



INGENIEURS CONSEILS
26160 Félines sur Rimandoule
☎ 04 75 90 18 54 - contact@enertech.fr

BATIMENTS PERFORMANTS

ETUDE ECONOMIQUE

RAPPORT FINAL



Maître d'ouvrage de l'étude :
Direction régionale Rhône-Alpes de l'ADEME

Etude suivie par Hakim HAMADOU
hakim.hamadou@ademe.fr

Révision	Rédigé par	Vérifié par	Date
Edition Initiale	Thierry Rieser	Olivier Sidler	Février 2011
Relecture HH	Thierry Rieser		Juin 2011

TABLE DES MATIERES

1	Méthodologie utilisée	6
1.1	<i>Généralités.....</i>	6
1.2	<i>Détail par lot – lots architecturaux</i>	8
1.2.1	Terrassement.....	8
1.2.2	Gros oeuvre.....	8
1.2.3	Construction en ossature bois	8
1.2.4	Menuiseries extérieures	8
1.2.5	Isolation	9
1.2.6	Traitement des ponts thermiques	12
1.2.7	Choix architecturaux.....	12
1.3	<i>Détail par lot - lots fluides.....</i>	13
1.3.1	Chauffage.....	13
1.3.2	Ventilation	16
1.3.3	Eau Chaude Sanitaire.....	17
1.3.4	Plomberie.....	17
1.3.5	Electricité.....	17
1.3.6	Installation photovoltaïque	18
1.3.7	Ascenseur.....	18
2	Présentation des projets	19
2.1	<i>Logement.....</i>	19
2.1.1	Revel – OPAC 38	19
2.1.2	Epagny, Jardins République – SOGIMM.....	20
2.1.3	Epagny, Le Pérenne – OPAC 74	21
2.1.4	Ancône, les Santolines – DAH	22
2.1.5	Bron – ZAC Fort – OPAC 69	23
2.1.6	Tour de Salvagny – OPAC 69	24
2.1.7	Vaugneray – Les Visitandines – Commune	25
2.2	<i>Tertiaire</i>	26
2.2.1	Grenoble – LFI	26
2.2.2	ZAC Thiers – UTEI	27
2.3	<i>Bâtiment d’enseignement.....</i>	28
2.3.1	Ecole – Saint Christo en Jarez	28
2.3.2	Crèche – Montrevel	29

3	Résultats de l'étude.....	30
3.1	<i>Analyse poste par poste – lots architecturaux.....</i>	<i>30</i>
3.1.1	Isolation des murs	30
3.1.2	Isolation de la toiture	35
3.1.3	Isolation du plancher bas	36
3.1.4	Traitement des ponts thermiques	37
3.1.5	Menuiseries performantes, portes isolantes, étanchéité à l'air	38
3.2	<i>Analyse poste par poste – lots fluides.....</i>	<i>43</i>
3.2.1	Ventilation	43
3.2.2	Chauffage performant et local chaufferie	48
3.2.3	Emission et régulation terminale	55
3.2.4	ECS performante	58
3.2.5	Plomberie	60
3.2.6	Maîtrise de la demande en électricité	60
3.2.7	Photovoltaïque	63
3.3	<i>Bilan transversal.....</i>	<i>64</i>
4	Conclusion	68

Lexique des abréviations et termes techniques utilisés

b	Coefficient de réduction des pertes thermiques d'une paroi donnant sur un local non chauffé, pour tenir compte du fait que celui-ci est plus chaud que l'air extérieur.
BBC	Bâtiment Basse Consommation au sens de la RT 2005.
BEPOS	Bâtiment à énergie positive : la production locale d'énergie renouvelable est supérieure à la consommation tous usages confondus (électricité spécifique comprise)
BAES	Bloc autonome d'éclairage de sécurité.
Cep :	Consommation conventionnelle d'énergie primaire selon calcul RT 2005 pour 5 postes : chauffage, rafraîchissement, la ventilation, l'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux. Elle est exprimée en kWh d'énergie primaire par m ² SHON.
Cep ref :	Consommation conventionnelle d'énergie primaire de la référence. La référence est un bâtiment fictif ayant la même géométrie que le projet réel avec des caractéristiques de parois, de vitrages et de systèmes de référence.
COP	Coefficient de performance d'une pompe à chaleur. Il exprime la quantité de chaleur que la PAC fournit rapportée à la quantité d'électricité consommée (en énergie finale).
ECS :	Eau chaude sanitaire.
Indice BT	Indice de prix publié dans le Journal Officiel permettant de suivre l'évolution des prix par lot, et donc de comparer des projets entre eux en s'affranchissant des variations des prix du marché.
I ₄ ou Q ₄	Performance d'étanchéité à l'air, exprimé en m ³ /h d'infiltration par m ² de surface déperditive hors plancher bas, sous une différence de pression de 4 Pa.
ITE	Isolation thermique par l'extérieur.
ITI	Isolation thermique par l'intérieur.
LdV	Laine de verre.
LNC	Local non chauffé.
n ₅₀	Performance d'étanchéité à l'air, exprimé en volume/h d'infiltration, sous une différence de pression de 50 Pa.
PSE	Polystyrène expansé.
Ψ	Psi, coefficient thermique linéique d'un pont thermique, exprimé en W/m.K.
R	Résistance thermique d'un isolant, exprimée en m ² .K/W.
RT 2005	Réglementation thermique 2005.
SHAB	Surface habitable.
SHON	Surface hors œuvre nette.
SU	Surface utile.
Ubat, Ubat ref	Déperdition globale du bâtiment complet rapportée à la surface totale des parois déperditives dans le calcul RT 2005. Le Ubat est exprimé en W/m ² .K. Ubat ref correspond au calcul de la référence.
U, Ue	Coefficient thermique d'une paroi opaque (mur, plancher, toiture) , exprimé en W/m ² .K. Ue correspond à une valeur corrigée selon les règles Th-U pour une paroi enterrée.
Uw	Coefficient thermique d'une menuiserie complète (vitrage et cadre), exprimé en W/m ² .K.
Ug	Coefficient thermique du vitrage seul, exprimé en W/m ² .K.
VDF	Ventilation double flux.
VSF	Ventilation simple flux.
VS	Vide sanitaire
VRD	Voirie et réseaux divers.

