niveau Ew est égal à 45, qui présentent un CGA proches (+2,6 %) du cost-optimum « absolu ». Les vitrages et les murs y sont plus performants, mais le sol n'est toujours pas isolé (ce n'est donc pas un optimum « U conformes »). Cette solution est donc aussi rentable, tout en présentant une performance énergétique bien meilleure.

Optimum U conforme					
	K	27		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	41 689		Fenêtres	1.43	F1-F4
BNC [kWh/m².an]	36		Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	5 440		Murs	0.24	M1-M12-M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	6 793		Toits	0.24	H1-T2-T3
Ew	42		Sols	0.24	S1-S4
CGA macro [€]	981 979 €				
Investissement [€]	648 321 €				
Combinaison n°	315066				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation du cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupérateur de chaleur).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).

- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

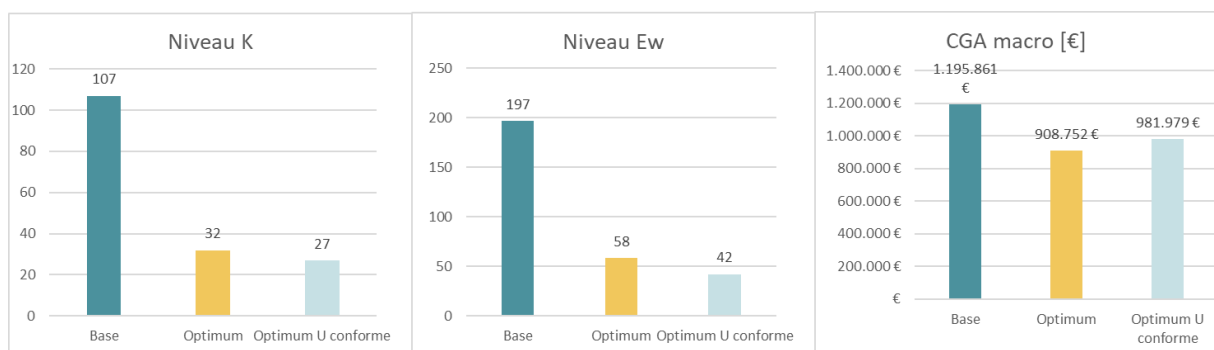
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 82% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 260% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.

La combinaison correspondant au cost-optimum qui permet d'atteindre des valeurs U conformes aux exigences en vigueur prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition.

Les systèmes sont identiques à ceux de l'optimum « absolu ».



L'optimum « U conformes » est caractérisé par des résultats énergétiques incontestablement meilleurs que l'optimum « absolu », affichant un niveau Ew 42 (<45). Par contre, une augmentation du CGA macroéconomique de 7,5 % par rapport à l'optimum « absolu » en découle - ce qui reste largement inférieur (- 21,8 %) au CGA du cas de base inchangé.

#### 11.1.5. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub> avec une installation photovoltaïque

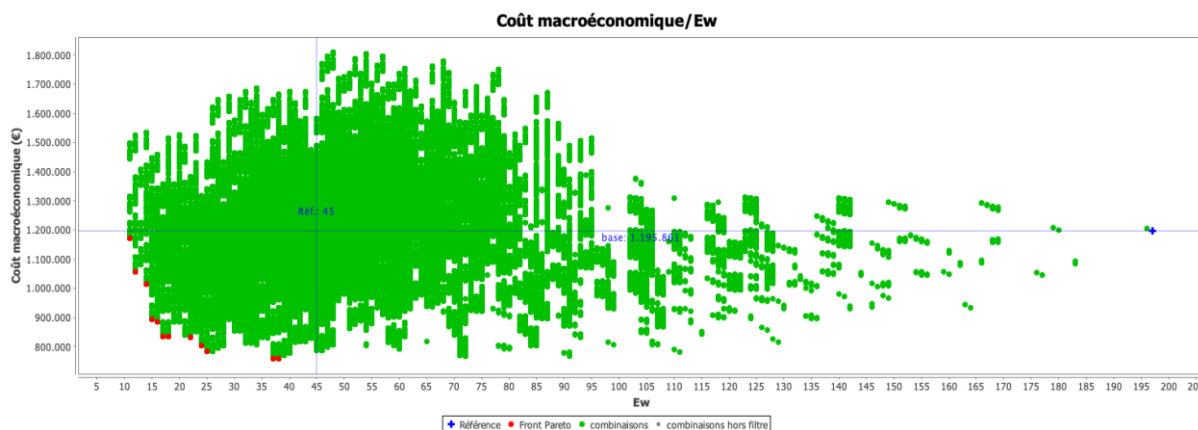
Optimum PV					
	K	32		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	75 962		Fenêtres	1.43	F1-F4
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	66		Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	5 053		Murs	0.24	M1-M12-M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	6 793		Toits	0.2	H1-T2-T3
Ew	38		Sols	0.54	-
CGA macro [€]	758 992 €				
Investissement [€]	524 569 €				
Combinaison n°	316231				

Caractéristiques techniques :

- Étanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité

des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.

- Ventilation du cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupérateur de chaleur).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).

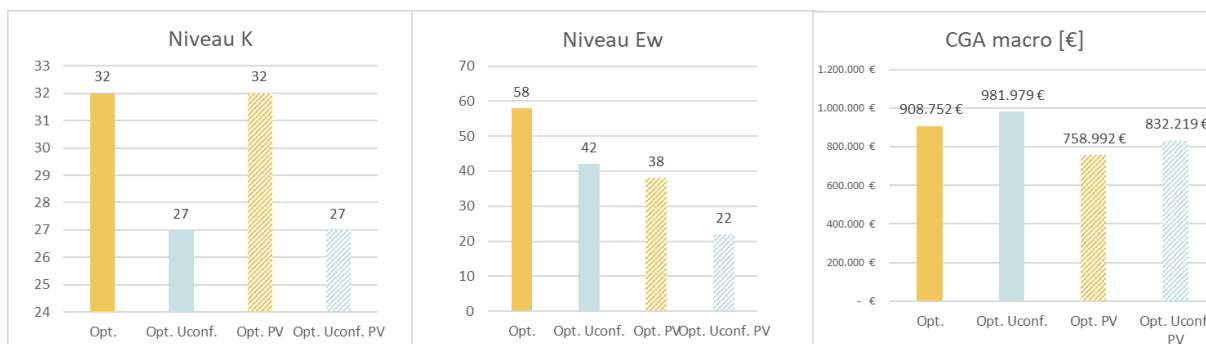


Optimum U conforme PV					
	K	27		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	41 689		Fenêtres	1.43	F1-F4
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	36		Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	5 440		Murs	0.24	M1-M12-M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	6 793		Toits	0.24	H1-T2-T3
	Ew	22	Sols	0.24	S1-S4
CGA macro [€]	832 219 €				
Investissement [€]	688 018 €				
Combinaison n°	316298				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation du cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans récupérateur de chaleur).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).

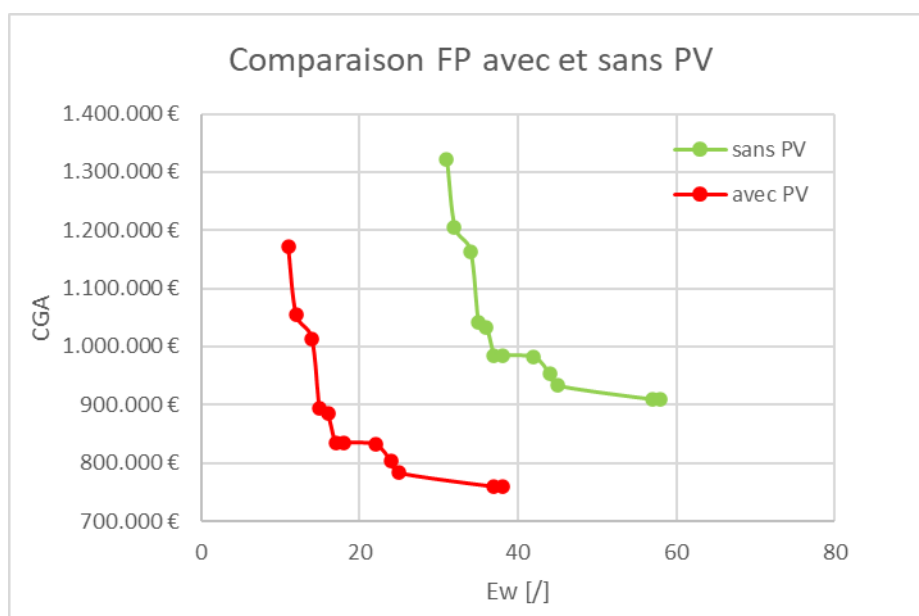




Avec l'installation de 25 kWc de panneaux photovoltaïques sur cette école, l'amélioration du niveau  $E_w$  est de 20 points dans les deux combinaisons optimums, pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150 000 €.

De manière similaire aux bureaux, l'installation de panneaux PV implique un déplacement de la courbe de Pareto, chaque point voyant son niveau  $E_w$  et son CGA diminuer de manière constante. Il pourrait donc être conclu qu'une installation PV est d'office rentable, selon la méthodologie employée ici.

Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :



## 11.2. EE2 – Ecole maternelle primaire (1950) de surface < 5000 m<sup>2</sup>

### 11.2.1. Bâtiment de référence



- Construite en 1950, 2 volumes perpendiculaires de 2 et 3 niveaux sur vides ventilés
- Grenier non aménagé
- Murs creux, planchers et plafonds non isolés
- Simple vitrage
- Chauffage : central gaz
- Eau chaude sanitaire : via la chaudière avec stockage
- Refroidissement : Climatisation par une machine à compression (EER 2.5)
- Pas de système de ventilation

• Valeur intrinsèque : 1 422 562 €

• Ach = 1 499,06 m<sup>2</sup>

• Vp = 6 187,74 m<sup>3</sup>

### 11.2.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	173 520
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	2

### 11.2.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy</sub> ,base	U <sub>moy</sub> ,costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>149</b>	<b>- €</b>	<b>1 710 929.00 €</b>	<b>1 590 543.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	315502 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>5.11</b>	<b>1.36</b>	<b>113</b>	<b>188 498.00 €</b>	<b>1 605 197.00 €</b>	<b>1 512 454.00 €</b>
<b>Murs</b>	315506 M0.24(ME0.24,Meanc0.24) (M1,M14)					
	<b>2</b>	<b>0.24</b>	<b>91</b>	<b>173 769.00 €</b>	<b>1 486 667.00 €</b>	<b>1 422 922.00 €</b>
<b>Toitures</b>	315501 T0.15(PfGr0.15) (H2)					
	<b>1.05</b>	<b>0</b>	<b>136</b>	<b>63 362.00 €</b>	<b>1 667 922.00 €</b>	<b>1 559 854.00 €</b>
<b>Sols</b>	315505 Pl0.24(Plvv0.24) (S3)					
	<b>1.44</b>	<b>0.24</b>	<b>132</b>	<b>20 906.00 €</b>	<b>1 628 071.00 €</b>	<b>1 523 140.00 €</b>

11.2.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K	149		U moy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	335 316		Fenêtres	5.11
BNC [kWh/m².an]	224		Portes	4
BNECS [kWh/an]	1 490		Murs	2
BNF [kWh/an]	2 851		Toits	1.05
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	32 633		Sols	1.44
Ew	253			
CGA macro [€]	1 710 929 €			

Optimum				
	K	28		U moy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	64 492		Fenêtres	1.43
BNC [kWh/m².an]	43		Portes	2
BNF [kWh/an]	7 077		Murs	0.24
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	10 041		Toits	0.24
Ew	31		Sols	0.24
CGA macro [€]	854 313 €			
Investissement [€]	528 787 €			
Combinaison n°	314735			

Caractéristiques techniques :

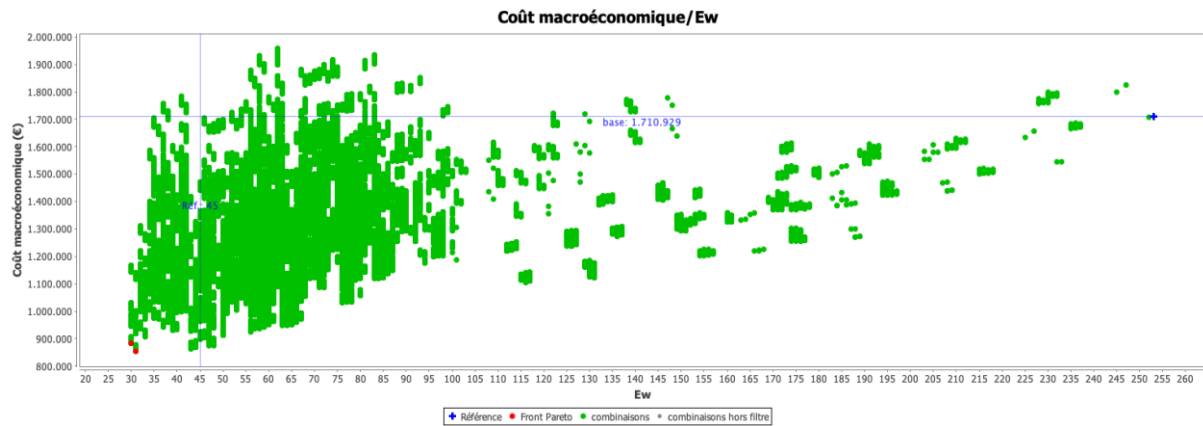
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation du cas de base (pas de système de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- Production d'eau chaude sanitaire identique au cas de base (chaudière gaz avec stockage).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 81% par rapport au cas de base.

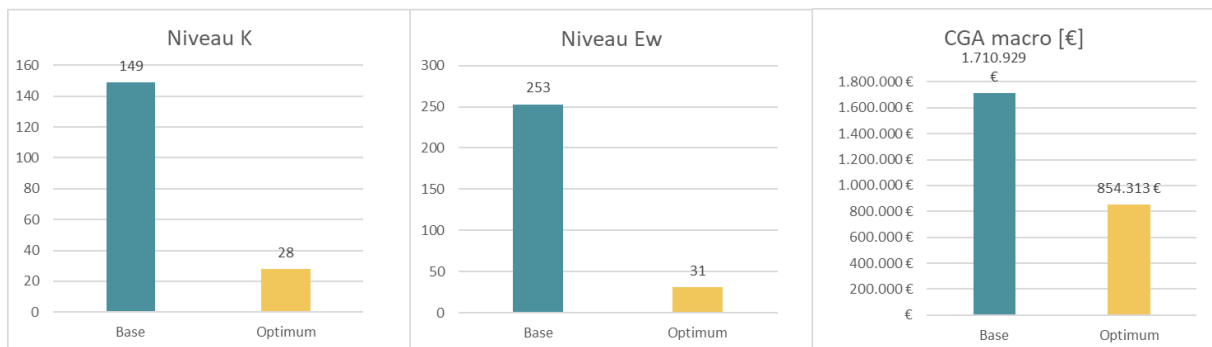
Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 148% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition. Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. Ce système assure également le refroidissement. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

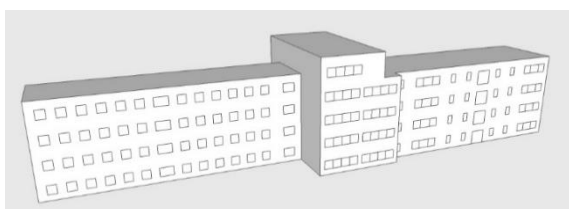
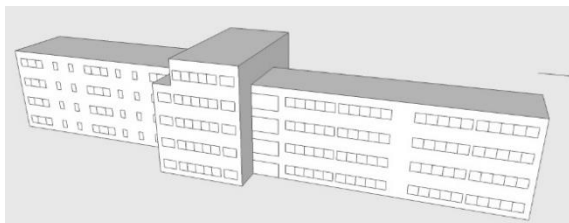
Il est à remarquer que les 2 points du Front de Pareto présentent des résultats Ew inférieurs à 45, comprenant une isolation complète des parois de déperdition, sols compris. La différence entre ces 2 points tient dans le système de production d'eau chaude sanitaire (la chaudière gaz n'est pas remplacée dans l'optimum Ew31, alors qu'elle est remplacée par un boiler thermodynamique dans le cas Ew30). Les 2 solutions peuvent être considérées comme cost optimales, au vu de leurs très faibles différences en termes de CGA (< 5%) et de Ew (1 point). Pour une question de cohérence, le remplacement du système de chauffage devrait s'accompagner du remplacement du système de production d'eau chaude sanitaire, ce qui tendrait à privilégier la solution Ew30.



Les combinaisons optimum « absolu » et optimum « U conformes » sont identiques. Il n'y a donc pas de différences au niveau du CGA macroéconomique.

### 11.3. EE3 – Ecole secondaire (> 1970) surface comprise entre 5.000 et 10.000 m<sup>2</sup>

#### 11.3.1. Bâtiment de référence



- Construite après 1970, 1 volume central de 5 niveaux et 2 volumes latéraux de 4 niveaux
- Murs creux, dalle sur sol et toitures non isolés
- Simple vitrage
- Chauffage central gaz
- Eau chaude sanitaire via la chaudière
- Refroidissement : climatisation par une machine à compression de froid (EER 2.5)
- Pas d'installation de ventilation
- Valeur intrinsèque : 3 660 385 €
- Ach = 5 044 m<sup>2</sup>
- Vp = 19 775 m<sup>3</sup>

#### 11.3.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	94 896
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	9

#### 11.3.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>111</b>	- €	4 208 430.00 €	3 923 161.00 €
<b>Fenêtres</b>	315499 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>5.78</b>	<b>1.36</b>	<b>78</b>	378 261.00 €	3 809 085.00 €	3 592 949.00 €
<b>Murs</b>	315502 M0.15(ME0.15) (M1)					
	<b>1.6</b>	<b>0.15</b>	<b>70</b>	454 864.00 €	3 738 740.00 €	3 567 858.00 €
<b>Toitures</b>	315496 T0.20(T0.20) (T2)					
	<b>1.34</b>	<b>0.2</b>	<b>99</b>	176 796.00 €	4 082 463.00 €	3 832 839.00 €
<b>Sols</b>	315506 P0.20(PISol0.20) (S4)					
	<b>0.68</b>	<b>0.2</b>	<b>106</b>	224 003.00 €	4 306 423.00 €	4 045 002.00 €

11.3.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K	111	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	743 255	Fenêtres	5.78	
BNC [kWh/m².an]	147	Portes	4	
BNECS [kWh/an]	11 684	Murs	1.6	
BNF [kWh/an]	6 245	Toits	1.34	
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	114 373	Sols	0.68	
Ew	206			
CGA macro [€]	4 208 430 €			

Optimum				
	K	27	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	200 334	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	40	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	10 237	Murs	0.24	M1
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	35 192	Toits	0.2	T2
Ew	34	Sols	0.68	-
CGA macro [€]	2 158 316 €			
Investissement [€]	1 186 240 €			
Combinaison n°	315005			

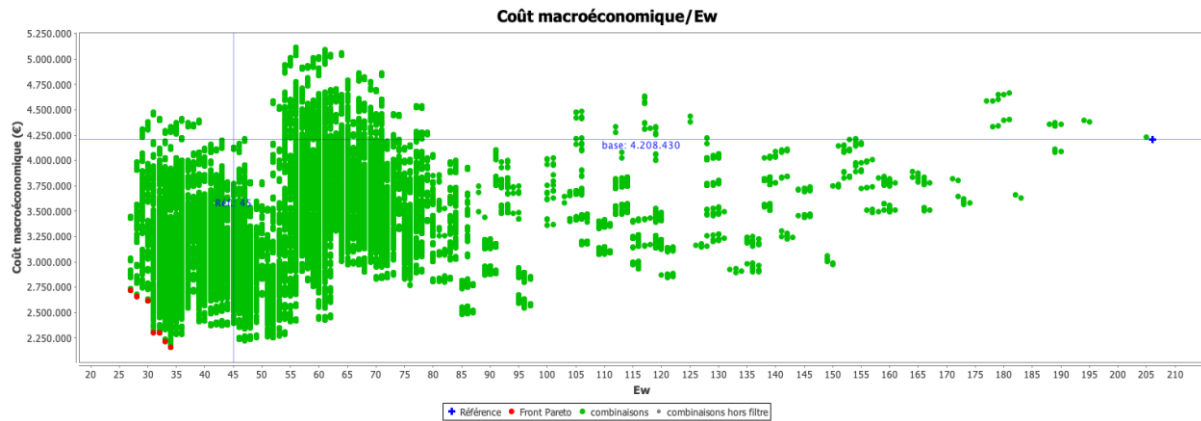
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation du cas de base (pas de système de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Eclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 73% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 64% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. Ce système assure également le refroidissement. L'eau chaude sanitaire est produite par la chaudière gaz instantanée sans stockage qui est maintenue. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

Toutes les solutions du FP sont rentables (avec des CGA inférieurs au CGA du cas de base inchangé). Les points affichant des niveaux Ew 32 et inférieurs présentent également une isolation des planchers, ce qui les rend « U conformes ».

Optimum U conforme					
	K	23		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	173 226		Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	34		Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	10 710		Murs	0.24	M1
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	35 192		Toits	0.24	T2
Ew	32		Sols	0.24	S4
CGA macro [€]	2 299 918 €				
Investissement [€]	1 391 814 €				
Combinaison n°	314735				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de système de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

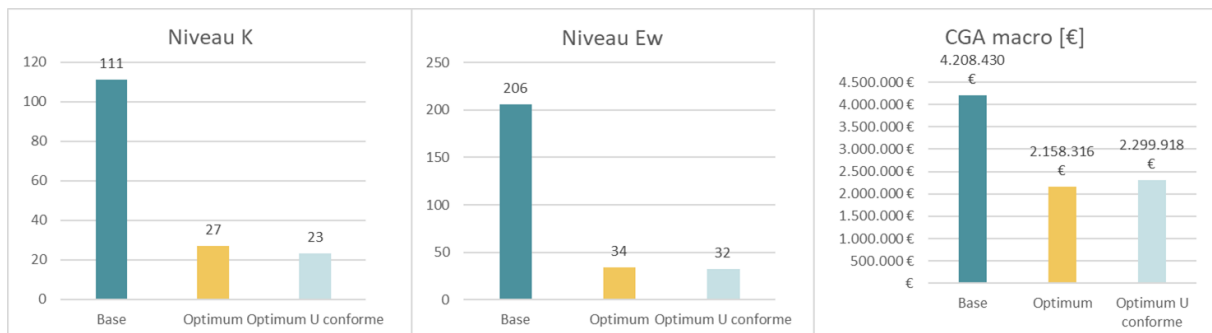
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 77% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 71% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.

Dans la combinaison correspondant au cost-optimum « U conformes », qui prévoit donc le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, les systèmes sont les mêmes que dans le cas optimum « absolu ».

Certains scénarios, affichant des niveaux Ew inférieurs sur le Front de Pareto, présentent des systèmes de production d'eau chaude sanitaire différents (boilers thermodynamiques). C'est notamment le cas du point présentant un niveau Ew 33, dont le CGA est légèrement supérieur (+ 2,7 %) à celui du cost-optimum « absolu »



La différence dans les résultats énergétiques entre les deux optimums est faible. Le CGA macroéconomique de la combinaison optimum « U conformes » est 6,6 % supérieur à celui de la combinaison optimum « absolu », mais reste très largement inférieur (-45,4 %) au CGA du cas du bâtiment inchangé.



## 11.4. EE4 – Bâtiment universitaire (1968) d'une surface d'environ 10.000 m<sup>2</sup>

### 11.4.1. Bâtiment de référence



- Construite en 1968, 1 volume de 4 niveaux
- Architecture monolithique
- Murs pleins en béton, toiture et planchers sur sol non isolés
- Double vitrage
- Chauffage central gaz atmosphérique
- Eau chaude sanitaire : via la chaudière
- Refroidissement : climatisation par une machine à compression de froid (EER 2.5)
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques, sans échangeur de chaleur



- Valeur intrinsèque : 8 316 310 €
- Ach = 9 662 m<sup>2</sup>
- Vp = 40 560 m<sup>3</sup>

### 11.4.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées : 30 240  
 Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP : 7

### 11.4.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>107</b>	- €	8 473 773.00 €	7 904 140.00 €
<b>Fenêtres</b>	315504 fen1.1(Ch1.7-DV1.1/0.63-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	<b>2.97</b>	<b>1.43</b>	<b>93</b>	<b>663 464.00 €</b>	<b>8 712 307.00 €</b>	<b>8 208 291.00 €</b>
<b>Murs</b>	315499 M0.24(ME0.24,Ms0.24) (M1,M16)					
	<b>2.85</b>	<b>0.24</b>	<b>55</b>	<b>412 814.00 €</b>	<b>7 560 334.00 €</b>	<b>7 176 722.00 €</b>
<b>Toitures</b>	315496 T0.24(TP0.24) (T3)					
	<b>1.55</b>	<b>0.24</b>	<b>94</b>	<b>320 128.00 €</b>	<b>8 498 538.00 €</b>	<b>7 993 857.00 €</b>
<b>Sols</b>	315502 Pl0.20(PlSol0.20) (S4)					
	<b>0.63</b>	<b>0.2</b>	<b>103</b>	<b>300 375.00 €</b>	<b>8 634 879.00 €</b>	<b>8 094 914.00 €</b>

11.4.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K	107	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	1 531 434	Fenêtres	2.97	
BNC [kWh/m².an]	158	Portes	4	
BNECS [kWh/an]	11 062	Murs	2.85	
BNF [kWh/an]	11 971	Toits	1.55	
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	185 697	Sols	0.63	
Ew	176			
CGA macro [€]	8 473 773 €			

Optimum				
	K	25	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	277 201	Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	29	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	23 929	Murs	0.2	M1-M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	57 138	Toits	0.2	T3
Ew	41	Sols	0.63	-
CGA macro [€]	4 942 341 €			
Investissement [€]	2 204 735 €			
Combinaison n°	315372			

Caractéristiques techniques :

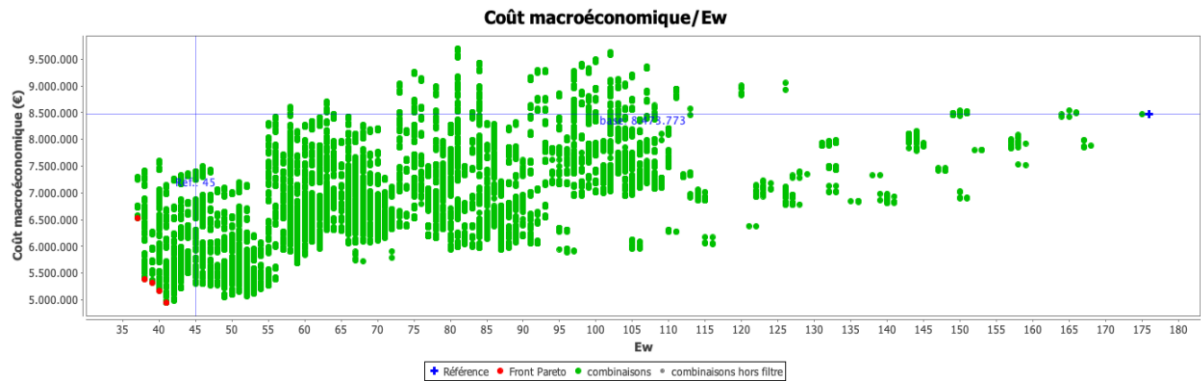
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques, avec un échangeur de chaleur ( $\eta = 80 \%$ ), équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- Système eau chaude sanitaire inchangé par rapport au cas de base (chaudière gaz).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 82% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 100% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. Ce système assure également le refroidissement. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

Optimum U conforme					
	K	23		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	247	245	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	26		Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	34	693	Murs	0.24	M1-M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	57	138	Toits	0.24	T3
Ew	40		Sols	0.24	S4
CGA macro [€]	5	171 166 €			
Investissement [€]	2	426 748 €			
Combinaison n°	315	152			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques, avec un échangeur de chaleur ( $\eta = 80 \%$ ), équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- Système Eau chaude sanitaire inchangé par rapport au cas de base (chaudière gaz).
- Refroidissement par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED ( $4\text{W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

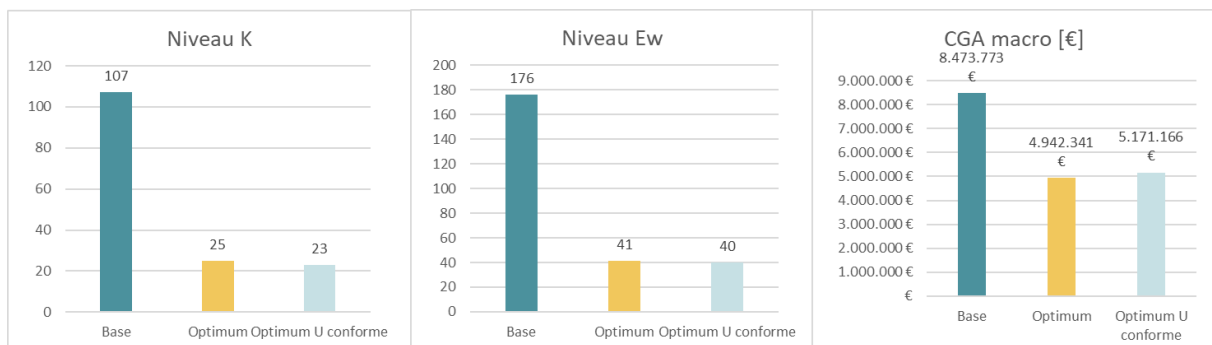
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 84% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 190% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 69% par rapport au cas de base.

Il est à noter que le cas optimum « U conforme » présente des niveaux d'isolation thermique moins importants que le cost-optimum « absolu » sur les murs, toitures et fenêtres, mais comprend l'isolation du plancher pour atteindre un U de 0,24 W/m<sup>2</sup>K.

Les systèmes sont les mêmes que dans le cas optimum « absolu ».



La différence dans les résultats énergétiques entre les deux optimums est faible. Le CGA macroéconomique de la combinaison optimum « U conformes » est 4,6 % supérieur à celui de la combinaison optimum « absolu », mais reste très largement inférieur (-39 %) au CGA du cas du bâtiment inchangé.

La plupart des combinaisons testées sont rentables sur la période d'évaluation.

Les points du FP qui présentent des résultats énergétiques plus intéressants voient les niveaux d'isolation sensiblement et progressivement renforcés aux niveaux affichés par le cost-optimum « absolu », au prix d'une augmentation progressive des CGA (sauts de +/- 2 %).

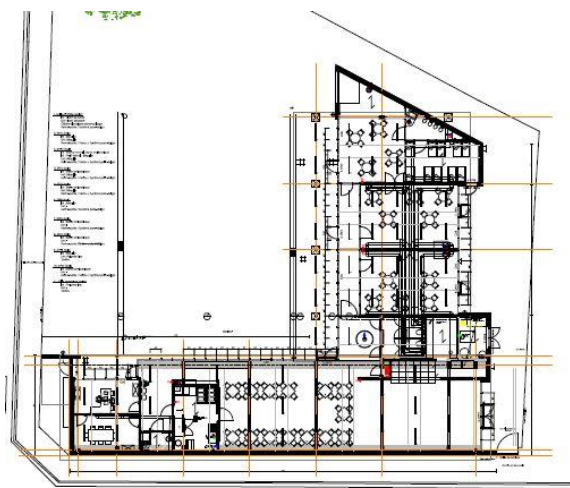
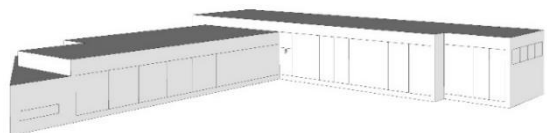
Le point du Front de Pareto affichant un niveau Ew 39 voit également le système d'eau chaude sanitaire changé par un boiler thermodynamique, pour un CGA très similaire à celui de l'optimum « U conformes ».

Le point du Front de Pareto affichant un niveau Ew 37 voit également le système d'eau chaude sanitaire changé par un boiler thermodynamique, mais aussi un changement des vitrages pour du triple vitrage (Ug 0.6 W/m<sup>2</sup>K). Le CGA est par contre plus de 15 % supérieur à celui des optimums.

## 12. Analyse des résultats des écoles neuves

### 12.1. EN1 – Ecole maternelle d'une surface < 5000 m<sup>2</sup>

#### 12.1.1. Bâtiment de référence



- Petite école de village, +/- 60 élèves
- 2 volumes d'un niveau, dalle sur sol
- Murs crépis, toiture et planchers isolés
- Double vitrage selon exigences PEB 2014
- Chauffage central mazout condensation
- Eau chaude sanitaire : via la chaudière avec stockage
- Refroidissement : climatisation par une machine à compression de froid (EER 2.5)
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques (double flux), sans échangeur de chaleur
- Valeur intrinsèque : 867 219 €
- Etanchéité à l'air = 6 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>
- Ach = 487 m<sup>2</sup>
- Vp = 2 230 m<sup>3</sup>

#### 12.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	21 577
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	108

#### 12.1.3. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub> et K du bâtiment

Base			
	K		Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]
BNC [kWh/an]	47 761	Fenêtres	1.49
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	98	Portes	2
BNECS [kWh/an]	1 735	Murs	0.24
BNF [kWh/an]	6 520	Toits	0.24
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	3 356	Sols	0.24
Ew	45		
CGA macro [€]	1 169 590 €		

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	<b>37</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	34 629	Fenêtres	1.49	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	71	Portes	2	P1-alu
<b>BNF [kWh/an]</b>	6 520	Murs	0.24	M3
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	3 356	Toits	0.24	T1
<b>Ew</b>	50	Sols	0.24	S1
<b>CGA macro [€]</b>	1 090 884 €			
<b>Investissement [€]</b>	862 092 €			
<b>Combinaison n°</b>	315125			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , il est équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED ( $4\text{W/m}^2$  - L500).

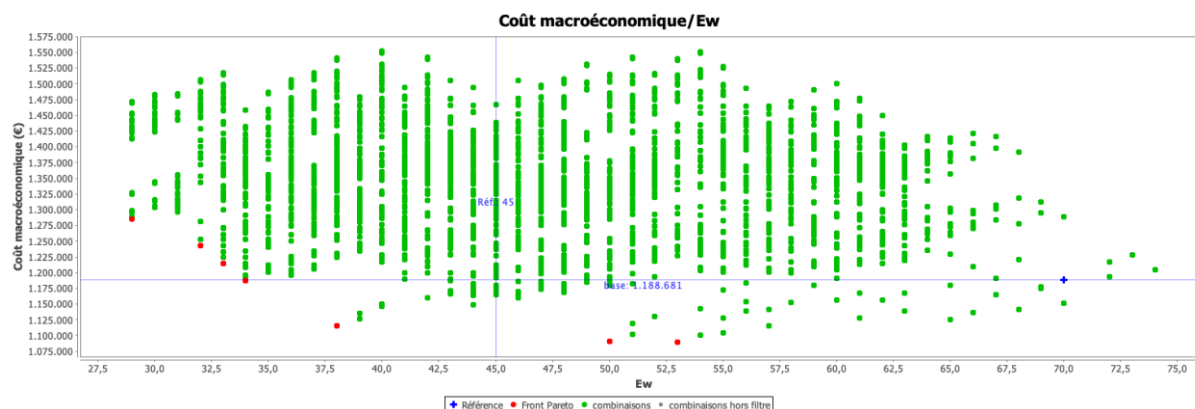
L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 27% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement sont inchangés par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage est inchangée par rapport au cas de base.

Le cost-optimum ne permet pas d'atteindre l'exigence Ew 45 en vigueur dans ce cas. Le premier cas qui respecte cette exigence (Ew 38) prévoit une PAC air-eau pour la production de chauffage et de froid avec des ventilo-convecteurs. Les niveaux d'isolation thermique restent identiques. Le CGA est 2,3 % supérieur à celui de l'optimum « absolu », une différence qui reste minime. Ce cas de figure n'est pas viable, car il conserve la production d'eau chaude sanitaire via l'ancienne chaudière au mazout. La seule exigence que ce cas ne respecte pas est le niveau K, qui est égal à 37 ( $<35$ ). Il sera donc nécessaire de sélectionner un autre cost-optimum « PEB conforme ».



Optimum PEB conforme					
	K	34	Umoy [W/m².K]		
BNC [kWh/an]	27 886		Fenêtres	1.36	F1
BNC [kWh/m².an]	57		Portes	2	P1-Alu
BNF [kWh/an]	5 626		Murs	0.2	M4
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	3 356		Toits	0.2	T1
Ew	34		Sols	0.24	S1
CGA macro [€]	1 187 381 €				
Investissement [€]	984 361 €				
Combinaison n°	314944				

#### Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . La performance de l'enveloppe permet d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite via un boiler thermodynamique.
- Le refroidissement est assuré par la pompe à chaleur air-eau réversible (EER 3.8).
- Éclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

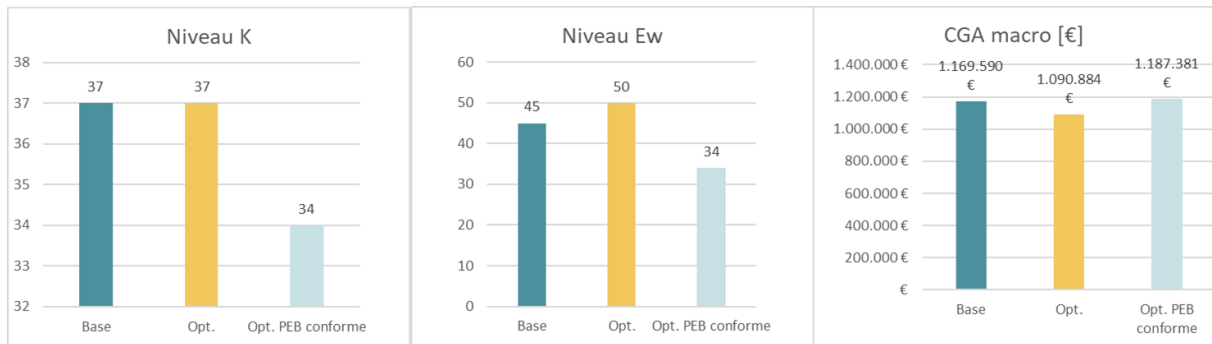
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 42% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 14% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage est inchangée par rapport au cas de base.

La combinaison cost-optimum PEB conforme qui permet d'atteindre un Ew 34 (< 45) comprend un renforcement de l'isolation des fenêtres, des murs et du toit, par rapport au cost-optimum « absolu ». Le système de production de chaleur est une pompe à chaleur air-eau réversible, combinée à des ventilo-convecteurs pour l'émission. L'eau chaude sanitaire est produite par un boiler thermodynamique. Le refroidissement est également assuré par la pompe à chaleur air-eau réversible.





Les résultats énergétiques de la combinaison optimum « PEB conforme » sont meilleurs que ceux du cas de base. Le CGA de la combinaison optimum « PEB conforme » est par contre 8.85 % supérieur à celui de la combinaison optimum « absolu » et 1.5 % supérieur au CGA du cas de base inchangé.

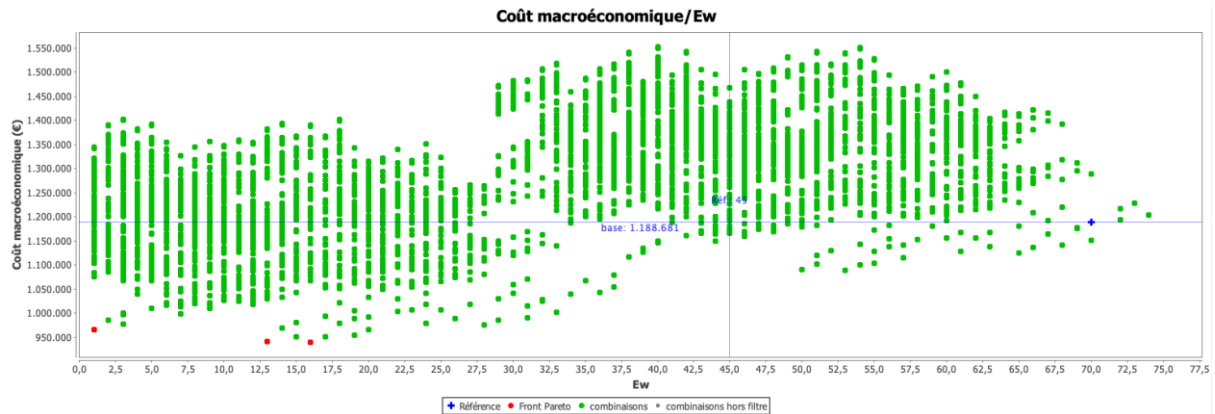
#### 12.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque

Optimum PV					
	K	37		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	34 629		Fenêtres	1.49	F1
BNC [kWh/m².an]	71		Portes	2	P1-PVC
BNF [kWh/an]	6 520		Murs	0.24	M3
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	3 356		Toits	0.24	T2
Ew	13		Sols	0.24	S1
CGA macro [€]	941 124 €				
Investissement [€]	901 789 €				
Combinaison n°	316925				

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

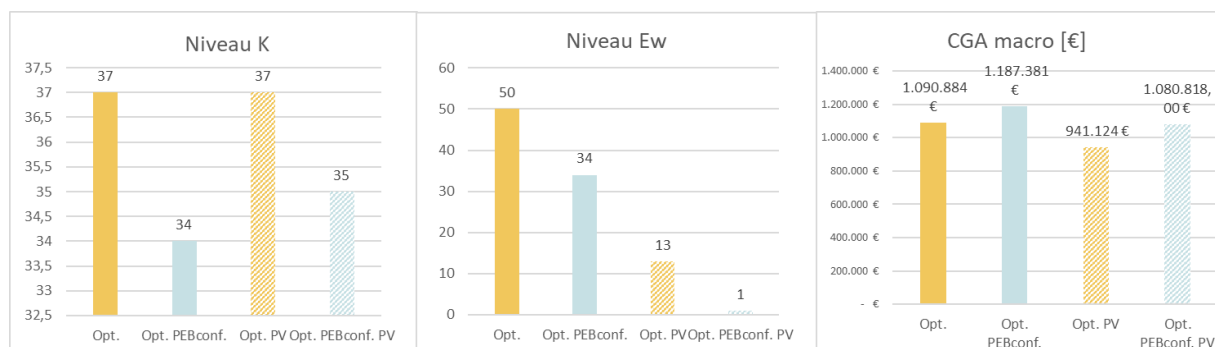


**Optimum PEB conforme PV**

	K	35	Umoy [W/m².K]		
BNC [kWh/an]	28 259		Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	58		Portes	2	P1-PVC
BNF [kWh/an]	7 520		Murs	0.24	M3
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	4 195		Toits	0.2	T2
Ew	1		Sols	0.24	S1
CGA macro [€]	1 080 818 €				
Investissement [€]	1 041 540 €				
Combinaison n°	316657				

## Caractéristiques techniques :

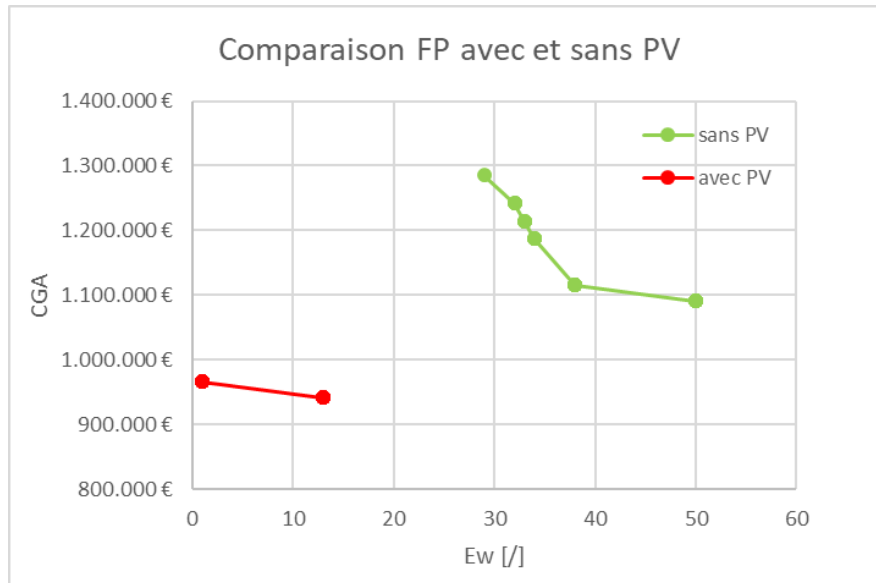
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double-flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une pompe à chaleur air-eau (SCOPON 3.62).
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite via un boiler thermodynamique.
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4W/m² - L500).