Remarques préliminaires

Contexte de l'étude :

La présente étude a été réalisée en complément d'une mission d'évaluation/suivi/analyse d'opérations performantes en Rhône-Alpes. Une partie des opérations étudiées sont lauréates des appels à projets régionaux PREBAT - Bâtiments démonstrateurs, montés par l'ADEME et le conseil Régional Rhône-Alpes. L'étude des pièces écrites et les visites de chantier nous ont permis de valider la cohérence des dispositions préconisées au regard des objectifs énergétiques envisagés pour l'opération, la conception du bâtiment, et la mise en œuvre par les entreprises. Les campagnes de mesure sont en cours sur les bâtiments terminés. Elles nous permettront de tirer les leçons sur le fonctionnement effectif des installations livrées.

Avertissement : l'étude permet d'identifier clairement, selon une méthodologie explicitée, les surcoûts affectés à la performance énergétique sur 11 opérations situées en région Rhône Alpes.

Si le cadre méthodologique d'identification des surcoûts est transposable sur d'autres projets, l'utilisation des ratios obtenus reste délicate. Chaque opération étant bien particulière par sa conception, son architecture, son marché local, ses spécificités d'adaptation au site....

Liste des projets étudiés :

Voici la liste des 11 projets étudiés :

Type	Nom du projet	Maître d'ouvrage	Lieu	Description
Logement	Revel	OPAC 38	Revel (38)	7 logements BBC
	Jardins République	SOGIMM	Epagny (74)	51 logements Minergie et 4 locaux commerciaux
	Le Pérenne	OPAC 74	Epagny (74)	15 logements Effnergie (BBC)
	Les Santolines	DAH	Ancône (26)	4 logements passifs
	ZAC Fort de Bron	OPAC du Rhône	Bron (69)	22 logements THPE (RT2000)
	Tour de Salvagny	OPAC du Rhône	La Tour de Salvagny (69)	29 logements THPE et 7 locaux commerciaux
	Les Visitandines	Commune de Vaugneray	Vaugneray (69)	Réhabilitation lourde en 27 logements niveau BBC réno.
Tertiaire	ZAC de Bonne Energie	LFI	Grenoble (38)	1599 m ² de bureaux à Energie positive
	ZAC Thiers	UTEI	Lyon (69)	4215 m ² de bureaux niveau BBC (Cref -50%)
	Ecole de Saint Christo	Commune de Saint Christo en Jarez	Saint Christo en Jarez (42)	Ecole élémentaire de 1080 m ² niveau BBC (Cref -50%)
	Crèche de Montrevel	Communauté de Communes de Montrevel-en-Bresse	Montrevel-en-Bresse (01)	Pôle multi-accueil et centre de loisir de 1608 m ² niveau THPE. Cep = Cref - 40%, ce qui se rapproche du BBC.

1 Méthodologie utilisée

1.1 Généralités

Présentation globale :

Cette analyse a pour but d'identifier dans le coût de la construction les **surinvestissements** et les **moins-values** liés à la performance énergétique.

La philosophie générale est de remplacer les éléments performants du projet par une solution moins performante qui aurait suffi à respecter la réglementation en vigueur (RT 2005). Le travail se base donc sur une référence « RT 2005 » qui est décrite dans le présent chapitre. La définition de cette référence est facilitée par le fait que le *Cep ref* servant d'objectif au calcul RT 2005 est calculé sur la base de la géométrie du projet avec des parois, vitrages et systèmes de référence définis dans l'arrêté du 24 mai 2006.

- Le calcul pratique a consisté à reprendre les bordereaux de prix lot par lot et de proposer une variante RT2005 évaluée à l'aide de ratio de coût et d'extrapolation détaillées dans le présent chapitre. On en déduit ainsi un surinvestissement que l'on peut rattacher à chaque poste.

Analyse	Opération réelle	Unité	Qté	Prix	Prix ind. BT	Référence RT 2005 (fictive)	Coût	Surinvest.
Lot n° 1	Gros œuvre				0,990			
Isolation du plancher bas	Isolation sous dallage	Résistance	4	6 885,00 €	6 818,70 €	Référence R=1,7	3 682,10 €	3 136,60 €
Traitement des ponts therm	Traitement pont thermique Périphérie			2 760,00 €	2 733,42 €	Supprimé dans la référence	0,00 €	2 733,42 €
Traitement des ponts therm	Traitement pont thermique Retombées			2 040,00 €	2 020,36 €	Conservé dans la référence		0,00 €
	<i>Pour le calcul : Mur extérieur béton</i>	Surface	701	29 575,00 €	29 290,21 €		41,78 €	
	<i>Pour le calcul : Dalle béton</i>	Surface	314	28 260,00 €	27 987,87 €		89,13 €	
	<i>Pour le calcul : Mur agglo</i>	Surface	301	15 050,00 €	14 905,08 €		49,52 €	
Local chaufferie	Suppression de la chaufferie : dalle			0,00 €	0,00 €	Suppression de la chaufferie : dalle	89,13 €	4 438,84 €
Local chaufferie	Suppression de la chaufferie : mur agglo			0,00 €	0,00 €	Suppression de la chaufferie : mur agglo	49,52 €	674,69 €
Local chaufferie	Suppression de la chaufferie : mur			0,00 €	0,00 €	Suppression de la chaufferie : mur	33,35 €	1 393,48 €
Total lot 1				257 610,00 €	255 129,35 €	Total lot 1	242 752,32 €	12 377,03 €
Lot n° 1 bis	VRD				0,998			
Qualité environnementale	Enrobé drainant	Surface	318	5 088,00 €	5 079,94 €	Option 2 : moins value pour enrobé classique		412,75 €
Total lot 1 bis				89 000,00 €	88 659,05 €	Total lot	88 446,31 €	412,75 €
Lot n° 2	Charpente bois				0,998			
Ventilation double-flux	Tuiles à douille + lanterne	Nombre	4	248,00 €	247,81 €	Ventilation simple flux : pas de prise d'air		185,71 €
	<i>Pour le calcul : tuiles béton</i>	Surface	483	17 581,20 €	17 553,36 €			
Isolation des murs	Facade sud à structure bois	Surface	128	19 456,00 €	19 425,19 €	Remplacement par mur béton (isolé au Int)	41,78 €	5 348,28 €
								61,90 €
								14 076,91 €

Figure 1 : extrait de la feuille de calcul utilisée

Ces études nous permettent d'établir différents indicateurs :

- ✓ Surinvestissement par poste rapporté à la surface hors œuvre nette (SHON),
- ✓ Surinvestissement rapporté au logement, rapporté au prix total de l'opération,
- ✓ Eléments complémentaires permettant d'expliquer certains niveaux de prix, notamment prix de l'isolation extérieure au m² de façade, influence de la compacité du bâtiment, prix des menuiseries triple vitrage rapporté au m² de menuiserie, prix de la régulation terminale par logement, etc...

Liste des postes étudiés :

- Isolation des murs ;
- Isolation de la toiture ;
- Isolation du plancher bas ;
- Traitement des ponts thermiques, hors balcon désolidarisé ;
- Balcon désolidarisé : balcon ou coursive autoporté avec isolation filante entre le mur extérieur et le balcon assurant une rupture totale du pont thermique ;
- Menuiseries performantes : surinvestissement « thermique » par rapport à la référence avec un cadre de même nature. Le surcoût d'un cadre en bois est affecté au poste Qualité environnementale ;
- Véranda bioclimatique : ne sont affectées à ce poste que les vérandas contribuant effectivement au chauffage du bâtiment : véranda « chaude » orientée sud. On compte à ce poste le vitrage non isolant, le vitrage isolant étant au poste *Menuiseries performantes* ;

- Portes isolantes ;
- Etanchéité à l'air : peu de données sont disponibles sur ce poste. Nous avons établi les coûts qui étaient détaillés, hors classement A* des menuiseries.
- Ventilation double flux : y compris les faux plafond et soffites induits en logement ;
- Chauffage performant (collectif) : génération et distribution collective de chauffage ;
- Local chaufferie ;
- Emission performante : surinvestissement des émetteurs de chaleur (et de froid), hors régulation terminale ;
- Régulation terminale performante ;
- ECS performante : production et distribution collective d'eau chaude sanitaire, y compris installation solaire le cas échéant ;
- Plomberie : éléments permettant la réduction des consommations d'ECS ;
- Maîtrise de la demande d'électricité : éléments permettant de réduire les consommations électriques, comme les luminaires performants, la détection de présence, les prises commandées en logement, les BAES basse consommation...