Avec l'installation de 25 kWc sur cette école, l'optimum PV engendre une amélioration de 37 points par rapport au niveau Ew de l'optimum « absolu », pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150 000 €. L'ajout d'une installation photovoltaïque n'ayant aucune influence sur la performance de l'enveloppe du bâtiment (son niveau K, sa compacité), elle ne rend pas d'office le bâtiment PEB conforme car elle n'en améliore que le niveau Ew.

Dans la combinaison optimum « PEB conforme », l'amélioration du Ew est de 33 points par rapport au cost optimum « PEB conforme » sans PV. La diminution du CGA macroéconomique est d'environ 106 500 €.

Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :



De manière similaire aux bureaux, l'installation de panneaux PV implique un déplacement de la courbe de Pareto, chaque point voyant son niveau Ew et son CGA diminuer de manière constante. Il pourrait donc être conclu qu'une installation PV est d'office rentable, selon la méthodologie employée ici.

## 12.2. EN2 – Ecole fondamentale de taille moyenne (3.000 m<sup>2</sup>)

### 12.2.1. Bâtiment de référence



- Ecole fondamentale
- Volumétrie simple
- 3 niveaux, dalle sur sol
- Murs crépis, toiture et planchers isolés
- Double vitrage selon exigences PEB 2014
- Chauffage central gaz condensation
- Eau chaude sanitaire: via la chaudière avec stockage.
- Refroidissement: Climatisation par une machine à compression de froid (EER 2.5)
- Ventilation: amenées mécaniques, extractions mécaniques (double flux) sans échangeur
- Valeur intrinsèque: 5 483 557 €
- Etanchéité à l'air = 6 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup>
- Ach = 3 226 m<sup>2</sup>
- Vp = 11 532 m<sup>3</sup>

### 12.2.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	43153
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	152

### 12.2.3. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub> et K du bâtiment

Base				
	K	27	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	
BNC [kWh/an]	98 476		Fenêtres	1.46
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	31		Portes	2
BNECS [kWh/an]	5 973		Murs	0.24
BNF [kWh/an]	12 616		Toits	0.24
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	21 948		Sols	0.24
Ew	45			
CGA macro [€]	6 386 732 €			
Optimum				
	K	27	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	98 476		Fenêtres	1.46
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	31		Portes	2
BNF [kWh/an]	12 616		Murs	0.24
				F1-Ftoit2
				P1-alu
				M3-M16

<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	21 948	Toits	0.24	T1-T3
<b>Ew</b>	45	Sols	0.24	S1
<b>CGA macro [€]</b>	6 322 601 €			
<b>Investissement [€]</b>	5 465 803 €			
<b>Combinaison n°</b>	316025			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

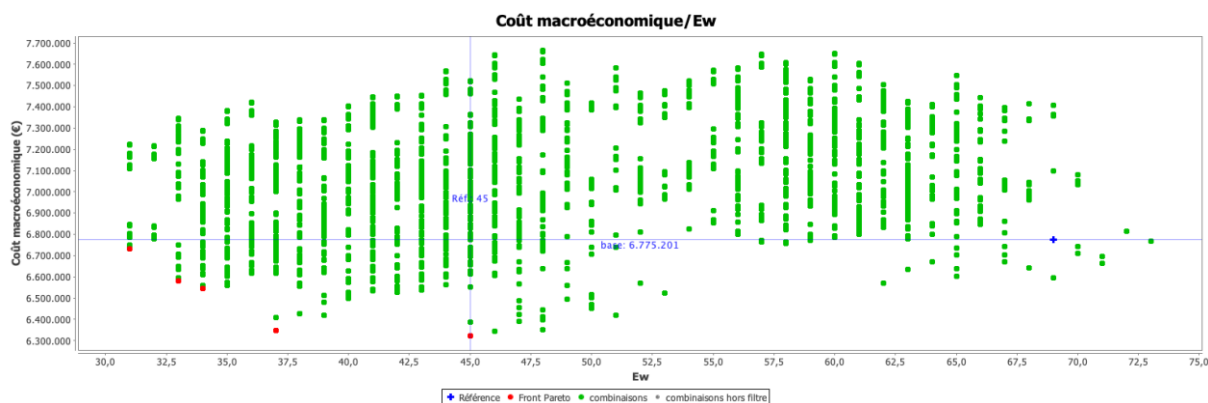
L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage sont inchangés par rapport au cas de base.

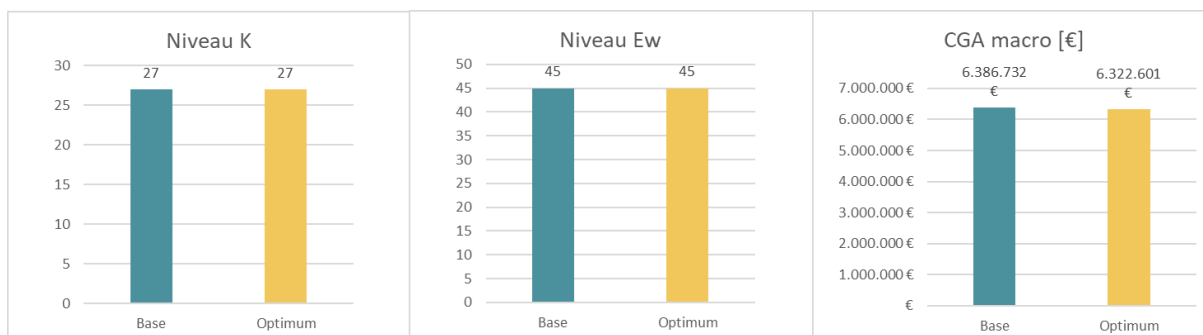
Les besoins nets de refroidissement sont inchangés par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage est inchangée par rapport au cas de base.

Le cost-optimum permet d'atteindre l'ensemble des exigences en vigueur ( $U_{\text{max}}$ , K35, Ew 45). Le système de production de chaleur est une chaudière gaz à condensation, combinée à des radiateurs pour l'émission. L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz. Le refroidissement est assuré par une pompe à chaleur air-air. L'ensemble de l'éclairage est du LED.



À noter qu'il existe un point, à CGA quasi identique (+4 %), qui présente de meilleurs résultats énergétiques (Ew37). La différence avec l'optimum « absolu » tient dans les solutions systèmes : PAC air-eau pour le chauffage et le froid, et boiler thermodynamique pour la production d'ECS. Les niveaux d'isolation thermique sont identiques.

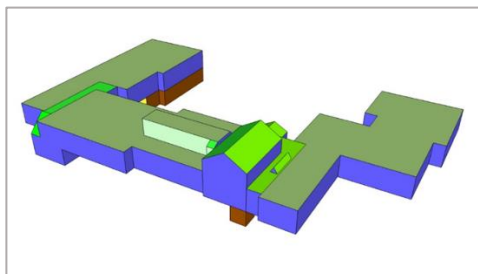


L'optimum « absolu » et l'optimum « PEB conforme » étant identiques, les résultats le sont également. Le CGA macroéconomique de ces 2 optimums est 1 % inférieur à celui du cas de base inchangé.

## 13. Analyse des résultats des maisons de repos existantes

### 13.1. MRE1 – Maison de repos existante 1

#### 13.1.1. Bâtiment de référence



- Construite en 1989
  - Composée de trois ailes construites en une phase reliées par des volumes secondaires à toiture plate
  - La façade avant, parallèle à la rue, est située au nord-ouest
  - Nombre de chambres : 30
  - Nombre de lits : 40
  - Les bâtiments construits sont isolés
  - Murs creux isolés, double vitrage et verrière simple vitrage
  - Chauffage central gaz
  - Eau chaude sanitaire via chaudière avec stockage
  - Refroidissement : climatisation par pompe à chaleur air-air (EER 2.1)
  - Pas de système de ventilation
- 
- Valeur intrinsèque : 1 918 469 €
  - Ach = 1 372 m<sup>2</sup>
  - Vp = 4 790 m<sup>3</sup>

#### 13.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	664 996
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	7

#### 13.1.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>77</b>	- €	<b>1 631 455.00 €</b>	<b>1 809 003.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	320822 fen0.6(Ch0.95-TV0.6/0.5-WE,Ftoit 2,Peanc0.8,Pext0.8) (F1,F4,P2-P,P5-P)					
	<b>2.32</b>	<b>0.93</b>	<b>66</b>	<b>164 764.00 €</b>	<b>1 655 548.00 €</b>	<b>1 846 470.00 €</b>
<b>Murs</b>	320824 M0.24(ME0.24,Meanc0.24) (M14)					
	<b>1.18</b>	<b>0.24</b>	<b>55</b>	<b>20 911.00 €</b>	<b>1 466 084.00 €</b>	<b>1 642 923.00 €</b>
<b>Toitures</b>	320820 T0.24(PfGr0.24,T0.24,TP0.24) (H1,T2,T3)					
	<b>1.29</b>	<b>0.24</b>	<b>72</b>	<b>72 217.00 €</b>	<b>1 652 073.00 €</b>	<b>1 842 525.00 €</b>
<b>Sols</b>	320827 Pl0.20(PlCave0.20,PlSol0.20) (S1,S4)					
	<b>0.61</b>	<b>0.2</b>	<b>66</b>	<b>201 712.00 €</b>	<b>1 732 014.00 €</b>	<b>1 947 963.00 €</b>

13.1.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K	77	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	304 042		Fenêtres	2.32
BNC [kWh/m².an]	222		Portes	3.26
BNECS [kWh/an]	33 429		Murs	1.18
BNF [kWh/an]	5 650		Toits	1.29
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	29 117		Sols	0.61
Ew	106			
CGA macro [€]	1 631 455 €			

Optimum				
	K	42	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	178 467		Fenêtres	1.44
BNC [kWh/m².an]	130		Portes	2
BNF [kWh/an]	3 784		Murs	0.24
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	23 293		Toits	0.2
Ew	70		Sols	0.61
CGA macro [€]	1 361 271 €			-
Investissement [€]	320 234 €			
Combinaison n°	321377			

Caractéristiques techniques :

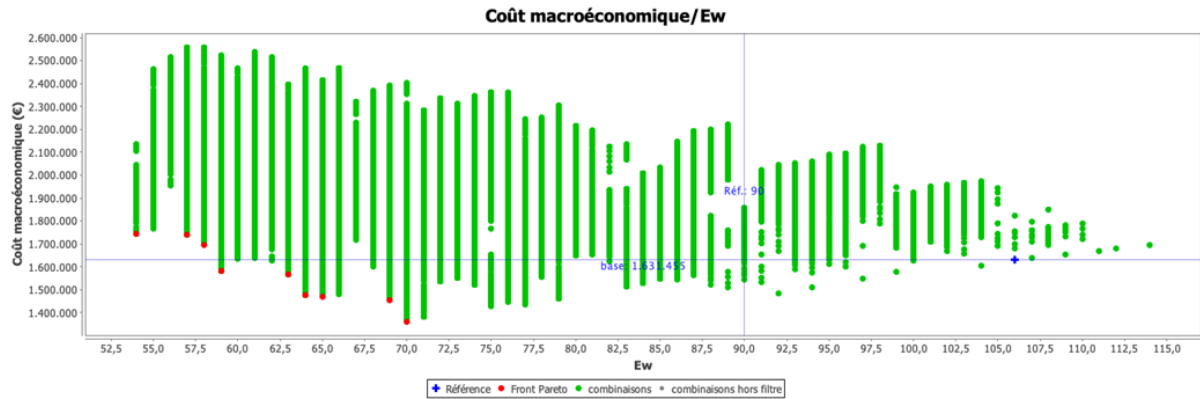
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz.
- Pas de système de refroidissement.
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 41% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 33% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 20% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation qui produit également l'eau chaude sanitaire de manière instantanée. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED.

Optimum U conforme					
	K	32		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]		151 940	Fenêtres	1.44	F1-F4
BNC [kWh/m².an]		111	Portes	2	P2-P - P5-P
BNF [kWh/an]		4 795	Murs	0.24	M14
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]		23 293	Toits	0.24	H1-T2-T3
	Ew	65	Sols	0.24	S1-S4
CGA macro [€]		1 470 447 €			
Investissement [€]		488 539 €			
Combinaison n°		321080			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz.
- Pas de système de refroidissement.
- Eclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

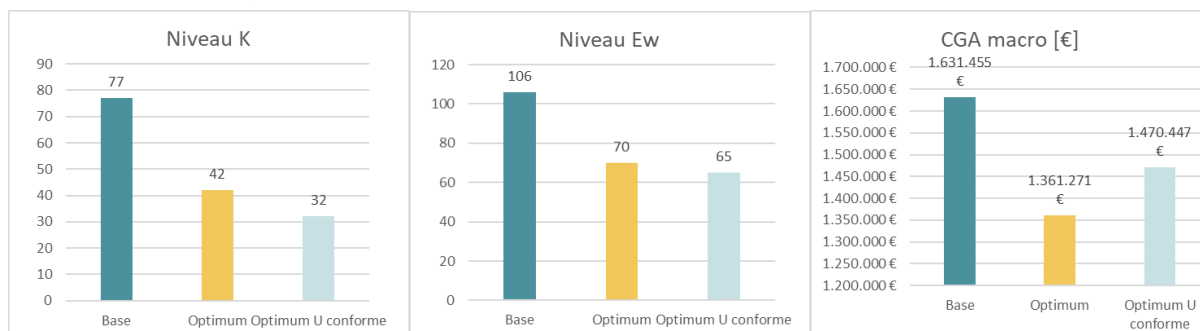
Les besoins nets de chauffage ont diminué de 50% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 15% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 20% par rapport au cas de base.



es seules différences entre l'optimum « absolu » et l'optimum « U conforme » tiennent dans l'isolation des planchers et une isolation moins performante des toitures. Cela se traduit par une diminution du  $E_w$  de 5 points, mais une augmentation du CGA de 8 %.



Les deux cost-optimums sont rentables puisqu'ils présentent des coûts macroéconomiques inférieurs à celui du cas de base : -16,6% pour le cost-optimum « absolu », et -9,4 % pour l'optimum « U conformes ».

Il existe un point, sur le Front de Pareto, qui présente un CGA légèrement inférieur (-3,2%) à celui du cas de base, mais un résultat  $E_w$  bien meilleur, à savoir  $E_w$  59. Celui-ci prévoit un niveau d'isolation de l'enveloppe correspondant aux valeurs U en vigueur, et des systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire identiques à la combinaison cost-optimum « U conforme ». La ventilation est assurée par un système double flux (alimentations et évacuations mécaniques) avec récupérateur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ), et la climatisation par une PAC air-air (EER 4). On voit donc, pour ce bâtiment, qu'il est possible d'améliorer grandement la performance énergétique, et le confort intérieur, avec des solutions qui restent rentables sur la période d'évaluation.

#### 13.1.5. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque

Optimum PV				
	K	42	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	178 467		Fenêtres 1.44	F1-F4
BNC [kWh/m².an]	130		Portes 2	P2-P - P5-P
BNF [kWh/an]	3 784		Murs 0.24	M1-M14
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	23 293		Toits 0.2	H1-T2-T3
Ew	61		Sols 0.61	-
CGA macro [€]	1 211 511 €			
Investissement [€]	359 931 €			
Combinaison n°	323245			

Caractéristiques techniques :

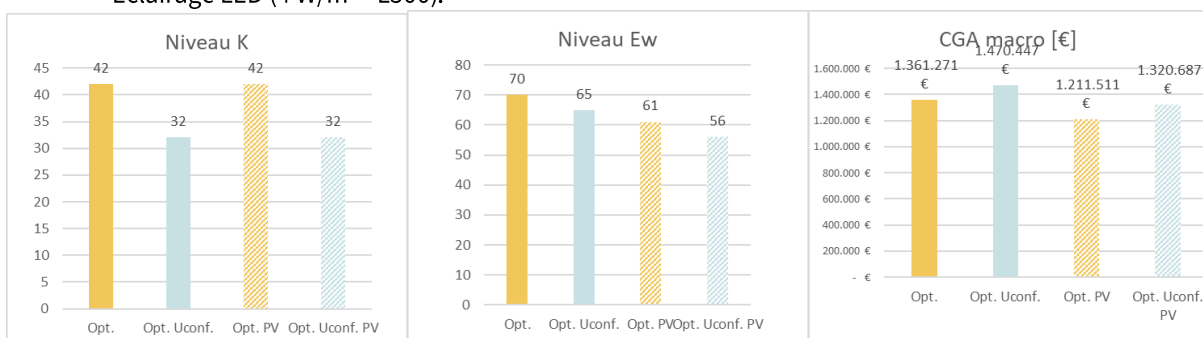
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.

- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz.
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Pas de système de refroidissement.
- Eclairage LED (4W/m<sup>2</sup> - L500).

Optimum U conforme PV					
	K	32		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	151 940		Fenêtres	1.44	F1-F4
BNC [kWh/m².an]	111		Portes	2	P2-P - P5-P
BNF [kWh/an]	4 795		Murs	0.24	M14
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	23 293		Toits	0.24	H1-T2-T3
Ew	56		Sols	0.24	S1-S4
CGA macro [€]	1 320 687 €				
Investissement [€]	528 236 €				
Combinaison n°	322939				

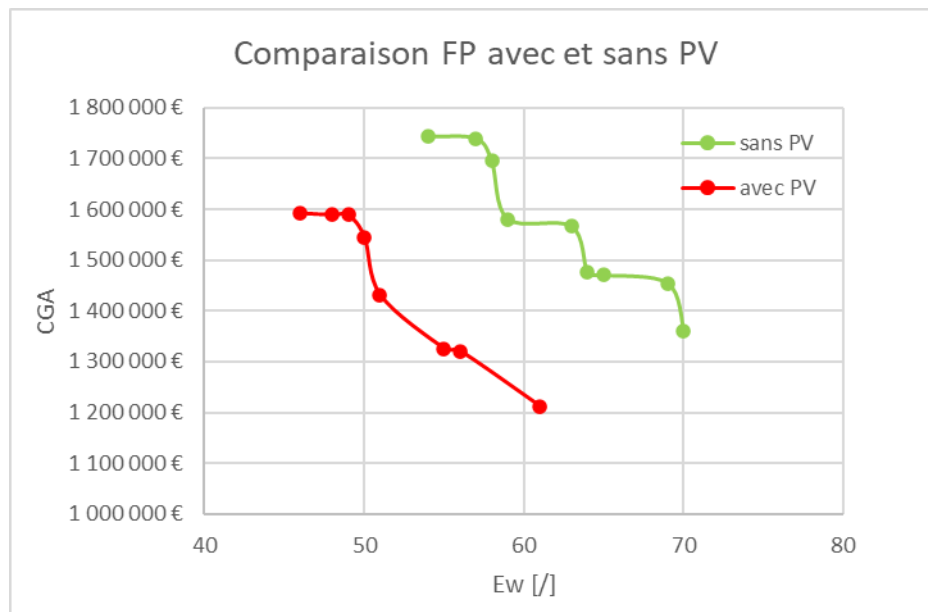
Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière.
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Pas de système de refroidissement.
- Éclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).



Avec l'installation de 25 kWc sur cet immeuble, l'amélioration du  $E_w$  est de 9 points, pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150 000 € (-11% par rapport à l'optimum « absolu »). Les conclusions tirées sur la comparaison des cost-optimum « sans PV » restent valables dans cette comparaison « avec PV ».

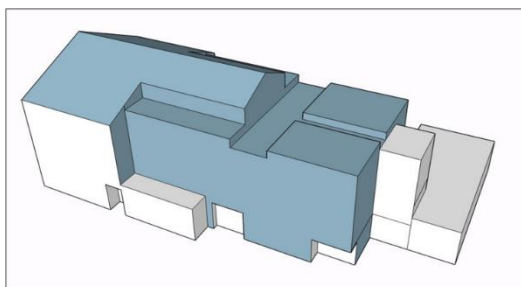
Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :



À noter que, dans toutes les simulations PV, les résultats indiquent un simple décalage du FP (diminution constante du CGA et des niveaux Ew). Les conclusions que nous avons tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

## 13.2. MRE2 – Maison de repos existante 2

### 13.2.1. Bâtiment de référence



- Construite en 1984
  - Composée de deux bâtiments
  - Le volume principal est surmonté d'une toiture à versants, le volume secondaire possède une toiture plate
  - La façade avant, parallèle à la rue, est située au sud-est
  - Nombres de chambres : 38
  - Nombres de lits : 40
  - Les bâtiments construits ne sont pas isolés
  - Murs creux non isolés, double vitrage
  - Chauffage central gaz
  - Eau chaude sanitaire via la chaudière avec stockage
  - Refroidissement : climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 2.1)
  - Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque : 1 980 773 €
- Ach = 1 550 m<sup>2</sup>
- Vp = 4 913 m<sup>3</sup>

### 13.2.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	1 038 852
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	6

### 13.2.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			86	- €	1.527.646,00 €	1.684.570,00 €
<b>Fenêtres</b>	320826 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Ftoit 1,Peanc2,Pext2) (F1,F4,P2-P,P5-P)					
	2,94	1,37	74	136.127,00 €	1.550.360,00 €	1.720.536,00 €
<b>Murs</b>	320823 M0.24(ME0.24,Meanc0.24) (M1,M14)					
	1,4	0,24	55	108.326,00 €	1.446.960,00 €	1.624.651,00 €
<b>Toitures</b>	320820 T0.24(PfGr0.24,T0.24,TP0.24) (H1,T2,T3)					
	0,75	0,24	76	74.708,00 €	1.537.430,00 €	1.707.380,00 €
<b>Sols</b>	320829 Pl0.20(PlCave0.20,PlE0.20,PlSol0.20) (S1,S4,S5)					
	0,5	0,2	80	72.151,00 €	1.561.753,00 €	1.732.534,00 €

13.2.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K		Umoy [W/m².K]	
	86			
BNC [kWh/an]	265 419	Fenêtres	2.94	
BNC [kWh/m².an]	171	Portes	3.39	
BNECS [kWh/an]	47 091	Murs	1.4	
BNF [kWh/an]	7 945	Toits	0.75	
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	38 166	Sols	0.5	
Ew	98			
CGA macro [€]	1 527 646 €			

Optimum				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
	33			
BNC [kWh/an]	131 025	Fenêtres	1.37	F1-F4
BNC [kWh/m².an]	85	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	7 083	Murs	0.2	M1-M14
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	30 533	Toits	0.2	H2-T2-T3
Ew	59	Sols	0.5	-
CGA macro [€]	1 335 111 €			
Investissement [€]	419 766 €			
Combinaison n°	323295			

Caractéristiques techniques :

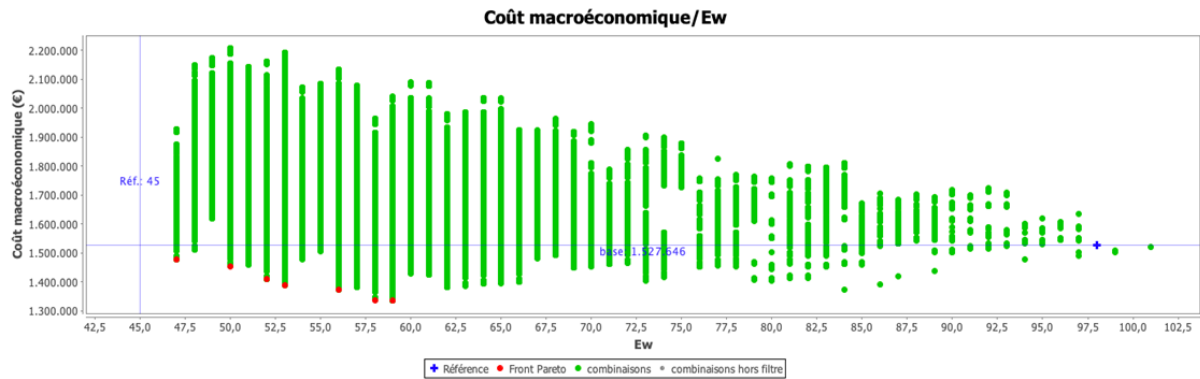
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz.
- Pas de panneaux solaires thermiques.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 51% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 11% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 20% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation qui produit également l'eau chaude sanitaire de manière instantanée. Comme les bâtiments étaient déjà équipés d'une chaudière gaz (non à condensation) pour la production de chaleur et d'eau chaude sanitaire, la rentabilité de la mesure s'explique exclusivement par l'amélioration des rendements des nouvelles chaudières installées. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED. La climatisation est assurée par une PAC air-air (EER 4). Le point du FP avec un niveau Ew 58, qui présente un CGA quasi identique (+0,2 %), se distingue du cost-optimum « absolu » par l'absence complète de système de climatisation.

<b>Optimum U conforme</b>					
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>	
<b>BNC [kWh/an]</b>	26	116 590	Fenêtres	1.37	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	75		Portes	2	P2-P
<b>BNF [kWh/an]</b>	7 565		Murs	0.2	M1-M16
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	30 533		Toits	0.15	T3
<b>Ew</b>	56		Sols	0.2	S1-S4-S5
<b>CGA macro [€]</b>		1 373 543 €			
<b>Investissement [€]</b>		495 276 €			
<b>Combinaison n°</b>		323095			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangé par rapport au cas de base (pas de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des ventilo-convecteurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite instantanément par la chaudière gaz.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4 W/m² - L500).

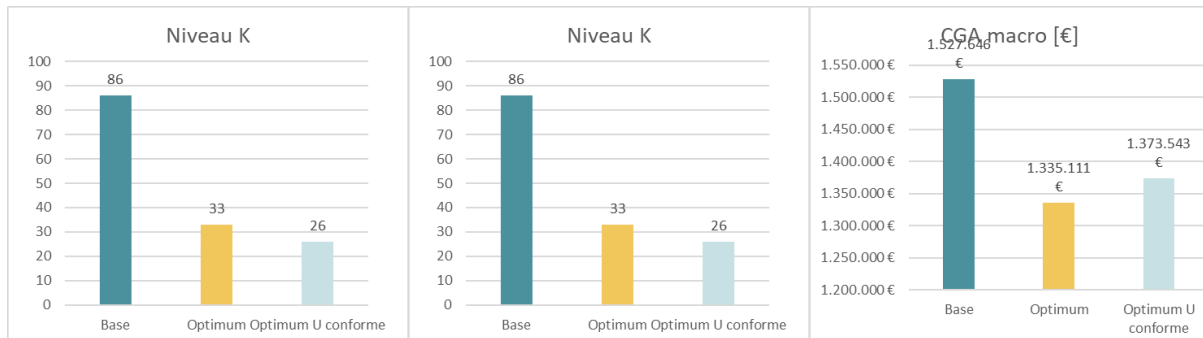
L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 56% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 5% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 20% par rapport au cas de base.

Au-delà de l'isolation du plancher, l'optimum « U conformes » se distingue également par un renforcement de l'isolation des toitures. Son CGA est 2,9 % supérieur à celui de l'optimum « absolu », mais reste 10 % inférieur à celui du cas de base.

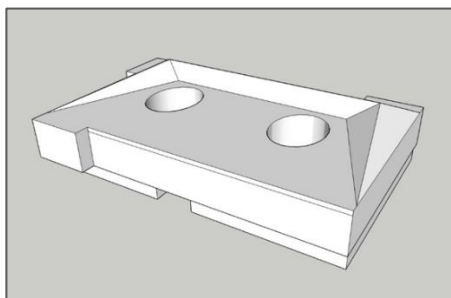


À noter que tous les points du Front de Pareto ont un CGA inférieur à celui du cas de base. Le cas le plus performant énergétiquement présente un niveau Ew 47 et un CGA 10,6 % supérieur à l'optimum « absolu ». Ce niveau Ew 47 est caractérisé par un niveau d'isolation plus performant (0,15 W/m<sup>2</sup>K pour les murs et toitures, triple vitrage), des systèmes identiques à l'optimum « absolu », et un système de ventilation double flux (alimentation mécanique, extraction mécanique) avec échangeur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ).

## 14. Analyse des résultats des maisons de repos neuves

### 14.1. MRN1 – Maison de repos neuve 1

#### 14.1.1. Bâtiment de référence



- Maison de repos répondant aux standards passifs
- Deux atriums centraux offrent un apport de lumière naturelle et un accès à une cour intérieure
- Une cuisine collective de type industrielle doit permettre de préparer les repas des résidents et de personnes externes
- Nombre de lits : 140
- Toiture plate isolée
- Ossature bois isolée
- Dalle de béton sur granulat de verre cellulaire
- Triple vitrage
- Chauffage central gaz à condensation
- Eau chaude sanitaire via chaudière, sans stockage
- Refroidissement : climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 2.1)
- Ventilation : système double flux avec récupérateur de chaleur ( $\eta = 70\%$ )
- Valeur intrinsèque : 13 174 245 €
- $A_{ch} = 10\,000\text{ m}^2$
- $V_p = 27\,833\text{ m}^3$

#### 14.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	41038
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	7

#### 14.1.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$

Base			
	K		Umoy [W/m².K]
BNC [kWh/an]	377 029	Fenêtres	1.35
BNC [kWh/m².an]	38	Portes	2
BNECS [kWh/an]	282 406	Murs	0.2



<b>BNF [kWh/an]</b>	568 581	Toits	0.2
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	989 665	Sols	0.24
<b>Ew</b>	90		
<b>CGA macro [€]</b>	35 644 692 €		

<b>Optimum</b>				
<b>K</b>	25	<b>Umoy [W/m².K]</b>		<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	377 303	Fenêtres	1.35	F1
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	38	Portes	2	P5-PVC
<b>BNF [kWh/an]</b>	432 344	Murs	0.2	M9-M13
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	197 933	Toits	0.2	T3
<b>Ew</b>	43	Sols	0.24	S1-S2-S5-S11
<b>CGA macro [€]</b>	21 776 239 €			
<b>Investissement [€]</b>	12 488 885 €			
<b>Combinaison n°</b>	319650			

#### Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux (alimentation mécanique, extraction mécanique) avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par la chaudière gaz avec un stockage.
- 22 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage sont inchangés par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 24% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 80% par rapport au cas de base.

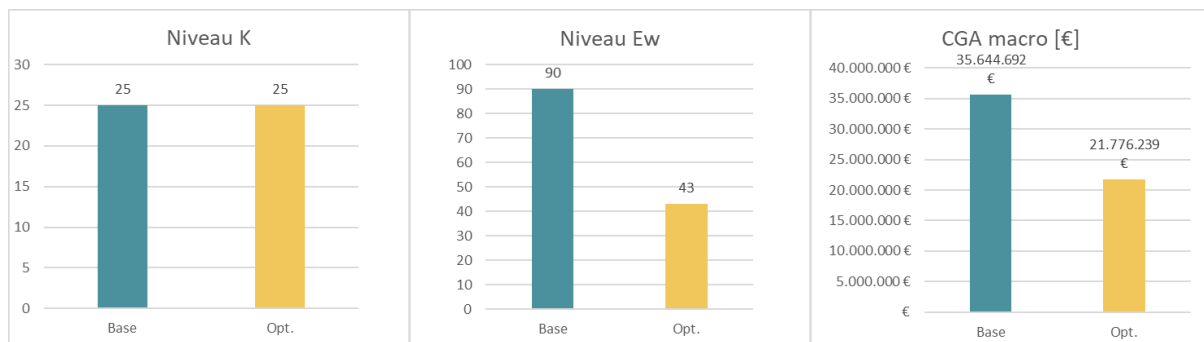


La différence entre les 2 nuages de points sur le graphique ci-dessus s'explique par le remplacement de l'éclairage par du LED pour l'ensemble des combinaisons plus performantes.

L'optimum « absolu » correspond à un optimum « PEB conforme » car il respecte toutes les exigences (U, K, Ew). Le niveau d'isolation thermique est identique au cas de base ; la différence dans les résultats énergétiques (Ew90 pour le cas de base, Ew 43 pour l'optimum) se justifie donc par une augmentation des rendements du récupérateur de chaleur du système de ventilation et de la chaudière, une réduction de la consommation de froid (liée notamment à l'utilisation d'un éclairage LED, et d'un système de refroidissement plus performant), et par l'installation de 22 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire.

Le CGA macroéconomique de l'optimum est 38,9 % inférieur à celui du cas de base.

Tous les points du Front de Pareto ont un CGA nettement inférieur à celui du cas de base. Le cas le plus performant énergétiquement (Ew 40) voit son niveau d'isolation thermique renforcé par rapport à l'optimum (0,15 W/m<sup>2</sup>K pour toutes les parois opaques, triple vitrage), mais conserve les mêmes systèmes. Son CGA est 4,5 % supérieur à celui de l'optimum « absolu ».



#### 14.1.4. Niveau de performance cost-optimum Ew avec une installation photovoltaïque

Optimum PV				
	K	25	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	377 303	Fenêtres	1.35	F1
BNC [kWh/m².an]	38	Portes	2	P5-PVC
BNF [kWh/an]	432 344	Murs	0.2	M9-M13
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	197 933	Toits	0.2	T3
Ew	42	Sols	0.24	S1-S2-S5-S11
CGA macro [€]	21 626 479 €			
Investissement [€]	12 528 582 €			
Combinaison n°	323799			

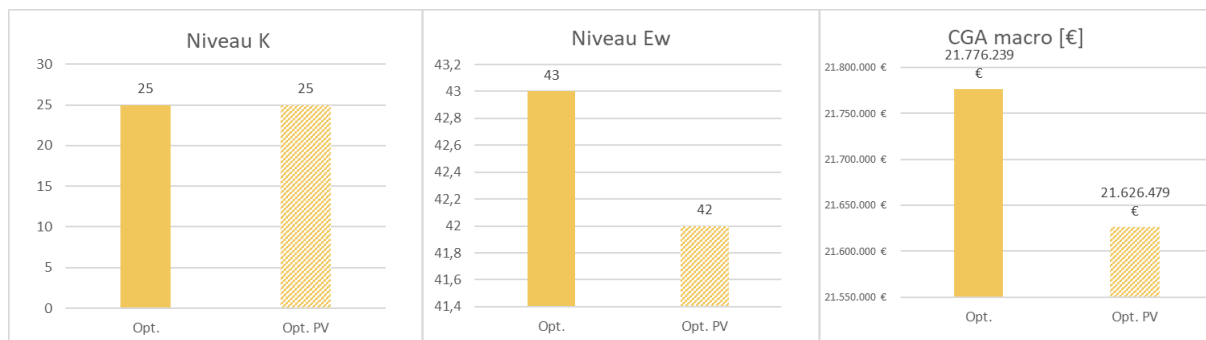
Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.

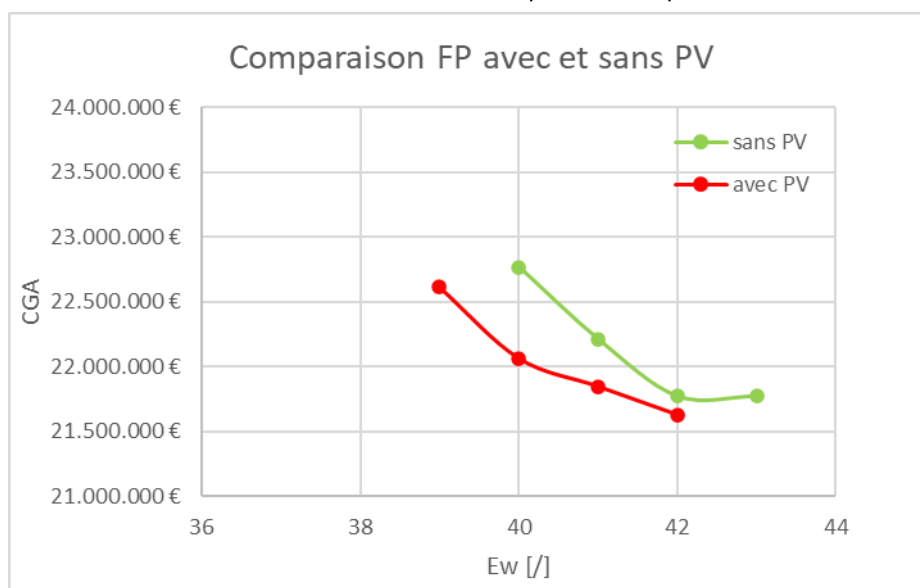
- Ventilation double flux (alimentation mécanique, extraction mécanique) avec échangeur,  $\eta = 80\%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz avec un stockage.
- 22 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire.
- 25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Eclairage LED (4W/m<sup>2</sup> - L500).

Ici encore, l'optimum « absolu » et l'optimum « PEB conforme » se confondent.

Les conclusions tirées sans l'installation photovoltaïque sont toujours valables dans ce cas, à ceci près que l'installation de ces 25 kWc de panneaux sur le toit engendre une diminution du niveau Ew d'1 point, et un gain sur le CGA d'environ 150 000 euros (soit 0,7 % du CGA de l'optimum « absolu » sans PV). Au vu de la taille du bâtiment, l'apport lié à une installation PV de 25 kWc est très faible, en comparaison aux consommations globales.



Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :

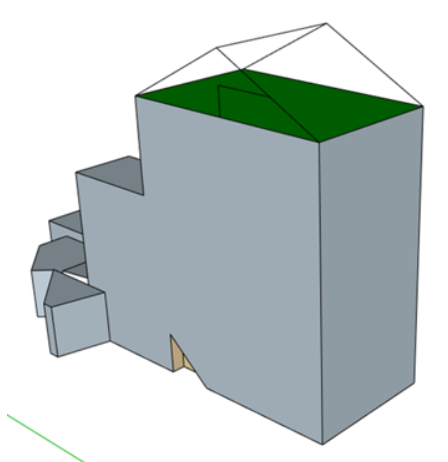


À noter que comme pour les autres typologies, dans toutes les simulations PV, les résultats indiquent un simple décalage du FP (diminution constante du CGA et des niveaux Ew). Les conclusions que nous avons tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

## 15. Analyse des résultats des hôtels existants

### 15.1. HOE1 – Hôtel existant 1

#### 15.1.1. Bâtiment de référence



- Construit en +/- 1920
  - Immeuble de type maison de maître semi-mitoyenne. Annexe construite au rez-de-chaussée et sur une partie du premier étage dans les années 70 (toiture plate)
  - La façade avant, parallèle à la rue, est située au sud-ouest
  - Nombre de chambres : 10
  - Services complémentaires : restaurant au rez-de-chaussée
  - Le bâtiment construit n'est pas isolé
  - Murs pleins en briques, double vitrage
  - Chauffage central gaz atmosphérique
  - Eau chaude sanitaire via chaudière avec stockage
  - Pas de refroidissement
  - Pas de système de ventilation
- Valeur intrinsèque : 351 807 €
  - Ach = 458.7 m<sup>2</sup>
  - Vp = 1 580 m<sup>3</sup>

#### 15.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées : 270 648  
 Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP : 11

#### 15.1.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U <sub>moy,base</sub>	U <sub>moy,costopt</sub>	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>168</b>	- €	<b>858 498.00 €</b>	<b>938 717.00 €</b>
<b>Fenêtres</b>	320787 fen0.6(Ch0.95-TV0.6/0.5-WE,Ftoit 2,Pext0.8) (F1,F4,P2-P)					
	<b>2.69</b>	<b>0.89</b>	<b>146</b>	<b>106 195.00 €</b>	<b>891 898.00 €</b>	<b>986 179.00 €</b>
<b>Murs</b>	320796 M0.24(ME0.24,Meanc0.24) (M1,M14)					
	<b>2.4</b>	<b>0.24</b>	<b>79</b>	<b>78 326.00 €</b>	<b>696 453.00 €</b>	<b>789 615.00 €</b>
<b>Toitures</b>	320785 T0.20(PfGr0.2,TP0.20) (H2,T3)					
	<b>2.13</b>	<b>0.2</b>	<b>140</b>	<b>37 074.00 €</b>	<b>820 377.00 €</b>	<b>907 166.00 €</b>
<b>Sols</b>	320791 Pl0.20(PlCave0.20,PlSol0.20) (S1,S4)					
	<b>0.52</b>	<b>0.2</b>	<b>165</b>	<b>20 565.00 €</b>	<b>882 940.00 €</b>	<b>969 906.00 €</b>

15.1.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K	168	Umoy [W/m².K]	
BNC [kWh/an]	155 185	Fenêtres	2.69	
BNC [kWh/m².an]	338	Portes	3.18	
BNECS [kWh/an]	12 973	Murs	2.4	
BNF [kWh/an]	1 812	Toits	2.13	
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	9 321	Sols	0.52	
Ew	188			
CGA macro [€]	858 498 €			

Optimum				
	K	36	Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	48 014	Fenêtres	1.38	F1-F4
BNC [kWh/m².an]	105	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	2 720	Murs	0.2	M1-M14
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	7 457	Toits	0.2	H2-T3
Ew	65	Sols	0.52	-
CGA macro [€]	548 763 €			
Investissement [€]	231 386 €			
Combinaison n°	320068			

Caractéristiques techniques :

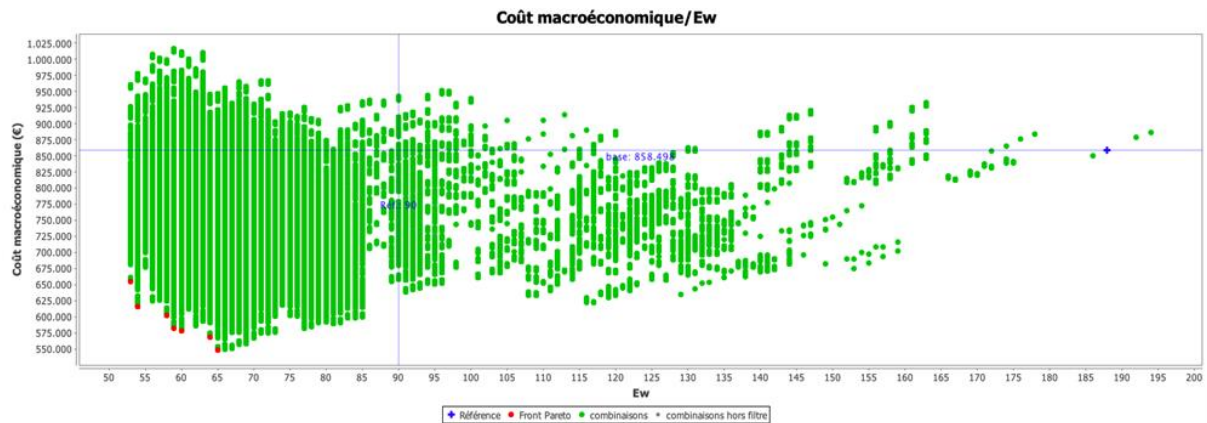
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de système de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Pas de système de refroidissement.
- Eclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 69% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 50% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 20% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation qui produit également l'eau chaude sanitaire de manière instantanée. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED. Le point le plus proche sur le FP, affichant un Ew de 64 et un CGA légèrement supérieur est celui décrit ci-dessous, comme étant l'optimum « U conformes » :

<b>Optimum U conforme</b>				
	<b>K</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>	45 545	Fenêtres	1.38	F1-F4
<b>BNC [kWh/m².an]</b>	99	Portes	2	P2-P
<b>BNF [kWh/an]</b>	2 792	Murs	0.2	M1-M14
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>	7 457	Toits	0.15	H2-T3
<b>Ew</b>	64	Sols	0.2	S1-S4
<b>CGA macro [€]</b>	568 472 €			
<b>Investissement [€]</b>	256 845 €			
<b>Combinaison n°</b>	319708			

Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation inchangée par rapport au cas de base (pas de système de ventilation).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Pas de système de refroidissement.
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

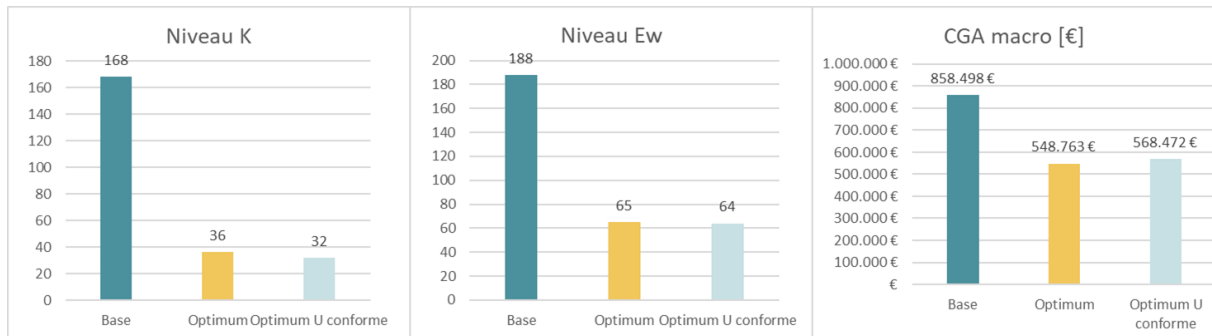
L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 71% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont augmenté de 54% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 20% par rapport au cas de base.