Pour mémoire, les postes suivants ont également été suivis : installation photovoltaïque, suivi des performances (compteurs de chaleur, sous compteurs électriques), et certains éléments de qualité environnementale (surcoût des menuiseries bois par rapport à leur équivalent thermique, sols linoléum ou caoutchouc par rapport à un sol souple PVC, etc...).

Note importante sur les prix :

L'ensemble des prix est rapporté à l'indice BT de Novembre 2009 correspondant à chaque lot principal. Ceci permet de comparer les projets entre eux sans déformation liée aux évolutions de prix, et d'établir des références de coût sur ces mêmes indices de Novembre 2009.

Tous les prix sont Hors Taxes.

Le coût total de l'opération est établi avec les règles suivantes :

- Tous les lots sont pris en compte, y compris les VRD.
- Les frais de maîtrise d'œuvre ne sont pas pris en compte.

Avertissement : l'étude permet d'identifier clairement selon une méthodologie explicitée , les surcoûts affectés à la performance énergétique sur 11 opérations situées en région Rhône Alpes.

Si le cadre méthodologique d'identification des surcoûts est transposable sur d'autres projets, l'utilisation des ratios obtenus reste délicate. Chaque opération étant bien particulière par sa conception, son architecture, son marché local, ses spécificités d'adaptation au site.... .

1.2 Détail par lot – lots architecturaux

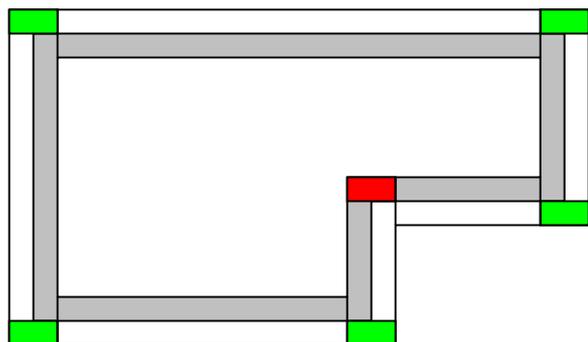
1.2.1 Terrassement

Puits canadien : surinvestissement de la tranchée (si elle est spécifique au puits canadien), du conduit, de la prise d'air, du système d'évacuation des condensats...

1.2.2 Gros oeuvre

Dans le cas d'une isolation par l'extérieur : La référence RT 2005 est en isolation intérieure. Aussi, à surface intérieure (SHAB) égale, la surface de l'isolant, lorsque celui-ci est placé à l'extérieur, est plus importante que lorsqu'il est placé à l'intérieur :

Méthode simple de calcul de la différence :



Pour chaque angle sortant on augmente la surface de mur de $(\text{ép. isolant} + \text{ép. mur}) \times \text{hauteur}$ (surface verte). Pour chaque angle rentrant on réduit la surface de $(\text{ép. isolant} + \text{ép. mur}) \times \text{hauteur}$ (surface rouge)

Au final l'augmentation de surface de mur pour la référence est de :

$$\text{ép totale du mur (de référence)} \times \text{hauteur} \\ \times (\text{Nb angle sortant} - \text{Nb angle rentrant})$$

L'augmentation de la surface des dalles pour la référence est le produit du périmètre par l'épaisseur hors tout de l'isolant intérieur de référence (12cm).

On peut ainsi obtenir le volume de béton armé économisé, multiplié par le coût au m² (béton + acier + coffrage) des murs d'une part et pour les dalles d'autre part.

De plus, dans le cas de l'isolation extérieure, les dalles ont une surface plus faible donc elles sont plus légères : les charges à porter par les murs sont alors réduites, ce qui entraîne une moins value supplémentaire sur l'armature du béton des murs, estimée à 2 kg d'acier par m² de dalle. Si la décomposition du prix des aciers n'est pas connue, on prend par défaut 2,5 € par kg d'acier T.S. (treillis soudés), moyenne constatée, soit 5 € / m² de dalle.

Local chaufferie : Dans ce lot on comptabilise également le surinvestissement d'une chaufferie collective. La méthodologie est détaillée au paragraphe concernant le chauffage.

1.2.3 Construction en ossature bois

Les murs en ossature bois sont remplacés par le mur de référence en béton isolé par l'intérieur. Voir le détail de la méthodologie au paragraphe concernant l'isolation.

1.2.4 Menuiseries extérieures

Référence pour la RT 2005 : Référence :

Désignation	Uw
Porte non vitrée	1,5
Fenêtre / PF non résidentiel	2,1
Fenêtre / PF résidentiel	1,8

En pratique aujourd'hui dans le secteur résidentiel on ne pose principalement que des menuiseries PVC ayant un Uw de 1,5 W/m².K. On prendra donc ce type de menuiserie en référence.

On considère que le projet est plus performant que la référence si Uw est meilleur que 1,5 W/m².K et/ou si le classement de la menuiserie est A4 pour l'étanchéité à l'air.

Coût de référence des fenêtres double vitrage 4/16/4 faible émissivité sur cadre PVC : **230 €/m²**.

Le surcoût est à répartir entre le surinvestissement lié à la performance thermique et le surcoût du cadre bois par rapport au cadre PVC qui est lié à la qualité environnementale.

Prix de référence du double vitrage bois à $U_w=1,5$: **380 €/m²**.

Exemple :	Coût	Référence	Coût	Surinvestissement
Triple vitrage cadre bois (projet <i>Revel</i>)	441 €/m ²	Double vitrage cadre bois	380 €/m²	Thermique : 61 €/m ²
		Double vitrage PVC	230 €/m²	Qualité envir. : 150 €/m ²

Pour les bâtiments tertiaires, la référence est une menuiserie double vitrage alu à rupteurs de pont thermique. Référence de coût : **340 €/m²**

Portes extérieures (accès commun) :

Porte pleine de référence : **300 €/m²**

Porte métallique en double vitrage feuilleté de référence : **500 €/m²**

Porte palière :

Prix de référence : - **400 €**unité si l'exigence phonique est inférieure à 37 dB ;

- **600 €**unité pour une exigence phonique supérieure ou égale à 37 dB.

Etanchéité à l'air : surcoût pour le seuil suisse des portes palières : 20 € par porte.

On ne compte pas de surcoût sur les occultations, sur les portes de garage et sur les portes des locaux non chauffés.

1.2.5 Isolation

Référence RT 2005 :

Zone climatique	H1, H2, H3>800m		H3<800m	
	U en W/m ² .K	Référence	U en W/m ² .K	Référence
a1 – Mur	0,36	R=2,6 Porté à R=3 (10cm PSE) *	0,40	R=2,3 (8cm PSE) Porté à R=3 (10cm PSE) *
a2 – Toiture sauf a3	0,20	R=4,9 Porté à R=5 (20cm LV) *	0,25	R=3,9 Porté à R=5 (20cm LV) *
a3 – Toiture béton	0,27	R=3,6 Porté à R=3.7 (10cm PU) *	0,27	R=3,6 Porté à R=3.7 (10cm PU) *
a4 – Plancher bas	0,27	<u>Sur terre plein :</u> R=1,7 (garde fou**, 6cm PSE) <u>Sur parking ou commun :</u> R=2,5 (b=0,9)	0,36	<u>Sur terre plein :</u> R=1,7 (garde fou**, 6cm PSE) <u>Sur parking :</u> R=2,5 (b=0,9)

* La solution de référence définie dans la RT 2005 comprend des valeurs pour les ponts thermiques a8, a9 et a10. Ces valeurs (a8 $\psi=0,40$; a9 $\psi=0,55$ en maison individuelle, $\psi=0.60$ sinon ; a10 $\psi=0,50$ en maison individuelle, $\psi=0.60$ sinon) ne sont pas atteignables en isolation intérieure (voir paragraphe suivant concernant les ponts thermiques). Aussi, il est plus réaliste de prendre en compte comme référence des ponts thermiques moins bons que la référence RT 2005 et des parois un peu mieux isolées.

On note que les épaisseurs d'isolant retenus comme référence sont effectivement très courantes.

** pour le plancher bas, dans le cas d'un parois enterrée, le calcul du Ue selon les règles Th-U sur ces parois conduit généralement à ce que le respect du garde fou $R = 1,7 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ suffise pour atteindre $U_e=0,27 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$.

Illustration sur un cas concret (projet *Revel*) :

		Référence RT 2005			Référence pour l'analyse				
Description		U en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	Surface en m^2	W/K	Description	U en $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	Surface en m^2	W/K	
a1	Mur	0,36	294,6	106,0	R=3 - 10cm PSE	0,32	294,6	92,9	
a2	Plancher haut	0,20	244,8	49,0	R=5 - 20cm LV	0,19	244,8	47,6	
a4	Plancher bas	0,27	243,4	65,7	R=1,7 - 6cm PSE	0,27	243,4	65,7	
a5	Portes	1,50	13,0	19,4	Portes	1,50	13,0	19,4	
a7	Fenêtres	1,80	65,4	117,6	Fenêtres	1,50	65,4	98,1	
		Ψ en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	Linéaire en m	W/K		Ψ en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	Linéaire en m	W/K	
L8	PT pl bas mur	0,40	74,4	29,7	ITI 1.1.1	0,63	74,4	46,8	
L9	PT pl int mur	0,70	149,2	104,4	ITI 2.1.1	0,97	149,2	144,7	
L10	PT pl haut mur	0,70	74,8	52,4	ITI 3.1.1	0,82	74,8	61,3	
Autre pont thermique		-	-	-	Refend – mur	0.83	45	37,4	
					Refend pl. bas	0.10	35,3	3,5	
					Refend - toiture	0.12	35,4	4,25	
Total en W/K				544,3	Total en W/K				621.8
U bat ref				0,632	U bat ref				0,722