En comparaison avec le cost-optimum « absolu », la combinaison correspondant au cost-optimum « U conformes » prévoit également une isolation des planchers, et un renforcement de l'isolation des toitures.

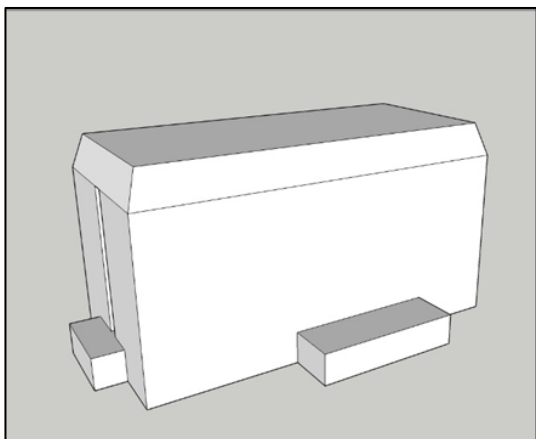


Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum « U conformes » est à peine 3,59 % supérieur au cost-optimum « absolu », tout en restant largement inférieur (-33,8 %) à celui du cas de base. Le meilleur niveau Ew sur le FP est de 53. Dans cette configuration à la performance énergétique supérieure, l'isolation thermique est renforcée à 0,15 W/m<sup>2</sup>K pour les parois opaques, les fenêtres sont équipées de triple vitrage, le chauffage et le refroidissement sont assurés par une PAC air-eau, et l'eau chaude sanitaire par un boiler thermodynamique. Une installation solaire thermique de 12 m<sup>2</sup> est installée. Le CGA est 19,4% supérieur au CGA du cost-optimum « absolu », mais reste 23,7 % inférieur au CGA du cas de base.



## 15.2. HOE2 – Hôtel existant 2

### 15.2.1. Bâtiment de référence



- Bâtiment construit avant 1950
- Toiture plate sans isolation
- Il possède 53 chambres, 6 salles de conférences pouvant accueillir jusqu'à 200 personnes, un restaurant et un bar
- Les chambres sont équipées de climatisation avec contrôle individuel
- Dalle sur sol et plancher sur vide ventilé, sans isolation
- Murs pleins en briques non isolés, double vitrage
- Chauffage central mazout
- Eau chaude sanitaire via chaudière avec stockage
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 2.1)
- Système de ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques (double flux), avec récupération de chaleur ( $\eta = 75\%$ )
- Valeur intrinsèque : 3 844 459 €
- Ach = 5 349 m<sup>2</sup>
- Vp = 18 913 m<sup>3</sup>

### 15.2.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	38 448
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	9

### 15.2.3. Niveau de performance cost-optimum U max des parois

Combinaisons	U moy, base	U moy, costopt	Niveau K	Investissement _COST	COST_Macro_eco	COST_fin
<b>Base</b>			<b>96</b>	- €	6 095 754.00 €	6 044 972.00 €
<b>Fenêtres</b>	319277 fen1.0(Ch1.7-DV1.0/0.5-WE,Pext2) (F1,P2-P)					
	4.43	1.36	83	200 287.00 €	5 961 674.00 €	5 982 404.00 €
<b>Murs</b>	319280 M0.24(ME0.24,Ms0.24) (M16)					
	1.06	0.24	76	13 545.00 €	5 764 420.00 €	5 818 399.00 €
<b>Toitures</b>	319274 T0.24(TP0.24) (T3)					
	3.11	0.24	65	215 049.00 €	5 686 069.00 €	5 810 639.00 €
<b>Sols</b>	319283 Pl0.20(PlSol0.20,Plvv0.20) (S3,S4)					
	0.96	0.2	88	168 600.00 €	6 041 065.00 €	6 045 357.00 €

15.2.4. Niveau de performance cost-optimum  $E_w$ 

Base				
	K		Umoy [W/m².K]	
	96			
BNC [kWh/an]	953 958	Fenêtres	4.43	
BNC [kWh/m².an]	178	Portes	4	
BNECS [kWh/an]	116 283	Murs	1.06	
BNF [kWh/an]	0	Toits	3.11	
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	117 872	Sols	0.96	
Ew	142			
CGA macro [€]	6 095 754 €			

Optimum				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
	31			
BNC [kWh/an]	206 357	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	39	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	16 615	Murs	0.24	M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	78 581	Toits	0.2	T3
Ew	46	Sols	0.96	-
CGA macro [€]	3 324 351 €			
Investissement [€]	850 596 €			
Combinaison n°	326700			

Caractéristiques techniques :

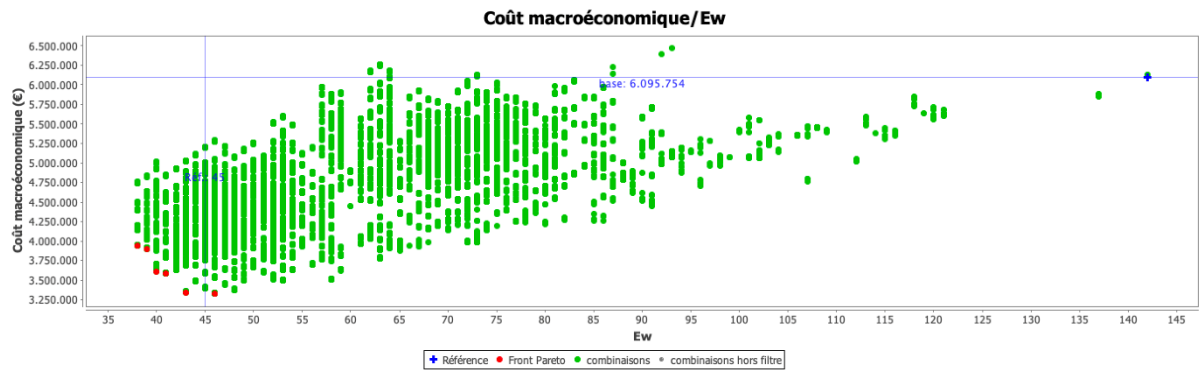
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux (amenées mécaniques, extractions mécaniques, avec récupération de chaleur ( $\eta = 80 \%$ )).
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED ( $4 \text{ W/m}^2$  - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 78% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement sont passés de rien à 16.615 kWh/an.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 33% par rapport au cas de base.



La combinaison correspondant au cost-optimum prévoit le remplacement des portes et fenêtres et l'isolation thermique de l'ensemble des parois de déperdition, excepté le plancher.

Le système de production de chaleur existant est remplacé par une chaudière gaz à condensation qui produit également l'eau chaude sanitaire de manière instantanée. L'ensemble de l'éclairage est remplacé par du LED. Le refroidissement est assuré par une PAC air-air.

Il existe un point sur le FP qui affiche un CGA très légèrement supérieur (+ 0,6 %), et un gain de 3 points sur le Ew, qui prévoit une isolation des planchers, mais on constate un niveau moins élevé de l'isolation des toitures (0,24 W/m².K). La chaleur et l'ECS sont produits par une chaudière au gaz, le froid est produit par une PAC air-air. Il s'agit du cas "U conformes" ci-dessous.

Optimum U conforme				
	K		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]	24	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]	30	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]	18 812	Murs	0.24	M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	78 581	Toits	0.24	T3
Ew	43	Sols	0.24	S3-S4
CGA macro [€]	3 344 646 €			
Investissement [€]	990 453 €			
Combinaison n°	326646			

Caractéristiques techniques :

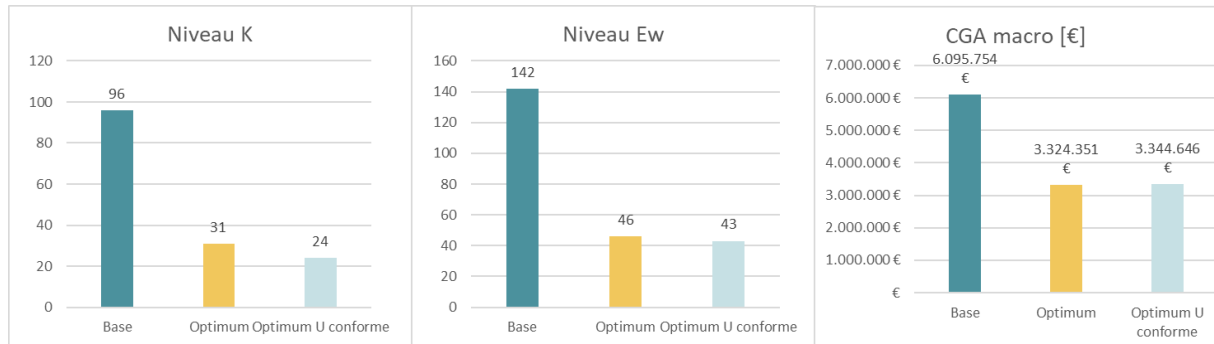
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation identique au cas de base (amenées mécaniques, extractions mécaniques (double flux), avec récupération de chaleur ( $\eta = 75 \%$ ))
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz, sans stockage.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont diminué de 83% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement sont passés de rien à 18.812 kWh/an.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 33% par rapport au cas de base.



Le coût macroéconomique de la combinaison correspondant au cost-optimum « U conformes » est 0.61 % supérieur au cost-optimum « absolu », tout en restant inférieur (-45 %) à celui du cas de base et donc en restant rentable.

#### 15.2.5. Niveau de performance cost-optimum E<sub>w</sub> avec une installation photovoltaïque

Optimum PV					
	K	31		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]		206 357	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]		39	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]		16 615	Murs	0.24	M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]		78 581	Toits	0.2	T3
Ew		43	Sols	0.96	-
CGA macro [€]		3 174 591 €			
Investissement [€]		890 293 €			
Combinaison n°		325689			

Caractéristiques techniques :

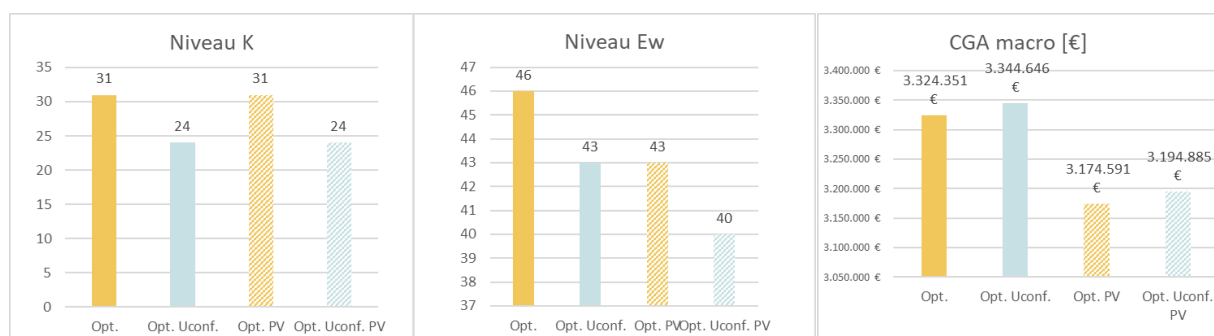
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.

- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'ECS est produite de manière instantanée par la chaudière gaz (sans stockage).
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).

Optimum U conforme PV					
	K	24		Umoy [W/m².K]	Groupe
BNC [kWh/an]		159 022	Fenêtres	1.43	F1
BNC [kWh/m².an]		30	Portes	2	P2-P
BNF [kWh/an]		18 812	Murs	0.24	M16
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]		78 581	Toits	0.24	T3
Ew		40	Sols	0.24	S3-S4
CGA macro [€]		3 194 885 €			
Investissement [€]		1 030 150 €			
Combinaison n°		325626			

#### Caractéristiques techniques :

- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite de manière instantanée par la chaudière (sans stockage).
- **25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.**
- Refroidissement : PAC air-air réversible (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).



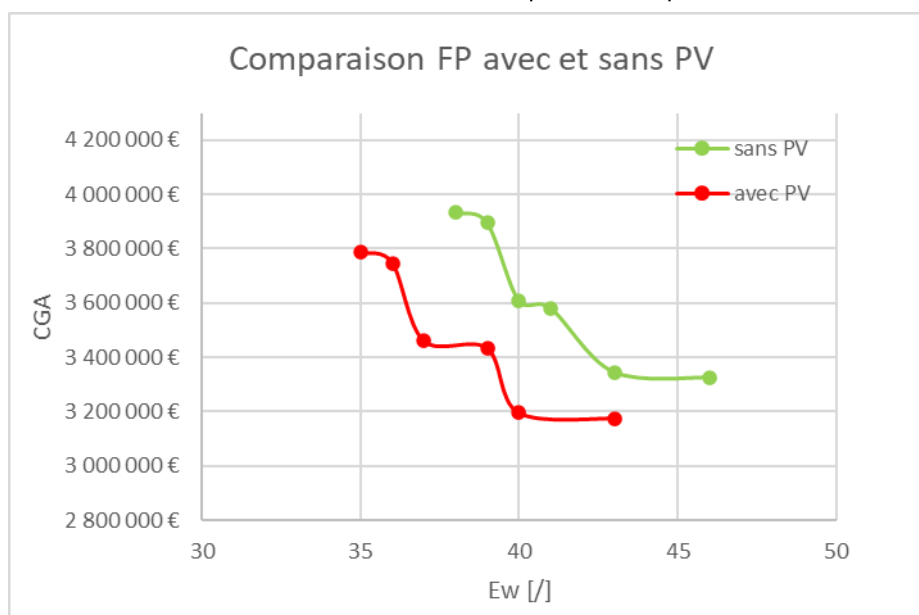
Avec l'installation de 25 kWc sur cet immeuble, l'amélioration du  $E_w$  est de 3 points pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150 000 € (-4,5 % par rapport à l'optimum « absolu »).

À noter que, dans les simulations PV, les résultats indiquent globalement un simple décalage du FP (diminution constante du CGA et des niveaux  $E_w$ ).

Ceci est dû à la méthode de calcul PEB, qui considère la production PV comme une simple compensation de la consommation, tous vecteurs confondus, sans tenir compte d'un scénario d'autoconsommation/

réinjection sur le réseau. Les conclusions tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :



À noter que, dans toutes les simulations PV, les résultats indiquent un simple décalage du FP (diminution constante du CGA et des niveaux Ew). Les conclusions que nous avons tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

## 16. Analyse des résultats des hôtels neufs

### 16.1. HON1 – Hôtel neuf 1

#### 16.1.1. Bâtiment de référence



- Hôtel de 150 chambres de 2 à 8 personnes (678 lits) avec parking en sous-sol
- Bâtiment en forme de « T »
- Murs en béton armé, isolé
- Toiture plate isolée
- Triple vitrage
- Récupérateurs de chaleur sur les douches
- Chauffage central gaz à condensation
- Eau chaude sanitaire via chaudière avec stockage
- Pas de refroidissement
- Ventilation : amenées mécaniques, extractions mécaniques (double flux) avec récupérateur de chaleur ( $\eta = 75\%$ )
- Valeur intrinsèque : 9 937 156 €
- $A_{ch} = 6\,167\text{ m}^2$
- $V_p = 21\,660\text{ m}^3$

#### 16.1.2. Combinaisons générées par le COT

Nombre de combinaisons de mesures calculées :	164 137
Nombre de combinaisons enveloppe/systèmes sur le FP :	52

#### 16.1.3. Niveau de performance cost-optimum $E_w$

Base			
K	20	Umoy [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]	
BNC [ $\text{kWh}/\text{an}$ ]	155 547	Fenêtres	1.43
BNC [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{an}$ ]	252	Portes	1.33
BNECS [ $\text{kWh}/\text{an}$ ]	514 064	Murs	0.24
BNF [ $\text{kWh}/\text{an}$ ]	92 986	Toits	0.1
Conso. Fin. éclairage [ $\text{kWh}/\text{an}$ ]	686 288	Sols	0.17
$E_w$	90		
Espec [ $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{an}$ ]	559		
CGA macro [€]	21 231 376 €		

<b>Optimum</b>					
	<b>K</b>	<b>14</b>		<b>Umoy [W/m².K]</b>	<b>Groupe</b>
<b>BNC [kWh/an]</b>		199 946	Fenêtres	0.8	-
<b>BNC [kWh/m².an]</b>		324	Portes	1.07	P1-alu
<b>BNF [kWh/an]</b>		15 776	Murs	0.14	M3-M13
<b>Conso. Fin. éclairage [kWh/an]</b>		137 258	Toits	0.1	T1
<b>Ew</b>		51	Sols	0.17	S1-S2-S4-S5
<b>Espec [kWh/m².an]</b>		315			
<b>CGA macro [€]</b>		14 580 851 €			
<b>Investissement [€]</b>		9 322 200 €			
<b>Combinaison n°</b>		325662			

#### Caractéristiques techniques :

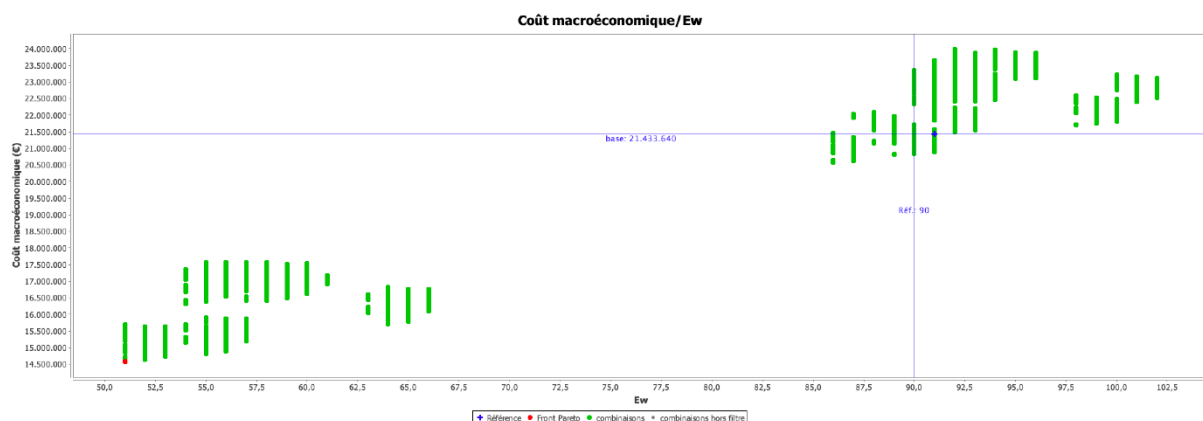
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . La performance de l'enveloppe permet d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 80 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par une chaudière gaz sans stockage.
- 22 m² de panneaux solaires thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m² - L500).

L'impact de ces mesures est le suivant :

Les besoins nets de chauffage ont augmenté de 29% par rapport au cas de base.

Les besoins nets de refroidissement ont diminué de 83% par rapport au cas de base.

La consommation finale en énergie liée à l'éclairage a diminué de 80% par rapport au cas de base.

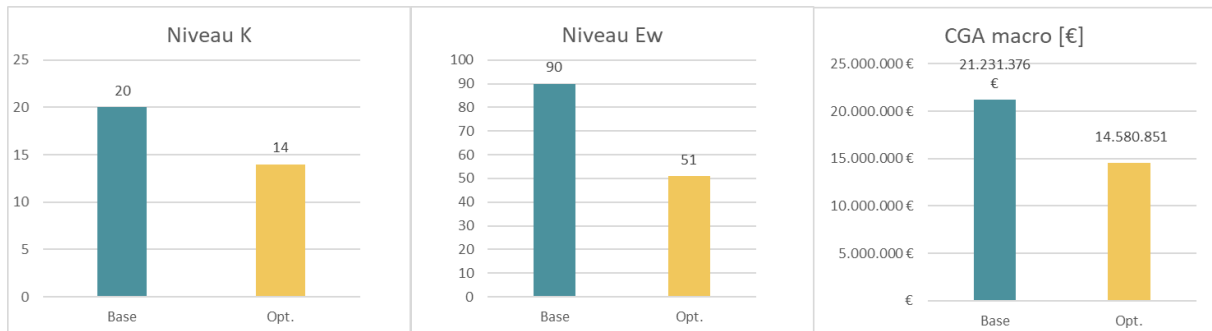


La différence entre les 2 nuages de points sur le graphique ci-dessus s'explique par le remplacement de l'éclairage par du LED pour l'ensemble des combinaisons plus performantes.

La combinaison correspondant au cost-optimum est également « PEB conforme » puisqu'elle permet de respecter les exigences de valeurs U, niveau K (35) et niveau Ew (90) avec une enveloppe très performante, une



chaudière gaz à condensation qui produit également l'ECS, 22 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques, et une climatisation air-air pour le refroidissement.



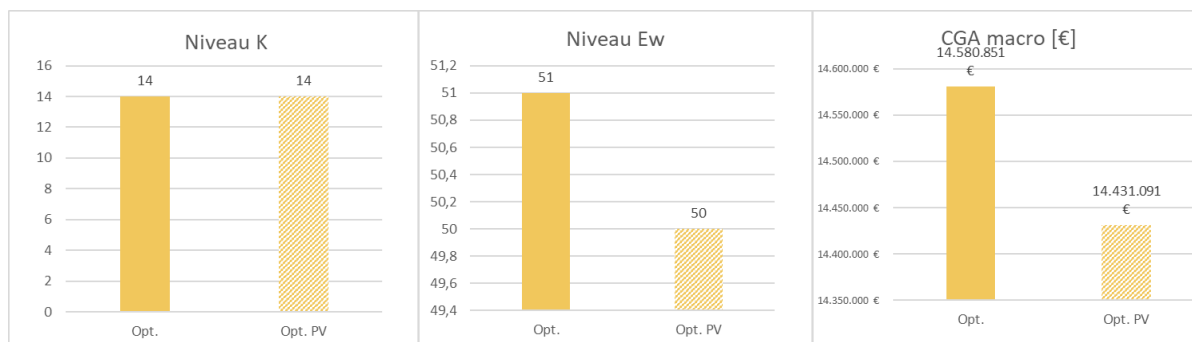
Le CGA macroéconomique de l'optimum « absolu » est 31.32 % inférieur à celui du cas de base.

#### 16.1.4. Niveau de performance cost-optimum $E_w$ avec une installation photovoltaïque

Optimum PV				
	K	14	Umoy [W/m <sup>2</sup> .K]	Groupe
BNC [kWh/an]	199 946	Fenêtres	0.8	-
BNC [kWh/m <sup>2</sup> .an]	324	Portes	1.07	P1-alu
BNF [kWh/an]	15 776	Murs	0.14	M3-M13
Conso. Fin. éclairage [kWh/an]	137 258	Toits	0.1	T1
Ew	50	Sols	0.17	S1-S2-S4-S5
Espec [kWh/m <sup>2</sup> .an]	306			
CGA macro [€]	14 431 091 €			
Investissement [€]	9 361 897 €			
Combinaison n°	327462			

Caractéristiques techniques :

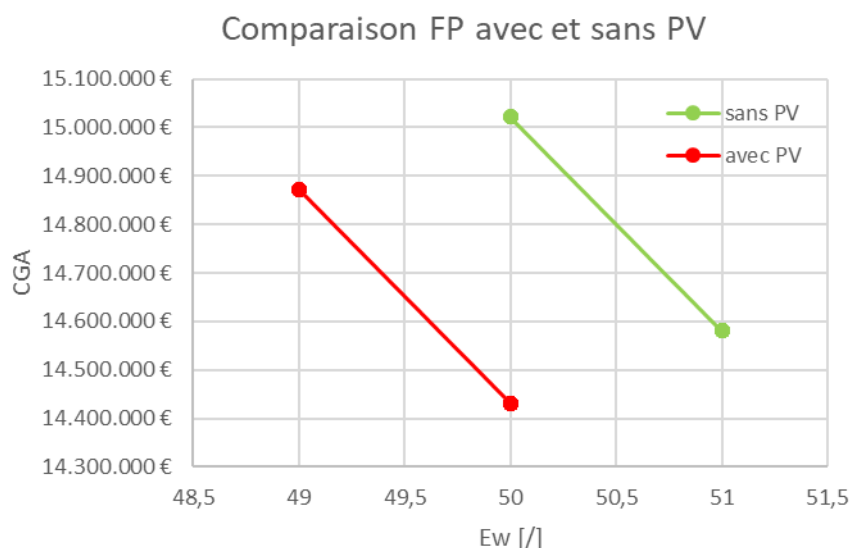
- Etanchéité à l'air caractérisée par un  $v_{50} = 6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ . Les travaux au niveau de l'enveloppe permettent d'atteindre ce niveau d'étanchéité à l'air, moyennant une mise en œuvre de qualité des techniques et matériaux utilisés. Les coûts considérés dans l'étude ne prévoient aucun supplément associé à la qualité d'une mise en œuvre effectuée dans les règles de l'art.
- Ventilation double flux avec échangeur,  $\eta = 75 \%$ , équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.
- La production de chauffage est assurée par une chaudière gaz à condensation.
- L'émission de chaleur est assurée par des radiateurs.
- L'eau chaude sanitaire est produite par la chaudière gaz sans stockage.
- 22 m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS.
- 25 kWc de panneaux solaires photovoltaïques.
- Refroidissement : Climatisation par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- Éclairage LED (4 W/m<sup>2</sup> - L500).



Avec l'installation de 25 kWc sur cet immeuble, l'amélioration du  $E_w$  est de 1 point pour une diminution du CGA macroéconomique d'environ 150 000 € (-1% par rapport à l'optimum « absolu »).

Au vu de la taille du bâtiment, l'apport lié à une installation PV de 25 kWc est très faible, en comparaison aux consommations globales.

Comparaison des Fronts de Pareto avec et sans installation photovoltaïque :



Les simulations PV montrent un simple décalage du Front de Pareto, ce qui traduit une diminution constante du CGA et des niveaux  $E_w$ . Les conclusions tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration des résultats énergétiques et économiques.

## 17. Conclusions générales de l'étude sur les bâtiments résidentiels

Réalisée selon une méthodologie commune sur 36 bâtiments de référence répartis en 4 segments représentatifs du parc immobilier résidentiel wallon, l'étude a permis de dégager une série d'observations et de conclusions formulées par segment.

Les résultats obtenus ont notamment permis de comparer les coûts globaux actualisés (CGA) de différentes combinaisons de mesures de performance énergétique appliqués aux bâtiments sélectionnés. En particulier, l'objectif de cette étude a été de calculer les écarts moyens pondérés, entre les cost-optimums (absolus, ou en ligne avec les objectifs QZEN – pour le neuf – et SRLT – pour l'existant) et les niveaux d'exigence actuels.

D'une manière générale, il apparaît que les optimums moyens pondérés **Ew 45** et **Espec 80 kWh/m<sup>2</sup>.an** des logements individuels neufs, sont remarquablement proches des niveaux d'exigences (**Ew 45** et **Espec 85 kWh/m<sup>2</sup>.an**) en vigueur depuis 2021. Signe qu'avec les techniques constructives et les systèmes de production de chaleur disponibles sur le marché actuellement, on peut construire des logements résidentiels globalement performants, sans en augmenter considérablement le coût global (sur 30 ans).

L'optimum moyen pondéré pour le niveau K se trouve, lui, au niveau **K27**, ce qui représente une amélioration substantielle (-23%) par rapport à l'exigence actuelle (K35). Attention toutefois que la prise en compte des nœuds constructifs dans l'évaluation du niveau K (et spécialement la méthode du supplément forfaitaire, autorisée par la réglementation) doit imposer une réflexion additionnelle avant d'envisager le renforcement de l'exigence.

Dans le cas des habitations existantes, les optimums moyens pondérés (en termes de cost-optimums absolus) sont relativement éloignés des objectifs de la SRLT (Espec 144 kWh/m<sup>2</sup>.an). Dans 9 cas sur 14, il existe toutefois des combinaisons dont les CGA macroéconomiques sont très proches (moins de 5% d'écart) des CGA des cost-optimums absolus, tout en présentant des niveaux Espec inférieurs à 85 kWh/m<sup>2</sup>.an. Les bâtiments présentant une isolation thermique initiale se trouvent rarement dans ces cas intéressants. En moyenne pondérée, l'écart de CGA entre l'optimum "SRLT" et l'optimum "absolu", est de 4,8%.

Dans le cas des immeubles à appartements existants, l'analyse est relativement similaire à celle des habitations existantes. Les optimums moyens pondérés (en termes de cost optimums absolus) sont relativement éloignés des objectifs de la SRLT (Espec 165 kWh/m<sup>2</sup>.an). Des solutions "cost-optimums SRLT" existent et sont identifiées ; leurs CGA macro-économiques, bien que plus faibles que les CGA des cas de base (ce qui les rend donc rentables), sont par contre souvent plus éloignés des CGA des cost-optimums absolus (12% en moyenne pondérée).

Dans le cas des immeubles à appartements neufs, l'optimum se situe à un niveau **K31**, un niveau **Ew 80** et un niveau **Espec 128 kWh/m<sup>2</sup>.an**. L'optimum QZEN, présentant un Espec 72 kWh/m<sup>2</sup>.an, présente également un CGA macro-économique 21,9% supérieur à celui du cost-optimum absolu.

Au niveau des coefficients de transmission thermique des parois (U), on observe que :

Le  $U_w$  optimum moyen pondéré des fenêtres (1,34 W/m<sup>2</sup>K) est 11% plus performant que l'exigence  $U_{max}$  2021 (1,5 W/m<sup>2</sup>K) dans les habitations unifamiliales existantes ; 8% (1,38 W/m<sup>2</sup>K) dans les habitations unifamiliales neuves ; ou encore, 9% (1,37 W/m<sup>2</sup>K) dans les immeubles à appartement existants. Dans le cas de l'immeuble à appartements neuf, le  $U_w$  optimum moyen se situe à 1,83 W/m<sup>2</sup>K (+22%), ce qui est moins performant que l'exigence actuelle. L'exigence actuelle semble donc suffisamment alignée sur le niveau d'amélioration cost-optimum et ne doit pas être renforcée ;

- Dans les différents segments étudiés, le  $U$  optimum moyen pondéré des murs extérieurs est systématiquement plus performant que l'exigence  $U_{max}$  2021 (0,24 W/m<sup>2</sup>K) : 0,166 W/m<sup>2</sup>K (-31%) en moyenne pour les habitations existantes ; 0,208 W/m<sup>2</sup>K (-13%) pour les habitations neuves ; 0,182 W/m<sup>2</sup>K (-24%) pour les immeubles à appartements existants ; 0,22 W/m<sup>2</sup>K (-8%) pour les immeubles à appartements neufs. Spécifions que l'étude des optimums sur les  $U$  de parois dans l'existant a été réalisée en considérant que les systèmes (chauffage, ECS) restaient inchangés (et globalement peu performants), alors que l'étude des  $U$  optimums dans le neuf s'accompagnait d'office de systèmes performants. Par conséquent, les résultats pour l'existant tendent à favoriser des  $U$  plus exigeants que dans le neuf. Globalement, **un renforcement harmonisé des exigences d'isolation thermique des murs extérieurs, au niveau 0,20 W/m<sup>2</sup>K, se justifierait.**
- Le  $U$  optimum moyen pondéré des toitures est systématiquement plus performant que l'exigence  $U_{max}$  2021 en vigueur (0,24 W/m<sup>2</sup>K) : 0,2 W/m<sup>2</sup>K (-17%) pour les habitations unifamiliales, neuves ou existantes, et 0,21 W/m<sup>2</sup>K (-13%) pour les immeubles à appartements, neufs ou existants. Par conséquent, **l'exigence pourrait être renforcée au niveau 0,20 W/m<sup>2</sup>K pour ce type de paroi.**
- De même, le  $U$  optimum moyen pondéré des sols est généralement plus performant que l'exigence actuellement en vigueur (0,24 W/m<sup>2</sup>K). Seul l'immeuble à appartements neuf présente un optimum identique au seuil d'exigence actuel. Les immeubles à appartements existants affichent un  $U_{sol}$  optimum moyen pondéré à 0,214 W/m<sup>2</sup>K (-11%). Les habitations neuves suivent, avec un  $U_{sol}$  optimum moyen pondéré à 0,21 W/m<sup>2</sup>K (-13%), et enfin les habitations existantes, à 0,20 W/m<sup>2</sup>K (-17%). Une remarque importante, sur le cas des sols, a déjà été énoncée lors de l'analyse des résultats globaux (simulations enveloppe + systèmes) : dans les habitations existantes, l'isolation thermique des sols ressort rarement dans les combinaisons cost-optimum. La conclusion qui semble s'imposer est donc que le niveau actuel d'exigence ne devrait pas nécessairement être renforcé. Dans les bâtiments neufs, un renforcement d'exigence à 0,20 W/m<sup>2</sup>K se justifierait au regard des résultats.

#### Influence du photovoltaïque sur les résultats :

En accord avec la méthode PEB, qui soustrait l'intégralité de la production photovoltaïque au niveau Espec, le Front de Pareto et le cost-optimum subissent une diminution proportionnelle à la production de l'installation qui a été testée.

Les hypothèses utilisées pour le photovoltaïque sont :

- Une orientation sud
- Une inclinaison de 15°
- Une puissance crête de 3,75 kWc dans les habitations unifamiliales, 15 kWc dans les immeubles à appartements
- L'absence d'ombrage sur les panneaux

Des simulations intégrant des solutions photovoltaïques ont été réalisées sur les cas HN1-T1, IAN1, HE5 et IAE1. Bien que la valeur exacte de l'amélioration sur le Espec dépende bien sûr de l'Ach du bâtiment considéré, les résultats sont globalement les suivants :

Pour les maisons unifamiliales, neuves et existantes, les Espec sont globalement diminués de l'ordre de 40 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Pour l'immeuble à appartements neuf, la diminution est de l'ordre de 33 kWh/m<sup>2</sup>.an.

La prise en compte du photovoltaïque dans l'étude COZEB aurait pour conséquence de biaiser les résultats, en exagérant la compensation énergétique qu'il permet (100% d'autoconsommation). Remarquons également que la compensation se fait sur la consommation en énergie primaire totale : la production d'électricité photovoltaïque, par conséquent, peut tout à fait compenser une consommation de mazout, de gaz ou de biomasse servant à la production de chauffage, par exemple. Les cost-optimum atteints, par conséquent, sont excessivement faibles lorsqu'il s'agit d'évaluer un CGA – et a fortiori de baser une exigence réglementaire, qui ne serait atteignable qu'en ayant recours à cette technologie.

Les tableaux présentés dans la suite indiquent la différence entre les exigences minimales de performance énergétique en vigueur en Wallonie et la moyenne de tous les niveaux optimaux en fonction des coûts calculés à partir des combinaisons de mesures appliquées à tous les bâtiments de référence et types de bâtiments comparables utilisés dans l'étude.

L'écart moyen (en %) est calculé selon la formule ci-dessous, imposée par le Règlement délégué de la CE, compte tenu d'un facteur de pondération estimant l'importance relative de chaque bâtiment de référence au sein de sa catégorie.

#### Détermination de l'écart:

Écart en % (niveau du bâtiment de référence) = (niveau d'optimalité en fonction des coûts [kWh/m<sup>2</sup>a] – exigences minimales de performance actuelles [kWh/m<sup>2</sup>a] / niveau d'optimalité en fonction des coûts [kWh/m<sup>2</sup>a]) × 100 %

Pour les éléments de bâtiment, l'écart est calculé selon l'équation suivante:

Écart en % (pour les éléments de bâtiment) = (niveau d'optimalité en fonction des coûts [unité d'indicateur de performance <sup>(1)</sup>] – exigences minimales de performance actuelles [unité d'indicateur de performance]) / niveau d'optimalité en fonction des coûts] × 100%

### 17.1. Maisons unifamiliales existantes (HE)

Dans le cas des habitations unifamiliales existantes, une différence relativement importante avec les niveaux d'exigence en vigueur s'affiche lorsque l'on analyse les niveaux cost-optimum obtenus dans l'étude des déperditions thermiques (U) des différentes parois (fenêtres, murs, toits, sols). Le tableau ci-dessous affiche en effet des niveaux optimaux moyens pondérés qui semblent plaider en faveur d'un renforcement des exigences d'isolation thermique. À noter que cette conclusion n'est que partielle à ce stade, et doit être revue à l'aune des observations plus générales qui sont tirées sur base des analyses globales (enveloppe + systèmes), et des bâtiments neufs.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PER 2021 existant</b>		<b>1.50</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>
HE1	Maison vernaculaire	6.2%	0.85	0.15	0.20	0.20
HE2	Maison type ouvrière 3 façades	4.1%	1.36	0.15	0.20	0.20
HE3	Maison type ouvrière mitoyenne	15.5%	1.43	0.15	0.20	0.20
HE4	Maison villageoise	4.1%	0.86	0.15	0.20	0.24
HE5	Maison urbaine mitoyenne	16.5%	1.43	0.15	0.20	0.20
HE6	Villa des premières extensions urbaines	10.3%	1.43	0.15	0.20	0.15
HE7	Villa de plain pied	6.2%	1.43	0.15	0.15	0.20
HE8	Maison bel étage mitoyenne	4.1%	0.85	0.15	0.24	0.15
HE9	Villa 4 façades de type lotissement	12.4%	1.43	0.20	0.20	0.20
HE10	Maison type barre de logement social	3.1%	1.43	0.20	0.24	0.20
HE11	Villa 4 façades K70	6.2%	1.43	0.20	0.15	0.20
HE12	Maison 3 façades K70	2.1%	1.38	0.20	0.15	0.24
HE13	Maison mitoyenne bel-étage K70	2.1%	1.39	0.20	0.24	0.20
HE14	Villa 4 façades K55	7.2%	1.37	0.20	0.24	0.24
	<b>Ecart moyen pondéré</b>	100.0%	<b>-11%</b>	<b>-31%</b>	<b>-17%</b>	<b>-17%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1.338</b>	<b>0.166</b>	<b>0.199</b>	<b>0.198</b>

Tableau 15: Ecart moyen pondéré entre U<sub>max</sub> et U<sub>optimum</sub> des différentes parois du bâtiment

L'écart moyen pondéré entre les niveaux U optimum des maisons unifamiliales existantes de référence analysés dans l'étude et les exigences U max en vigueur en 2021 varie de -11% à -31% en fonction des parois. Les exigences U<sub>max</sub> imposées par la réglementation PEB 2021 sont inférieures de plus de 15% aux U optimum moyens pondérés des murs extérieurs, des toitures et des sols.

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour les maisons existantes** sont de :

- **1,34 W/m²K** pour les fenêtres ;
- **0,17 W/m²K** pour les murs extérieurs ;
- **0,20 W/m²K** pour les toitures ;
- **0,20 W/m²K** pour les sols.

On peut en conclure que les exigences U<sub>max</sub> applicables à la rénovation des parois de l'enveloppe thermique des maisons unifamiliales existantes sont moins exigeantes que les U optimums calculés paroi par paroi.



Actuellement, la rénovation des bâtiments existants n'est soumise à aucune exigence de performance globale (de type  $E_{spec}$ , K ou  $E_w$  en vigueur pour les nouvelles constructions), en raison notamment de la disparité et de l'hétérogénéité des typologies du bâti résidentiel wallon. Cette variabilité se marque par des performances énergétiques de base très différentes et, partant des niveaux de performance cost-optimum également fort différents.

L'écart moyen pondéré entre le niveau Espec correspondant à l'objectif SRLT et les niveaux de performance cost-optimum des 14 typologies analysées est présenté ci-dessous, pour information.

Les investissements nécessaires pour passer des niveaux Espec de base aux Espec cost-optimum ainsi que l'impact des mesures d'amélioration sur le coût global actualisé macroéconomique sont également repris dans le tableau.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	Espec Base	K Base	Ew Base	CGA Base	Investissement CO	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base
		%	kWh/m².an	kWh/m².an			EUR	EUR	EUR	%
	<b>Objectifs SRLT (Espec - 85 kWh/m².an)</b>		<b>85</b>							
HE1	Maison vernaculaire	6,2%	120	607	171	335	447.757 €	89.292 €	158.837 €	35%
HE2	Maison type ouvrière 3 façades	4,1%	156	611	174	317	279.157 €	65.597 €	116.148 €	42%
HE3	Maison type ouvrière mitoyenne	15,5%	120	414	137	248	189.084 €	42.113 €	94.334 €	50%
HE4	Maison villageoise	4,1%	71	584	147	346	577.273 €	116.992 €	206.184 €	36%
HE5	Maison urbaine mitoyenne	16,5%	114	509	151	369	500.145 €	115.757 €	197.544 €	39%
HE6	Villa des premières extensions urbaines	10,3%	137	788	175	389	376.247 €	96.245 €	150.584 €	40%
HE7	Villa de plain pied	6,2%	195	702	145	291	334.394 €	82.702 €	157.240 €	47%
HE8	Maison bel étage mitoyenne	4,1%	90	489	158	286	271.359 €	50.973 €	100.386 €	37%
HE9	Villa 4 façades de type lotissement	12,4%	175	400	110	231	357.794 €	73.967 €	195.515 €	55%
HE10	Maison type barre de logement social	3,1%	106	438	139	240	179.741 €	58.622 €	100.341 €	56%
HE11	Villa 4 façades K70	6,2%	245	310	73	173	219.239 €	19.983 €	149.754 €	68%
HE12	Maison 3 façades K70	2,1%	234	270	68	146	109.251 €	16.974 €	96.155 €	88%
HE13	Maison mitoyenne bel-étage K70	2,1%	143	158	63	111	141.480 €	17.067 €	125.737 €	89%
HE14	Villa 4 façades K55	7,2%	173	173	54	92	115.972 €	17.494 €	114.078 €	98%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>	<b>100,0%</b>	<b>70%</b>							
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>144</b>							

Tableau 16 : Espec, Ew et CGA cost-optimum

La moyenne pondérée de la consommation spécifique en énergie primaire des maisons rénovées à un niveau de performance cost-optimum est de **144 kWh/m².an**.

On observe une grande disparité entre les niveaux  $E_{spec}$  cost-optimum selon l'habitation considérée : de 71 kWh/m².an pour la maison villageoise à 245 kWh/m².an pour la villa 4 façades de type lotissement.

Les investissements nécessaires pour améliorer les performances de l'enveloppe et/ou des systèmes vont de 17.000 à 117.000 €, entraînant des diminutions de l'ordre de 2 à 65% du coût global actualisé.

Au niveau des systèmes présents dans les combinaisons cost-optimum :

- Un changement des systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire apparaît dans toutes les solutions cost-optimums "absolus" (et, a fortiori, les combinaisons cost-optimum "SRLT") ;
- La chaudière biomasse mixte (chauffage et eau-chaude sanitaire) est présente dans 9 cas (HE1, HE2, HE5, HE6, HE9, HE11, HE12, HE13, HE14) sur 14 ;
- La chaudière gaz mixte à condensation est présente dans 4 cas (HE3, HE7, HE8, HE10) sur 14 ;
- La PAC air-eau est présente dans un seul cas (HE4) sur 14 ;

- Une installation solaire thermique pour la production d'eau-chaude sanitaire est présente dans 8 cas (HE1, HE4, HE5, HE9, HE11, HE12, HE13, HE14) sur 14.

Au niveau de la ventilation :

Les systèmes étudiés en variantes (système C+ avec un facteur de réduction 0,9 et système D avec récupérateur de chaleur) semblent avoir une influence négative sur les calculs macroéconomique et financier (le surcoût excède l'économie générée).

Ces systèmes, pourtant plus performants par rapport à un système de ventilation naturelle, n'apparaissent pas sur le front de Pareto.

Il faut cependant nuancer ce résultat : il reste indispensable de ventiler correctement et suffisamment un bâtiment performant, afin d'assurer un renouvellement d'air suffisant garantissant une qualité d'air intérieur optimale, mais aussi un confort suffisant, une maîtrise des taux d'humidité...

Il faut noter que des impositions existent pour certains travaux en termes de ventilation. Il est par exemple obligatoire de prévoir un système d'alimentation en air neuf dans les locaux secs ou les menuiseries extérieures sont remplacées, ou une extraction conforme lorsqu'un local humide est créé.