Notre référence pour l'analyse s'avère moins performante que la référence RT2005. **Il faudra le compenser par une chaudière plus performante que la référence.**

Impact économique de l'augmentation de l'épaisseur d'un isolant :

L'augmentation marginale de l'épaisseur d'un isolation mise en œuvre est sans effet sur le temps de pose ou la complexité du produit posé. On ne peut donc pas considérer que le surcoût est lié directement à la quantité supplémentaire de matière isolante utilisée, ce qui ne tiendrait pas compte des coûts fixes.

Pour être plus précis on considère que le coût fourni posé se décompose en une part variable pour l'isolant et une part fixe pour la pose et les autres matériaux (plaque de plâtre, rails de fixation, parement coupe feu, étanchéité...) :

- pour l'isolation intérieure : on constate que 20% du prix est lié à l'isolant et 80% à la main d'œuvre et au parement. Alors pour un mur isolé par l'intérieur $R = 4,3 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ à 21 €/m², la référence isolée par l'intérieur $R=3 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ coûterait :

$$21 \times (80\% + 20\% \times 3/4,3) = 19,7 \text{ €/m}^2$$

- L'isolation par l'extérieur et l'isolation répartie sont remplacées dans la référence par une isolation par l'intérieur. Le coût estimé de l'isolation par l'intérieur comprend :
 - o Le coût surfacique de 20 € / m² pour $R = 3 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$,

- Pour le revêtement de façade, on compte un enduit : le coût au m² est repris sur les travaux de peinture extérieure sur béton le cas échéant, et par défaut on compte 11,50 €/m² (moyenne constatée). L'échafaudage est conservé (utilisé pour l'enduit de façade).
 - Une partie du coût du bardage peut être affectée au poste *Choix architectural*. Voir le paragraphe concerné.
 - Les plus values sur le gros œuvre sont détaillées au paragraphe gros œuvre.
- Isolant déroulé en toiture : on compte 80% du prix pour l'isolant et 20% pour la pose.
 - Isolant sur faux plafond : on compte 20% pour l'isolant et 80% pour la pose et le faux plafond.
 - Isolant en toiture terrasse sous complexe d'étanchéité ou sous dalles :
 - Si on a accès au prix unitaire de l'isolant, on comptera 80% pour l'isolant et 20% pour la pose.
 - Sinon, on se base sur le coût isolant + étanchéité, et on compte 50% pour l'isolant et 50% pour la pose et l'étanchéité.

Exemple : Coût isolant seul : 36 €/m² pour 120mm et 66 €/m² pour 240mm : les 120mm de plus coûtent 30 €/m² soit 83% du prix des 120mm fourni posés.

Coût isolant + étanchéité : 54 €/m² pour un isolant de 120mm et 83 €/m² pour 240mm. Ici les 120mm de plus coûtent 29 €/m², soit 54% du prix des 120mm fourni posés avec étanchéité.

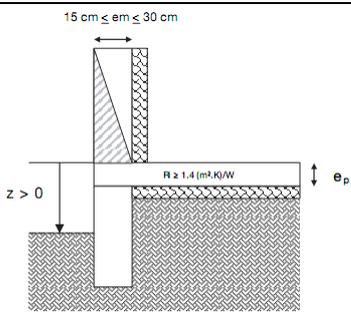
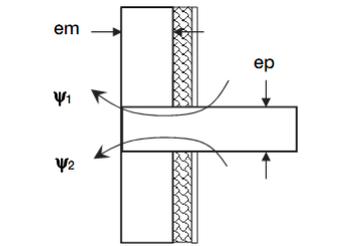
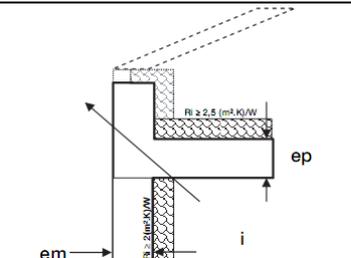
- Flocage en parking : on compte 50% du prix pour l'isolant et 50% pour la pose.
- Isolant sur terre plein : on compte 80% pour l'isolant et 20% pour la pose.
- Isolant sous dalle : on compte 20% pour l'isolant et 80% pour la pose et le parement (coupe feu dans un parking).