Globalement pour les habitations existantes, les solutions cost-optimum intègrent systématiquement une amélioration de la performance de l'enveloppe pour les habitations qui étaient non isolées en situation initiale. L'amélioration de la performance énergétique des planchers est moins rentable, en particulier pour les dalles en contact avec le sol. D'une manière générale, l'isolation a posteriori de sols en rénovation est une opération (très) coûteuse car elle s'accompagne toujours d'une multitude de travaux connexes. Une isolation par l'intérieur de ces surfaces peut impliquer, par exemple, une destruction et un remplacement du revêtement et de la chape existants ; une modification des impétrants qui circulent au niveau du sol ; des changements de hauteurs des escaliers, allèges ou des linteaux de portes, etc.

Dans le cas des bâtiments présentant des parois isolées en situation initiale, les solutions cost-optimum ne comprennent pas l'amélioration des parois. Pour atteindre les objectifs de la SRLT, il serait nécessaire de renforcer la performance globale de l'enveloppe, mais ce complément d'isolation représente un coût dont l'impact sur la performance énergétique du bâtiment est moindre que dans les bâtiments initialement non isolés.

La différence de coût macroéconomique est plus importante entre les combinaisons des cas cost-optimum (absolu vs SRLT) pour les bâtiments qui présentent une isolation de l'enveloppe du cas de base (à partir du K70). Au niveau des habitations existantes, les systèmes de base sont dans tous les cas remplacés.

Un autre angle d'analyse des résultats reprend les remarques soulevées dans les descriptions des résultats individuels (bâtiment par bâtiment). Dans de nombreux cas de figure, des niveaux "**cost-optimum SRLT**", dans lesquels les bâtiments respectent l'objectif Espec de 85 kWh/m<sup>2</sup>.an, présentent des CGA peu éloignés des CGA des optimums "absolus". Si l'on définit un seuil de 5% comme un écart "faible", cette conclusion concerne 9 habitations existantes sur les 14 étudiées. 3 habitations existantes supplémentaires présentent des CGA "optimums SRLT" qui sont plus éloignés des CGA "optimums absolus", mais qui restent inférieurs aux CGA des cas de base, c'est-à-dire qui restent rentable sur la période d'évaluation. Seules 2 habitations (HE12 et HE14),



existantes mais récentes (donc partiellement isolées dans leur cas de base), ne peuvent prétendre actuellement à voir un avantage économique dans les objectifs SRLT.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	CGA Base	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base	Espec SRLT	CGA cost optimum SRLT	CGA SRLT/ CGA CO
		%	kWh/m².an	EUR	EUR	%	kWh/m²	EUR	
	<b>Objectifs SRLT (Espec - 85 kWh/m².an)</b>		<b>85</b>		<b>cost-optimum "absolu"</b>		<b>85</b>	<b>optimum SRLT</b>	
HE1	Maison vernaculaire	6,2%	120	447.757 €	158.837 €	35%	65	159.760 €	0,6%
HE2	Maison type ouvrière 3 façades	4,1%	156	279.157 €	116.148 €	42%	80	126.148 €	8,6%
HE3	Maison type ouvrière mitoyenne	15,5%	120	189.084 €	94.334 €	50%	84	95.875 €	1,6%
HE4	Maison villageoise	4,1%	71	577.273 €	206.184 €	36%	71	206.184 €	0,0%
HE5	Maison urbaine mitoyenne	16,5%	114	500.145 €	197.544 €	39%	69	197.980 €	0,2%
HE6	Villa des premières extensions urbaines	10,3%	137	376.247 €	150.584 €	40%	80	152.140 €	1,0%
HE7	Villa de plain pied	6,2%	195	334.394 €	157.240 €	47%	83	169.699 €	7,9%
HE8	Maison bel étage mitoyenne	4,1%	90	271.359 €	100.386 €	37%	64	102.902 €	2,5%
HE9	Villa 4 façades de type lotissement	12,4%	175	357.794 €	195.515 €	55%	71	199.559 €	2,1%
HE10	Maison type barre de logement social	3,1%	106	179.741 €	100.341 €	56%	80	103.562 €	3,2%
HE11	Villa 4 façades K70	6,2%	245	219.239 €	149.754 €	68%	69	173.437 €	15,8%
HE12	Maison 3 façades K70	2,1%	234	109.251 €	96.155 €	88%	78	111.932 €	16,4%
HE13	Maison mitoyenne bel-étage K70	2,1%	143	141.480 €	125.737 €	89%	84	128.275 €	2,0%
HE14	Villa 4 façades K55	7,2%	173	115.972 €	114.078 €	98%	83	140.637 €	23,3%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>	<b>100,0%</b>	<b>70%</b>				<b>-12%</b>		
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>144</b>				<b>75</b>		

Tableau 17 : E<sub>spec</sub>, Investissement, CGA cost-optimum, E<sub>spec</sub> cost-optimum SRLT

Si l'on considère ces combinaisons "SRLT" comme un optimum, la moyenne pondérée de la consommation spécifique en énergie primaire des maisons rénovées à un niveau de performance cost-optimum est de l'ordre de 75 kWh/m².an (soit 12% plus faible que le seuil des 85 kWh/m².an), variable individuellement entre 64 et 85 kWh/m².an. L'écart moyen en termes de CGA, entre l'optimum SRLT et l'optimum absolu, est de 6.1%, variable entre 0% (pour la HE4, pour laquelle l'optimum SRLT est en fait l'optimum absolu), et 23.3% (pour la HE14).

Les combinaisons cost-optimum SRLT disposent de systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire plus performants par rapport au cost-optimum "absolu". Tous les cas présentent un système de type pompe à chaleur air-eau mixte associé, dans 8 cas sur 14, à une installation solaire thermique. Ceci confirme bien sûr que les objectifs SRLT ne peuvent être atteints, dans les habitations existantes, qu'en combinant des interventions sur l'enveloppe ET les systèmes.

## 17.2. Maisons unifamiliales neuves (HN)

Quatre types d'habitations unifamiliales neuves - déclinées en 3 modes constructifs courants - ont été analysés. Globalement ce segment affiche un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois (Fenêtres, murs, toits, sols) légèrement plus performant que les exigences  $U_{max}$  applicables en Wallonie.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PER 2021 neuf</b>		1.50	0.24	0.24	0.24
HN1-T1	Maison 4 façades -maçonnerie traditionnelle	20.0%	1.36	0.20	0.20	0.20
HN1-T2	Maison 4 façades -crépi sur isolant	7.5%	1.43	0.24	0.20	0.24
HN1-T3	Maison 4 façades - ossature bois	2.0%	1.36	0.20	0.20	0.20
HN2-T1	Maison 4 façades -maçonnerie traditionnelle	20.0%	1.37	0.20	0.20	0.20
HN2-T2	Maison 4 façades -crépi sur isolant	7.5%	1.43	0.24	0.20	0.24
HN2-T3	Maison 4 façades - ossature bois	2.0%	1.37	0.20	0.20	0.20
HN3-T1	Maison 3 façades - maçonnerie traditionnelle	18.3%	1.36	0.20	0.20	0.20
HN3-T2	Maison 3 façades - crépi sur isolant	4.6%	1.43	0.24	0.20	0.24
HN3-T3	Maison 3 façades - ossature bois	3.7%	1.36	0.20	0.20	0.20
HN4-T1	Maison neuve mitoyenne - maçonnerie traditionnelle	10.0%	1.36	0.20	0.20	0.20
HN4-T2	Maison neuve mitoyenne - crépi sur isolant	2.5%	1.36	0.20	0.20	0.20
HN4-T3	Maison neuve mitoyenne - ossature bois	2.0%	1.36	0.20	0.20	0.20
	<b>Ecart moyen pondéré (exigence 2021)</b>	<b>100.0%</b>	<b>-8%</b>	<b>-13%</b>	<b>-17%</b>	<b>-13%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1.376</b>	<b>0.208</b>	<b>0.200</b>	<b>0.208</b>

Tableau 18 : Ecart moyen pondéré entre  $U_{max}$  et  $U_{optimum}$  des différentes parois du bâtiment

L'écart moyen pondéré entre les niveaux U optimums des maisons unifamiliales neuves de référence analysées dans l'étude et les exigences U max en vigueur varie de -8% à -17% en fonction des parois. Seules les exigences  $U_{max}$  imposées par la réglementation PEB 2021 pour les toitures sont inférieures de plus de 15% des U optimums moyens pondérés pour ces parois.

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour les maisons neuves** sont de :

- **1,38 W/m²K** pour les fenêtres ;
- **0,21 W/m²K** pour les murs extérieurs ;
- **0,20 W/m²K** pour les toitures ;
- **0,21 W/m²K** pour les sols.

On peut en conclure que des valeurs  $U_{max}$  plus strictes que les exigences en vigueur en 2021 pourraient s'appliquer aux toitures des nouvelles constructions, de manière à se rapprocher des niveaux d'isolation cost-optimum de ces éléments de bâtiments.

La construction de bâtiments résidentiels est soumise à des exigences de performance globale ( $E_{spec}$ , K et  $E_w$ ). L'écart moyen pondéré entre ces exigences et les niveaux de performance cost-optimum des 4 typologies constructives analysées est présenté ci-dessous.

La valeur intrinsèque du bien ainsi que le coût global actualisé (CGA) macroéconomique sont également repris dans le tableau.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	K cost optimum	Ew cost optimum	Espec Base	K Base	Ew Base	Valeur immobilière	CGA Base	Investissement CO	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base
	<b>Exigence PER 2021 neuf</b>		<b>85</b>	<b>35</b>	<b>45</b>								<b>Optimum absolu</b>
HN1-T1	Maison 4 façades -maçonnerie traditionnelle	20,0%	81	27	46	80	19	45	307.497 €	436.332 €	317.536 €	388.830 €	89%
HN1-T2	Maison 4 façades -crépi sur isolant	7,5%	81	30	46	80	31	45	285.972 €	369.290 €	292.585 €	366.670 €	99%
HN1-T3	Maison 4 façades - ossature bois	2,0%	84	27	47	80	27	45	332.097 €	421.318 €	337.864 €	411.102 €	98%
HN2-T1	Maison 4 façades -maçonnerie traditionnelle	20,0%	71	27	39	82	30	45	331.869 €	430.853 €	349.497 €	417.864 €	97%
HN2-T2	Maison 4 façades -crépi sur isolant	7,5%	75	30	41	82	30	45	308.638 €	407.386 €	323.002 €	395.458 €	97%
HN2-T3	Maison 4 façades - ossature bois	2,0%	76	27	41	82	30	45	358.419 €	464.948 €	374.818 €	448.128 €	96%
HN3-T1	Maison 3 façades - maçonnerie traditionnelle	18,3%	76	24	43	80	24	45	271.371 €	353.211 €	282.881 €	342.299 €	97%
HN3-T2	Maison 3 façades - crépi sur isolant	4,6%	80	27	45	79	20	45	252.375 €	337.991 €	261.544 €	323.562 €	96%
HN3-T3	Maison 3 façades - ossature bois	3,7%	78	24	44	79	17	45	293.081 €	380.116 €	303.791 €	364.505 €	96%
HN4-T1	Maison neuve mitoyenne - maçonnerie traditionnelle	10,0%	93	27	56	75	27	45	272.129 €	350.241 €	276.839 €	333.107 €	95%
HN4-T2	Maison neuve mitoyenne - crépi sur isolant	2,5%	111	27	67	75	27	45	253.080 €	335.854 €	258.445 €	329.748 €	98%
HN4-T3	Maison neuve mitoyenne - ossature bois	2,0%	111	27	67	75	75	45	293.899 €	376.633 €	298.003 €	368.994 €	98%
	<b>Ecart moyen pondéré (exigence 2021)</b>	<b>100,0%</b>	<b>-6%</b>	<b>-23%</b>	<b>1%</b>								
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>80</b>	<b>27</b>	<b>45</b>								

Tableau 19 : E<sub>spec</sub>, E<sub>w</sub>, K et CGA cost-optimum

La consommation spécifique moyenne pondérée en énergie primaire des maisons unifamiliales construites à un niveau cost-optimum est de **80 kWh/m²an**, soit 6% plus performant que l'exigence E<sub>spec</sub> imposée aux constructions neuves depuis 2021.

Le niveau K optimum moyen pondéré est **K27**, environ 23% plus performant que l'exigence en vigueur.

Comme indiqué plus haut, la révision de l'exigence sur cet indicateur ne pourra se faire qu'en considérant l'impact additionnel des nœuds constructifs sur le calcul du niveau K.

Le Ew optimum moyen pondéré est **Ew45**, ce qui correspond à l'exigence E<sub>w</sub> en vigueur.

Au niveau des systèmes présents dans les combinaisons cost-optimum :

- La PAC air-eau mixte (chauffage et eau-chaude sanitaire) est présente dans 9 cas sur 12 (HN1 T1-T2-T3, HN2 T1-T2-T3, HN3 T1-T2-T3), les 3 restants (HN4 T1-T2-T3) étant équipés de chaudières gaz mixtes à condensation (production instantanée de l'eau chaude sanitaire) ;
- Un système solaire thermique couplé à la pompe à chaleur est présent dans 8 cas sur 12 (tous les cas équipés d'une PAC sauf la HN3-T1) pour assurer la production d'ECS ;
- 10 cas sur 12 sont équipés d'une ventilation de type C (amenées d'air naturelles et extractions mécaniques) sans régulation ; les 2 restant sont équipés du même système avec régulation via capteurs d'humidité (impliquant un facteur de réduction de 0,9).

Dans la totalité des cas présentés dans cette étude pour les habitations neuves, il existe des **optimums QZEN** dont les CGA sont égaux à (6 cas sur 12, les HN 2 et 3 dans les 3 modes constructifs), ou très proches (moins de 2% d'écart) des CGA des optimums "absolus".

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	CGA Base	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base	Espec QZEN	CGA cost optimum QZEN	CGA QZEN / CGA CO
	<b>Exigence PER 2021 neuf</b>		<b>85</b>		<b>Optimum absolu</b>		<b>85</b>	<b>Optimum QZEN</b>	
HN1-T1	Maison 4 façades -maçonnerie traditionnelle	20,0%	81	436.332 €	388.830 €	89%	79	391.007 €	0,6%
HN1-T2	Maison 4 façades -crépi sur isolant	7,5%	81	369.290 €	366.670 €	99%	77	367.475 €	0,2%
HN1-T3	Maison 4 façades - ossature bois	2,0%	84	421.318 €	411.102 €	98%	80	415.969 €	1,2%
HN2-T1	Maison 4 façades -maçonnerie traditionnelle	20,0%	71	430.853 €	417.864 €	97%	71	417.864 €	0,0%
HN2-T2	Maison 4 façades -crépi sur isolant	7,5%	75	407.386 €	395.458 €	97%	75	395.458 €	0,0%
HN2-T3	Maison 4 façades - ossature bois	2,0%	76	464.948 €	448.128 €	96%	76	448.128 €	0,0%
HN3-T1	Maison 3 façades - maçonnerie traditionnelle	18,3%	76	353.211 €	342.299 €	97%	76	342.299 €	0,0%
HN3-T2	Maison 3 façades - crépi sur isolant	4,6%	80	337.991 €	323.562 €	96%	80	323.562 €	0,0%
HN3-T3	Maison 3 façades - ossature bois	3,7%	78	380.116 €	364.505 €	96%	78	364.505 €	0,0%
HN4-T1	Maison neuve mitoyenne - maçonnerie traditionnelle	10,0%	93	350.241 €	333.107 €	95%	64	333.319 €	0,1%
HN4-T2	Maison neuve mitoyenne - crépi sur isolant	2,5%	111	335.854 €	329.748 €	98%	75	335.809 €	1,8%
HN4-T3	Maison neuve mitoyenne - ossature bois	2,0%	111	376.633 €	368.994 €	98%	75	376.453 €	2,0%
	<b>Ecart moyen pondéré (exigence 2021)</b>	<b>100,0%</b>	<b>-6%</b>				<b>-12%</b>		
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>80</b>				<b>75</b>		

Tableau 20 : E<sub>spec</sub>, Investissement, CGA cost-optimum, E<sub>spec</sub> cost-optimum QZEN

La consommation spécifique moyenne pondérée en énergie primaire de ces combinaisons “QZEN” est de **75 kWh/m²an**, soit 12% plus performant que l'exigence E<sub>spec</sub> imposée aux constructions neuves depuis 2021.

### 17.3. Immeubles à appartements existants (IAE)

Les 9 typologies de logements collectifs analysées affichent un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois (fenêtres, toits, murs, sols) globalement assez proche des exigences U<sub>max</sub> applicables en rénovation depuis le 1er janvier 2021 en Wallonie.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PER 2021 existant</b>		<b>1.50</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>
IAE1	Immeuble à appartements avant 1919	10.40%	1.43	0.15	0.24	0.20
IAE2	Maison divisée en appartements d'avant 1919	7.90%	1.43	0.15	0.20	0.20
IAE3	Maison divisée en appartements & services < 1919	7.90%	1.43	0.15	0.20	0.24
IAE4	Maison divisée en appartements, de 1919-1945	12.57%	1.38	0.24	0.20	0.20
IAE5	Immeuble à appartements de 1946-1970	14.87%	1.43	0.15	0.24	0.24
IAE6	Immeuble à appartements de 1946-1970	14.87%	1.36	0.15	0.24	0.20
IAE7	Maison divisée en appartements de 1946-1970	12.29%	1.43	0.24	0.15	0.24
IAE9	Immeuble à appartements, après 1990	9.60%	1.01	0.20	0.15	0.20
IAE10	Immeuble d'appartements d'après 1990	9.60%	1.36	0.20	0.24	0.20
	<b>Ecart moyen pondéré</b>	<b>100.0%</b>	<b>-9%</b>	<b>-24%</b>	<b>-13%</b>	<b>-11%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1.366</b>	<b>0.182</b>	<b>0.209</b>	<b>0.214</b>

Tableau 21 : Tableau 21 : Ecart moyen pondéré entre U<sub>max</sub> et U<sub>optimum</sub> des différentes parois du bâtiment

L'écart moyen pondéré entre les niveaux U optimum des immeubles à appartements de référence analysés dans l'étude et les exigences U<sub>max</sub> en vigueur depuis 2021 varie de -24% à -9% en fonction des parois. Les exigences U<sub>max</sub> 2021 des fenêtres, des toitures et des sols sont inférieures de moins de 15% par rapport aux U optimum moyens pondérés de ces parois.

Seule l'exigence U<sub>max</sub> 2021 applicable aux murs extérieurs est inférieure de plus de 15% par rapport au U optimum moyen pondéré de ces parois.

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimaux pour les immeubles à appartements existants** sont de :

- **1,37 W/m²K** pour les fenêtres ;
- **0,18 W/m²K** pour les murs extérieurs ;
- **0,21 W/m²K** pour les toitures ;
- **0,21 W/m²K** pour les sols.

On peut en conclure que les U<sub>max</sub> applicables à la rénovation des parois (F, M, T, S) de l'enveloppe thermique des immeubles à appartements existants sont moins exigeants que les U optimaux.

Actuellement, la rénovation des bâtiments existants n'est soumise à aucune exigence de performance globale (de type E<sub>spec</sub>, K ou E<sub>w</sub> en vigueur pour les nouvelles constructions).

L'écart moyen pondéré entre le niveau E<sub>spec</sub> correspondant à l'objectif SRLT et les niveaux cost optimum des 9 typologies de d'immeubles à appartements existants est donc présenté pour information ci-dessous.

Les investissements nécessaires pour passer des niveaux  $E_{\text{spec}}$  de base aux  $E_{\text{spec}}$  cost-optimums ainsi que l'impact des mesures d'amélioration sur le coût global actualisé (CGA) macroéconomique sont également repris dans le tableau.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	Espec Base	K Base	Ew Base	CGA Base	Investissement CO	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base
	<b>Objectifs SRLT (Espec - 85 kWh/m².an)</b>		<b>85</b>							
IAE1	Immeuble à appartements avant 1919	10,40%	99	474	144	314	1.661.025 €	652.344 €	1.115.471 €	67%
IAE2	Maison divisée en appartements d'avant 1919	7,90%	122	471	151	276	702.582 €	216.837 €	392.738 €	56%
IAE3	Maison divisée en appartements & services < 1919	7,90%	102	458	151	294	467.298 €	173.104 €	270.484 €	58%
IAE4	Maison divisée en appartements, de 1919-1945	12,57%	172	394	112	281	720.408 €	192.050 €	422.103 €	59%
IAE5	Immeuble à appartements de 1946-1970	14,87%	232	312	133	226	1.482.019 €	181.689 €	1.281.354 €	86%
IAE6	Immeuble à appartements de 1946-1970	14,87%	221	273	127	217	2.543.466 €	62.338 €	1.640.628 €	65%
IAE7	Maison divisée en appartements de 1946-1970	12,29%	116	386	158	223	248.735 €	84.847 €	165.133 €	66%
IAE9	Immeuble à appartements, après 1990	9,60%	175	212	68	122	310.915 €	48.683 €	258.904 €	83%
IAE10	Immeuble d'appartements d'après 1990	9,60%	176	242	78	147	971.359 €	108.989 €	788.572 €	81%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>	100,0%	<b>94%</b>							
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>165</b>							

Tableau 22 :  $E_{\text{spec}}$ , Ew et CGA cost-optimum

La moyenne pondérée des consommations spécifiques en énergie primaire des immeubles à appartements rénovés à un niveau de performance cost-optimum est de l'ordre de **165 kWh/m².an** (soit 94% plus élevé que l'exigence actuelle imposée aux bâtiments neufs, et que l'objectif de la SRLT).

Les investissements nécessaires pour améliorer les performances de l'enveloppe et/ou des systèmes vont de 48.700 à 652.000 €, entraînant des diminutions de l'ordre de 17 à 44% du coût global actualisé, lorsqu'on les compare aux CGA des cas de base. La diminution de la consommation spécifique en énergie primaire est assez spectaculaire (de l'ordre de 350 à 375 kWh/m².an) pour les immeubles (IAE1, IAE2, IAE3) construits avant 1919.

Au niveau des systèmes présents dans la combinaison cost-optimum :

- Un changement des systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire apparaît dans toutes les solutions cost-optimums "absolus" (et, a fortiori, les combinaisons cost-optimum "SRLT") ;
- Dans les 6 immeubles à appartements (IAE1, IAE4, IAE5, IAE6, IAE7, IAE9) équipés de producteurs de chauffage collectifs, la chaudière biomasse est présente dans 4 cas. Pour les autres cas, il s'agit d'une chaudière gaz condensation et d'une PAC air-eau.
- Dans les 3 immeubles à appartements équipés des producteurs de chauffage individuels (IAE2, IAE3, IAE10), la chaudière gaz condensation est présente dans les 3 cas.
- L'installation solaire thermique est présente dans l'ensemble des cas équipés de systèmes de production d'eau chaude sanitaire collectifs (IAE1, IAE4, IAE9).

Au niveau de la ventilation :

Comme pour les habitations individuelles, les systèmes étudiés en variantes (système C+ avec un facteur de réduction 0,9 et système D avec récupérateur de chaleur) semblent avoir une influence négative sur les calculs macroéconomique et financier (le surcoût excède l'économie générée).



Ces variantes, pourtant plus performantes par rapport à un système de ventilation naturelle, n'apparaissent pas sur le front de pareto.

Il faut cependant nuancer ce résultat : il reste nécessaire de ventiler correctement et suffisamment un bâtiment performant, afin d'assurer un renouvellement d'air suffisant garantissant une qualité d'air intérieur optimale, mais aussi un confort suffisant, une maîtrise des taux d'humidité...

Il faut noter que des impositions existent pour certains travaux en termes de ventilation. Il est par exemple obligatoire de prévoir un système d'alimentation en air neuf dans les locaux secs ou les menuiseries extérieures sont remplacées, ou une extraction conforme lorsqu'un local humide est créé.

Comme dans le cas des habitations individuelles existantes, des **combinaisons optimum“SRLT”** ont été définies pour les différentes typologies. Leurs CGA sont cependant plus éloignés des CGA des optimums “absolus” : l'écart minimum est de 2,5% pour l'IAE4. Seule l'IAE3 est également sous le seuil des 5%. 4 autres IAE présentent un écart entre 5 et 10%.

Dans le cas spécifique de l'IAE1, comme expliqué en détail dans l'analyse des résultats au chapitre 7, aucune combinaison ne permet d'atteindre les objectif SRLT sans recourir à la mise en place de panneaux photovoltaïques. Les autres immeubles à appartements existants ne rencontrent pas cette difficulté.

La consommation spécifique moyenne pondérée en énergie primaire de ces combinaisons “SRLT” est de **75 kWh/m².an**, soit 12% plus performant que l'objectif de 85 kWh/m².an. Vu les écarts de CGA, cet objectif est cependant bien plus compliqué à atteindre dans le contexte économique actuel – tenant compte en plus des difficultés inhérentes à ce genre de projet en copropriété.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	CGA Base	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base	Espec SRLT	CGA cost optimum SRLT	CGA SRLT / CGA CO
	<b>Objectifs SRLT (Espec - 85 kWh/m².an)</b>		<b>85</b>		<b>Optimum absolu</b>		<b>85</b>	<b>optimum SRLT</b>	
IAE1	Immeuble à appartements avant 1919	10,40%	99	1.661.025 €	1.115.471 €	67%	84	1.198.553 €	7,4%
IAE2	Maison divisée en appartements d'avant 1919	7,90%	122	702.582 €	392.738 €	56%	80	413.225 €	5,2%
IAE3	Maison divisée en appartements & services < 1919	7,90%	102	467.298 €	270.484 €	58%	78	283.339 €	4,8%
IAE4	Maison divisée en appartements, de 1919-1945	12,57%	172	720.408 €	422.103 €	59%	79	432.773 €	2,5%
IAE5	Immeuble à appartements de 1946-1970	14,87%	232	1.482.019 €	1.281.354 €	86%	68	1.393.351 €	8,7%
IAE6	Immeuble à appartements de 1946-1970	14,87%	221	2.543.466 €	1.640.628 €	65%	66	1.950.104 €	18,9%
IAE7	Maison divisée en appartements de 1946-1970	12,29%	116	248.735 €	165.133 €	66%	85	174.416 €	5,6%
IAE9	Immeuble à appartements, après 1990	9,60%	175	310.915 €	258.904 €	83%	85	293.218 €	13,3%
IAE10	Immeuble d'appartements d'après 1990	9,60%	176	971.359 €	788.572 €	81%	75	1.095.032 €	38,9%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>	<b>100,0%</b>	<b>94%</b>				<b>-12%</b>		
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>165</b>				<b>75</b>		

Tableau 23 : E<sub>spec</sub>, Investissement, CGA cost-optimum, E<sub>spec</sub> cost-optimum SRLT

## 17.4. Immeubles de 6 appartements neuf (IAN)

Un immeuble de 6 appartements neufs a été analysé. Celui-ci affiche un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois fenêtre et sols équivalent aux exigences  $U_{max}$  applicables depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021 en Wallonie. Le niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois murs et toitures est légèrement plus performant que les  $U_{max}$  imposés actuellement.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PER 2021 neuf</b>		<b>1.50</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>
IAN1	Immeuble de 6 appartements neuf	100.0%	1.83	0.22	0.21	0.24
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>22%</b>	<b>-8%</b>	<b>-13%</b>	<b>0%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1.830</b>	<b>0.220</b>	<b>0.210</b>	<b>0.240</b>

Tableau 24 : Ecart moyen pondéré entre  $U_{max}$  et  $U_{optimum}$  des différentes parois du bâtiment

Pour ce bâtiment, l'écart entre les exigences  $U_{max}$  en vigueur depuis 2021 et les niveaux cost-optimum varie de 0% à 22% en fonction des parois. Les exigences  $U_{max}$  des murs extérieurs et des toitures imposés par la réglementation PEB 2021 sont inférieures de moins de 15% aux niveaux U optimum pour ces parois.

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour l'immeuble à appartement neuf** sont de :

- **1,83 W/m²K** pour les fenêtres ;
- **0,22 W/m²K** pour les murs extérieurs ;
- **0,21 W/m²K** pour les toitures
- **0,24 W/m²K** pour les sols

La construction de bâtiments résidentiels est soumise à des exigences de performance globale  $E_{spec}$ , K et  $E_w$ . L'écart entre ces exigences et les consommations caractéristiques d'énergie primaire cost-optimum / niveau K /  $E_w$  de cet immeuble à appartement est présenté ci-dessous.

La valeur immobilière du bien, ainsi que le coût global actualisé macroéconomique, sont également repris dans le tableau.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Espec cost optimum	K cost optimum	Ew cost optimum	Espec Base	K Base	Ew Base	Valeur immobilière	CGA Base	Investissement CO	CGA cost optimum	CGA CO / CGA base
	<b>Exigence PER 2021 neuf</b>		<b>85</b>	<b>35</b>	<b>45</b>							<b>Optimum absolu</b>	
IAN1	Immeuble de 6 appartements neuf	100,0%	128	31	80	71	31	45	1.285.551 €	1.975.996 €	1.303.918 €	1.598.572 €	81%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>51%</b>	<b>-11%</b>	<b>78%</b>								
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>128</b>	<b>31</b>	<b>80</b>								

Tableau 25 :  $E_{spec}$ ,  $E_w$  et CGA cost-optimum

La consommation spécifique en énergie primaire (Espec) de cet immeuble à appartements construit à un niveau cost-optimum est de l'ordre de **128 kWh/m²an**, de 51% moins performant que l'exigence  $E_{spec}$  imposée aux constructions neuves depuis 2021.



Le niveau K optimum est **K 31**, environ 11% plus performant que l'exigence PEB 2021.

Le Ew optimum est **Ew80**, de 78% moins performant que l'exigence PEB 2021.

Au niveau des systèmes présents dans la combinaison cost-optimum :

- La ventilation est de type C (amenées d'air naturelles, extractions mécaniques), avec régulation (facteur de réduction 0,9) ;
- La production de chauffage et d'eau chaude sanitaire est assurée par une chaudière biomasse mixte;
- Une installation solaire thermique de 18m<sup>2</sup> est présente pour la production d'eau chaude sanitaire.

Le cas optimum QZEN, obtenu avec une augmentation substantielle du CGA (+21,9%), voit le niveau Espec descendre à 72 kWh/m<sup>2</sup>.an, le niveau Ew à 45, et le niveau K à 25.

## 17.5. Résumé des niveaux optimaux

Catégorie de bâtiments de référence	Exigences 2021	Cost-optimum "absolu"	Ecart moyen pondéré
Ufenêtres [W/m².K]			
Maison unifamiliales existantes - HE	1.5	1.338	-11%
Immeuble à appartements existant - IAE		1.366	-9%
Maison unifamiliales neuves - HN		1.376	-8%
Immeuble à appartements neufs - IAN		1.83	22%
Umurs [W/m².K]			
Maison unifamiliales existantes - HE	0.24	0.166	-31%
Immeuble à appartements existant - IAE		0.182	-24%
Maison unifamiliales neuves - HN		0.208	-13%
Immeuble à appartements neufs - IAN		0.22	-8%
Utoits [W/m².K]			
Maison unifamiliales existantes - HE	0.24	0.199	-17%
Immeuble à appartements existant - IAE		0.209	-13%
Maison unifamiliales neuves - HN		0.2	-17%
Immeuble à appartements neufs - IAN		0.21	-13%
Usols [W/m².K]			
Maison unifamiliales existantes - HE	0.24	0.198	-17%
Immeuble à appartements existant - IAE		0.214	-11%
Maison unifamiliales neuves - HN		0.208	-13%
Immeuble à appartements neufs - IAN		0.24	0%
NIVEAU K			
Maison unifamiliales existantes - HE			
Immeuble à appartements existant - IAE			
Maison unifamiliales neuves - HN	35	27	-23%
Immeuble à appartements neufs - IAE		31	-11%
E <sub>w</sub>			
Maison unifamiliales existantes - HE			
Immeuble à appartements existant - IAE			
Maison unifamiliales neuves - HN	45	45	10%
Immeuble à appartements neufs - IAN		80	78%
Espec [kWh/m²an]			
Maison unifamiliales existantes - HE	85	144	70%
Immeuble à appartements existant - IAE		165	94%
Maison unifamiliales neuves - HN		80	-6%
Immeuble à appartements neufs - IAN		128	51%

## 17.6. Justification des écarts

Concernant les **fenêtres**, les écarts moyens pondérés entre les performances cost-optimum U et les exigences en vigueur depuis 2021 ne sont supérieurs à 15% pour aucune des catégories de bâtiments résidentiels.

Concernant les **murs**, les écarts moyens pondérés entre les performances cost-optimum U et les exigences en vigueur depuis 2021 sont supérieurs à 15% pour les habitations unifamiliales et les immeubles à appartements existants. Globalement, **un renforcement harmonisé des exigences d'isolation thermique des murs extérieurs, au niveau 0.20 W/m²K, se justifierait.**

Concernant les **toits**, les écarts moyens pondérés entre les performances cost-optimum U et les exigences en vigueur depuis 2021 sont supérieurs à 15% pour les habitations unifamiliales existantes et neuves. Par conséquent, **l'exigence pourrait être renforcée au niveau 0,20 W/m²K pour ce type de paroi**, ce qui correspond déjà aux conditions d'octroi de subsides.

Concernant les **sols**, les écarts moyens pondérés entre les performances cost-optimum U et les exigences en vigueur depuis 2021 sont supérieurs à 15% pour les habitations unifamiliales existantes. Un renforcement des exigences pourrait se justifier pour ces parois.

Dans les habitations neuves et les immeubles à appartements existants, un renforcement d'exigence à 0,20 W/m²K se justifierait également au regard des résultats, bien que l'écart soit inférieur à 15% (13%) car le cost-optimum tend vers une valeur de 0.2 W/m²K. Pour l'immeuble à appartements neuf, certes, la valeur U optimum pour le sol est de 0.24 pour le cas traité. Par soucis d'uniformité des exigences des bâtiments résidentiels, **un renforcement de l'exigence Usols à 0.2 W/m²K pourrait se justifier**, d'autant plus qu'en neuf, il n'y a pas de difficultés techniques à mettre l'isolation du sol en œuvre.

Spécifions que l'étude des optimums sur les U de parois dans l'existant a été réalisée en considérant que les systèmes (chauffage, ECS) restaient inchangés (et globalement peu performants), alors que l'étude des U optimums dans le neuf s'accompagnait d'office de systèmes performants. Par conséquent, les résultats pour l'existant tendent à favoriser des U plus exigeants que dans le neuf.

Concernant **l'exigence K**, seules les maisons unifamiliales neuves s'écartent de plus de 15% du cost-optimum. Cette exigence pourrait néanmoins être revue à un niveau K30 pour les bâtiments résidentiels compte tenu du niveau K cost-optimum des immeubles à appartements qui est de 31. Attention toutefois à évaluer la pertinence de cette modification en tenant compte de l'impact des nœuds constructifs.

Concernant **les exigences Ew et Espec** pour les bâtiments neufs, celles-ci sont plus performantes que l'optimum pour toutes les catégories, excepté les habitations neuves dont l'optimum de 80 kWh/m²an ne présente qu'un écart de 6% par rapport à l'exigence. Ces exigences peuvent donc être maintenues aux niveaux définis en 2021.



## 18. Conclusions générales de l'étude sur les bâtiments non résidentiels

Réalisée selon une méthodologie commune sur 18 bâtiments de référence répartis en 8 segments représentatifs du parc immobilier tertiaire wallon, l'étude a permis de dégager une série d'observations et de conclusions formulées par segment.

Néanmoins, nous attirons l'attention sur le fait que les résultats des segments bureaux neufs, hôtels neufs et maisons de repos neuves sont à considérer avec réserve puisqu'un seul bâtiment par segment a été étudié.

Les résultats obtenus ont notamment permis de comparer les coûts globaux actualisés (CGA) de différentes combinaisons de mesures de performance énergétique appliqués aux bâtiments sélectionnés. En particulier, l'objectif de cette étude a été de calculer les écarts moyens pondérés, entre les cost optimums (absolus, ou en ligne avec les objectifs PEB pour l'existant) et les niveaux d'exigence actuels.

Les tableaux présentés dans la suite indiquent l'écart entre les exigences minimales de performance énergétique en vigueur en Wallonie et la moyenne pondérée de tous les niveaux optimaux en fonction des coûts calculés à partir des combinaisons de mesures appliquées à tous les bâtiments de référence utilisés dans l'étude.

L'écart moyen (en %) est calculé comme pour les bâtiments résidentiels (cf. chapitre 17).

### 18.1. Bureaux existants (BUE)

Dans le cas des bureaux existants, peu de différences avec les niveaux d'exigence en vigueur s'affichent lorsque l'on analyse les niveaux cost-optimum obtenus dans l'étude des déperditions thermiques (U) des différentes parois (fenêtres, murs, toits, sols). Le tableau ci-dessous affiche en effet des niveaux optimums moyens pondérés qui ne plaident pas en faveur d'un renforcement des exigences d'isolation thermique.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>		<b>1,50</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
BUE1	Grand bureau (élevé), avant 1945	31,3%	1,36	0,24	0,24	0,24
BUE2	Bureau étendu (peu élevé), années 70	21,0%	1,36	0,24	0,20	0,24
BUE3	Petit bureau pour indépendant, 1984	13,5%	1,36	0,20	/	0,24
BUE4	Bureau compact, années 2000	3,0%	1,36	0,24	0,24	0,24
BUE5	Bureau existant <1945	31,3%	1,49	0,20	0,20	0,24
		<b>100,0%</b>				
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-10%</b>	<b>-11%</b>	<b>-13%</b>	<b>0%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1,355</b>	<b>0,214</b>	<b>0,210</b>	<b>0,240</b>

Tableau 26 : Ecart moyen pondéré entre exigences U<sub>max</sub> et U<sub>optimum</sub> des différentes parois les bureaux existants

L'écart moyen pondéré entre les niveaux U optimum des bureaux existants de référence analysés dans l'étude et les exigences U<sub>max</sub> 2021 varie de 0% à -13% en fonction des parois. Les exigences U<sub>max</sub> imposées par la réglementation PEB 2021 sont inférieures de moins de 15% aux U optimum moyens pondérés pour tous les types de parois.

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour les bureaux existants** sont de :

- **1,355 W/m²K** pour les fenêtres (-10% par rapport à l'exigence actuelle) ;
- **0,214 W/m²K** pour les murs extérieurs (-11% par rapport à l'exigence actuelle) ;
- **0,21 W/m²K** pour les toitures (-13% par rapport à l'exigence actuelle) ;
- **0,24 W/m²K** pour les sols (identique à l'exigence actuelle).

On peut en conclure que les exigences U<sub>max</sub> 2021 applicables à la rénovation des parois de l'enveloppe déperditive des bureaux existants sont proches des U optimums calculés paroi par paroi et ne demandent pas de renforcement spécifique.

Bien qu'il n'y ait pas d'exigence E<sub>w</sub> pour les bâtiments tertiaires existants, les niveaux E<sub>w</sub> des combinaisons cost-optimum absolu et « U conformes » sont présentés à titre informatif dans les tableaux ci-dessous, ainsi que les investissements nécessaires et l'impact sur le coût global actualisé macroéconomique.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%			EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>							
BUE1	Grand bureau (élevé), avant 1945	31,3%	120	415	4.451.545 €	863.729 €	2.227.404 €	50%
BUE2	Bureau étendu (peu élevé), années 70	21,0%	83	186	5.298.436 €	324.005 €	3.271.728 €	62%
BUE3	Petit bureau pour indépendant, 1984	13,5%	114	151	57.083 €	2.359 €	41.608 €	73%
BUE4	Bureau compact, années 2000	3,0%	81	174	1.337.524 €	124.620 €	854.340 €	64%
BUE5	Bureau existant <1945	31,3%	136	195	208.391 €	23.682 €	146.761 €	70%
		<b>100,0%</b>						
	<b>Ecart moyen pondéré</b>							
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>115</b>					

Tableau 27 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des bureaux existants

Le niveau E<sub>w</sub> optimum moyen pondéré des bureaux existants est de **115**, ce qui est assez éloigné d'un E<sub>w</sub> 45 exigé pour les bâtiments neufs de la même typologie. De même, aucun des 5 bâtiments étudiés ne présente un niveau E<sub>w</sub> optimum atteignant l'exigence du neuf.

On observe une grande disparité entre les niveaux E<sub>w</sub> cost-optimum selon le bureau considéré : de **81** pour le bureau compact des années 2000, à **136** pour le bureau existant d'avant 1945. On ne peut cependant pas établir de corrélation entre le niveau cost optimum et l'âge du bâtiment ou le niveau de performance initial.

Les investissements nécessaires pour améliorer les performances de l'enveloppe et/ou des systèmes au niveau cost optimum sont très disparates, et impliquent des diminutions de CGA très différents. Ainsi, le petit bureau en rez-de-chaussée d'un immeuble de logements ne requiert qu'un changement du système d'éclairage pour atteindre le cost optimum, avec une faible amélioration de la performance énergétique et une diminution de 27% du coût global actualisé ; le grand bureau datant d'avant 1945, en revanche, nécessite un investissement de 863.729 €, entrainant une diminution du coût global actualisé de 50% et une amélioration significative de la performance énergétique.

Au niveau des systèmes présents dans les combinaisons cost-optimum :

- Un changement des systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire apparaît dans toutes les solutions cost optimum, sauf pour le BUE3, le petit bureau en rez-de-chaussée d'un immeuble de logement, qui conserve sa chaudière gaz pour la production de chaleur, et son boiler électrique pour la faible demande en ECS ;
- La PAC air-eau réversible est présente dans 3 cas sur 5 (BUE1, BUE2, BUE4) pour le chauffage et le refroidissement ; dans ces 3 cas, l'eau chaude sanitaire reste produite par le système existant au préalable (chaudière ou chauffe-eau), principalement à cause de la très faible part que cette eau chaude joue dans la performance globale.
- La chaudière gaz mixte à condensation est préconisée dans le cas du BUE5 ;
- L'installation solaire thermique pour la production d'eau-chaude sanitaire ne ressort jamais.
- L'installation de panneaux solaires photovoltaïques n'implique pas d'autres choix sur les systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire.
- Les systèmes de ventilation restent inchangés par rapport aux cas de base (qui en étaient tous équipés), quel que soit le système présent initialement (complètement ou partiellement mécanisé, avec ou sans récupération de chaleur).

Un autre angle d'analyse des résultats reprend les observations des résultats individuels (bâtiment par bâtiment). Pour chaque bâtiment, des combinaisons "**cost-optimum U conformes**" ont été extraites des résultats, dans lesquelles les bâtiments respectent les valeurs  $U_{max}$  2021 en vigueur. Dans de nombreux cas de figure, ces combinaisons présentent des CGA peu éloignés des CGA des optimums "absolus", mais atteignent de meilleures performances énergétiques. Dans le cas du BUE1, le CGA "U conformes" est 2% plus élevé que le CGA du cost-optimum absolu pour un niveau  $E_w$  de 101, contre 120 pour l'optimum « absolu ». Les cas BUE2, BUE3 et BUE4 présentent des CGA "U conformes" bien meilleurs d'un point de vue énergétique, plus éloignés du CGA du cost-optimum absolu, mais toujours inférieurs aux CGA des cas de base, c'est-à-dire qui restent rentable sur la période d'évaluation. Seul le BUE5 ne peut prétendre actuellement à voir un avantage économique dans les objectifs U conformes.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base	Ew CO U-conf.	CGA CO U-conf.	CGA CO Uconf. /CGA CO
		%			EUR	EUR	EUR	%	kWh/m².an	EUR	
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>										
BUE1	Grand bureau (élevé), avant 1945	31,3%	120	415	4.451.545 €	863.729 €	2.227.404 €	50%	101	2.274.468,00 €	2%
BUE2	Bureau étendu (peu élevé), années 70	21,0%	83	186	5.298.436 €	324.005 €	3.271.728 €	62%	49	3.631.633,00 €	11%
BUE3	Petit bureau pour indépendant, 1984	13,5%	114	151	57.083 €	2.359 €	41.608 €	73%	62	47.034,00 €	13%
BUE4	Bureau compact, années 2000	3,0%	81	174	1.337.524 €	124.620 €	854.340 €	64%	59	1.175.560,00 €	38%
BUE5	Bureau existant <1945	31,3%	136	195	208.391 €	23.682 €	146.761 €	70%	51	223.613,00 €	52%
		100,0%									
	<b>Ecart moyen pondéré</b>										
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>115</b>						<b>68</b>		

Tableau 28 : Comparaison des  $E_w$  (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des bureaux existants

Si l'on considère ces combinaisons "U conformes" comme un optimum, la moyenne pondérée du  $E_w$  des bureaux rénovés à un niveau de performance cost-optimum est de l'ordre de **68** (soit 51% plus élevé que le seuil de 45 en vigueur en 2021 pour les bureaux neufs, mais également 41% inférieur à la moyenne pondérée des optimums absolus).