Résumé du calcul de la référence pour l'isolation

Type de parois	Typologie	Référence	Calcul du coût de référence
Murs	Par l'extérieur	ITI 100+13 – R=3	Coût de référence ITI (20 €/m ²) + augmentation surface mur extérieur et dalle
	Répartie / ossature bois	ITI 100+13 – R=3	Coût de référence ITI + mur béton (par défaut 46,6 €/m ² , moyenne constatée).
	Par l'intérieur	ITI 100+13 – R=3	Extrapolé : 20% lié à l'isolant, 80% à la pose et au parement
Toiture	Isolant déroulé en combles	Isolant déroulé R=5	Extrapolé : 80% lié à l'isolant, 20% à la pose
	Isolant sur faux plafond	Faux plafond + isolant R=5	Extrapolé : 20% lié à l'isolant, 80% à la pose et au faux plafond
	Toiture terrasse en béton	Etanchéité + isolant R=3,7	Extrapolé sur : - Prix isolant seul : 80% lié à l'isolant, 20% à la pose. - Prix isolant + étanchéité, 50% lié à l'isolant et 50% à la pose et à l'étanchéité.
Plancher bas	Sur terre plein	Isolant R=1,7	Extrapolé : 80% lié à l'isolant, 20% à la pose
	Sous sol : flocage	Isolant R=2,5	Extrapolé : 50% lié à l'isolant, 50% à la pose
	Sous sol : isolant sous plancher	Isolant R=2,5	Extrapolé : 20% lié à l'isolant, 80% à la pose

1.2.6 Traitement des ponts thermiques

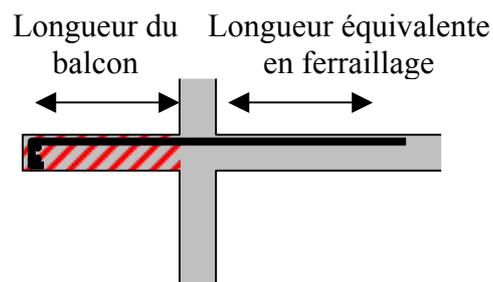
Ponts thermiques de référence :

Localisation	Configuration (selon fascicule 5 des règles Th-U)	
Plancher bas – mur (type L8)	ITI 1.1.1 NB : suppression des isolants périphériques enterrés pour les projets en ITE	
Plancher intermédiaire – mur (type L9)	ITI 2.1.1 NB : suppression des planelles en isolation répartie.	
Plancher haut – mur (type L10)	ITI 3.1.1 NB : remontée d'étanchéité sur isolant conservée dans la référence.	

Les autres traitements de ponts thermiques sont conservés car la référence RT2005 considère qu'ils n'existent même pas. Pour les retombées de poutres on diminue l'épaisseur d'isolant avec les mêmes règles que pour le plancher bas.

Balcons et coursives désolidarisés : remplacés par

- dalles béton : 122 €/m² (intégrant la plus value de dalle pour le ferrailage par rapport à une dalle courante, voir schéma)
- Garde corps : 210 €/ml.



NB : un balcon partiellement désolidarisé porté par poutres noyées a quasiment le même coût qu'un balcon classique (même quantité d'acier).

1.2.7 Choix architecturaux

On considère comme choix architectural les éléments de conception relevant de l'esthétique du bâtiment et non de la basse consommation d'énergie. Ainsi de même que pour la référence en RT 2005, la référence de notre étude a la même géométrie que le projet.

Exemple de choix architecturaux conservés en référence :

- Bardage architectural : en référence on remplace le bardage architectural par un bardage moins onéreux (de type utilisé par ailleurs dans le même projet ou par défaut sur un autre projet comparable). On conserve le principe du bardage (on ne remplace pas par un enduit sur polystyrène si ce type d'ITE n'est pas utilisée sur le projet) et les caractéristiques thermiques ;
- Brise soleil, pergola ;
- Certains luminaires (suspensions notamment) sont choisis à la fois pour leurs performances optiques et pour leur design. Dans ce cas le surcoût par rapport à la référence est affecté pour moitié à la *Maîtrise de la demande en électricité* et pour moitié à un *Choix architectural*. Si le luminaire n'est pas performant (sources non performantes ou rendement optique médiocre) alors on ne compte aucun surcoût.

NB : Le fait d'affecter un surcoût à ce poste *Choix architectural* n'est en aucun cas un jugement de valeur sur la pertinence de ce choix. Nous approuvons l'intérêt de produire des bâtiments esthétiques et intégrés à leur environnement. Il s'agit de ne pas imputer le coût de ce choix à la performance énergétique du bâtiment, qui est l'unique objet de ce rapport.

1.3 Détail par lot - lots fluides

1.3.1 Chauffage

Référence de la RT 2005 : pour des systèmes autres que le chauffage électrique direct, la référence est de même type que le projet, dimensionné selon le calcul de U_{bat} ref et avec un rendement défini par l'arrêté du 24 mai 2006. Pour un système thermodynamique, la référence a un COP corrigé de 2,45.

Pour les logements

Pour les logements, la référence est la chaudière gaz individuelle, émission par radiateur.