Les niveaux  $E_w$  des optimums « U conformes » sont variables individuellement entre 49 et 101. Il est intéressant de noter, par exemple, que le BUE5, qui présentait le niveau  $E_w$  le plus élevé dans les optimums absolus, prend la deuxième place des bâtiments les plus performants dans le classement des optimums « U conformes », ce qui se traduit par une augmentation de son CGA de 52% par rapport à l'optimum absolu. Le BUE1 présente une augmentation de son CGA de seulement 2%, pour une amélioration de son niveau  $E_w$  de 19 points (de 120 à 101), obtenu en rendant toutes ses parois de déperditions « U conformes ». Il reste donc rentable, tout en permettant une amélioration substantielle de ses performances énergétiques.

## 18.2. Bureaux neufs (BUN)

Selon les spécifications de l'étude COZEB3, un cas de bureau neuf a été analysé, et présente un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois (Fenêtres, murs, toits, sols) correspondant aux exigences  $U_{max}$  2021 applicables en Wallonie. Les conclusions tirées dans ce sous-chapitre sont donc à considérer sous cet éclairage particulier.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>1,50</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
BUN1	Nouveau bâtiment de bureaux	100,0%	1,49	0,24	0,24	0,23
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-4%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1,490</b>	<b>0,240</b>	<b>0,240</b>	<b>0,230</b>

Tableau 29 : Ecart moyen pondéré entre exigences  $U_{max}$  et  $U_{optimum}$  des différentes parois les bureaux neufs

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour les bureaux neufs** sont de :

- **1,49 W/m²K** pour les fenêtres (-1% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les murs extérieurs (identique aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les toitures (identique aux exigences actuelles) ;
- **0,23 W/m²K** pour les sols (-4% par rapport aux exigences actuelles).

On peut en conclure que les exigences  $U_{max}$  2021 applicables à la rénovation des parois de l'enveloppe déperditive des bureaux neufs ne nécessitent pas de renforcement.

La construction de bâtiments de bureaux est soumise à des exigences de performance globale ( $K$  et  $E_w$ ). L'écart moyen pondéré entre ces exigences et le niveau de performance cost-optimum du bureau neuf analysé est présenté ci-dessous.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	K cost optimum	$E_w$ cost optimum	K Base	$E_w$ Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%					EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>35</b>	<b>45</b>						
BUN1	Nouveau bâtiment de bureaux	100,0%	32	56	32	45	3.945.867 €	3.361.767 €	3.910.713 €	99%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-9%</b>	<b>24%</b>						
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>32</b>	<b>56</b>						



Tableau 30 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des bureaux neufs

Le niveau K optimum est **K32**, soit 9% plus performant que l'exigence en vigueur.

Le Ew optimum est **Ew56**, ce qui est 24% plus élevé que l'exigence  $E_w$  en vigueur depuis 2021 (une différence certes significative en pourcentage, mais qui ne semble pas insurmontable en valeur absolue (11 points Ew)).

Au niveau des systèmes, la combinaison cost-optimum préconise :

- Une chaudière gaz à condensation mixte, assurant le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sans stockage ;
- Le refroidissement via une PAC air-air ;
- Une ventilation double flux (alimentation mécanique, extraction mécanique) avec échangeur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ), équipé d'un by-pass complet.

Pour ce bâtiment de bureaux, il existe un cost-optimum répondant aux exigences en vigueur depuis 2021 (PEB conforme) dont le CGA est inférieur au CGA de base et à peine 0.31% plus élevé que le CGA CO absolu, signe que l'exigence Ew45 peut être atteinte avec des solutions cost-optimales et rentables.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base	Ew CO PEB-conf.	CGA CO PEB-conf.	CGA CO PEB-conf. / CGA CO
		%			EUR	EUR	EUR	%	kWh/m².an	EUR	
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>45</b>								
BUN1	Nouveau bâtiment de bureaux	100,0%	56	45	3.945.867 €	3.361.767 €	3.910.713 €	99%	45	3.922.998,00 €	0,31%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>24%</b>								
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>56</b>								

Tableau 31 : Comparaison des Ew (cost-optimum et PEB-conforme) et CGA (cost-optimum et PEB-conforme) des bureaux neufs

### 18.3. Etablissements scolaires existants (EE)

Les 4 typologies d'écoles existantes analysées affichent un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois fenêtres, murs et sols globalement proche des exigences  $U_{max}$  applicables en rénovation depuis le 1er janvier 2021 en Wallonie. Cette conclusion est à nuancer en ce qui concerne les toitures, dont le U optimum est de 0,2 W/m²K, soit 17% plus performant que l'exigence en vigueur.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>		<b>1,50</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
EE1	Ecole maternelle/primaire d'avant 1945	89,8%	1,42	0,24	0,20	0,24
EE2	Ecole maternelle/primaire de 1950	3,4%	1,36	0,24	0,15	0,24
EE3	Ecole secondaire d'après 1970	3,4%	1,36	0,15	0,20	0,20
EE4	Bâtiment universitaire de 1968	3,4%	1,43	0,24	0,24	0,24
		<b>100,0%</b>				
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-8%</b>	<b>-1%</b>	<b>-17%</b>	<b>-1%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1,378</b>	<b>0,237</b>	<b>0,200</b>	<b>0,239</b>

Tableau 32 : Ecart moyen pondéré entre exigences  $U_{max}$  et  $U_{optimum}$  des différentes parois les écoles existantes

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimaux pour les écoles existantes** sont de :

- **1,378 W/m<sup>2</sup>K** pour les fenêtres (-8% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,237 W/m<sup>2</sup>K** pour les murs extérieurs (-1% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,20 W/m<sup>2</sup>K** pour les toitures (-17% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,239 W/m<sup>2</sup>K** pour les sols (-1% par rapport aux exigences actuelles).

On peut en conclure que les exigences U<sub>max</sub> 2021 applicables à la rénovation des parois de l'enveloppe thermique des écoles existantes sont très proches des U optimaux calculés paroi par paroi et ne demandent pas de renforcement, sauf pour les toits peut-être, dont l'exigence pourrait être renforcée au niveau optimum de 0.20 W/m<sup>2</sup>K.

Le niveau E<sub>w</sub> correspondant aux combinaisons cost-optimum des 4 typologies analysées, sont présentés ci-dessous, à titre informatif.

Les investissements nécessaires pour passer des niveaux E<sub>w</sub> de base aux E<sub>w</sub> cost-optimum ainsi que l'impact des mesures d'amélioration sur le coût global actualisé macroéconomique sont également repris dans le tableau.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%			EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>							
EE1	Ecole maternelle/primaire d'avant 1945	89,8%	58	197	1.195.861 €	484.872 €	908.752 €	76%
EE2	Ecole maternelle/primaire de 1950	3,4%	31	253	1.710.929 €	528.787 €	854.313 €	50%
EE3	Ecole secondaire d'après 1970	3,4%	34	206	4.208.430 €	1.186.240 €	2.158.316 €	51%
EE4	Bâtiment universitaire de 1968	3,4%	41	176	8.473.773 €	2.204.735 €	4.942.341 €	58%
		<b>100,0%</b>						
	<b>Ecart moyen pondéré</b>							
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>56</b>					

Tableau 33 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des écoles existantes

La moyenne pondérée du niveau E<sub>w</sub> des écoles rénovées à un niveau de performance cost-optimum est de 56, ce qui est éloigné de 24% d'un E<sub>w</sub> 45 exigé pour les bâtiments neufs de la même typologie. On observe un étalement des niveaux E<sub>w</sub> cost optimum selon l'école considérée, entre **58** pour EE1, et **31** pour le EE2.

Les investissements nécessaires pour améliorer les performances de l'enveloppe et/ou des systèmes s'étendent entre 485.000 € pour EE1, et 2.205.000 € pour EE4, entraînant des diminutions de l'ordre de 24 à 50% du coût global actualisé. Pour l'ensemble des cas analysés, l'atteinte de l'optimum est donc largement rentable sur la période d'évaluation.

Au niveau des systèmes présents dans les combinaisons cost-optimum :

- Un changement des systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire apparaît dans toutes les solutions cost-optimums "absolus" ;
- La PAC air-eau réversible est présente dans 3 cas sur 4 (EE2, EE3, EE4) pour le chauffage et le refroidissement ; dans ces 3 cas, l'eau chaude sanitaire reste produite par le système existant au préalable (chaudière), principalement à cause de la très faible part que cette eau chaude joue dans la performance globale ;
- La production d'eau chaude sanitaire est remplacée dans 1 cas sur 4 (EE1), par une chaudière gaz à condensation sans stockage ;

- La ventilation est remplacée uniquement dans le 4<sup>ème</sup> cas (EE4), le système double flux existant sans échangeur est remplacé par la mise en place d'un système double flux avec échangeur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ). Pour EE1 le système de ventilation double flux sans échangeur est maintenu. Pour EE2 et EE3, qui n'étaient pas équipés d'un système de ventilation initialement, la combinaison cost optimum ne prévoit pas d'installation de ventilation, bien que cela soit nécessaire au vu de l'isolation performante de l'enveloppe pour ces combinaisons.
- L'installation solaire thermique pour la production d'eau-chaude sanitaire ne ressort jamais.
- L'installation photovoltaïque ne provoque aucun changement dans le choix des systèmes de chauffage ou d'eau chaude sanitaire.

Comme dans le cas des autres typologies existantes, des "**combinaisons optimum U conforme**", dans lesquelles les bâtiments respectent les valeurs  $U_{max}$  2021 en vigueur, ont été définies pour les différentes typologies d'écoles existantes. Dans tous les cas de figure, ces niveaux "**cost-optimum U conformes**" présentent des CGA peu éloignés des CGA des optimums "absolus" et restent toujours rentables par rapport au bâtiment laissé en l'état.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base	Ew CO U-conf.	CGA CO U-conf.	CGA CO U-conf. /CGA CO
		%			EUR	EUR	EUR	%	kWh/m².an	EUR	
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>										
EE1	Ecole maternelle/primaire d'avant 1945	89,8%	58	197	1.195.861 €	484.872 €	908.752 €	76%	42	981.979,00 €	8%
EE2	Ecole maternelle/primaire de 1950	3,4%	31	253	1.710.929 €	528.787 €	854.313 €	50%	31	854.313,00 €	0%
EE3	Ecole secondaire d'après 1970	3,4%	34	206	4.208.430 €	1.186.240 €	2.158.316 €	51%	32	2.299.918,00 €	7%
EE4	Bâtiment universitaire de 1968	3,4%	41	176	8.473.773 €	2.204.735 €	4.942.341 €	58%	40	5.171.166,00 €	5%
		100,0%									
	<b>Ecart moyen pondéré</b>										
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>56</b>						<b>41</b>		

Tableau 34 : Comparaison des Ew (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des écoles existantes

Le cost optimum absolu est identique au cost optimum U conformes pour l'EE2, c'est-à-dire que le cost-optimum « absolu » présente des parois qui respectent les niveaux d'exigences  $U_{max}$  2021. Pour les 3 autres écoles existantes, les CGA des cost-optimum U conformes sont 5 à 8% plus élevés que celui des cost-optimum absolus et toujours bien inférieurs aux CGA de base.

La moyenne pondérée du niveau  $E_w$  des écoles rénovées à un niveau de performance cost-optimum U conforme est de 41, ce qui démontre que, pour ce segment, le niveau  $E_w$  45 exigé pour la fonction enseignement « neuf » est atteignable pour les écoles existantes avec des solutions rentables, assez proches des optimums « absolus ».

#### 18.4. Etablissements scolaires neufs (EN)

Deux cas d'écoles neuves ont été analysés, et présentent un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois (fenêtres, murs, toits, sols) correspondant aux exigences  $U_{max}$  applicables en Wallonie depuis 2021.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>1,50</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
EN1	Petite école de village	40,0%	1,49	0,24	0,24	0,24
EN2	Ecole fondamentale volumétrie simple	60,0%	1,46	0,24	0,24	0,24
		<b>100,0%</b>				
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1,472</b>	<b>0,240</b>	<b>0,240</b>	<b>0,240</b>

Tableau 35 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois les écoles neuves

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimaux pour les écoles neuves** sont de :

- **1,472 W/m²K** pour les fenêtres (-2% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les murs extérieurs (identique aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les toitures (identique aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les sols (identique aux exigences actuelles).

On peut en conclure que les exigences Umax applicables aux parois de l'enveloppe déperditive des écoles neuves sont cost-optimales et ne nécessitent pas de renforcement.

La construction de bâtiments scolaires est soumise à des exigences de performance globale (K et E<sub>w</sub>). L'écart moyen pondéré entre ces exigences et le niveau de performance cost-optimum des écoles neuves analysées est présenté ci-dessous.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	K cost optimum	Ew cost optimum	K Base	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%					EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>35</b>	<b>45</b>						
EN1	Petite école de village	40,0%	37	50	37	45	1.169.590 €	862.092 €	1.090.884 €	93%
EN2	Ecole fondamentale volumétrie simple	60,0%	27	45	27	45	6.386.732 €	5.465.803 €	6.322.601 €	99%
		<b>100,0%</b>								
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-11%</b>	<b>4%</b>						
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>31</b>	<b>47</b>						

Tableau 36 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des écoles neuves

Le niveau K optimum est **K31**, 11% plus performant que l'exigence en vigueur.

Le Ew optimum est **Ew47**, ce qui est 4% moins performant que l'exigence E<sub>w</sub> en vigueur.

Les combinaisons cost-optimum préconisent les systèmes suivants :

- Une chaudière gaz à condensation mixte pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire (sans stockage) ;
- Une PAC air-air pour le refroidissement ;
- Un système de ventilation double flux (alimentation et extraction mécanique), avec échangeur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ), équipé d'un by-pass.

La petite école neuve EN1 présente un cost-optimum PEB conforme dont le CGA est 9% plus élevé que celui du cost-optimum absolu, et 2% plus élevé que celui du cas de base. Ce cost-optimum "PEB conforme" ne

représente donc pas une solution rentable. L'isolation des murs et toitures y est poussée au niveau U0,2 W/m<sup>2</sup>K, la production de chaleur et de froid est assurée par une pompe à chaleur air-eau réversible, et un boiler thermodynamique assure la production d'eau chaude sanitaire.

Dans le cas de l'école EN2, le cost-optimum absolu correspond exactement à l'exigence en vigueur. Il est donc également cost-optimum « PEB conforme ».

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base	Ew CO PEB-conf.	CGA CO PEB-conf.	CGA CO PEB-conf. / CGA CO
		%			EUR	EUR	EUR	%	kWh/m <sup>2</sup> an	EUR	
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>45</b>								
EN1	Petite école de village	40,0%	50	45	1.169.590 €	862.092 €	1.090.884 €	93%	34	1.187.381,00 €	9%
EN2	Ecole fondamentale volumétrie simple	60,0%	45	45	6.386.732 €	5.465.803 €	6.322.601 €	99%	45	6.322.601,00 €	0%
		100,0%									
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>4%</b>						<b>-10%</b>		
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>47</b>						<b>41</b>		

Tableau 37 : Comparaison des Ew (cost-optimum et PEB-conforme) et CGA (cost-optimum et PEB-conforme) des écoles neuves

### 18.5. Maisons de repos existantes (MRE)

Les 2 typologies de maison de repos existantes analysées affichent un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois murs et toits équivalent à celui des exigences U<sub>max</sub> applicables en rénovation depuis le 1er janvier 2021 en Wallonie. Par contre, des écarts importants sont constatés pour les fenêtres (U<sub>w</sub> ≈ 1 W/m<sup>2</sup>K) et les sols (0,2 W/m<sup>2</sup>K).

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>		<b>1.50</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>
MRE1	Maison de repos existante 1	50.0%	0.93	0.24	0.24	0.20
MRE2	Maison de repos existante 2	50.0%	1.37	0.24	0.24	0.20
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-23%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-17%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1.150</b>	<b>0.240</b>	<b>0.240</b>	<b>0.200</b>

Tableau 38 : Ecart moyen pondéré entre exigences U<sub>max</sub> et U<sub>optimum</sub> des différentes parois les maisons de repos existantes

Selon les hypothèses de l'étude, les niveaux U optimums pour les maisons de repos existantes sont de :

- 1.15 W/m<sup>2</sup>K pour les fenêtres (-23% par rapport aux exigences actuelles) ;
- 0,24 W/m<sup>2</sup>K pour les murs extérieurs (identique aux exigences actuelles) ;
- 0,24 W/m<sup>2</sup>K pour les toitures (identique aux exigences actuelles) ;
- 0,20 W/m<sup>2</sup>K pour les sols (-17% par rapport aux exigences actuelles).

Au vu de ces résultats, un renforcement des exigences devrait s'opérer pour les fenêtres et les sols. Cependant, concernant les fenêtres, seule une maison de repos sur 2 justifie ce renforcement (MR1) ; dans le cas de MR2, le U optimum des fenêtres est évalué à 1,37 W/m<sup>2</sup>K (-9% par rapport aux exigences 2021).

Le niveau Ew correspondant aux combinaisons cost-optimum des 2 typologies analysées, sont présentés ci-dessous, à titre informatif.

Les investissements nécessaires pour passer des niveaux Ew de base aux Ew cost-optimum, ainsi que l'impact des mesures d'amélioration sur le coût global actualisé macroéconomique, sont repris dans le tableau ci-dessous.

Ew cost-optimum, investissement et CGA des maisons de repos existantes

La moyenne pondérée du niveau Ew des maisons de repos rénovées à un niveau de performance cost-optimum est de 65, ce qui est 28% plus performant que le niveau Ew 90 exigé pour les bâtiments neufs de la même typologie.

Les investissements nécessaires pour améliorer les performances de l'enveloppe et/ou des systèmes sont de 370.000 € en moyenne (variable entre 320 et 420.000 euros), entraînant des diminutions de l'ordre de 85% en moyenne (83 à 87%) du coût global actualisé par rapport au bâtiment dans son état initial. Dans les 2 cas étudiés il est donc rentable de rénover le bâtiment au niveau cost optimum.

Les combinaisons cost-optimum préconisent les systèmes suivants :

- Un changement des systèmes de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire par une chaudière gaz mixte à condensation sans stockage apparaît pour les deux cas analysés ;
- Aucun système de refroidissement n'est préconisé dans le cas de la MRE1. Dans le cas de la MRE2, par contre, une PAC air-air est installée.
- Dans les 2 cas étudiés, aucune ventilation n'est existante initialement et, de manière similaire aux écoles, aucun système n'est installé dans la combinaison cost-optimum. Ici également, par conséquent, nous devons insister sur la nécessité d'installer un système conforme lorsque les travaux de rénovation le demandent, ainsi que le prévoit la réglementation.

Sous l'angle des "cost-optimum U conformes", dans lesquels les bâtiments respectent les valeurs U<sub>max</sub> 2021 en vigueur, on constate que les CGA de ces combinaisons sont 3 et 8 % plus élevés que ceux des cost-optimums absolus, tout en restant plus faibles que ceux des cas de base, c'est-à-dire rentable.

Le niveau Ew cost-optimum correspondant aux « U conformes » des 2 typologies analysées est présenté ci-dessous, à titre informatif.

Comparaison des Ew (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des maisons de repos existantes

## 18.6. Maisons de repos neuves (MRN)

Selon les spécifications de l'étude COZEB3, un cas de maison de repos neuve a été analysé, présentant un niveau cost-optimum de déperditions thermiques (U) des parois (fenêtres, murs, toits) plus exigeant que les valeurs U<sub>max</sub> applicables en Wallonie. Le niveau d'isolation recommandé pour les sols est conformes aux exigences actuelles.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>1,50</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
MRN1	Maison de repos neuve 1	100,0%	1,35	0,20	0,20	0,24
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-10%</b>	<b>-17%</b>	<b>-17%</b>	<b>0%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1,350</b>	<b>0,200</b>	<b>0,200</b>	<b>0,240</b>

Tableau 39 : Ecart moyen pondéré entre exigences U<sub>max</sub> et U<sub>optimum</sub> des différentes parois les maisons de repos neuves

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour les maisons de repos** sont de :

- **1,35 W/m²K** pour les fenêtres (-10% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,20 W/m²K** pour les murs extérieurs (-17% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,20 W/m²K** pour les toitures (-17% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les sols (identique aux exigences actuelles).

L'écart entre l'optimum des fenêtres et l'exigence étant inférieur à 15 %, un renforcement ne se justifie pas. Par contre les exigences U<sub>max</sub> 2021 applicables à la rénovation des murs et toitures des maisons de repos neuves pourraient faire l'objet d'un renforcement.

Il est à noter toutefois qu'un seul cas de maison de repos neuve a été analysé. Il conviendra de confirmer les conclusions de ce bâtiment au travers d'autres cas tests afin d'éviter tout biais des résultats liés à cette seule typologie. Ces vérifications seront effectuées en dehors de la présente étude.

La construction de maisons de repos est soumise à des exigences de performance globale (K et E<sub>w</sub>).

L'écart entre ces exigences et le niveau de performance cost-optimum de la maison de repos neuve analysée est présenté ci-dessous.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	K cost optimum	Ew cost optimum	K Base	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%					EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>35</b>	<b>90</b>						
MRN1	Maison de repos neuve 1	100,0%	25	43	25	90	35.644.692 €	12.488.885 €	21.776.239 €	61%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-29%</b>	<b>-52%</b>						
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>25</b>	<b>43</b>						

Tableau 40 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des maisons de repos neuves

Le niveau K optimum est **K25**, environ 29% plus performant que l'exigence en vigueur.

Le Ew optimum est **Ew 43**, ce qui est 52% plus performant que l'exigence E<sub>w</sub> en vigueur (Ew 90).

La combinaison cost-optimum préconise les systèmes suivants :

- Une chaudière gaz à condensation mixte pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire (avec stockage) ;
- Un système solaire thermique couplé à chaudière (22 m²) ;
- Un refroidissement par PAC air-air ;
- Un système de ventilation double flux (alimentation et extraction mécaniques) avec un échangeur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ), équipé d'un by-pass complet pour éviter de réchauffer l'air neuf en été lorsqu'il est nécessaire de refroidir les locaux.



Pour cette maison de repos, le cost-optimum absolu est PEB conforme.

### 18.7. Hôtels existants (HOE)

Parmi les 2 typologies d'hôtels existants analysés, seuls les murs affichent un niveau cost-optimum moyen pondéré de déperditions thermiques (U) équivalent à celui de l'exigence  $U_{max}$  applicable en rénovation depuis le 1er janvier 2021 en Wallonie. Des écarts sont observés pour les autres parois, et dépassent le seuil des 15% pour les fenêtres et les sols, de manière identique aux maisons de repos.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>		<b>1.50</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>	<b>0.24</b>
HOE1	Hôtel existant 1	50.0%	0.89	0.24	0.20	0.20
HOE2	Hôtel existant 2	50.0%	1.36	0.24	0.24	0.20
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-25%</b>	<b>0%</b>	<b>-8%</b>	<b>-17%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>1.125</b>	<b>0.240</b>	<b>0.220</b>	<b>0.200</b>

Tableau 41 : Ecart moyen pondéré entre exigences  $U_{max}$  et  $U_{optimum}$  des différentes parois hôtels existants

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimums pour les maisons de repos existantes** sont de :

- **1.125 W/m²K** pour les fenêtres (-25% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,24 W/m²K** pour les murs extérieurs (identique aux exigences actuelles) ;
- **0,22 W/m²K** pour les toitures (-8% par rapport aux exigences actuelles) ;
- **0,20 W/m²K** pour les sols (-17% par rapport aux exigences actuelles).

Au vu de ces résultats, un renforcement des exigences fenêtre et sol devrait s'opérer, de la même manière que pour les maisons de repos. Cependant, concernant les fenêtres, seul un hôtel sur 2 justifie ce renforcement (HOE1), le deuxième présente un U cost-optimum de 1.36 W/m²K, pour une exigence fixée à 1.5 W/m²K

Les niveaux  $E_w$  cost-optimum des 2 typologies analysées sont présentés ci-dessous, à titre informatif.

Les investissements nécessaires pour passer des niveaux  $E_w$  de base aux  $E_w$  cost-optimum ainsi que l'impact des mesures d'amélioration sur le coût global actualisé macroéconomique sont également repris dans le tableau.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	$E_w$ cost optimum	$E_w$ Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%			EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>							
HOE1	Hôtel existant 1	50,0%	65	188	858.498 €	231.386 €	548.763 €	64%
HOE2	Hôtel existant 2	50,0%	46	142	6.095.754 €	850.596 €	3.324.351 €	55%
		<b>100,0%</b>						
	<b>Ecart moyen pondéré</b>							
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>56</b>					

Tableau 42 :  $E_w$  cost-optimum, investissement et CGA des hôtels existants



La moyenne pondérée du niveau  $E_w$  des hôtels rénovés à un niveau de performance cost-optimum est de **56**, ce qui est 38% plus performant que le niveau  $E_w$  90 exigé pour les bâtiments neufs de la même typologie.

Les investissements nécessaires pour améliorer les performances de l'enveloppe et/ou des systèmes sont respectivement de 231.386 € et 850.596 €, entraînant des diminutions importantes du CGA de 55 à 64%.

Les combinaisons cost-optimum préconisent les systèmes suivants :

- Une chaudière gaz à condensation mixte pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (sans stockage) ;
- Aucun système de refroidissement n'est préconisé dans le cas de l'HOE1. Dans le cas de l'HOE2, par contre, une PAC air-air est installée ;
- Dans le cas de l'HOE1, aucune ventilation n'est installée initialement et, de manière similaire aux écoles et aux maisons de repos, aucun système n'est installé dans la combinaison cost-optimum. Ici également, par conséquent, nous devons insister sur la nécessité d'installer un système conforme lorsque les travaux de rénovation le demandent, ainsi que le prévoit la réglementation. Dans le cas de l'HOE2, une ventilation mécanique double flux existe dans le cas de base, et est conservée dans le cost-optimum. Le récupérateur de chaleur a, par contre, été amélioré pour monter son rendement de récupération à 80%.

Sous l'angle des  $E_w$  cost-optimum « U conformes », dans lesquels les bâtiments respectent les valeurs  $U_{max}$  en vigueur, on constate ci-dessous que le CGA des combinaisons cost-optimum U conformes sont 1 et 4 % plus élevés tout en restant largement plus faibles que ceux des cas de base, c'est-à-dire rentables.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	Ew cost optimum	Ew Base	CGA Base	CGA CO	CGA CO / CGA base	Ew CO U-conf.	CGA CO U-conf.	CGA CO U-conf. / CGA CO
		%			EUR	EUR	%	kWh/m².an	EUR	
	<b>Exigence PEN 2021 existant</b>									
HOE1	Hôtel existant 1	50,0%	65	188	858.498 €	548.763 €	64%	64	568.472,00 €	4%
HOE2	Hôtel existant 2	50,0%	46	142	6.095.754 €	3.324.351 €	55%	43	3.344.646,00 €	1%
		<b>100,0%</b>								
	<b>Ecart moyen pondéré</b>									
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>56</b>					<b>54</b>		

Tableau 43 : Comparaison des  $E_w$  (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des hôtels existants

## 18.8. Hôtels neufs (HON)

Dans le cas de l'hôtel neuf, une différence relativement importante avec les niveaux d'exigence en vigueur s'affiche lorsque l'on analyse les niveaux cost-optimum obtenus dans l'étude des déperditions thermiques (U) des différentes parois (fenêtres, murs, toits, sols).

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	U optimum Fenêtres	U optimum Murs extérieurs	U optimum Toit	U optimum Sol
		%	W/m²K	W/m²K	W/m²K	W/m²K
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>1,50</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
HON1	Hôtel neuf 1	100,0%	0,80	0,14	0,10	0,17
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-47%</b>	<b>-42%</b>	<b>-58%</b>	<b>-29%</b>
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>0,800</b>	<b>0,140</b>	<b>0,100</b>	<b>0,170</b>

Tableau 44 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois hôtels neufs

Selon les hypothèses de l'étude, **les niveaux U optimaux pour les hôtels** sont de :

- **0,8 W/m²K** pour les fenêtres (-47% par rapport aux exigences) ;
- **0,14 W/m²K** pour les murs extérieurs (-42% par rapport aux exigences) ;
- **0,10 W/m²K** pour les toitures (-58% par rapport aux exigences) ;
- **0,17 W/m²K** pour les sols (-29% par rapport aux exigences).

On constate que les exigences Umax 2021 applicables aux parois de l'enveloppe des hôtels neufs sont nettement moins performantes que les U optimaux calculés paroi par paroi.

De même que pour la maison de repos, un seul cas d'hôtel neuf a été analysé. S'agissant du seul bâtiment pour lequel les résultats s'écartent autant des exigences, il conviendra donc également de confirmer les conclusions de ce bâtiment au travers d'autres cas tests afin d'éviter tout biais des résultats liés à cette seule typologie. Ces vérifications seront effectuées en dehors de la présente étude.

La construction d'hôtels est soumise à des exigences de performance globale (K et E<sub>w</sub>). L'écart entre ces exigences et le niveau de performance cost-optimum de l'hôtel neuf analysé est présenté ci-dessous.

Code BatRef	Batiment de Référence	Représentativité du bâtiment	K cost optimum	Ew cost optimum	K Base	Ew Base	CGA Base	Inv. CO	CGA CO	CGA CO / CGA base
		%					EUR	EUR	EUR	%
	<b>Exigence PEN 2021 neuf</b>		<b>35</b>	<b>90</b>						
HON1	Hôtel neuf 1	100,0%	14	51	20	90	21.231.376 €	9.322.200 €	14.580.851 €	69%
	<b>Ecart moyen pondéré</b>		<b>-60%</b>	<b>-43%</b>						
	<b>Niveau optimum moyen pondéré</b>		<b>14</b>	<b>51</b>						

Tableau 45 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des hôtels neufs

Le niveau K optimum est **K14**, 60% plus performant que l'exigence en vigueur.

Le Ew optimum est **Ew51**, ce qui est 43% plus élevé que l'exigence E<sub>w</sub> en vigueur.

Les combinaisons cost-optimum préconisent les systèmes suivants :

- Une chaudière gaz à condensation mixte pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, avec stockage ;
- Un système solaire thermique couplé à la chaudière (22 m²) ;
- Le refroidissement est assuré par une pompe à chaleur air-air (EER 4).
- La ventilation est assurée par un système double flux (alimentation et extraction mécaniques) avec un échangeur de chaleur ( $\eta = 80\%$ ), équipé d'un by-pass complet.

Pour cet hôtel, le cost-optimum absolu est PEB conforme.

## 18.9. Conclusions générales sur les systèmes

### Ventilation :

Les systèmes de ventilation étudiés en variantes (amenées naturelles, extractions mécaniques à la demande avec un facteur de réduction 0,9 et amenées mécaniques, extractions mécaniques avec récupérateur de chaleur) semblent avoir une influence négative sur les calculs macroéconomique et financier (le surcoût excède l'économie générée).

Ces systèmes, pourtant plus performants par rapport à un système de ventilation naturelle, n'apparaissent pas sur le front de Pareto.

Plus étonnant encore, certaines combinaisons sélectionnées par l'étude comme cost optimum ne comprennent pas l'installation d'un système de ventilation dans les opérations de rénovation des bâtiments existants. D'un point de vue strictement économique, cela est cohérent ; les systèmes de ventilation ajoutent au coût de la rénovation, et ce surcoût excède l'économie d'énergie générée. Il faut cependant nuancer ce résultat : il reste indispensable de ventiler correctement et suffisamment un bâtiment performant, afin d'assurer un renouvellement d'air suffisant garantissant une qualité d'air intérieur optimale, mais aussi un confort suffisant, une maîtrise des taux d'humidité... Par ailleurs, des impositions existent en termes de ventilation. Il est par exemple obligatoire de prévoir un système d'alimentation en air neuf dans les locaux secs où les menuiseries extérieures sont remplacées, ou une extraction conforme lorsqu'un local humide est créé. Lorsqu'un système est existant, par contre, il est toujours maintenu dans les combinaisons optimales. Les systèmes double flux qui ne sont pas équipés d'un récupérateur de chaleur dans les cas de base, le sont parfois dans les optimums.

Dans le cas des bâtiments neufs, l'installation d'un système complet de ventilation conforme est une obligation réglementaire. Tous les cas de base en sont équipés, et les combinaisons cost-optimales le sont également.

### Systèmes de chauffage, de refroidissement et d'eau chaude sanitaire

Les différents bâtiments existants étaient équipés de systèmes relativement différents dans les cas de base. Il est intéressant de noter que deux types d'installations ressortent régulièrement des résultats optimaux :

- Soit une pompe à chaleur air-eau réversible, qui couvre les besoins de chaud et de froid, est associée à une chaudière séparée qui se charge de la couverture des besoins en ECS. Les cas concernés sont : BUE1, BUE2, BUE4, EE2, EE3, EE4. Attention toutefois que, dans le cas des écoles existantes, l'ancienne chaudière est conservée, et n'est donc pas remplacée par une nouvelle installation. La raison est à trouver dans la faible importance des besoins d'ECS dans ces bâtiments, qui ne justifie pas un investissement conséquent pour les satisfaire. Dans plusieurs cas cependant, ces installations existantes fonctionnaient au mazout. Il n'est pas raisonnable de penser que ces anciennes chaudières au mazout puissent être conservées encore 20 ans ; il est également impossible qu'elles soient remplacées par une nouvelle chaudière fonctionnant avec le même vecteur, au vu des orientations que prend la réglementation wallonne en la matière. Dans ces cas, les auteurs de ce rapport ont supprimé les variantes qui conservaient les systèmes de production d'eau chaude sanitaire utilisant du mazout, lorsque les systèmes de production de chauffage étaient changés. Il est donc impossible que des optimums présentent des consommations de mazout.

- Soit une chaudière gaz à condensation, préconisée dans les cas suivants : BUE5, EE1, HOE1, HOE2, MRE1, MRE2. Dans ces cas, la chaudière est équipée pour fournir la chaleur nécessaire aux bâtiments, mais aussi pour couvrir le besoin en eau chaude sanitaire (chaudières mixtes). Le refroidissement est alors pris en charge par une climatisation air-air supplémentaire. Seuls l'HOE1 et le MRE1 ne sont pas équipés de systèmes de climatisation (ce qui justifie partiellement la préférence pour une chaudière, au lieu d'une pompe à chaleur qui, dans les autres cas, fournit les 2 services – chaleur et froid – au prix d'une seule installation).
- Le solaire thermique est présent dans les cost optimum des bâtiments neufs présentant des besoins en eau chaude sanitaire importants (MRN, HON).
- Seul le BUE3 ne présente pas de changements de systèmes, ni dans l'optimum absolu, ni dans l'optimum « U conformes ». Cela est probablement dû à la très faible taille du bureau (isolé, au rez-de-chaussée d'un bâtiment), et aux très faibles besoins de chaleur qui en résultent.

L'analyse des optimum « U conformes » ne change pas souvent la conclusion ci-dessus. Il est intéressant de voir que le BUE5 y rejoint les autres exemples de bureaux existants, équipés de pompes à chaleur air-eau réversibles et d'un chauffe-eau au gaz pour l'ECS. Dans tous les autres cas, les systèmes sont identiques à l'optimum absolu.

Dans les bâtiments neufs, la chaudière gaz à condensation, mixte (production de chaleur et d'eau chaude sanitaire) sort dans tous les optimums absolus, accompagnée d'une climatisation air-air pour couvrir les besoins de froid.

### **Influence du photovoltaïque sur les résultats :**

Des simulations intégrant des solutions photovoltaïques ont été réalisées sur les cas BUE1, BUN1, EE1, EN1, MRE1, MRN1, HOE2, HON1.

Les hypothèses utilisées pour le photovoltaïque dans les bâtiments tertiaires sont :

- Une orientation sud
- Une inclinaison de 15°
- Une puissance crête de 25 kWc
- L'absence d'ombrage sur les panneaux

Les conclusions sont identiques dans tous les cas de figure étudiés : en accord avec la méthode PEB, qui soustrait l'intégralité de la production photovoltaïque au niveau Espec, le Front de Pareto et le cost-optimum subissent une diminution proportionnelle à la production de l'installation qui a été testée. L'influence sur le CGA est identique dans tous les cas : une diminution d'environ 150.000 euros. L'influence sur le Ew est par contre très variable, ce qui est assez logique. En effet, la consommation initiale (avant PV) des bâtiments exposés à cette étude est très différente d'un cas à l'autre (entre la toute petite école EN1, et le très grand hôtel HON, ou la MRN, par exemple), mais la déduction faite par la même installation décrite ci-dessus, est identique. Le résultat en termes de Ew sera donc très variable : de 1 points (pour l'HON, ou la MRN) à 37 points (sur l'optimum absolu de l'EN1).

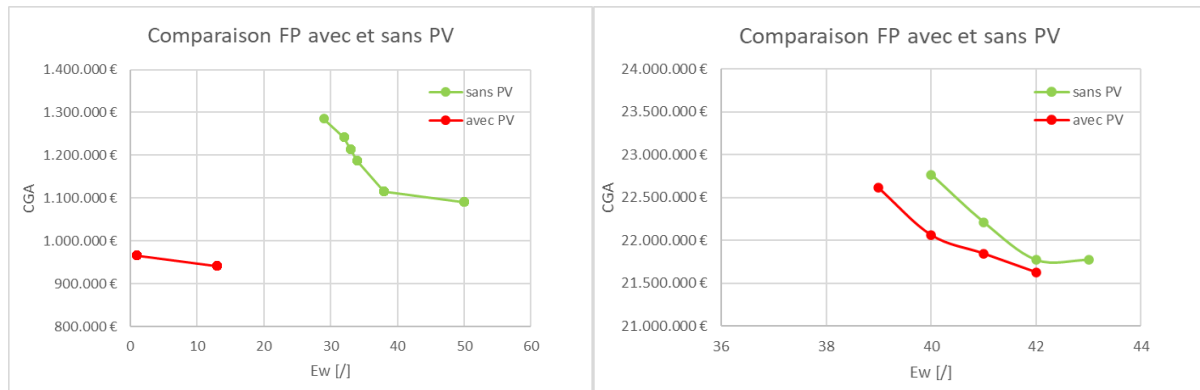


Tableau 46 : Comparaison des fronts de Pareto pour l'EN1 et la MRN, avec et sans PV

Nous n'avons pas généralisé cette étude à l'ensemble des bâtiments, car la prise en compte systématique du photovoltaïque aurait pour conséquence de biaiser les résultats, en exagérant la compensation énergétique qu'il permet (100% d'autoconsommation). Remarquons également que la compensation se fait sur la consommation en énergie primaire totale, tous vecteurs confondus : la production d'électricité photovoltaïque, par conséquent, peut tout à fait compenser une consommation de mazout, de gaz ou de biomasse servant à la production de chauffage, par exemple. Les cost-optimum atteints seraient donc anormalement réduits, lorsqu'il s'agit d'évaluer un CGA – et a fortiori de baser une exigence réglementaire, qui ne serait atteignable qu'en ayant recours à cette technologie.

Autre biais de cette compensation indifférenciée : la décision d'installer une production photovoltaïque est également indépendante du type de systèmes présents pour satisfaire les besoins en chaud, en froid ou en eau chaude, selon la PEB. Nous ne constatons d'ailleurs aucune différence de systèmes dans les simulations avec et sans PV. Les conclusions tirées sur les simulations sans PV restent donc valables pour les simulations avec PV, tout en présentant une amélioration (variable) des résultats énergétiques et économiques.

## 18.10. Résumé des niveaux optimaux

Catégorie de bâtiments de référence	Exigences 2021	Cost-optimum "absolu"	Ecart moyen pondéré
Ufenêtres [W/m².K]			
Bureaux existant - BUE	1.5	1.355	-10%
Ecoles existantes - EE		1.378	-8%
Maisons de repos existantes - MRE		1.150	-23%
Hôtels existants - HOE		1.125	-25%
Bureaux neufs - BUN		1.490	-1%
Ecoles neuves - EN		1.472	-2%
Maisons de repos neuves - MRN		1.350	-10%
Hôtels neufs - HON		0.800	-47%
Umurs [W/m².K]			
Bureaux existant - BUE	0.24	0.214	-11%
Ecoles existantes - EE		0.237	-1%
Maisons de repos existantes - MRE		0.240	0%
Hôtels existants - HOE		0.240	0%
Bureaux neufs - BUN		0.240	0%
Ecoles neuves - EN		0.240	0%
Maisons de repos neuves - MRN		0.200	-17%
Hôtels neufs - HON		0.140	-42%
Utoits [W/m².K]			
Bureaux existant - BUE	0.24	0.210	-13%
Ecoles existantes - EE		0.200	-17%
Maisons de repos existantes - MRE		0.240	0%
Hôtels existants - HOE		0.220	-8%
Bureaux neufs - BUN		0.240	0%
Ecoles neuves - EN		0.240	0%
Maisons de repos neuves - MRN		0.200	-17%
Hôtels neufs - HON		0.100	-58%
Usols [W/m².K]			
Bureaux existant - BUE	0.24	0.240	0%
Ecoles existantes - EE		0.239	-1%
Maisons de repos existantes - MRE		0.200	-17%
Hôtels existants - HOE		0.200	-17%
Bureaux neufs - BUN		0.230	-4%
Ecoles neuves - EN		0.240	0%
Maisons de repos neuves - MRN		0.240	0%
Hôtels neufs - HON		0.170	-29%
NIVEAU K			
Bureaux existant - BUE			
Ecoles existantes - EE			
Maisons de repos existantes - MRE			
Hôtels existants - HOE			
Bureaux neufs - BUN	35	32	-9%
Ecoles neuves - EN		31	-11%
Maisons de repos neuves - MRN		25	-29%
Hôtels neufs - HON		14	-60%
E <sub>w</sub>			
Bureaux existant - BUE			
Ecoles existantes - EE			
Maisons de repos existantes - MRE			
Hôtels existants - HOE			
Bureaux neufs - BUN	45	56	24%
Ecoles neuves - EN		47	4%
Maisons de repos neuves - MRN	90	43	-52%
Hôtels neufs - HON		51	-43%

## 18.11. Justification des écarts

### Sur les niveaux d'isolation thermique

Pour les valeurs U, globalement, le tableau ci-dessus ne permet pas de tirer des conclusions générales qui conviennent pour l'ensemble des parois, ou l'ensemble des typologies. De nombreuses parois présentent des valeurs optimales moyennes pondérées proches des exigences actuelles, tandis que d'autres s'en écartent de plus de 15%. Les différences notables que l'on peut mettre en lumière ci-dessous sont principalement liées aux différences importantes en termes de morphologie des typologies, et donc de proportion des différentes parois de déperdition dans les bilans énergétiques.

Comme pour le résidentiel, l'étude des optimums sur les U de parois dans l'existant a été réalisée en considérant que les systèmes (chauffage, ECS) restaient inchangés (et globalement peu performants), alors que l'étude des U optimums dans le neuf s'accompagnait d'office de systèmes performants issus des cas de base.

Ainsi, lorsque ces coefficients de performance (U) sont analysés seuls, en-dehors de considérations de performances globales :

Le  $U_w$  optimum moyen pondéré des **fenêtres** est :

- Plus performant de 9 à 8 % ( $1,37$  et  $1,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) que l'exigence  $U_{\text{max}} 2021$  ( $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) dans les bureaux et écoles existants.
- Plus performant de 23 et 25% ( $1.15$  et  $1.125 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) dans les maisons de repos et les hôtels existants ; il est intéressant de noter que, dans les 2 catégories, une typologie préconise en optimum des triples vitrages ( $U_w \approx 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), tandis que l'autre préconise des doubles vitrages ( $U_w \approx 1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Quasi identique aux exigences actuelles dans les bureaux et écoles neufs : l'écart n'y est que de 1 à 2% ( $1,49$  et  $1,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) ;
- Plus performant de 10% ( $1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) dans les maisons de repos neuves.
- Dans le cas de l'hôtel neuf, le  $U_w$  optimum moyen se situe à  $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ce qui correspond à un écart de 47% plus performant que l'exigence actuelle. Attention toutefois que les conclusions sont ici tirées sur le seul exemple de typologie analysée dans l'étude.

Un écart de 10% n'est pas réellement significatif, car il correspond simplement à l'écart entre l'hypothèse de calcul (un double vitrage dans un châssis "standard" implique un  $U_w$  de  $1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$  selon nos hypothèses) et l'exigence actuelle ( $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Il n'y a donc que 3 catégories (MRE, HOE et HON) sur les 8 étudiées ici, et 3 bâtiments (MRE2, HOE2 et HON) sur les 18, qui préconisent un renforcement de l'exigence. Dans l'ensemble, l'exigence actuelle semble donc suffisamment alignée sur le niveau d'amélioration cost-optimum et ne doit pas être renforcée.

Dans les différents segments étudiés, le U optimum moyen pondéré des **murs extérieurs** :

- Correspond à l'exigence  $U_{\text{max}} 2021$  ( $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) pour les écoles, les maisons de repos et les hôtels existants, mais aussi pour les bureaux et écoles neufs.
- Est un peu plus éloigné, mais toujours proche de l'exigence actuelle dans les bureaux existants (-11%, soit un U optimum de  $0,214 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Dépasse le seuil des 15% d'écart dans les maisons de repos neuves (-17%, soit un U optimum de  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Est beaucoup plus éloigné pour l'hôtel neuf (-42%, soit un U optimum  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).



Ainsi, il n'existe dans cette étude que 2 bâtiments (MRN, HON) sur 18 dont l'analyse semble préconiser un renforcement des exigences, au travers d'un écart supérieur à 15% par rapport à l'exigence actuelle. Un renforcement de l'exigence n'est donc pas pertinent pour les U des murs.

Le U optimum moyen pondéré des **toitures** est :

- Identique à l'exigence  $U_{max}$  2021 ( $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) pour les maisons de repos existantes, les bureaux neufs et les écoles neuves, soit 5 bâtiments sur les 18.
- Un peu plus éloigné, mais toujours proche de l'exigence actuelle ( $< 15\%$ ) dans les hôtels existants ( $-8\%$ , soit un U optimum de  $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) et les bureaux existants ( $-13\%$ , soit un U optimum de  $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).
- Éloigné de plus de 15% dans les écoles existantes ( $-17\%$ ) et les maisons de repos ( $-17\%$ ) neuves, qui présentent des U optimum de  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Beaucoup plus éloigné pour l'hôtel neuf,  $-58\%$ , soit un U optimum  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Attention qu'ici également, les écarts inférieurs à 15% (HOE, BUE) « cachent » une disparité entre les bâtiments traités : certains présentent des U optimum pour les toitures de  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $-17\%$  par rapport à l'exigence actuelle), d'autres de  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $0\%$  par rapport à l'exigence actuelle). Si l'on réfléchit en termes de bâtiments et non de catégories, il y a donc une forme de parité entre les cas qui préconisent un renforcement des exigences à  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , et ceux qui se satisfont des exigences actuelles. Il n'est dès lors pas possible de prononcer une recommandation générale.

Le U optimum moyen pondéré des **sols** est généralement *légèrement* plus performant que l'exigence actuellement en vigueur ( $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Ainsi :

- Les bureaux existants, écoles existantes, écoles neuves et maisons de repos neuves présentent un optimum identique ou quasi identique au seuil d'exigence actuel.
- Les bureaux neufs présentent un écart de 4% avec l'exigence, avec un U optimum de  $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Les maisons de repos existantes et les hôtels existants affichent un  $U_{sol}$  optimum moyen pondéré à  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $-17\%$ ).
- L'hôtel neuf présente par contre un  $U_{sol}$  optimum de  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$  ( $-29\%$ ).

Dans le cas de la MRN et de l'HON, un seul cas ayant été analysé par typologie, il sera nécessaire de confirmer les conclusions par l'analyse d'autres cas avant d'envisager un renforcement d'exigence.

Une autre remarque d'importance concerne **l'analyse des résultats globaux issus de la sélection des cost optimum dans les bâtiments existants**, c'est-à-dire à partir d'évaluations de la performance globale des bâtiments.

Dans la plupart des cas (BUE1, EE1, EE3, EE4, HOE1, HOE2, MRE1, MRE2), l'optimum absolu préconise l'isolation de toutes les parois de déperdition, à l'exception des planchers. Dans plusieurs de ces cas (BUE1, EE4, HOE1, HOE2, MRE1, MRE2), ces mêmes optimums préconisent par contre un renforcement de l'isolation des toitures et/ou des murs. À part, bien sûr, les bâtiments neufs, seul l'EE2 préconise une isolation thermique de l'ensemble des parois déperditives dans l'optimum absolu.

Dans les bâtiments neufs, les niveaux d'isolation thermique des sols qui ressortent des optimums absolus préconisent un U de  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  (à part pour l'hôtel neuf).

La conclusion qui semble s'imposer est donc que le niveau actuel d'exigence d'isolation des sols ne devrait pas nécessairement être renforcé.



Concernant l'isolation des murs, les optimums absolus ne sont pas nécessairement alignés dans leurs conclusions. Ainsi, les BUE1, EE4, HOE1, MRE2, et MRN1 préconisent un U optimum de  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ , alors que les BUN1, EE1, EE2, EE3, EN1, EN2, HOE2, et MRE1 préconisent un maintien de l'exigence actuelle ( $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Seul l'HON préconise un renforcement de l'isolation pour atteindre  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Concernant l'isolation des toitures, la situation est globalement semblable. Les BUE1, EE1, EE3, EE4, HOE1, HOE2, MRE1, MRE2, et MRN1 préconisent un U optimum de  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ , alors que les BUN1, EE2, EN1, et EN2 préconisent un maintien de l'exigence actuelle ( $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Seul l'HON préconise un renforcement pour atteindre  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Enfin, à part l'HON et les BUE 2 à 5, tous les optimums absolus sont équipés de double vitrage, et affichent des U optimums pour les fenêtres (entre  $1,35$  et  $1,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) qui ne s'écartent pas de plus de 15% de l'exigence actuelle ( $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Les **optimums « U conformes »** sont bien sûr différents. Ainsi que nous l'avons établi dans les parties de rapport dédiées à chaque typologie, les CGA de ces optimums sont rarement très éloignés des optimums absolus, et l'on peut souvent considérer les cas « U conformes » comme étant quasi aussi rentables.

Les fenêtres sont équipées de double vitrage (U compris entre  $1,35$  et  $1,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) dans la majorité des cas, à l'exception de l'HON. Les écarts avec l'exigence, liés uniquement aux hypothèses de calcul pour Uf (châssis) et Ug (vitres) utilisés étant inférieurs à 15%, un renforcement d'exigence ne se justifie pas.

Les murs présentent un U optimum de  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans les cas des bureaux existants, le HOE1, la MRE2, et la MRN ; et de  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans les cas des bureaux neufs, des écoles existantes et neuves, le HOE2, et la MRE1. Seul le HON se détache avec un optimum à  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Les toitures présentent un U optimum de  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans le cas du BUE1, BUE4, BUE5, HOE1 et MRE2 ; de  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans les cas de BUE2 et MRN ; et de  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans les cas des bureaux neufs, des écoles existantes et neuves, de l'HOE2 et de la MRE1. Seul le HON se détache, avec un U optimum pour le toit de  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  ; identique au cas de base.

Enfin, au niveau des planchers, les U optimums « conformes » sont de  $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans le BUE1, BUE3, BUE4, BUE5 et MRE2 ; et  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$  dans le BUE2, dans les bureaux neufs, les écoles existantes et neuves, le HOE2, MRE1 et MRN. Seul le HON préconise une isolation poussée pour atteindre un U de  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

En termes de **niveau K** (pour les bâtiments neufs, donc), les résultats sont là aussi assez variables. La MRN et l'HON préconisent un niveau K plus exigeant que la réglementation (K25 et K14, respectivement). Les autres bâtiments ne présentent pas d'écart important par rapport à l'exigence.

Attention toutefois que :

- La prise en compte des nœuds constructifs dans l'évaluation du niveau K (et spécialement la méthode du supplément forfaitaire, autorisée par la réglementation) doit imposer une réflexion additionnelle avant d'envisager le renforcement de l'exigence.
- Le nombre de bâtiments étudiés (5, pour les 4 typologies) doit nous imposer la plus grande prudence face à ces conclusions.

Sur les niveaux de performance globale

Les bureaux neufs représentent la catégorie qui s'éloigne le plus de l'exigence, avec un Ew cost-optimum moyen de 56 (+24% par rapport à l'exigence de 45). Les Ew cost-optimum moyen des écoles neuves sont légèrement supérieurs à l'exigence, bien que très proches (Ew 47, soit +4%).

Les maisons de repos neuves, et hôtels neufs, affichent des niveaux Ew cost-optimum très performants (Ew 43 et 51, respectivement), grâce notamment à des niveaux d'isolation thermique élevés. Ces résultats sont plus performants que l'exigence, qui est actuellement fixée à Ew 90 pour ces types d'occupation. L'exigence pour ces segments maisons de repos et hôtels neufs pourrait donc être renforcée pour s'aligner sur l'exigence Ew des bureaux et écoles (E45). La pertinence d'un renforcement devra cependant être vérifiée au travers d'autres cas tests afin de confirmer ces conclusions.

Les systèmes utilisés dans le bâtiment ont bien sûr une influence considérable sur les niveaux Ew (voir chapitre 18.9 ci-dessus).

Actuellement, la rénovation des bâtiments non résidentiels existants n'est soumise à aucune exigence de performance globale (de type K ou Ew en vigueur pour les nouvelles constructions), en raison notamment de la disparité et de l'hétérogénéité des typologies du bâti wallon. Cette variabilité se marque par des performances énergétiques de base très différentes et, partant, des niveaux de performance cost-optimum également fort différents.

## 19. Etude de sensibilité

### 19.1. Introduction

L'étude COZEB analyse le coût macroéconomique et le coût financier de la performance énergétique des bâtiments sur une période de 30 ans pour les bâtiments résidentiels et 20 ans pour les bâtiments non-résidentiels.

Cette étude a pour but de déterminer la sensibilité des résultats aux variations du taux d'actualisation et de l'évolution des prix de l'énergie dans le calcul macroéconomique et dans le calcul financier. Elle permet de comparer les fronts de Pareto obtenus avec les paramètres de base de l'étude et ceux obtenus en faisant varier ces paramètres à la hausse et à la baisse.

### 19.2. Hypothèses

La justification des valeurs utilisées dans cette étude se trouve dans les paragraphes 2.2.3 et 2.2.4.

Evolution des prix de l'énergie (EPE) :

- Pas d'évolution des prix de l'énergie - Prix 1 : 0.00%
- **Scénario d'évolution des prix de l'énergie moyen - Prix 2 : 1.81%**
- Scénario d'évolution des prix de l'énergie élevé - Prix 3 : 3.62%

Taux d'actualisation pour le calcul macroéconomique (TAM) :

- TAM2 : 2% (PER)
- **TAM3 : 3% (PER-PEN)**
- **TAM4 : 4% (PER-PEN)**
- TAM5 : 5% (PEN)

Taux d'actualisation Pour le calcul financier (TAF) :

- TAF1 : 1% (PER)
- **TAF2 : 2% (PER-PEN)**
- **TAF3 : 3% (PER-PEN)**
- TAF4 : 4% (PEN)

Cette étude est réalisée sur l'indicateur Espec pour les bâtiments résidentiels, et sur l'indicateur Ew pour les bâtiments non-résidentiels.

Les courbes en jaune correspondent aux cas présentés dans le rapport, pour un taux d'actualisation de 3% pour le résidentiel et de 4% pour le non-résidentiel, et un scénario d'évolution des prix de l'énergie moyen, c'est-à-dire de 1.81%.

Cette étude est réalisée sur un bâtiment neuf et un bâtiment existant de chaque typologie (habitation individuelle HE5 et HN1-T1, immeuble appartements IAE1 et IAN1, bureaux BUE1 et BUN1, écoles EE1 et EN1, hôtels HOE2 et HON1 et maisons de repos MRE1 et MRN1). Les conclusions seront donc à considérer avec précautions et en considérant les particularités des bâtiments sélectionnés, notamment en termes de taille.

### 19.3. Résultats

Bâtiments résidentiels											
Résultats Macroéconomiques						Résultats Financiers					
TAM variable : 2% - 3% - 4%			TAM moyen : 3%			TAF variable : 1% - 2% - 3%			TAF moyen : 2%		
EPE moyenne : 1.81%			EPE variable : 0% - 1.81% - 3.62%			EPE moyenne : 1.81%			EPE variable : 0% - 1.81% - 3.62%		
Maison unifamiliale existante - HE5											
	Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO
TAM2	69	206 637 €	EPE 0%	114	180 720 €	TAF1	69	237 045 €	EPE 0%	69	206 354 €
TAM3	114	197 544 €	EPE 1.81%	114	197 544 €	TAF2	69	224 227 €	EPE 1.81%	69	224 227 €
TAM4	114	187 788 €	EPE 3.62%	69	214 925 €	TAF3	69	213 751 €	EPE 3.62%	69	249 097 €
Maison unifamiliale neuve - HN1-T1											
	Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO
TAM2	81	396 387 €	EPE 0%	81	378 110 €	TAF1	81	402 992 €	EPE 0%	81	376 205 €
TAM3	81	388 830 €	EPE 1.81%	81	388 830 €	TAF2	81	391 804 €	EPE 1.81%	81	391 804 €
TAM4	81	382 614 €	EPE 3.62%	81	403 620 €	TAF3	81	382 661 €	EPE 3.62%	81	413 511 €
Immeuble appartements existant - IAE1											
	Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO
TAM2	99	1 164 683 €	EPE 0%	320	927 338 €	TAF1	184	1 319 745 €	EPE 0%	184	963 159 €
TAM3	99	1 115 471 €	EPE 1.81%	99	1 115 471 €	TAF2	184	1 171 084 €	EPE 1.81%	184	1 171 084 €
TAM4	320	1 006 391 €	EPE 3.62%	99	1 211 795 €	TAF3	184	1 049 216 €	EPE 3.62%	99	1 399 721 €
Immeuble appartements neuf - IAN1											
	Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO		Espec CO	CGA CO
TAM2	114	1 661 719 €	EPE 0%	128	1 542 149 €	TAF1	108	1 711 575 €	EPE 0%	108	1 578 767 €
TAM3	128	1 598 572 €	EPE 1.81%	128	1 598 572 €	TAF2	108	1 656 106 €	EPE 1.81%	108	1 656 106 €
TAM4	128	1 565 854 €	EPE 3.62%	114	1 699 176 €	TAF3	108	1 610 776 €	EPE 3.62%	95	1 748 628 €

Bâtiments non résidentiels											
Résultats Macroéconomiques						Résultats Financiers					
TAM variable : 3% - 4% - 5%			TAM moyen : 4%			TAF variable : 2% - 3% - 4%			TAF moyen : 3%		
EPE moyenne : 1.81%			EPE variable : 0% - 1.81% - 3.62%			EPE moyenne : 1.81%			EPE variable : 0% - 1.81% - 3.62%		
Immeuble de bureaux existant BUE1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	120	2 321 521 €	EPE 0%	120	2 080 101 €	TAF2	120	2 558 889 €	EPE 0%	120	2 227 704 €
TAM4	120	2 227 404 €	EPE 1.81%	120	2 227 404 €	TAF3	120	2 428 735 €	EPE 1.81%	120	2 428 735 €
TAM5	120	2 144 780 €	EPE 3.62%	120	2 408 257 €	TAF4	120	2 314 852 €	EPE 3.62%	120	2 676 481 €
Immeuble de bureaux neuf BUN1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	56	3 952 200 €	EPE 0%	56	3 845 782 €	TAF2	56	4 027 714 €	EPE 0%	56	3 881 727 €
TAM4	56	3 910 713 €	EPE 1.81%	56	3 910 713 €	TAF3	56	3 970 342 €	EPE 1.81%	56	3 970 342 €
TAM5	56	3 874 292 €	EPE 3.62%	56	3 990 433 €	TAF4	56	3 920 142 €	EPE 3.62%	56	4 079 548 €
Ecole existante EE1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	57	939 875 €	EPE 0%	111	833 611 €	TAF2	111	950 488 €	EPE 0%	130	765 761 €
TAM4	58	908 752 €	EPE 1.81%	58	908 752 €	TAF3	130	882 367 €	EPE 1.81%	130	882 367 €
TAM5	111	870 779 €	EPE 3.62%	57	968 167 €	TAF4	130	816 311 €	EPE 3.62%	57	993 011 €
Ecole neuve EN1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	50	1 107 963 €	EPE 0%	50	1 064 155 €	TAF2	50	1 104 959 €	EPE 0%	50	1 052 313 €
TAM4	50	1 090 884 €	EPE 1.81%	50	1 090 884 €	TAF3	50	1 084 269 €	EPE 1.81%	50	1 084 269 €
TAM5	50	1 075 892 €	EPE 3.62%	50	1 123 701 €	TAF4	50	1 285 316 €	EPE 3.62%	50	1 123 652 €
Hôtel existant HOE2											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	46	3 511 062 €	EPE 0%	46	3 032 132 €	TAF2	46	4 030 175 €	EPE 0%	46	3 373 168 €
TAM4	46	3 324 351 €	EPE 1.81%	46	3 324 351 €	TAF3	46	3 771 974 €	EPE 1.81%	46	3 771 974 €
TAM5	46	3 160 441 €	EPE 3.62%	46	3 683 128 €	TAF4	46	3 546 053 €	EPE 3.62%	46	4 263 454 €
Hôtel neuf HON1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	51	14 995 632 €	EPE 0%	51	13 931 683 €	TAF2	51	15 851 041 €	EPE 0%	51	14 391 492 €
TAM4	51	14 580 851 €	EPE 1.81%	51	14 580 851 €	TAF3	51	15 277 443 €	EPE 1.81%	51	15 277 443 €
TAM5	51	14 216 723 €	EPE 3.62%	51	15 377 878 €	TAF4	51	14 775 559 €	EPE 3.62%	51	16 369 270 €
Maison de repos existante MRE1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	70	1 441 949 €	EPE 0%	70	1 235 004 €	TAF2	70	1 679 024 €	EPE 0%	70	1 395 133 €
TAM4	70	1 361 271 €	EPE 1.81%	70	1 361 271 €	TAF3	70	1 567 456 €	EPE 1.81%	70	1 567 456 €
TAM5	70	1 290 446 €	EPE 3.62%	70	1 516 298 €	TAF4	70	1 469 836 €	EPE 3.62%	70	1 779 823 €
Maison de repos neuve MRN1											
	Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO		Ew CO	CGA CO
TAM3	42	22 510 445 €	EPE 0%	43	20 626 544 €	TAF2	43	24 123 566 €	EPE 0%	43	21 538 668 €
TAM4	43	21 776 239 €	EPE 1.81%	43	21 776 239 €	TAF3	43	23 107 710 €	EPE 1.81%	43	23 107 710 €
TAM5	43	21 131 358 €	EPE 3.62%	43	23 187 795 €	TAF4	43	22 218 859 €	EPE 3.62%	43	25 041 365 €

Figure 7 : Ensemble des résultats de l'étude de sensibilité

Les graphiques présentant ces résultats sont disponibles en Annexe F.

Une première remarque d'importance est la suivante : les bâtiments HN1, BUE1 et BUN1, EN1, HOE2, HON1 et MRE1 ne présentent aucune modification des résultats énergétiques entre les différentes simulations réalisées. En d'autres mots, les niveaux Espec et Ew cost optimums restent identiques, quelles que soient les hypothèses sur les taux d'actualisation et les taux d'évolution des prix de l'énergie. Ils ne seront donc pas analysés plus en détail ci-dessous.

Les autres bâtiments, HE5, IAE1, IAN1, EE1 et MRN1 sont présentés ci-dessous, avec leurs graphiques.

L'analyse des caractéristiques des différents cost-optimum mis en évidence sera présentée sous forme de tableaux de variation du taux d'actualisation macroéconomique (TAM) ou financier (TAF) et de variation de

scénario d'évolution des prix de l'énergie (EPE). Seul les cas mettant en évidence un changement de performance énergétique (Espec ou Ew) seront détaillés.

## 19.3.1. Maison unifamiliale existante HE5

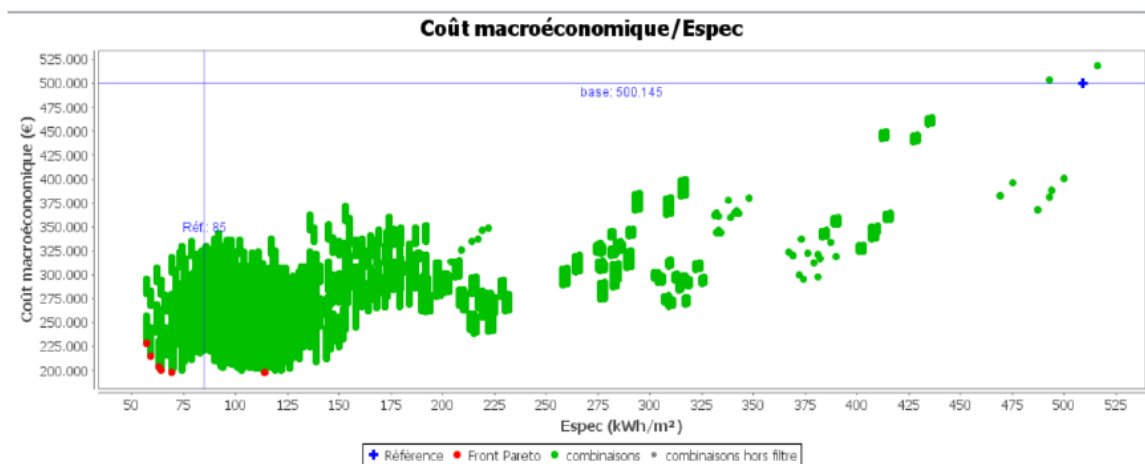
Analyse des résultats macroéconomiques :

Figure 8 : Front de Pareto de la HE5, tel que présenté dans le corps du rapport pour un taux d'actualisation de 3% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

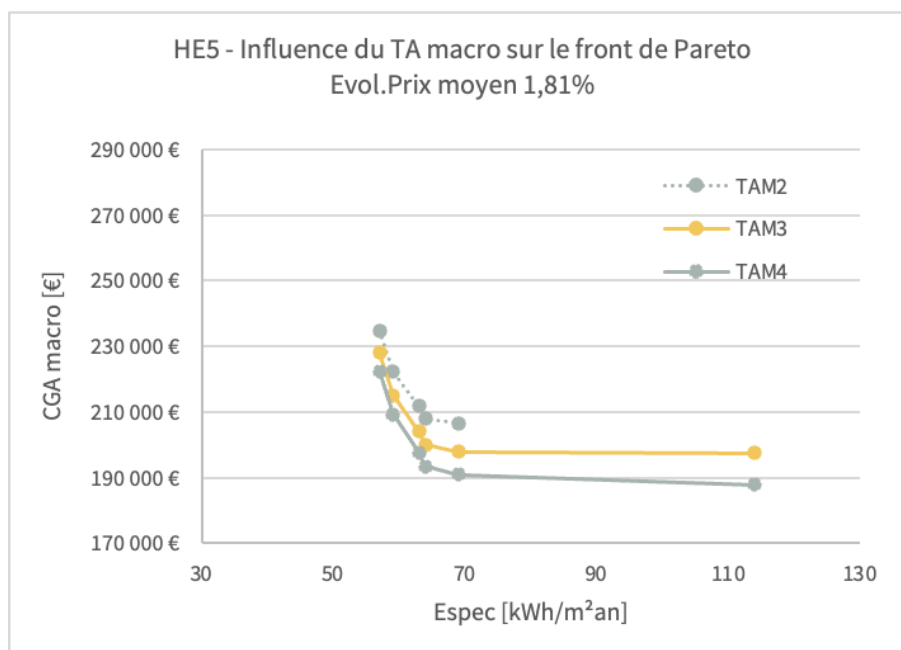


Figure 9 : Comparaison des Fronts de Pareto de la HE5, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (2%, 3% et 4%).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 114 kWh/m<sup>2</sup>an et 69 kWh/m<sup>2</sup>an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation macroéconomique pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAM 2%	TAM 3%	TAM 4%
CGA (€)	206 637 (+4.60%*)	197 544	187 788 (-4.94%*)
Espec (kWh/m²an)	69 (-39%*)	114	
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,20		
U murs (W/m²K)	0,20		
U planchers (W/m²K)	0,61 (IC**)		
Ug vitrage (W/m²K)	1,0		
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	2		
Systèmes			
Chauffage	Pompe à chaleur air-eau mixte	Chaudière mixte biomasse	
Eau chaude sanitaire	Pompe à chaleur air-eau mixte	Chaudière mixte biomasse	
Solaire thermique (m²)	6		
Ventilation	Pas de système (IC**)		

\* Par rapport au résultat avec un TAM 3%

\*\* IC = inchangé par rapport au cas de base.

Pour un taux d'actualisation macroéconomique plus faible (2%) on constate une amélioration de la performance énergétique (-39%) et une augmentation du CGA (+4.6%) du cost optimum, par rapport à un taux de 3%, dues à une installation de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire plus performante.



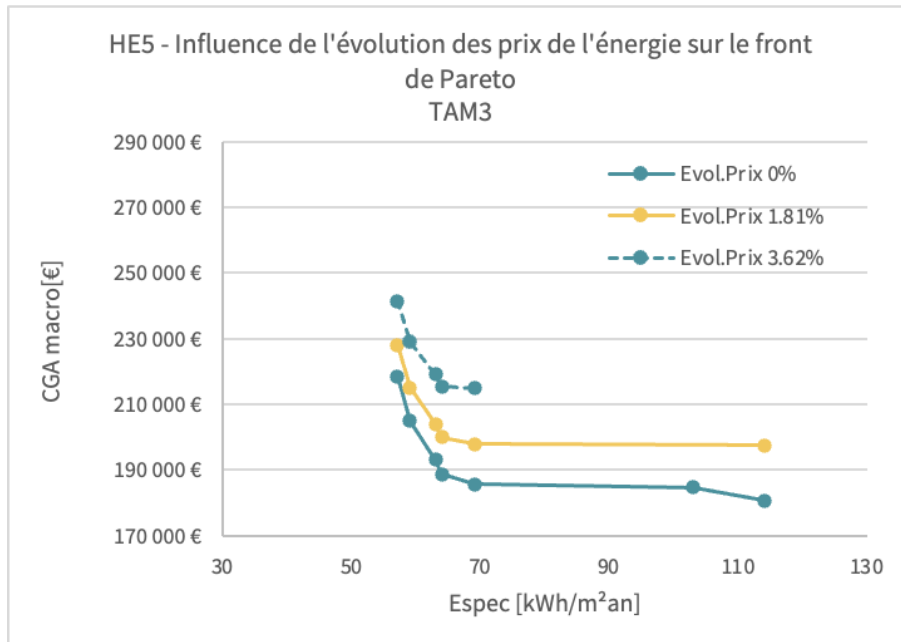


Figure 10 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 114 kWh/m²an et 69 kWh/m²an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de l'évolution des prix de l'énergie pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3%			
	EPE 0%	EPE 1.81%	EPE 3.62%
CGA (€)	180 720 (-8.52%*)	197 544	214 925 (+8.80%*)
Espec (kWh/m²an)	114		69 (-39%*)
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,20		
U murs (W/m²K)	0,20		
U planchers (W/m²K)	0,61 (IC)		
Ug vitrage (W/m²K)	1,0		
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	2		
Systèmes			
Chauffage	Chaudière mixte biomasse	Pompe à chaleur air-eau mixte	
Eau chaude sanitaire	Chaudière mixte biomasse	Pompe à chaleur air-eau mixte	
Solaire thermique (m²)	6		

Ventilation	Pas de système (IC)
-------------	---------------------

\* Par rapport au résultat avec un EPE moyen de 1.81%

Pour un scénario d'évolution des prix de l'énergie élevé (3.62%), on constate une amélioration de la performance énergétique (-39%) et une augmentation du CGA (+8.8%) du cost optimum, par rapport à une évolution moyenne (1.81%), dues à une installation de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire plus performante, de la même manière que pour une diminution du taux d'actualisation macroéconomique.

On pourrait en conclure qu'avec une évolution importante des prix de l'énergie, la pompe à chaleur devient plus rentable que la chaudière biomasse ; et l'amélioration des performances globales du bâtiment est plus intéressante. Cependant, il s'agit du seul bâtiment, soumis à l'étude de sensibilité, pour lequel on peut faire ce constat.

### Analyse des résultats financiers :

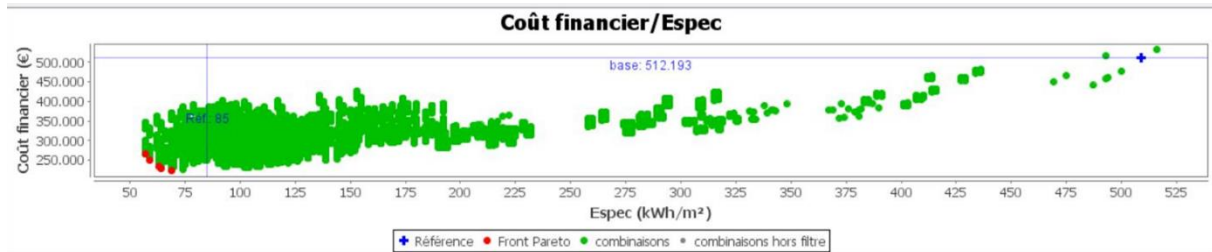


Figure 11 : Front de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'actualisation financier de 2% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

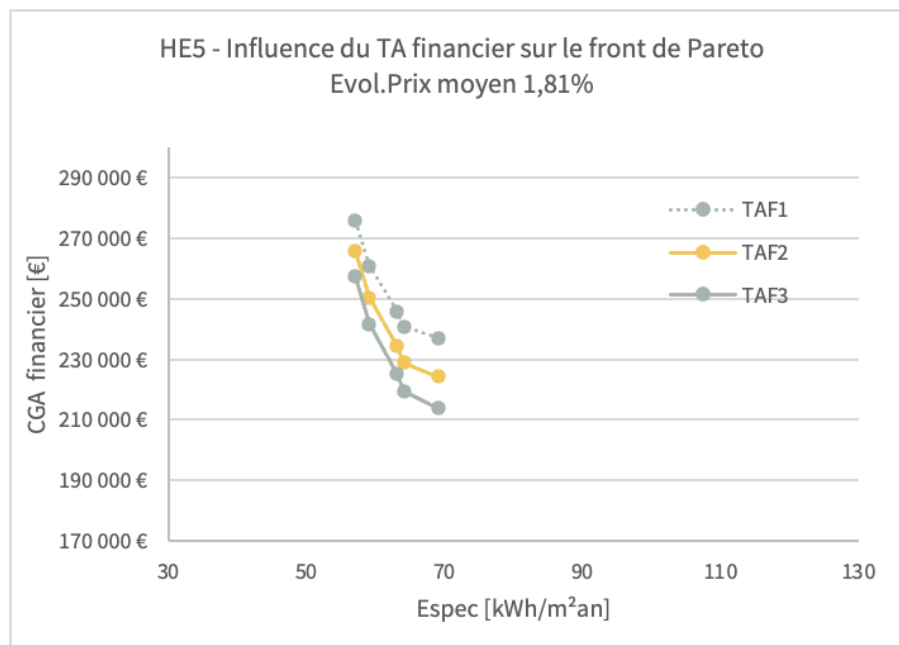


Figure 12 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81% et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (1%, 2% et 3%)

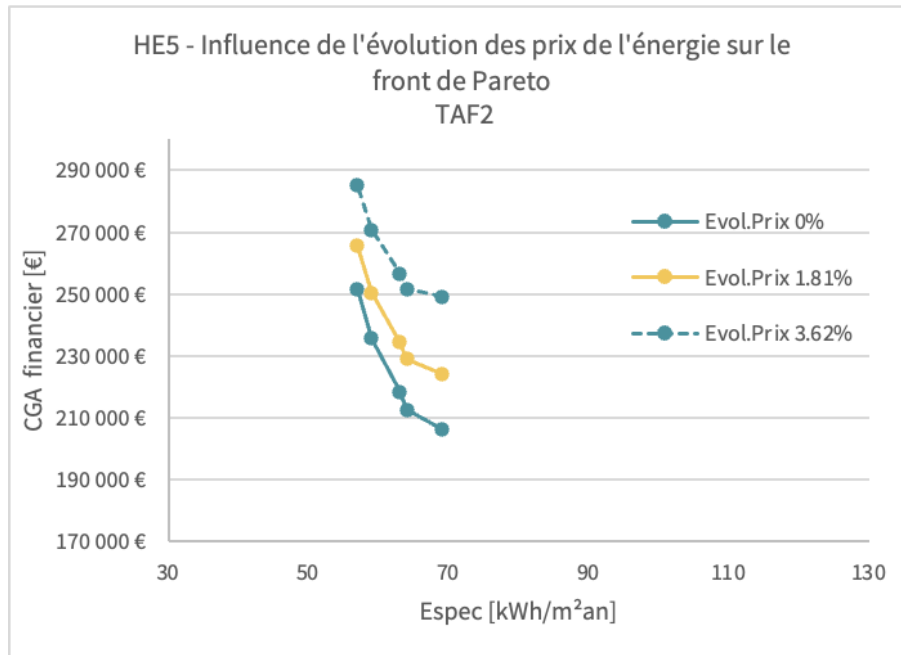


Figure 13 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'actualisation financier de 2% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

Les graphiques ne présentent aucune variation du niveau Espec cost optimum, que l'on fasse varier le taux d'actualisation ou le taux d'évolution des prix de l'énergie. Cet optimum, qui présente un Espec de 69 kWh/m².an, présente les mêmes caractéristiques que le cost optimum macroéconomique pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et un scénario d'évolution des prix de l'énergie de 3.62% présenté ci-dessus. Celui-ci rencontre également l'objectif de la stratégie de rénovation pour les bâtiments résidentiels, présenté dans le corps du rapport au chapitre 5.5.

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 69 kWh/m².an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation financier pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAF 1%	TAF 2%	TAF 3%
CGA (€)	237 045 (+5.72%*)	224 227	213 751 (-4.67%*)
Espec (kWh/m²an)	69		
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,20		
U murs (W/m²K)	0,20		
U planchers (W/m²K)	0,61 (IC)		
Ug vitrage (W/m²K)	1,0		

Etanchéité à l'air (v50 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	2
<b>Systèmes</b>	
Chauffage	Pompe à chaleur air-eau mixte
Eau chaude sanitaire	Pompe à chaleur air-eau mixte
Solaire thermique (m <sup>2</sup> )	6
Ventilation	Pas de système (IC)

\* Par rapport au résultat avec un TAF 2%

La performance énergétique (69 kWh/m<sup>2</sup>an) et les caractéristiques des cost optimum ne varient ni avec les taux d'actualisation financier, ni avec les scénarii d'évolution des prix de l'énergie. Seul le CGA financier évolue tel que renseigné dans le tableau ci-dessus.

#### Comparaison des résultats macroéconomiques et des résultats financiers :

La comparaison des résultats du calcul macroéconomique pour TAM3 et EPE 1.81% et du calcul financier pour TAF2 et EPE 1.81% permet de mettre en évidence ce qui suit.

Il est intéressant de noter qu'une différence existe entre les résultats macroéconomiques et financiers de l'étude de ce bâtiment.

En effet, le cost optimum du calcul financier (69 kWh/m<sup>2</sup>an) présente un niveau de performance supérieur au cost optimum du calcul macroéconomique (114 kWh/m<sup>2</sup>an). La différence se situe au niveau des systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Dans le calcul macroéconomique, il s'agit d'une chaudière à la biomasse. Dans le calcul financier, c'est une pompe à chaleur air-eau. Une des explications possibles tient dans l'utilisation d'un vecteur énergétique différent, dont la valorisation diffère dans le calcul macroéconomique par la prise en compte d'un coût lié aux émissions de CO<sub>2</sub>.

Pour le reste, ils sont identiques à la description du chapitre 5.5.

Il est important de mettre en évidence que le cost optimum du calcul financier est en ligne avec les objectifs de la stratégie de rénovation.

### 19.3.2. Immeuble à appartements existant IAE1

#### Analyse des résultats macroéconomiques :

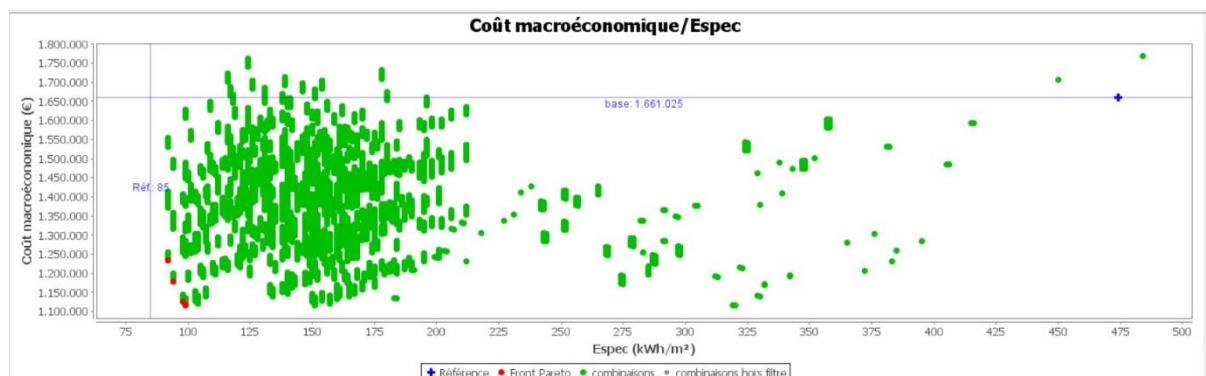


Figure 14 : Front de Pareto du bâtiment IAE1, tel que présenté dans le corps du rapport, pour un taux d'actualisation de 3% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

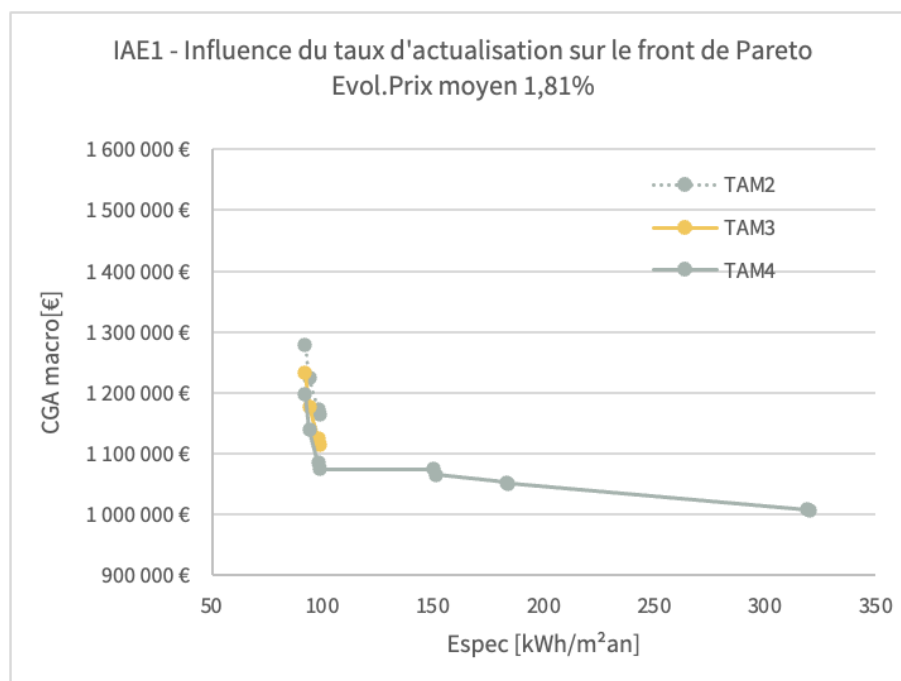


Figure 15 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (2%, 3% et 4%)

On peut observer que plus le taux d'actualisation est élevé, plus il y a de points sur le front de Pareto, entraînant un niveau Espec cost optimum bien moins performant.

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 320 kWh/m²an et 99 kWh/m²an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation macroéconomique pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAM 2%	TAM 3%	TAM 4%
CGA (€)	1 164 683 (+4.41%*)	1 115 471	1 006 391 (-9.78%*)
Espec (kWh/m²an)	99		320 (+223%*)
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,20		0,24
U murs (W/m²K)	0,20		2,12 (IC)
U planchers (W/m²K)	0,24		0,81 (IC)
Ug vitrage (W/m²K)	1,0		2,9 (IC)
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	2		15 (IC)
Systèmes			
Chauffage	Pompe à chaleur air-eau mixte		Chaudière mixte biomasse
Eau chaude sanitaire	Pompe à chaleur air-eau mixte		Chaudière mixte biomasse
Solaire thermique (m²)	20		
Ventilation	Pas de système (IC)		

\* Par rapport au résultat avec un TAM 3%

Pour un taux d'actualisation macroéconomique plus élevé (4%) on constate une dégradation de la performance énergétique (+223%) et une diminution du CGA (-9.78%) du cost optimum, par rapport à un taux moyen de 3%, dues à une installation de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire moins performante et à la seule isolation du toit (Utoitures 0.24 W/m²an) par rapport à la situation de base, alors que pour les deux autres taux, l'ensemble de l'enveloppe est améliorée, l'étanchéité à l'air également et l'installation de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire est plus performante.

Pour rappel, le cas de base présentait un Espec 474 kWh/m²an.

Les trois cost optimum sont équipés de 20m² de panneaux solaires thermiques pour l'eau chaude sanitaire.

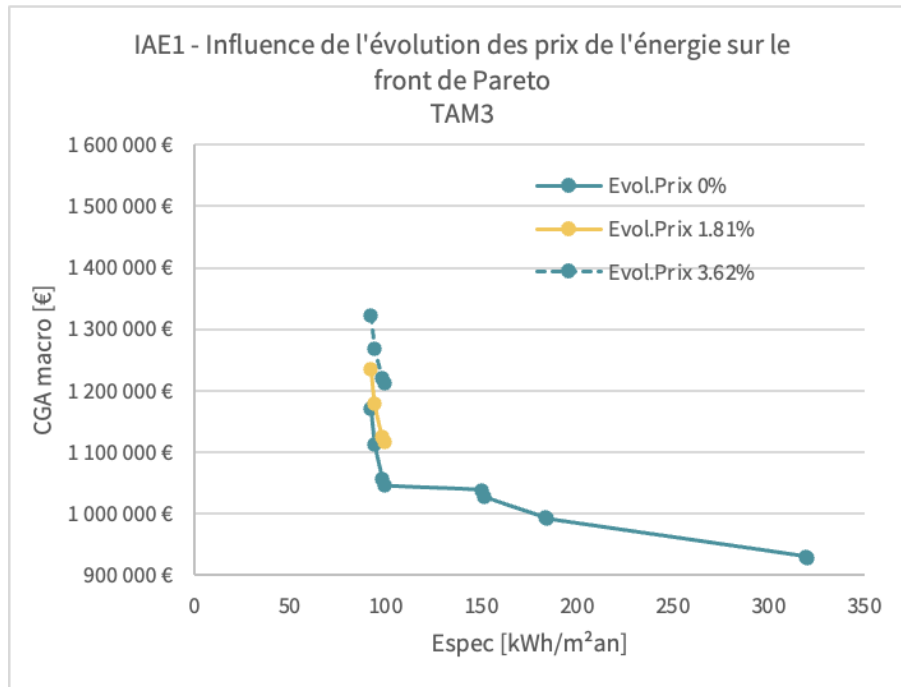


Figure 16 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

Nous avons ici des tendances inverses par rapport à celles de l'évolution des taux d'actualisation. Plus le scénario d'évolution des prix de l'énergie est faible, plus il y a de points sur le front de Pareto, mais avec de moins bonnes performances. Sans évolution des prix de l'énergie, les cost optimums sont bien moins ambitieux d'un point de vue énergétique, résultant en un CGA bien moindre.

Entre un taux d'évolution des prix de l'énergie de 0% et un taux de 3.62%, la performance énergétique du cost optimum augmente de 223 % et le CGA macroéconomique de 30.7%

Ces pourcentages importants d'augmentation se justifient par l'écart conséquent entre les cost optimums (320 kWh/m²an et 99 kWh/m²an). La part relative de la consommation d'énergie dans le CGA est beaucoup plus importante pour un Espec 320 kWh/m²an qu'un Espec 99 kWh/m²an, a fortiori pour une durée d'évaluation de 30 ans. Il n'est donc pas étonnant de présenter une différence de plus de 30% entre les CGA pour les taux d'évolution 0% et 3.62% des prix de l'énergie.

### Analyse des résultats financiers :

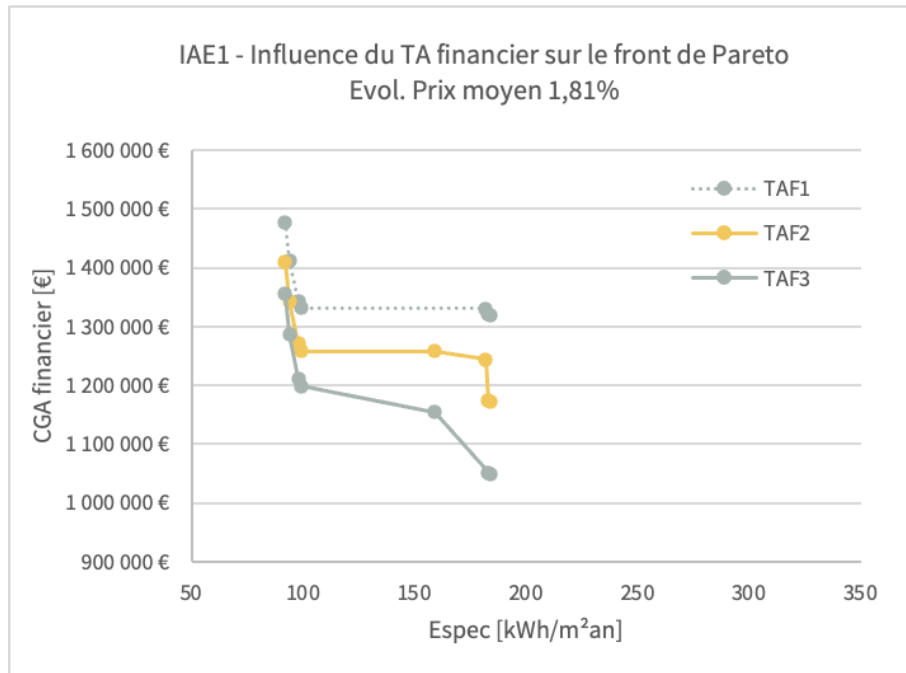


Figure 17 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81% et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (1%, 2% et 3%)

Le taux d'actualisation financier n'influence pas la performance énergétique du cost optimum qui est de Espece 184 kWh/m²an dans les 3 cas. Seuls les CGA financiers évoluent de +12.69% pour le TAF1 et -10.41% pour le TAF3 par rapport au taux d'actualisation financier moyen TAF2%.

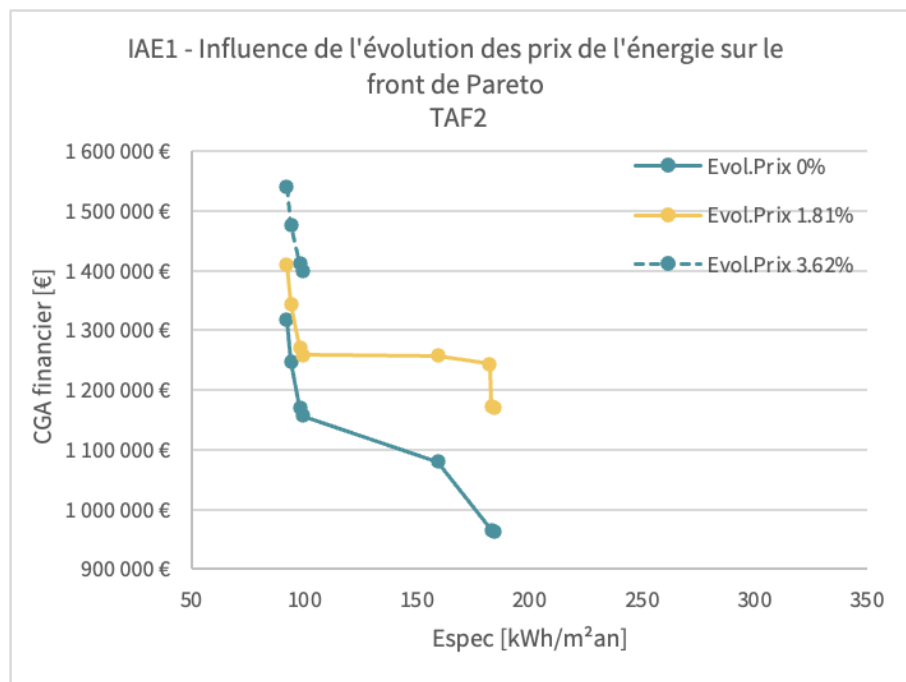


Figure 18 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'actualisation financier de 2% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).



2 des 3 fronts de Pareto présentés dans le graphique ci-dessus mettent en lumière un cost optimum Espec de 184 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Pour une évolution des prix de l'énergie plus élevée (3.62%), le cost optimum est plus performant et identique à ceux identifiés dans l'analyse macroéconomique ci-dessus (Espec 99 kWh/m<sup>2</sup>.an).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 184 kWh/m<sup>2</sup>.an et 99 kWh/m<sup>2</sup>.an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de l'évolution des prix de l'énergie pour un taux d'actualisation financier de 2%			
TAF 2%			
	EPE 0%	EPE 1.81%	EPE 3.62%
CGA (€)	963 159 (-17.75%*)	1 171 084	1 399 721 (+19.52%*)
Espec (kWh/m².an)	184		99 (-46.20%*)
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,24		0,20
U murs (W/m²K)	2,12 (IC)		0,20
U planchers (W/m²K)	0,81 (IC)		0,24
Ug vitrage (W/m²K)	2,9 (IC)		1,0
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	15 (IC)		2
Systèmes			
Chauffage	Pompe à chaleur air-eau mixte		
Eau chaude sanitaire	Pompe à chaleur air-eau mixte		
Solaire thermique (m²)	20		
Ventilation	Pas de système (IC)		

\* Par rapport au résultat avec un EPE moyen de 1.81%

Pour un scénario d'évolution des prix de l'énergie élevé (3.62%), on constate une amélioration de la performance énergétique (-46.20%) et une augmentation du CGA (+19.52%) du cost optimum, par rapport au scénario moyen (1.81%), dues à une amélioration globale de la performance de l'enveloppe (isolation et étanchéité à l'air), de la même manière que pour une diminution du taux d'actualisation macroéconomique.

#### **Comparaison des résultats macroéconomiques et des résultats financiers :**

La comparaison des résultats du calcul macroéconomique pour TAM3 et EPE 1.81% et du calcul financier pour TAF2 et EPE 1.81% permet de mettre en évidence ce qui suit.

Le cost optimum financier (Espec 184 kWh/m<sup>2</sup>.an) présente une moins bonne performance d'enveloppe (seul le toit est isolé - dans le calcul macroéconomique, toutes les parois sont isolées, la toiture et les murs présentent une valeur  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Les systèmes (chauffage – eau chaude sanitaire) sont identiques entre les 2 calculs.

Il pourrait être conclu qu'ici également, l'influence de l'impact CO<sub>2</sub> dans le calcul macro-économique se marque dans les résultats - non pas par un changement de systèmes, mais par un renforcement des niveaux d'isolation thermique.

### 19.3.3. Immeuble à appartements neuf IAN1

#### Analyse des résultats macroéconomiques :

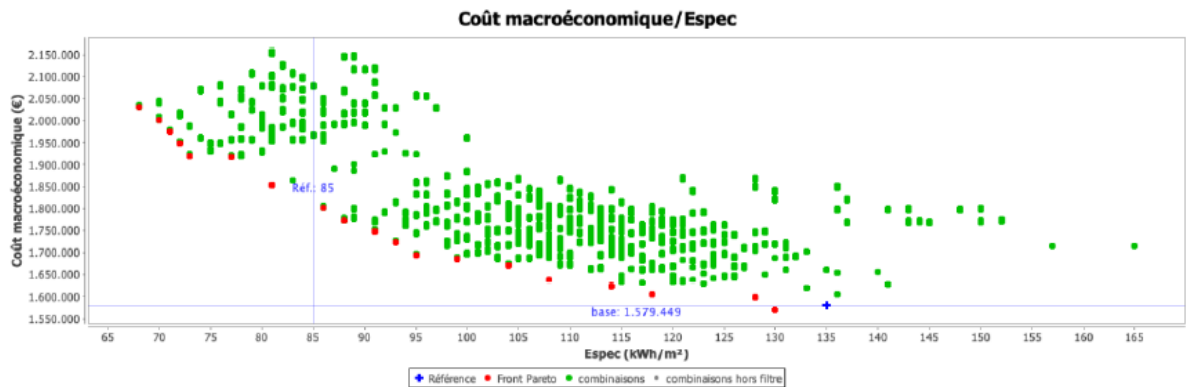


Figure 19 : Front de Pareto du bâtiment IAN1, tel que présenté dans le corps du rapport pour un calcul macro-économique, avec un taux d'actualisation de 3% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

A noter que le cost-optimum présentant un Espece = 130 kWh/m<sup>2</sup>an a été écarté car non viable. En effet, la chaudière produisant le chauffage et l'eau chaude sanitaire était alimentée au mazout dans cette variante.

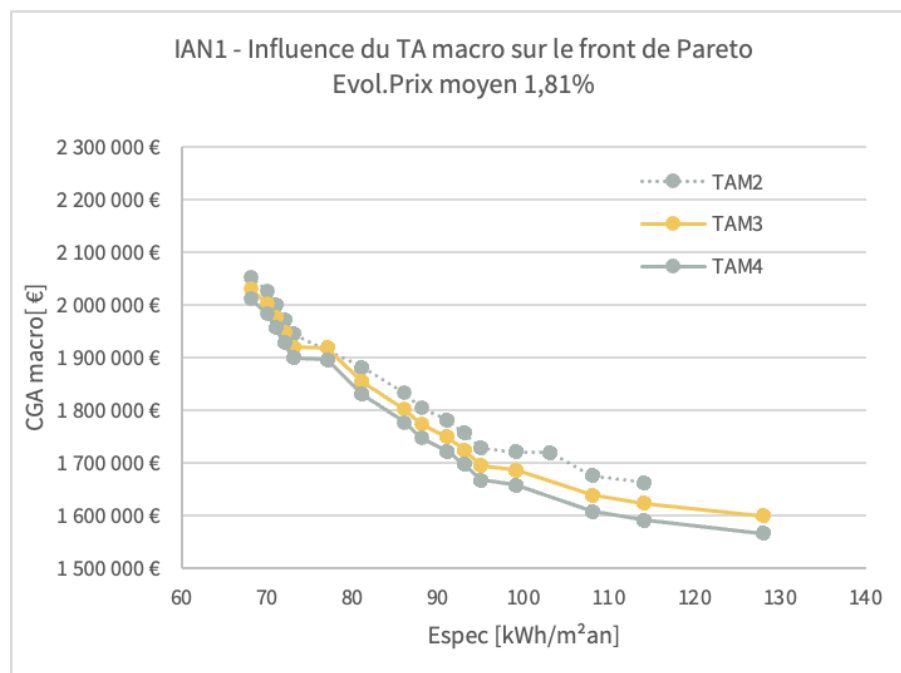


Figure 20 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (2%, 3% et 4%).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espece 114 kWh/m<sup>2</sup>an et 69 kWh/m<sup>2</sup>an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation macroéconomiques pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAM 2%	TAM 3%	TAM 4%
CGA (€)	1 661 719 (+9.95%*)	1 598 572	1 565 854 (-2.05%*)
Espec (kWh/m²an)	114 (-10.94%*)	128	
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,21		
U murs (W/m²K)	0,22		
U planchers (W/m²K)	0,24		
Ug vitrage (W/m²K)	1,1		
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	6		
Systèmes			
Chauffage	Chaudière mixte biomasse		
Eau chaude sanitaire	Chaudière mixte biomasse		
Solaire thermique (m²)	18		
Ventilation	Système D (alimentations et extractions mécaniques) échangeur	Système C+ (Amenées d'air naturelles, extractions mécaniques)	

\* Par rapport au résultat avec un TAM 3%

Pour un taux d'actualisation macroéconomique faible (2%), on constate une amélioration de la performance énergétique (-10.94%) et une augmentation du CGA (+9.95%) du cost optimum, par rapport au taux moyen de 3%, dues à un système de ventilation plus performant.

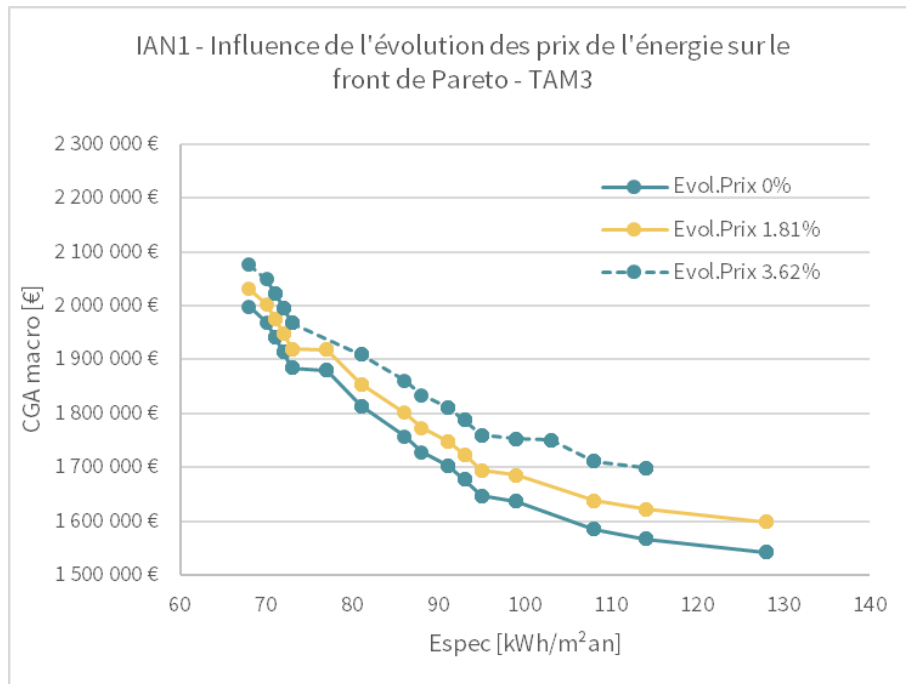


Figure 21 : Comparaison des Fronts de Pareto de l'IAN1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

Pour un scénario d'évolution des prix de l'énergie élevé (3.62%), on constate une amélioration de la performance énergétique (-11%) et une augmentation du CGA (+6.29%) du cost optimum, par rapport à un évolution moyenne (1.81%), dues à un système de ventilation plus performant, de la même manière que pour une diminution du taux d'actualisation macroéconomique.

### Analyse des résultats financiers :

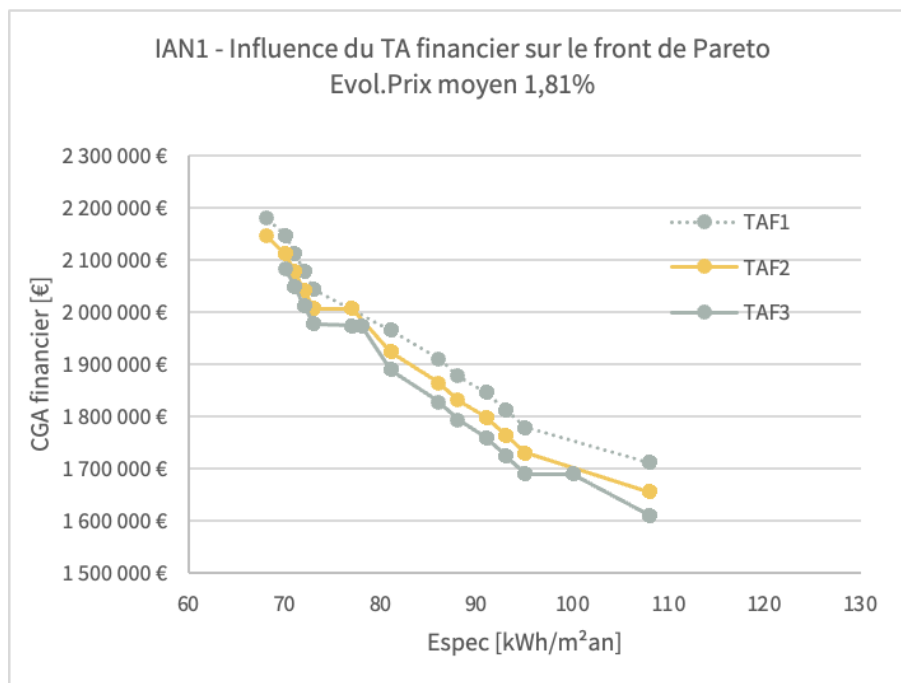


Figure 22 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (2%, 3% et 4%).

Le taux d'actualisation financier n'influence pas la performance énergétique du cost optimum qui est de Espec 108 kWh/m²an dans les 3 cas. Seuls les CGA macroéconomiques évoluent de +3.35% pour le TAF1 et -2.74% pour le TAF3 par rapport au taux d'actualisation financier moyen TAF2.

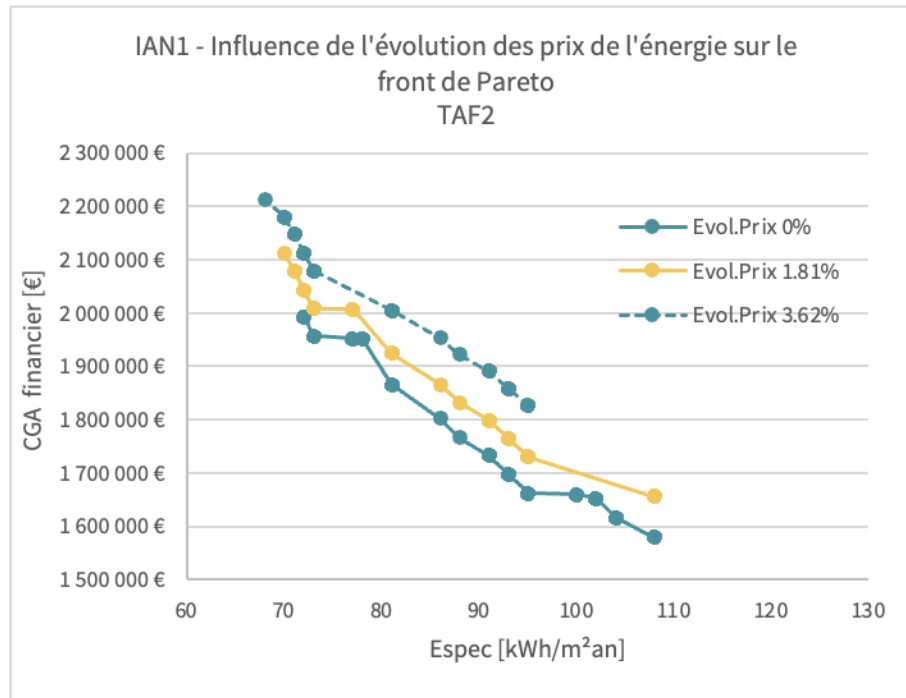


Figure 23 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAN1, pour un taux d'actualisation financier de 2% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

5 des 6 fronts de Pareto illustrés ci-dessus présentent un Espec cost-optimum de 108 kWh/m².an.

Seul le cas TAF2 – EPE 3.62% est différent, et présente un cost optimum à 95 kWh/m².an.

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 108 kWh/m².an et 95 kWh/m².an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de l'évolution des prix de l'énergie pour un taux d'actualisation financier de 2%			
TAF 2%			
	EPE 0%	EPE 1.81%	EPE 3.62%
CGA (€)	1 578 767 (-4.67%*)	1 656 106	1 825 756 (+5.59%*)
Espec (kWh/m²an)	108		95 (-12.04%*)
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,21		0,20
U murs (W/m²K)	0,22		0,20
U planchers (W/m²K)	0,24		0,20
Ug vitrage (W/m²K)	1,1		1,0
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	6		2

<b>Systèmes</b>		
Chauffage	Chaudière gaz condensation mixte	
Eau chaude sanitaire	Chaudière gaz condensation mixte	
Solaire thermique (m <sup>2</sup> )	18	
Ventilation	Système D (alimentations et extractions mécaniques) avec échangeur	Système de ventilation C (alimentations naturelles, évacuations mécaniques)

\* Par rapport au résultat avec un EPE moyen de 1.81%

Pour un scénario d'évolution des prix de l'énergie élevé (3.62%), on constate une amélioration de la performance énergétique (-12.04%) et une augmentation du CGA (+5.59%) du cost optimum, par rapport à un évolution moyenne (1.81%). La combinaison de mesures qui justifie cette différence de performance est détaillée dans le tableau ci-dessus. Elle correspond à une amélioration de l'enveloppe (isolation et étanchéité à l'air), malgré un système de ventilation moins performant.

#### **Comparaison des résultats macroéconomiques et des résultats financiers :**

La comparaison des résultats du calcul macroéconomique pour TAM3 et EPE 1.81% et du calcul financier pour TAF2 et EPE 1.81% permet de mettre en évidence ce qui suit.

Le calcul financier préconise également une isolation thermique, et en complément une amélioration du système de ventilation (système mécanique contrôlé double flux, contre un système simple flux dans le calcul macroéconomique). Le calcul macroéconomique préconise quant à lui un autre vecteur énergétique (la biomasse, au lieu du gaz dans le calcul financier). Le solaire thermique est présent dans les 2 cas.



## 19.3.4. Ecole existante EE1

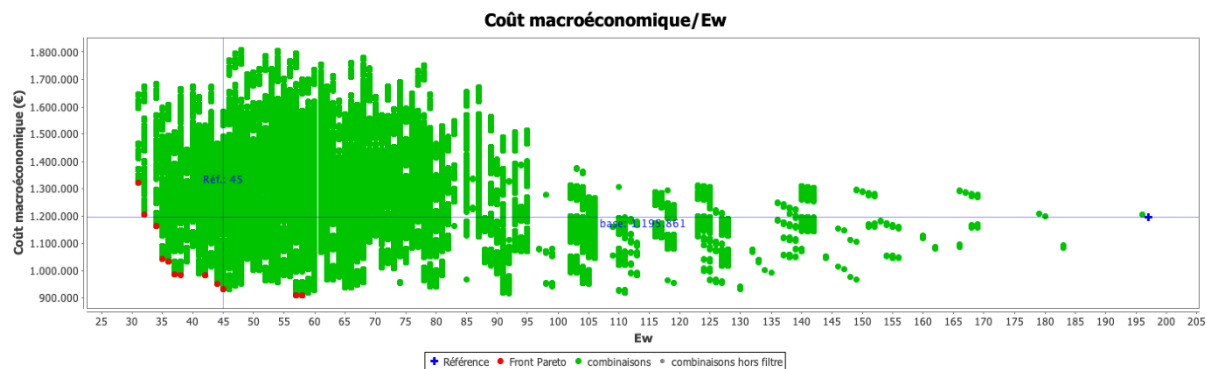
Analyse des résultats macroéconomiques :

Figure 24 : Front de Pareto du bâtiment EE1, tel que présenté dans le corps du rapport pour un taux d'actualisation macroéconomique de 4% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

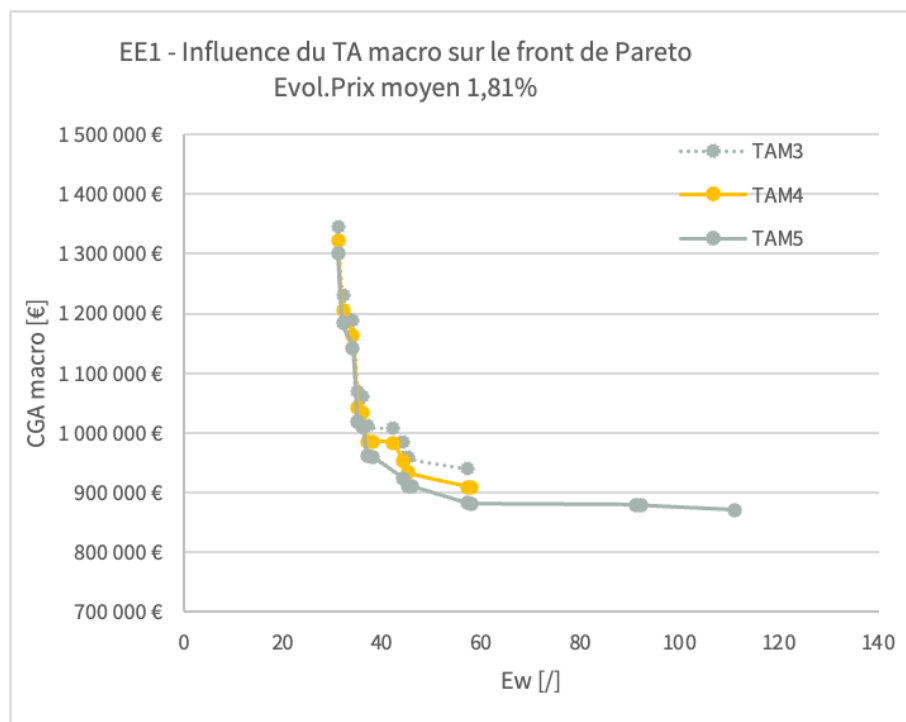


Figure 25 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (3%, 4% et 5%).

De manière similaire aux bâtiments résidentiels présentés ci-avant, le taux d'actualisation influence le niveau cost-optimum. Un taux élevé (5%) fait apparaître de nouveaux points sur le front de Pareto, entraînant une diminution du niveau Ew cost-optimum et une diminution du CGA macroéconomique.

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 111, 58 et 57 kWh/m<sup>2</sup>an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation macroéconomiques pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAM 3%	TAM 4%	TAM 5%
CGA (€)	939 875 (3.42%*)	908 752	870 779 (-4.18%*)
Ew	57 (-1.72%*)	58	111 (+91.38%*)
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,20		0,24
U murs (W/m²K)	0,20	0,24	1,39 (IC)
U planchers (W/m²K)	0,54 (IC)		
Ug vitrage (W/m²K)	1,0	1,1	3,42 (IC)
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	2		15 (IC)
Systèmes			
Chauffage	Chaudière gaz condensation		
Eau chaude sanitaire	Chaudière gaz condensation		
Solaire thermique (m²)	- (IC)		
Ventilation	Amenées et extractions mécaniques sans récupération de chaleur (IC)		
Refroidissement	Climatisation pompe à chaleur air-air		Climatisation : machine à compression de froid (IC)
Eclairage	LED		

\* Par rapport au résultat avec un TAM 4%

Pour un taux d'actualisation macroéconomique faible (3%) on constate une légère amélioration de la performance énergétique (-1.72%) et une augmentation du CGA (+3.42%) du cost optimum, par rapport à un taux moyen de 4%, dues à une meilleure isolation des murs et une meilleure performance des châssis.

Notons que dans aucun des trois cas, l'isolation des planchers n'est envisagée.

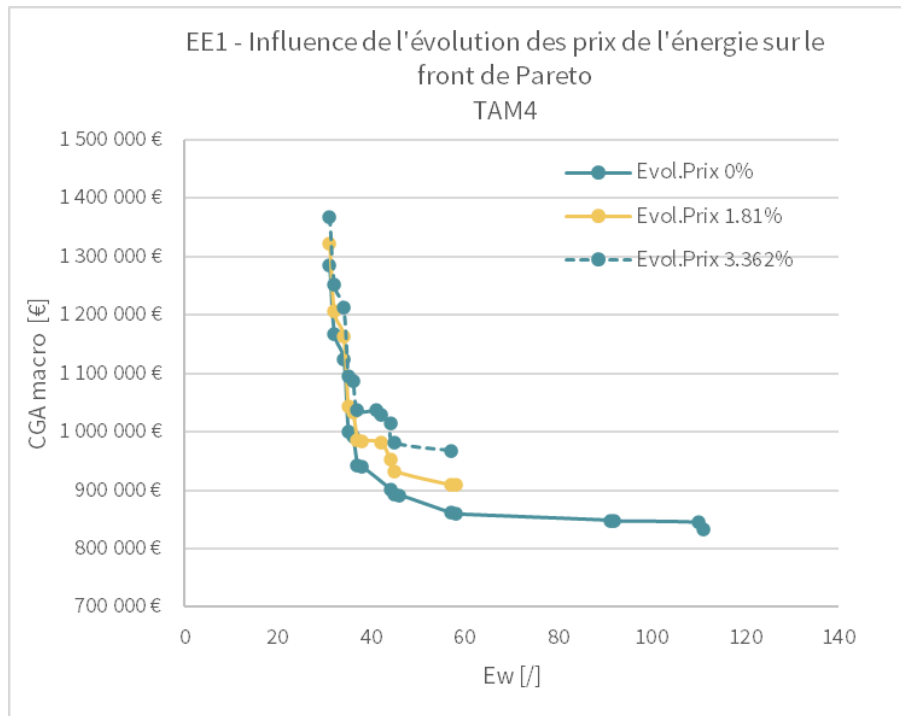


Figure 26 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 4% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

Nous avons ici des tendances inverses par rapport à celles de l'évolution des taux d'actualisation. Sans évolution des prix de l'énergie, le cost optimum est moins ambitieux d'un point de vue énergétique, résultant en un CGA moindre.

Entre un taux d'évolution des prix de l'énergie de 0% et un taux de 3.62%, la performance énergétique du cost optimum augmente de 49 % et le CGA macroéconomique de 16.1%.

Dans le scénario d'évolution des prix de l'énergie de 0%, le cost-optimum présente un Ew 111. Comparativement au cost-optimum avec l'hypothèse de base (« scénario moyen – 1.81% »), il ne présente pas d'isolation des façades, ni de changement de châssis. Sans évolution des prix de l'énergie, les opérations d'isolation thermique deviennent moins rentables.

Les améliorations du cost-optimum « scénario moyen – 1.81% » - Ew 58 (et « scénario élevé – 3.62% » - Ew57) portent sur une isolation de toiture renforcée, l'isolation des murs, le remplacement des fenêtres, l'amélioration de l'étanchéité à l'air, le remplacement du système de refroidissement existant par une pompe à chaleur air-air.

### Analyse des résultats financiers :

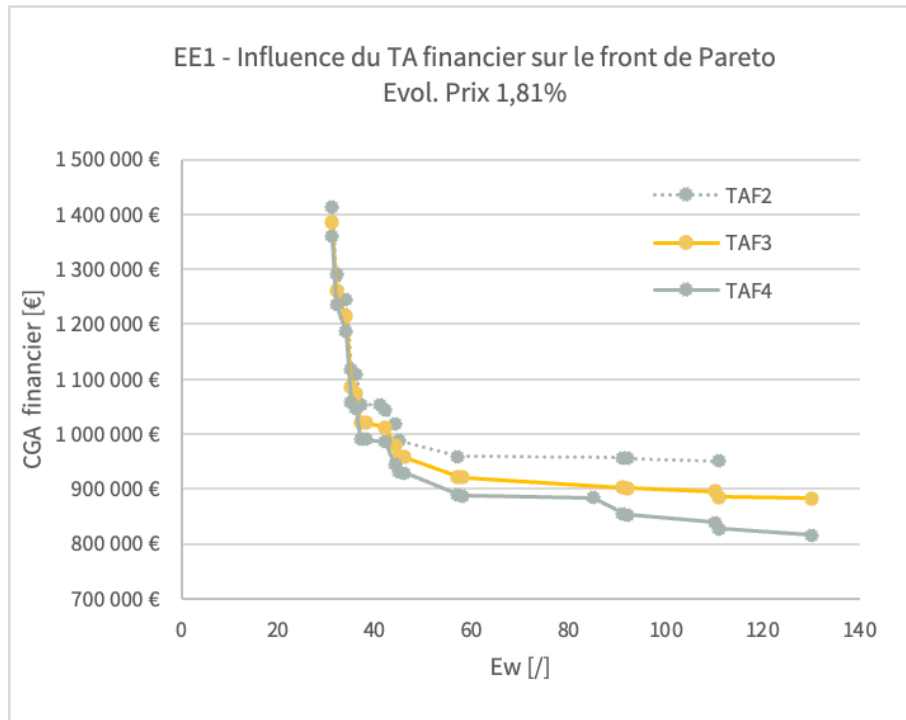


Figure 27 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (2%, 3% et 4%).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 130 et 111 kWh/m²/an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation financier pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAF 2%	TAF 3%	TAF 4%
CGA (€)	950 488 (+7.72%*)	882 367	816 311 (-7.49%*)
Ew	111 (-14.62%*)	130	
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,24	1,54 (IC)	
U murs (W/m²K)	1,39 (IC)		
U planchers (W/m²K)	0,54 (IC)		
Ug vitrage (W/m²K)	3,42 (IC)		
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	15 (IC)		
Systèmes			
Chauffage	Chaudière gaz condensation		

Eau chaude sanitaire	Chaudière gaz condensation
Solaire thermique (m <sup>2</sup> )	- (IC)
Ventilation	Amenées et extractions mécaniques sans récupération de chaleur (IC)
Refroidissement	Climatisation : machine à compression de froid (IC)
Eclairage	LED

\* Par rapport au résultat avec un TAF 3%

Pour un taux d'actualisation financier faible (2%) on constate une amélioration de la performance énergétique (-14.62%) et une augmentation du CGA (+7.72%) du cost optimum, par rapport à un taux moyen de 3%, dues à la seule isolation de la toiture.

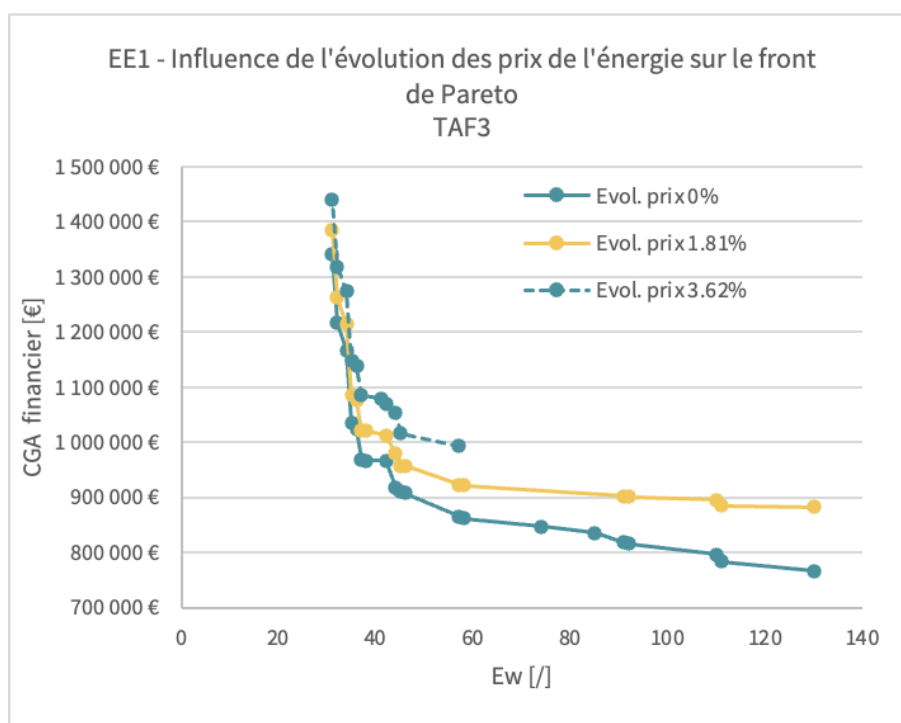


Figure 28: Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'actualisation financier de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 130 kWh/m<sup>2</sup>an et 57 kWh/m<sup>2</sup>an) est présentée dans le tableau ci-dessous :

Comparatif des cost-optimum en fonction de l'évolution des prix de l'énergie pour un taux d'actualisation financier de 3%			
TAF 3%			
	EPE 0%	EPE 1.81%	EPE 3.62%
CGA (€)	765 761 (-13.22%*)	882 367	993 011 (+12.54%*)
Ew	130		57 (-56.15%*)
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	1,54 (IC)		0,20
U murs (W/m²K)	1,39 (IC)		0,20
U planchers (W/m²K)	0,54 (IC)		
Ug vitrage (W/m²K)	3,42 (IC)		1,0
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	15		2
Systèmes			
Chauffage	Chaudière gaz condensation mixte		
Eau chaude sanitaire	Chaudière gaz condensation mixte		
Solaire thermique (m²)	- (IC)		
Ventilation	Amenées et extractions mécaniques sans récupération de chaleur (IC)		
Refroidissement	Climatisation : machine à compression de froid (IC)		Climatisation pompe à chaleur air-air
Eclairage	LED		

\* Par rapport au résultat avec un EPE moyen de 1.81%

Pour un scénario d'évolution des prix de l'énergie élevé (3.62%), on constate une amélioration de la performance énergétique (-56.15%) et une augmentation du CGA (+12.54%) du cost optimum par rapport à une évolution moyenne (1.81%). La combinaison de mesures qui justifie cette différence de performance est détaillée dans le tableau ci-dessus. Elle correspond à une amélioration de l'enveloppe (isolation et étanchéité à l'air) et un système de refroidissement plus performant.

#### Comparaison des résultats macroéconomiques et des résultats financiers :

La comparaison des résultats du calcul macroéconomique pour TAM4 et EPE 1.81% et du calcul financier pour TAF3 et EPE 1.81% permet de mettre en évidence ce qui suit.

Le cost optimum financier (Ew 130) présente une moins bonne performance d'enveloppe que le cost optimum macroéconomique (Ew 58). Les systèmes (chauffage – eau chaude sanitaire – ventilation et éclairage) sont identiques entre les 2 calculs.

Il pourrait être conclu qu'ici également, l'influence de l'impact CO2 dans le calcul macroéconomique se marque dans les résultats - non pas par un changement de systèmes, mais par un renforcement des niveaux d'isolation thermique.

Comparatif des cost-optimums macroéconomique et financier		
	Calcul macroéconomique	Calcul financier
	TAM4% - EPE 1.81%	TAF3% - EPE 1.81%
<b>CGA (€)</b>	<b>908 752</b>	<b>882 367 (-2.9%*)</b>
<b>Ew</b>	<b>58</b>	<b>130 (+124%*)</b>
<b>Enveloppe</b>		
U toitures (W/m <sup>2</sup> K)	0.24	1,54 (IC)
U murs (W/m <sup>2</sup> K)	0.24	1,39 (IC)
U planchers (W/m <sup>2</sup> K)	0.54 (IC)	0,54 (IC)
Ug vitrage (W/m <sup>2</sup> K)	1.1	3,42 (IC)
Etanchéité à l'air (v50 m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> )	2	15 (IC)
<b>Systèmes</b>		
Chauffage	Chaudière gaz condensation	
Eau chaude sanitaire	Chaudière gaz condensation	
Solaire thermique (m <sup>2</sup> )	- (IC)	
Ventilation	Amenées et extractions mécaniques sans récupération de chaleur (IC)	
Refroidissement	Climatisation pompe à chaleur air-air	Climatisation : machine à compression de froid (IC)
Eclairage	LED	

\* Par rapport au résultat avec un TAM 4% et EPE 1.81%

### 19.3.5. Maison de repos neuve MRN1

#### Analyse des résultats macroéconomiques :

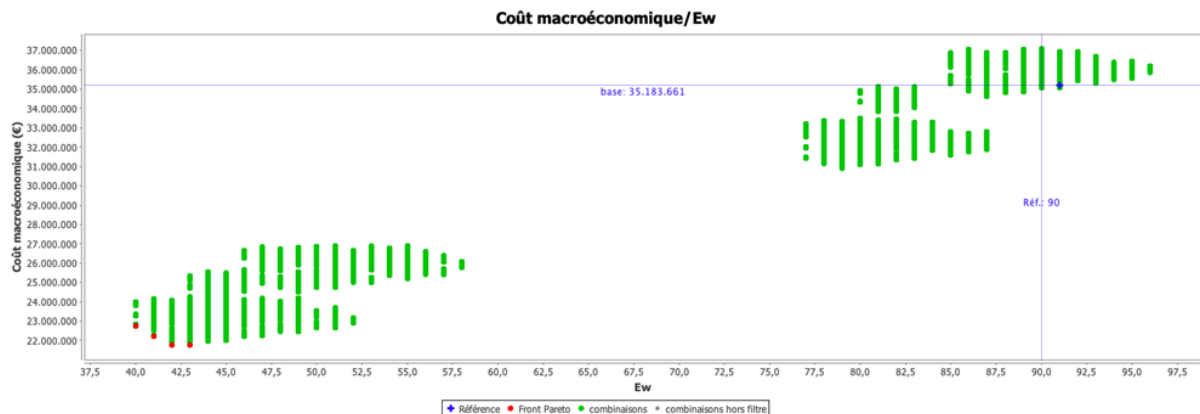


Figure 29 : Front de Pareto du bâtiment MRN1, tel que présenté dans le corps du rapport pour un taux d'actualisation de 4% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

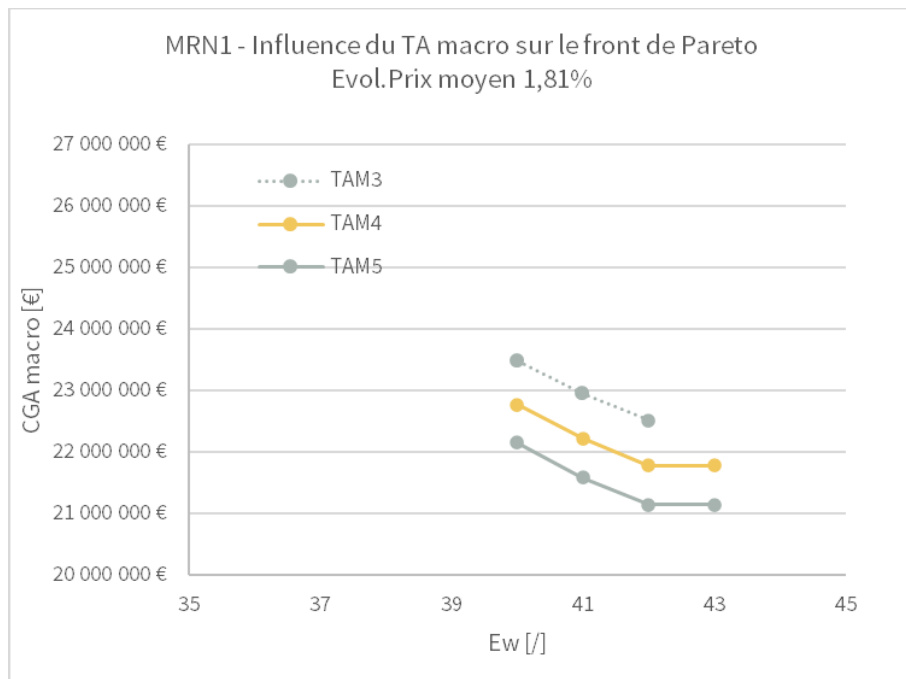


Figure 30 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation (3%, 4% et 5%).

La comparaison des résultats pour les 3 taux (cost optimum Espec 43 kWh/m<sup>2</sup>an et 42kWh/m<sup>2</sup>an) est présentée dans le tableau ci-dessous :



Comparatif cost-optimum en fonction de la variation du taux d'actualisation macroéconomiques pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1.81%			
	TAM 3%	TAM 4%	TAM 5%
CGA (€)	22 510 445 (+3.37%*)	21 776 239	21 131 358 (-2.96%*)
Ew	42 (-2.33%*)	43	
Enveloppe			
U toitures (W/m²K)	0,20		
U murs (W/m²K)	0,20		
U planchers (W/m²K)	0,20	0,24	
Ug vitrage (W/m²K)	1,0		
Etanchéité à l'air (v50 m³/hm²)	2		
Systèmes			
Chauffage	Chaudière gaz condensation		
Eau chaude sanitaire	Chaudière gaz condensation		
Solaire thermique (m²)	- (IC)		
Ventilation	Système D (alimentations et extractions mécaniques) avec échangeur (IC)		
Refroidissement	Climatisation pompe à chaleur air-air		
Eclairage	LED		

\* Par rapport au résultat avec un TAM 4%

Pour un taux d'actualisation macroéconomique faible (3%) on constate une amélioration de la performance énergétique (-2.33%) et une augmentation du CGA (+3.37%) du cost optimum, par rapport au taux moyen de 4%, dues au niveau d'isolation des planchers.

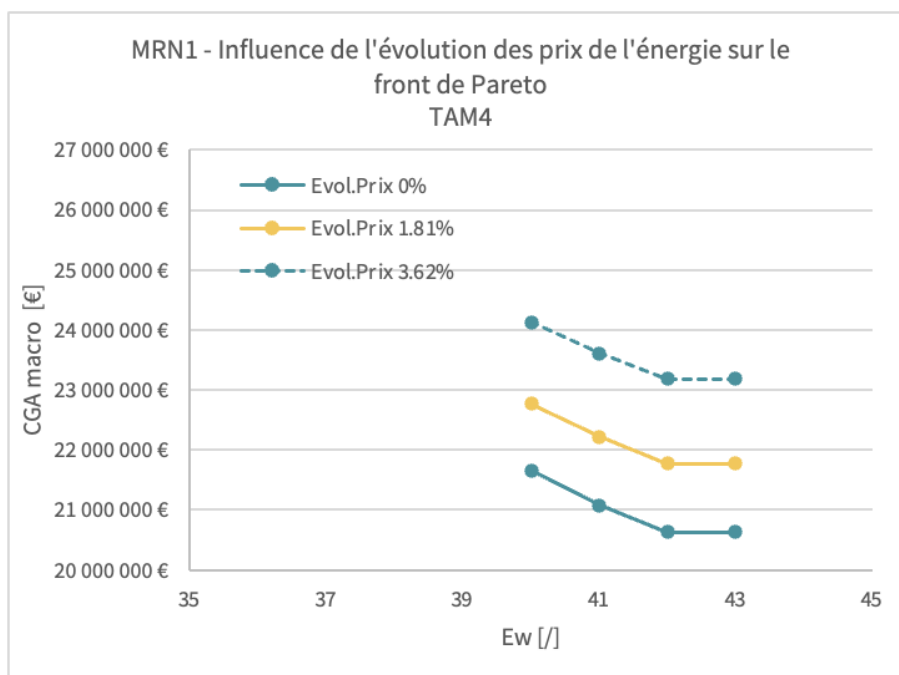


Figure 31 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 4% et 3 valeurs du « taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%) ».

L'évolution des prix de l'énergie n'influence pas la performance du cost optimum qui reste de 43 pour le Ew. Le CGA est par contre modifié de +6.48%% pour une évolution des prix de l'énergie de 3.62% et de -5.28% pour un scénario sans évolution (0%) par rapport au scénario moyen (+1.81%).

#### Analyse des résultats financiers :

L'analyse des résultats financiers met en lumière une seule performance de cost-optimum, déjà décrite ci-dessus, correspondant au Ew 43.

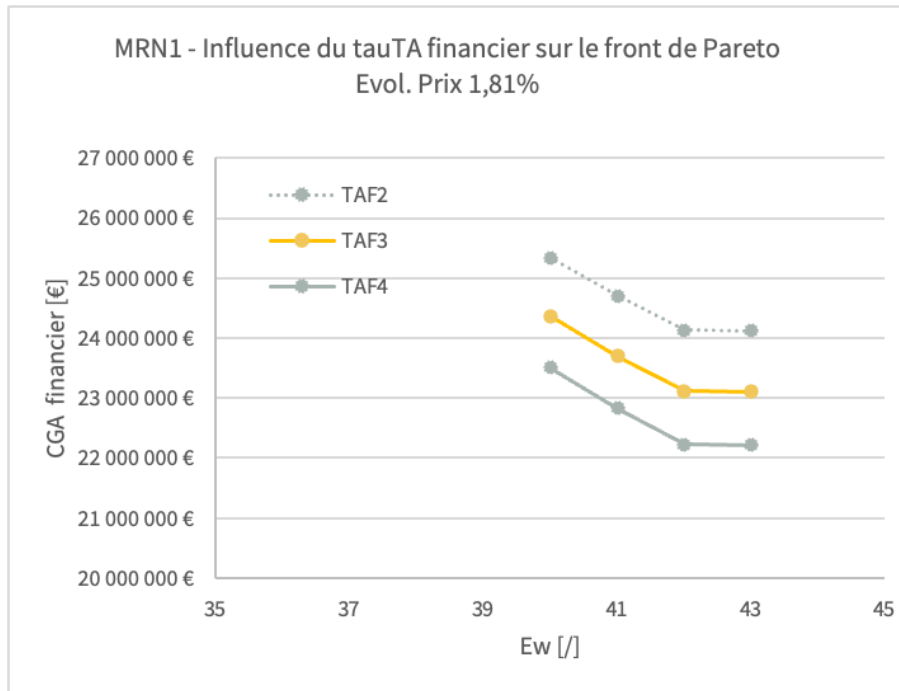


Figure 32 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (2%, 3% et 4%).

Le taux d'actualisation financier n'influence pas la performance du cost optimum qui reste de 43 pour le Ew. Le CGA est par contre modifié de +4.4% pour un TAF de 2% et de -3.85% pour un TAF de 4% par rapport à au TAF moyen de 3%.

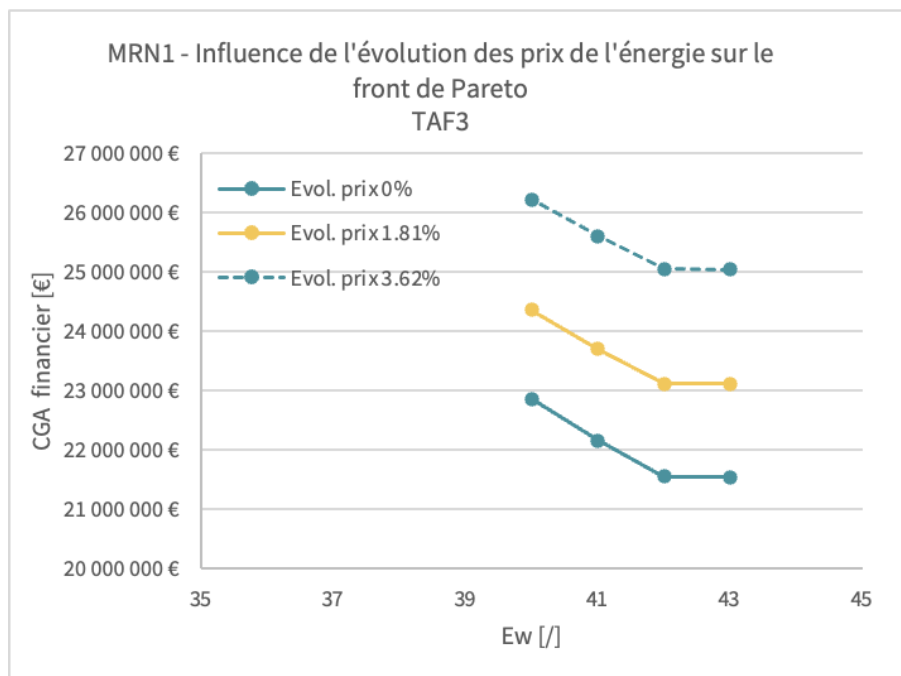


Figure 33 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'actualisation financier de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

Le scénario d'évolution des prix de l'énergie n'influence pas la performance du cost optimum qui reste de 43 pour le Ew. Le CGA est par contre modifié de -6.79% pour un scénario d'évolution des prix de l'énergie de 0% et de +8.37% pour un scénario d'évolution des prix de +3.62% par rapport au scénario moyen (+1.81%).

#### **Comparaison des résultats macroéconomiques et des résultats financiers :**

La comparaison des résultats du calcul macroéconomique pour TAM4 et EPE 1.81% et du calcul financier pour TAF3 et EPE 1.81% permet de mettre en évidence ce qui suit.

L'analyse des résultats financiers met en lumière 1 seul cost-optimum, identique à celui décrit dans l'analyse macroéconomique : celui présentant un Ew de 43.

Le CGA financier moyen du cost optimum est 6.11% plus élevé que le CGA macroéconomique moyen du cost optimum de même performance.

## 19.4. Synthèse

L'ensemble des résultats sous forme de tableaux et de graphes se trouvent en annexe F.

Pour les cas dans lesquels on observe un changement de performance du cost-optimum, c'est toujours dans le sens : amélioration de la performance (Espec ou Ew) et augmentation du CGA correspondant avec la diminution du TA ou avec l'augmentation des prix de l'énergie.

Dans les comparaisons entre calculs macroéconomiques et financiers, la prise en compte des émissions de CO<sub>2</sub> (et de ses coûts) influe sur le résultat. Parfois, les optimums préconisent le changement de vecteur (pour de l'électricité ou de la biomasse), au dépend de l'isolation thermique du bâtiment ; parfois, ils préconisent la diminution des besoins du bâtiment (par une isolation thermique renforcée, un système de ventilation performant), mais pas de changement de vecteur énergétique.

**Pour les bâtiments résidentiels**, dans 2 cas (HE5 et IAN1) sur 4 la performance énergétique du cost-optimum est améliorée de 25% en moyenne, avec la diminution du taux d'actualisation macroéconomique de 3 à 2%. Dans un seul cas (IAE1) la performance énergétique du cost-optimum est dégradée avec l'augmentation du taux d'actualisation macroéconomique de 3 à 4%.

Toujours pour les bâtiments résidentiels, dans 1 seul cas (IAE1) la performance énergétique du cost optimum est dégradée (+223% sur Espec) avec la diminution du scénario des prix de l'énergie (de 1.81 à 0%). Dans 2 cas (HE5 et IAN1) la performance énergétique du cost optimum est améliorée de 25% en moyenne, avec l'augmentation du scénario des prix de l'énergie (de 1.81 à 3.62%).

**Pour les bâtiments non résidentiels**, dans 2 cas (EE1 et MRN1) sur 8 la performance énergétique du cost-optimum est légèrement améliorée, de 2% en moyenne, avec la diminution du taux d'actualisation macroéconomique de 4 à 3%. Dans un seul cas (EE1) la performance énergétique du cost-optimum est dégradée avec l'augmentation du taux d'actualisation macroéconomique de 4 à 5%.

Toujours pour les bâtiments non résidentiels, dans 1 seul cas (EE1) la performance énergétique du cost optimum est dégradée (+91% sur Espec) avec la diminution du scénario des prix de l'énergie (de 1.81 à 0%). Dans ce même cas (EE1) la performance énergétique du cost optimum est légèrement améliorée de 2%, avec l'augmentation du scénario des prix de l'énergie (de 1.81 à 3.62%).

**Pour les bâtiments résidentiels**, le calcul financier révèle dans 2 cas (HE5 et IAN1) sur 4 un cost optimum plus performant de 25% que le calcul macroéconomique et dans un seul cas (IAE1), un cost optimum moins performant de 86%.

**Pour les bâtiments non résidentiels**, le calcul financier ne révèle qu'une fois (EE1) sur 8 un cost optimum moins performant énergétiquement de 124% que le calcul macroéconomique.

En termes d'amélioration ou dégradation des **performances énergétiques** des cost optimum mis en évidence, il est difficile de tirer des conclusions quant à l'impact des paramètres analysés, à savoir : le taux d'actualisation, l'évolution des prix de l'énergie et le calcul financier versus macroéconomique.

En termes de **CGA** des cost optimum mis en évidence, on constate un impact équilibré dans un sens et dans l'autre par rapport aux valeurs moyennes utilisées dans l'étude (TAM3 ou TAM4, EPE 1.81%).

Impact de ... ... à performance énergétique égale, comparé aux valeurs moyennes utilisées dans l'étude	Sur le CGA macro du CO en PER	Sur le CGA macro du CO en PEN
La diminution du TAM de 1%	+3%	+4%
L'augmentation du TAM de 1%	- 3%	-3%
La diminution du taux d'évolution des prix de l'énergie (de 1.81% à 0%)	-5%	-6%
L'augmentation du taux d'évolution des prix de l'énergie (de 1.81% à 3.62%)	+6%	+7%
L'analyse des résultats financiers plutôt que macroéconomique	(performance du CO modifiée dans 3 cas sur 4)	+7%

Figure 34 : Tableau de synthèse de l'impact des paramètres étudiés dans l'étude de sensibilité sur la performance énergétique des cost-optimum.

#### 19.4.1. Le taux d'actualisation

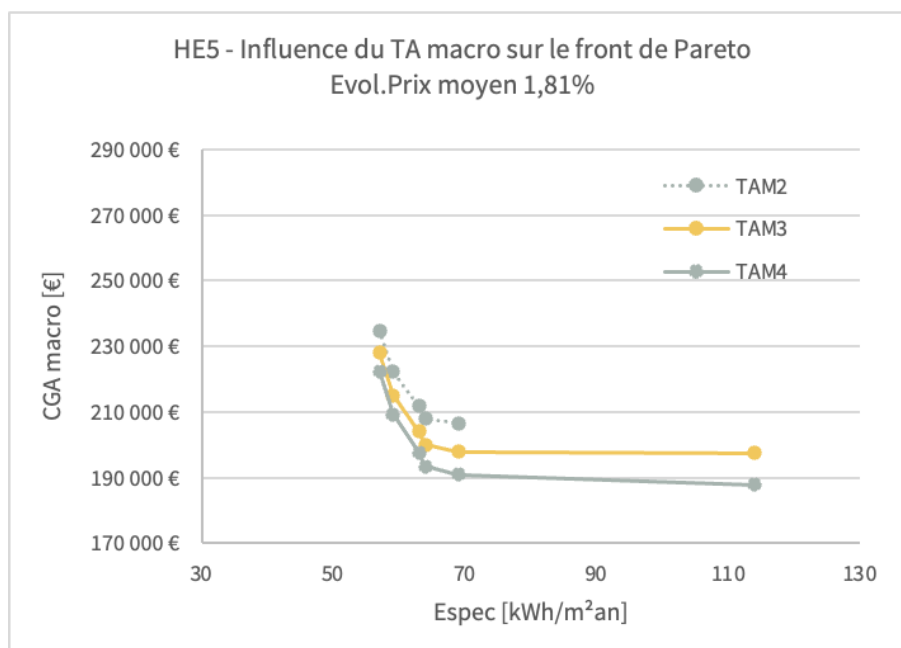
Le taux d'actualisation est un facteur essentiel dans l'évaluation des investissements de rénovation énergétique. Il influence la perception de la valeur future des économies réalisées grâce aux mesures d'efficacité énergétique.

Nous constatons que l'étude de sensibilité met en évidence un changement de cost optimum dans 33% des variantes du taux d'actualisation macroéconomique pour les bâtiments résidentiels, et 17% pour les variantes du taux d'actualisation financier.

Pour les bâtiments non résidentiels, nous constatons que l'étude de sensibilité met en évidence un changement de cost optimum dans 17% des variantes du taux d'actualisation macroéconomique et 8.5% pour les variantes du taux d'actualisation financier.

Un taux d'actualisation élevé favorise les investissements avec des retours rapides, ce qui peut conduire à une plus grande densité de points sur le front de Pareto.

Lorsque le taux augmente, des options jugées non rentables à taux plus faible peuvent devenir rentables, enrichissant le front de Pareto de nouvelles alternatives.



Un taux d'actualisation plus élevé signifie que l'on valorise moins les coûts et économies futurs. Par exemple, si le coût initial d'un système de chauffage performant est élevé, mais qu'il permet des économies d'énergie futures, un taux d'actualisation plus élevé rend ce coût initial plus attractif parce que les économies futures pèsent moins dans le calcul. Cela pourrait donc rendre cette option plus attrayante sur le front de Pareto, car ses bénéfices à court terme sont relativement plus valorisés.

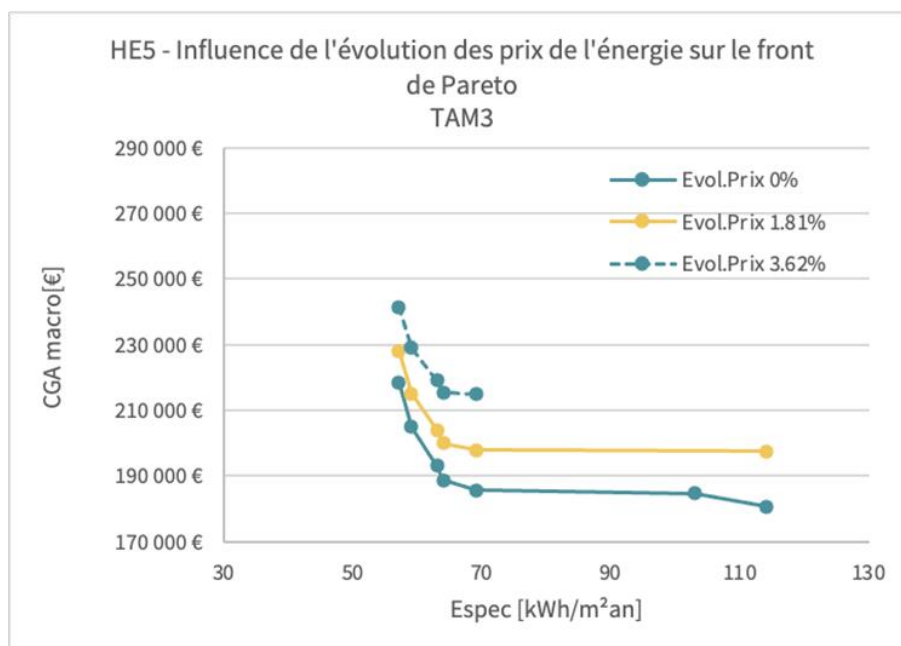
Inversement, un taux d'actualisation plus faible augmente la valeur des économies futures. Dans ce cas, des mesures comme l'amélioration de l'isolation, qui ont un coût initial très important mais une rentabilité moindre, deviennent plus avantageuses. Si le taux d'actualisation diminue, ces bénéfices futurs sont plus valorisés, mais cela augmente aussi le coût global actualisé (CGA).

Dans certains cas identifiés ci-dessus, l'influence d'un taux d'actualisation élevé a pour conséquence de diminuer la rentabilité de l'isolation thermique de façades et/ou des toitures, et/ou du remplacement des menuiseries.

#### 19.4.2. L'évolution des prix de l'énergie

Sur l'évolution des prix de l'énergie, on observe la tendance inverse : plus ce taux augmente, plus les mesures d'amélioration de l'enveloppe deviennent rentables.

L'augmentation des prix de l'énergie fait augmenter les CGA et met parfois en évidence un cost-optimum plus performant énergétiquement.



Une augmentation des prix de l'énergie peut rendre plus rentables des mesures d'économie d'énergie plus coûteuses au départ, telle que l'isolation des planchers ou l'installation de systèmes de chauffage et de climatisation plus performants, comme les pompes à chaleur.

Par exemple, si l'isolation des planchers était considérée comme non rentable avec des prix de l'énergie bas, une augmentation des prix rendrait cette mesure plus attractive, car les économies réalisées sur les coûts énergétiques seraient plus importantes.

De même, des systèmes de chauffage et de climatisation (HVAC) plus performants deviennent économiquement plus avantageux avec l'augmentation des prix de l'énergie car ils réduisent la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation, engendrant des économies significatives sur le long terme.

Nous constatons que l'étude de sensibilité met en évidence un changement de cost optimum dans 33% des variantes des scénarii des prix de l'énergie dans le calcul macroéconomique moyen pour les bâtiments résidentiels, et 17% pour les variantes du calcul financier.

Pour les bâtiments non résidentiels, nous constatons que l'étude de sensibilité met en évidence un changement de cost optimum dans 12.5% des variantes des scénarii des prix de l'énergie dans le calcul macroéconomique moyen et 4% pour les variantes du calcul financier.



## 19.5. Conclusions générales de l'étude de sensibilité

Cette étude montre comment des variations du taux d'actualisation et du prix de l'énergie peuvent influencer la décision d'investir dans des mesures de rénovation énergétique. L'étude de sensibilité qui inclut ces variables permet de comparer la rentabilité des mesures entre elles sous différents scénarii économiques et peut guider les décideurs dans la fixation des niveaux de performance règlementaires et l'allocation optimale des ressources pour la rénovation des bâtiments.

En général, les fluctuations du taux d'actualisation et l'évolution des prix de l'énergie ont un impact limité sur la rentabilité des mesures énergétiques. Néanmoins, il existe des situations où un taux d'actualisation croissant peut accroître la rentabilité de l'installation de systèmes de chauffage et de climatisation plus efficaces. Une diminution de ce taux d'actualisation entraîne proportionnellement une augmentation du coût global actualisé.

Des mesures initialement moins avantageuses, telles que l'isolation des planchers, peuvent devenir économiquement attrayantes si les prix de l'énergie venaient à augmenter.

Suite à l'analyse approfondie réalisée dans l'étude de sensibilité, nous avons observé une certaine uniformité dans les écarts de pourcentage à travers les différents scénarios examinés. Cette homogénéité nous guide naturellement vers l'adoption de taux moyens pour nos calculs. Cette décision est étayée par une évaluation des tendances passées dans les domaines clés de notre étude : les taux d'actualisation financier et macroéconomique, ainsi que les variations historiques du coût de l'énergie.

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1: Exigences PEB d'application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2021 en fonction de la nature des travaux :</b>	19
Tableau 2 : Exigences EW 2021 pour les parties fonctionnelles des unités PEN neuves.....	20
Tableau 3 : Exigences U <sub>max</sub> applicables en rénovation depuis le 1er janvier 2017 .....	21
Tableau 4 : Exigences en vigueur au niveau des systèmes HVAC depuis le 1er mai 2016.....	22
Tableau 5 : Température de consigne pour le chauffage et température de consigne intérieure moyenne pour les calculs de chauffage, par fonction. ....	25
Tableau 6 : Température intérieure de consigne pour le refroidissement des espaces avec refroidissement actif et température intérieure moyenne pour les calculs de refroidissement des espaces avec refroidissement actif, par fonction. ....	26
Tableau 7 : Facteur de conversion en énergie primaire des différents vecteurs énergétiques utilisés dans cette étude.....	29
Tableau 8 : Trajectoire harmonisée du prix / valeur du carbone (EUR2020 / tCO <sub>2</sub> ) (Source : « European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022 ».....	37
Tableau 9 : coûts annuels considérés pour l'émission d'une tonne de CO <sub>2</sub> .....	37
Tableau 10 : Prix de l'énergie utilisés dans l'étude .....	44
Tableau 11 : Durée de vie normalisée des éléments constitutifs de l'enveloppe du bâtiment.....	48
Tableau 12 : Durée de vie normalisée des systèmes HVAC .....	49
Tableau 13 : Coûts de maintenance des différents systèmes HVAC considérés dans l'études .....	55
Tableau 14 : Conditions climatiques .....	55
Tableau 15 : Ecart moyen pondéré entre U <sub>max</sub> et U <sub>optimum</sub> des différentes parois du bâtiment .....	320
Tableau 16 : E <sub>spec</sub> , E <sub>w</sub> et CGA cost-optimum .....	321
Tableau 17 : E <sub>spec</sub> , Investissement, CGA cost-optimum, E <sub>spec</sub> cost-optimum SRLT .....	323
Tableau 18 : Ecart moyen pondéré entre U <sub>max</sub> et U <sub>optimum</sub> des différentes parois du bâtiment .....	324
Tableau 19 : E <sub>spec</sub> , E <sub>w</sub> , K et CGA cost-optimum .....	325
Tableau 20 : E <sub>spec</sub> , Investissement, CGA cost-optimum, E <sub>spec</sub> cost-optimum QZEN .....	326
Tableau 21 : Tableau 21 : Ecart moyen pondéré entre U <sub>max</sub> et U <sub>optimum</sub> des différentes parois du bâtiment..	327
Tableau 22 : E <sub>spec</sub> , E <sub>w</sub> et CGA cost-optimum .....	328
Tableau 23 : E <sub>spec</sub> , Investissement, CGA cost-optimum, E <sub>spec</sub> cost-optimum SRLT .....	329
Tableau 24 : Ecart moyen pondéré entre U <sub>max</sub> et U <sub>optimum</sub> des différentes parois du bâtiment.....	330
Tableau 25 : E <sub>spec</sub> , E <sub>w</sub> et CGA cost-optimum .....	330
Tableau 26 : Ecart moyen pondéré entre exigences U <sub>max</sub> et U <sub>optimum</sub> des différentes parois les bureaux existants.....	335
Tableau 27 : E <sub>w</sub> cost-optimum, investissement et CGA des bureaux existants .....	336
Tableau 28 : Comparaison des E <sub>w</sub> (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des bureaux existants .....	337

Tableau 29 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois les bureaux neufs .....	338
Tableau 30 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des bureaux neufs.....	339
Tableau 31 : Comparaison des Ew (cost-optimum et PEB-conforme) et CGA (cost-optimum et PEB-conforme) des bureaux neufs .....	339
Tableau 32 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois les écoles existantes.....	339
Tableau 33 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des écoles existantes.....	340
Tableau 34 : Comparaison des Ew (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des écoles existantes .....	341
Tableau 35 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois les écoles neuves .....	342
Tableau 36 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des écoles neuves .....	342
Tableau 37 : Comparaison des Ew (cost-optimum et PEB-conforme) et CGA (cost-optimum et PEB-conforme) des écoles neuves.....	343
Tableau 38 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois les maisons de repos existantes .....	343
Tableau 39 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois les maisons de repos neuves .....	345
Tableau 40 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des maisons de repos neuves.....	345
Tableau 41 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois hôtels existants .....	346
Tableau 42 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des hôtels existants .....	346
Tableau 43 : Comparaison des Ew (cost-optimum et U-conforme) et CGA (cost-optimum et U-conforme) des hôtels existants .....	347
Tableau 44 : Ecart moyen pondéré entre exigences Umax et Uoptimum des différentes parois hôtels neufs.....	348
Tableau 45 : Ew cost-optimum, investissement et CGA des hôtels neufs .....	348
Tableau 46 : Comparaison des fronts de Pareto pour l'EN1 et la MRN, avec et sans PV.....	351

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma complet du bilan énergétique d'un unité résidentielle .....	30
Figure 2 : Schéma complet du bilan énergétique d'un unité non résidentielle .....	31
Figure 3 : éléments constitutifs du coût global selon la directive PEB. Source : règlement Délégué (UE) n°244/2012.....	39
Figure 4 : Prix internationaux des combustibles fossiles dans le scénario de référence de l'UE 2020 (source : European Commission, EU Reference Scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, July 2021).....	45
Figure 5 : Propositions de trajectoires centrales harmonisées pour les prix internationaux des carburants (EUR2020) (Source : European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2023, April 2022) .....	46
Figure 6 : évolution lissée des coûts des vecteurs pétrole et gaz naturel, sans tenir compte des épisodes particuliers des années 2020 à 2022. Basé sur [European Commission Directorate-General Climate Action, Recommended parameters for reporting on GHG projection.....	47
Figure 7 : Ensemble des résultats de l'étude de sensibilité .....	359
Figure 9 : Comparaison des Fronts de Pareto de la HE5, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (2%, 3% et 4%).....	361
Figure 10 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%). .....	363
Figure 11 : Front de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'actualisation financier de 2% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%. .....	364
Figure 12 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81% et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (1%, 2% et 3%).....	364
Figure 13 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment HE5, pour un taux d'actualisation financier de 2% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).....	365
Figure 14 : Front de Pareto du bâtiment IAE1, tel que présenté dans le corps du rapport, pour un taux d'actualisation de 3% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%. .....	367
Figure 15 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (2%, 3% et 4%).....	367
Figure 16 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%). .....	369
Figure 17 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81% et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (1%, 2% et 3%).....	370
Figure 18 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAE1, pour un taux d'actualisation financier de 2% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).....	370

Figure 19 : Front de Pareto du bâtiment IAN1, tel que présenté dans le corps du rapport pour un calcul macro-économique, avec un taux d'actualisation de 3% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%.

.....373

Figure 20 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (2%, 3% et 4%).....373

Figure 21 : Comparaison des Fronts de Pareto de l'IAN1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%). .....375

Figure 22 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (2%, 3% et 4%).....376

Figure 23 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment IAN1, pour un taux d'actualisation financier de 2% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%). .....377

Figure 24 : Front de Pareto du bâtiment EE1, tel que présenté dans le corps du rapport pour un taux d'actualisation macroéconomique de 4% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%. .....379

Figure 25 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation macroéconomique (3%, 4% et 5%).....379

Figure 26 : Comparaison des Fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 4% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

.....381

Figure 27 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (2%, 3% et 4%).....382

Figure 28 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment EE1, pour un taux d'actualisation financier de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%). .....383

Figure 29 : Front de Pareto du bâtiment MRN1, tel que présenté dans le corps du rapport pour un taux d'actualisation de 4% et un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%. .....386

Figure 30 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation (3%, 4% et 5%). .....386

Figure 31 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'actualisation macroéconomique de 4% et 3 valeurs du « taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%).

.....388

Figure 32 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'évolution annuel des prix de l'énergie de 1,81%, et 3 valeurs du taux d'actualisation financier (2%, 3% et 4%).....389

Figure 33 : Comparaison des fronts de Pareto du bâtiment MRN1, pour un taux d'actualisation financier de 3% et 3 valeurs du taux d'évolution annuel des prix de l'énergie (0%, 1,81%, 3,62%). .....389

Figure 34 : Tableau de synthèse de l'impact des paramètres étudiés dans l'étude de sensibilité sur la performance énergétique des cost-optimum. ....392

# RÉFÉRENCES

- [1] —Directive 2010/31/UE
- [2] —Le règlement Délégué (UE) n°244/2012 et les orientations accompagnant le règlement délégué (UE).
- [3] —première étude coût optimum de la Wallonie (COZEB), juin 2013 et COZEB extension (xxx 2015).
- [4] —rapports d'études coût optimum des régions bruxelloise et flamande ainsi que les rapports nationaux des autres Etats membres.
- [5] —site de la Concerted Action - Enregy performance of Buildings.
- [6] —étude « Cost optimal building performance requirements – calculation methodology for reporting on national energy performance.
- [7] —requirements on the basis of cost optimality within the framework of the EPBD » - T. Boermans, K. Bettgenhäuser, A. Hermelink, S. Schimschar and other Ecofys international staff – 2 May 2011.
- [8] —« Implementing the cost-optimal methodology in EU countries – lessons learned from three case studies » - BPIE-2013.
- [9] —Discount rates in energy system analysis – Discussion paper » - Jan Steinbach (Fraunhofer ISI), Dan Staniaszek (BPIE) – May 2015..

## Annexe A : Descriptif des bâtiments de référence

Les fiches descriptives complètes des bâtiments de références analysés dans l'étude sont disponibles dans des fichiers séparés :

COZEB3\_annexe\_A.1\_Habitations.pdf

COZEB3\_annexe\_A.2\_Immeubles\_app.pdf

COZEB3\_annexe\_A.3\_Immeubles\_bureaux.pdf

COZEB3\_annexe\_A.4\_Ecoles.pdf

COZEB3\_annexe\_A.5\_Hôtels.pdf

COZEB3\_annexe\_A.6\_Maisons\_repos.pdf

## Annexe B : Groupes constructifs

Toiture - existant		
<b>T1</b>	Existant - Isolation toiture sarking inclinée	Démontage couverture, lattage contre lattage, sous toiture Couverture Lattage/contre-lattage Isolation (panneau y compris pare-vapeur et sous-toiture) Zingueries à adapter (rives, gouttières, avaloir, solin, DEP) Structure (10%) et air non ventilé (90%) Finition intérieure
<b>T1</b>	Existant - Surisolation toiture sarking inclinée	Démontage couverture, lattage contre lattage, sous toiture Couverture Lattage/contre-lattage Isolation (panneau y compris pare-vapeur et sous-toiture) Zingueries à adapter (rives, gouttières, avaloir, solin, DEP) Structure (10%) et isolant existant (90%) Finition intérieure
<b>T2</b>	Existant - Isolation toiture inclinée dans la structure + doublage structure et isolation	Démontage finition intérieure éventuelle  Panneau existant Structure bois (10%) existante + Isolation entre structure (90%) Structure bois (10%) doublage + Isolation entre structure (90%) Pare-vapeur Lattage (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre
<b>T3</b>	Existant - <u>Surisolation</u> toiture plate par le haut	Rehausse des acrotères Zingueries à adapter (rives, gouttières, avaloir, solin, DEP) Préparation du support (nettoyage étanchéité, ...) Couverture (lestage) Couverture (Etanchéité) Isolation Etanchéité Isolation Structure lourde Finition intérieure
<b>T3</b>	Existant - Isolation toiture plate par le haut	Rehausse des acrotères Zingueries à adapter (rives, gouttières, avaloir, solin, DEP) Préparation du support (nettoyage étanchéité, ...) Couverture (lestage) Couverture (Etanchéité) Isolation Etanchéité Structure lourde Finition intérieure
<b>H1</b>	Existant - Isolation plancher grenier par le haut	Isolation sur le plancher Pare-vapeur Panneau existant Structure (10%) et air non ventilé (90%) Finition intérieure
<b>H2</b>	Existant - Isolation plancher grenier dans la structure	Démontage et évacuation finition plafond  Panneau existant Structure bois (10%) + Isolation entre structure (90%) Pare-vapeur Lattage (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre
<b>H3</b>	Existant - Isolation plancher grenier dans la structure et par le haut	Démontage et évacuation finition plafond  Isolation sur le plancher <18 cm Panneau existant Structure bois (10%) + Isolation entre structure (90%) Pare-vapeur Lattage (15%) et air non ventilé (85%)



Plaque de plâtre		
Murs - existant		
<b>M1</b>	Existant - Murs creux - isolation int	Briques parement TC maçonneries Lame d'air peu ventilée Blocs maçonneries Structure contre maçonnerie (15%) + isolation entre structure (85%) Panneau osb Pare-vapeur Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>M1</b>	Existant - Murs pleins - isolation int	Mur maçonneré plein / briques, pierres Structure contre maçonnerie (15%) + isolation entre structure (85%) Panneau osb Pare-vapeur Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>M2</b>	Existant - Murs creux - iso ext + crépi	Crépi Isolation EPS/XPS Briques parement TC maçonneries Lame d'air non ventilée Blocs maçonneries Finition intérieure Travaux connexes : modifications de seuils Travaux connexes : débord de toiture, ...
<b>M2</b>	Existant - Murs pleins - iso ext + crépi	Crépi Isolation EPS/XPS Mur maçonneré / briques, pierre, bloc Finition intérieure Travaux connexes : modifications de seuils Travaux connexes : débord de toiture, ...
<b>M3</b>	Existant - Murs pleins - iso ext + briquettes	Briquettes de façade collées Brique d'angle Isolation EPS/XPS Maçonnerie Finition intérieure Travaux connexes : modifications de seuils Travaux connexes : débord de toiture, ...
<b>M4</b>	Existant - mur creux - isolation par l'extérieur et injection par la coulisse	Crépi Isolation EPS/XPS Briques parement TC maçonneries Injection d'isolation dans la coulisse de 5 cm à 6 cm Blocs maçonneries Finition intérieure Travaux connexes : modifications de seuils Travaux connexes : débord de toiture, ...
<b>M5</b>	Existant - Murs pleins - iso ext + bardage	Bardage (y compris lattage, accessoires, pare-pluie ou tape joints isolants, ...) Isolation PU Mur maçonneré / briques, pierre, bloc Finition intérieure Travaux connexes : modifications de seuils Travaux connexes : débord de toiture, ...
<b>M9</b>	Existant - Mur mitoyen - iso int	Finition intérieure Mur plein maçonneries Structure contre maçonnerie (15%) + isolation entre structure (85%) Panneau osb Pare-vapeur Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>M6</b>	Existant - mur creux - isolation par l'extérieur avec dépose du parement existant + bardage	Dépose du parement existant Bardage (y compris lattage, accessoires, pare-pluie ou tape joints isolants ...) Isolation PU Mur maçonneré / blocs Finition intérieure
<b>M7</b>	Existant - mur creux - isolation par l'extérieur avec dépose du parement existant + crépi	Dépose du parement existant

		Crépi Isolation EPS/XPS Mur maçonné / blocs Finition intérieure
<b>M8</b>	Existant - mur creux - isolation par l'extérieur avec dépose du parement existant + briquette	Dépose du parement existant Briques de façade collées Brique d'angle Isolation EPS/XPS Mur maçonné / blocs Finition intérieure
<b>M10/M11/ M14</b>	Existant - Murs pleins contre cave/vv/eanc - isolation par l'intérieur	Finition intérieure Mur plein maçonnés Structure contre maçonnerie (15%) + isolation entre structure (85%) Panneau osb Pare-vapeur Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>M12/M13/ M15</b>	Existant - Murs pleins contre cave/eanc/vv - isolation par l'extérieur	Mur maçonné plein / briques, pierres Isolation PU Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>M16</b>	Existant - Murs contre terre - isolation par l'extérieur (murs pleins et murs creux)	Mur maçonné plein / briques, pierres Isolation XPS <14 cm Isolation XPS de 14 cm à 20 cm Isolation XPS >20 cm Etanchéité (cimentage+goudronnage+Platon)
<b>Sol - existant</b>		
<b>S1/S2/S3</b>	Existant - Isolation par le bas, plancher sur cave/eanc/vv	Isolation sous dalle Béton lourd armé / briques terre cuite Béton lourd non-armé / béton Carrelage de terre cuite
<b>S1/S2/S3</b>	Existant - surisolation par le bas, plancher sur cave/eanc/vv	Isolation sous dalle Béton lourd armé / briques terre cuite Isolation existante Béton lourd non-armé / béton Carrelage de terre cuite
<b>S4</b>	Existant - isolation par le haut, plancher sur sol	Dépose de la finition intérieure et de la chape Béton lourd armé Isolation PU Chape Finition intérieure
<b>Fenêtres - existant</b>		
<b>F1</b>	Existant - châssis déporté à l'extérieur du mur avec patte de fixation - <u>avec membrane</u> d'étanchéité	Dépose et évacuation du châssis existant Chassis (vitrage + profilé) Pose d'une nouvelle tablette de fenêtre intérieure Ragréage des enduits intérieurs ou cadre
<b>F2</b>	Existant - châssis sans modification d'emplacement - <u>avec membrane</u> d'étanchéité	Dépose et évacuation du châssis existant Chassis (vitrage + profilé) Raccord au seuil existant Ragréage des enduits intérieurs ou cadre
<b>F3</b>	Existant - remplacement vitrage	Dépose et évacuation du vitrage Pose du nouveau vitrage
<b>Ftoit1 ou F4</b>	Neuf - fenêtre de toiture - <u>avec membrane</u> d'étanchéité - Ftoit1 Double vitrage	Chassis (vitrage + profilé) Finitions intérieures
<b>Ftoit 2 ou F5</b>	Neuf - fenêtre de toiture - <u>avec membrane</u> d'étanchéité - Ftoit2 Triple vitrage	Chassis (vitrage + profilé) Finitions intérieures

	Protection solaire	Parallèle, intérieure manuelle Parallèle, extérieure manuelle Parallèle, extérieure automatique
<b>Portes - existant</b>		
<b>P1</b>	Existant - châssis déporté à l'extérieur du mur avec patte de fixation - <u>avec membrane</u> d'étanchéité	Dépose et évacuation du châssis existant  Porte Membrane d'étanchéité Ragréage sol Ragréage des enduits intérieurs ou cadre
<b>P2/P3/P4/P5</b>	Existant - châssis sans modification d'emplacement - <u>avec membrane</u> d'étanchéité contre ext/cave/vv/eanc	Dépose et évacuation du châssis existant  Porte Membrane d'étanchéité Ragréage des enduits intérieurs ou cadre

<b>Toiture - neuf</b>		
<b>T1</b>	Neuf - Isolation toiture plate légère Isolation par le haut	Couverture (lestage) Couverture (étanchéité, y compris sous-toiture et pare vapeur) Isolation Structure légère (10%) et air non ventilé (90%) (y compris cales de pente et osb) Lattage (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>T2</b>	Neuf - Isolation toiture plate lourde	Couverture (lestage) Couverture (étanchéité, y compris sous-toiture et pare vapeur) Isolation Structure lourde Plâtre
<b>T3</b>	Neuf - Isolation toiture inclinée dans la structure	Couverture Lattage/contre-lattage et air non ventilé Sous-toiture Structure (10%) + Isolation entre structure (90%) Pare-vapeur Lattage (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre
<b>S11</b>	Neuf - Isolation plancher grenier entre structure	Panneaux OSB Structure (10%) + isolation entre structure (90%) Pare-vapeur Lattage (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre
<b>Murs - neuf</b>		
<b>M3</b>	Neuf - Bloc - Isolation par l'extérieur + crépi	Crépi Isolation EPS/XPS Maçonnerie/mur de béton Plâtre
<b>M4</b>	Neuf - Isolation dans l'ossature + bardage	Bardage (y compris lattage, accessoires, pare-pluie ou tape joints isolants, ...) Panneau fibre de bois Ossature (10%) + isolation dans l'ossature (90%) Panneau osb Pare-vapeur Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit
<b>M7</b>	Neuf - Isolation dans l'ossature - mur mitoyen	Plaque de plâtre + enduit Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Panneau osb Pare-vapeur Ossature (10%) + Isolation dans l'ossature (90%) Panneau osb Pare-vapeur Structure bois (15%) et air non ventilé (85%) Plaque de plâtre + enduit

<b>M8</b>	Neuf - Isolation entre maçonnerie - mur mitoyen	Plafonnage Maçonnerie / mur béton Isolation pour mur creux Maçonnerie / mur béton Plafonnage
<b>M9</b>	Neuf - mur creux maçonnerie traditionnelle	Briques parement TC maçonnées ou pierres maçonnées Lame d'air peu ventilée Isolation pour mur creux Maçonnerie / mur béton Plafonnage
<b>M12/M13/M15</b>	Neuf - Murs contre cave/eanc/vv - isolation par l'extérieur	Plafonnage Maçonnerie / mur béton Isolation PU <12 cm Isolation PU de 12 cm à 14 cm Isolation PU >14 cm
<b>M16</b>	Neuf - Murs contre terre - isolation par l'extérieur (murs plein et murs creux)	Maçonnerie / mur béton Isolation XPS <14 cm Isolation XPS de 14 cm à 20 cm Isolation XPS >20 cm Etanchéité (cimentage+goudronnage+Platon)
<b>Sol - neuf</b>		
<b>S1</b>	Neuf - Isolation par le haut, dalle sur sol	Dalle BA (y compris géotextile, empierrement, sable, visqueen) Isolation PUR Chape Revêtement intérieur
<b>S2</b>	Neuf - Plancher bois contact extérieur	Finition extérieure (y compris lattage, accessoires, ...) Panneau fibre de bois Structure bois (10%) + isolation entre structure (90%) Panneau osb Revêtement intérieur
<b>S3, S4, S5</b>	Neuf - Isolation par le haut, dalle sur VV / cave / eanc	Plancher en béton (y compris chape de compression) Isolation PU Chape Revêtement intérieur

<b>Fenêtres - neuf</b>		
<b>F1</b>	Neuf - châssis déporté à l'extérieur du bloc avec patte de fixation ou dans l'ossature - <u>avec membrane</u> d'étanchéité	Chassis (vitrage + profilé) Seuil Tablette intérieure
<b>Ftoit1</b>	Neuf - fenêtre de toiture - <u>avec membrane</u> d'étanchéité Double vitrage	Chassis (vitrage + profilé) Finitions intérieures
<b>Ftoit2</b>	Neuf - fenêtre de toiture - <u>avec membrane</u> d'étanchéité Triple vitrage	Chassis (vitrage + profilé) Finitions intérieures
	Protection solaire	Parallèle, intérieure manuelle Parallèle, extérieure manuelle Parallèle, extérieure automatique
<b>Portes - neuf</b>		
<b>P1</b>	Neuf - châssis déporté à l'extérieur du bloc avec patte de fixation ou dans l'ossature - <u>avec membrane</u> d'étanchéité	Porte Membrane étanchéité Seuil pierre
<b>P3/P4/P5</b>	Neuf - châssis déporté à l'extérieur du bloc avec patte de fixation ou dans l'ossature - avec membrane d'étanchéité contre cave/vv/eanc	Porte Membrane d'étanchéité

## Annexe C : Tableaux de résultats

L'ensemble des résultats situés sur le front de Pareto de tous les cas étudiés se trouve au format Excel en annexe.

Cf. fichier COZEB3\_Annexe\_C\_Tableaux\_résultats.xlsx annexé

## Annexe D : Analyses transversales PER

Cf. fichier .pdf annexé

### HE – Habitations existantes

## HN – Habitations neuves

## IAE – Immeubles à appartements existants



## Annexe E : Tableaux pour la CE

COZEB3\_COT\_resultats-exist.xlsx (ensemble des résultats des bâtiments existants)

COZEB3\_COT\_resultats-neuf.xlsx (ensemble des résultats des bâtiments neufs)

COZEB3\_Tableau\_CE\_1.xlsx (Bâtiments de référence existants)

COZEB3\_Tableau\_CE\_2.xlsx (Bâtiments de référence neufs)

COZEB3\_Tableau\_CE\_3.xlsx (Données concernant la performance énergétique)

COZEB3\_Tableau\_CE\_4.xlsx (Tableau indicatif des variantes/mesures sélectionnées)

COZEB3\_Tableau\_CE\_5.xlsx (Calcul de la demande d'énergie)

COZEB3\_Tableau\_CE\_6.xlsx (Calcul des coûts globaux)

COZEB3\_Tableau\_CE\_7.xlsx (Calcul des écarts entre exigences et optimum)

## **Annexe F : Résultats macroéconomiques et financiers de l'étude de sensibilité sur le taux d'actualisation et les scénarii d'évolution des prix de l'énergie**