Nous avons vu au paragraphe 1.2.5 consacré à l'isolation que notre référence pour l'enveloppe est moins performante que la référence RT 2005. Le rendement de notre chaudière de référence pour l'étude devra donc être supérieure à la référence RT 2005. Illustration sur le même exemple que précédemment :

- Besoins de chaud selon référence RT 2005 ($U_{bat} = 0,632$) : 17,206 kWh/m²
- Besoins de chaud selon référence pour analyse ($U_{bat} = 0,722$) : 19,656 kWh/m²
- Rendement PCI moyen de la chaudière de référence RT 2005 : 91% (88,5 + 1,5 log (55 kW))
- Rendement PCI à 30% de charge de la chaudière de référence pour analyse : 100,5% pour obtenir la même consommation. Ceci conduit à prendre en référence pour l'analyse une **chaudière murale individuelle à condensation**.

Coûts de référence :

Le coût de référence est :

- Chaudières individuelles gaz à condensation double service avec ventouse : **2200 €HT**,
- Raccordements (gaz, électricité, évacuation) à **200 €HT**,
- Colonne gaz si les logements ne sont pas alimentés en gaz pour la cuisson. Coût de référence constaté : **300 €HT** par logement,
- La distribution intérieure de chauffage et d'ECS est conservée.

La moitié de ce coût de référence est affecté au poste *Chauffage performant*, l'autre moitié au poste *ECS performante*.

Coût de la chaufferie collective :

Pour les logements et les bureaux, on supprime de la référence les postes suivants :

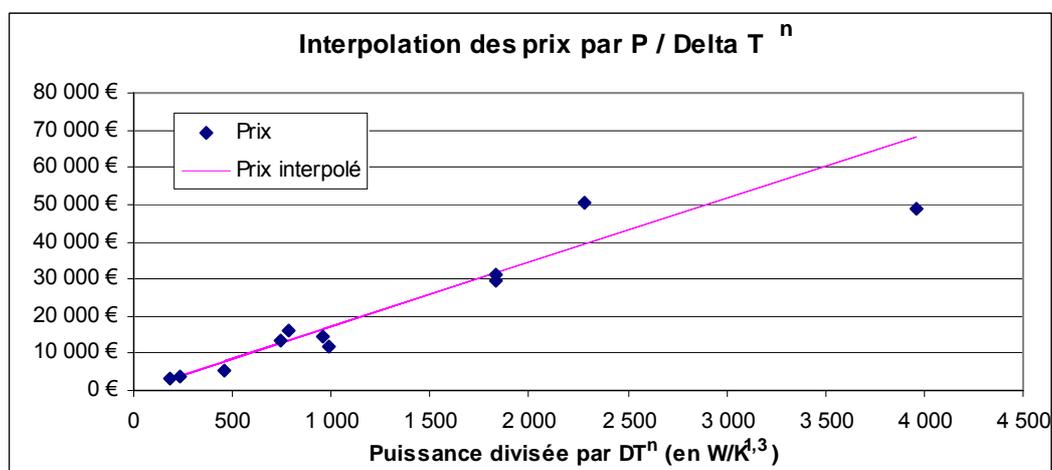
- Poste *Local chaufferie* :
 - Construction et aménagement de la chaufferie. Il comprend la structure, la toiture et le cuvelage éventuels, l'accès, l'alimentation électrique, les conduits de fumée, la ventilation haute et basse, etc. ;
 - Le cas échéant, le silo à bois déchiqueté ou plaquettes est également décompté sur ce poste ;
 - Dans le cas d'une chaufferie en sous-sol, on considère que l'espace de la chaufferie aurait été utilisé comme une ou plusieurs places de parking. Le surinvestissement correspond dans ce cas au prix de revient des places de parking, estimé comme le coût du sous-sol (murs, refends, poteaux et dalle supérieure) divisé par le nombre de places.
- Poste *Chauffage performant* :
 - Coût des canalisations, gaines, coffrets, organes, ventilations, etc, permettant d'amener le gaz naturel à la chaufferie collective ;
 - Coût des équipements de la chaufferie : chaudière, régulation, réseau hydraulique en chaufferie, etc. Le ballon ECS et les pompes associées sont également supprimées et affectées au poste *ECS performante*.
 - le coût des réseaux de distribution de chauffage depuis la chaufferie jusqu'aux nourrices de distribution situées dans les logements.
- Poste *Suivi des performances* :
 - Compteurs de chaleur, sauf ceux rendus nécessaires par la RT 2005 (consommation de chauffage et de refroidissement en tertiaire de plus de 400 m², consommation d'éclairage si la surface éclairée dépasse 1000m²).

Emission / régulation terminale :

La référence RT 2005 est un émetteur de classe B avec une variation temporelle de 1,2 K. Selon les règles Th-C ceci correspond à des radiateurs (régime 70/50) avec robinets thermostatiques.

Notre référence est donc l'émission par radiateurs en régime 70/50 équipés de robinets thermostatiques :

- Prix des radiateurs : Nous avons constaté que le prix des radiateurs est corrélé à la puissance installée (ECS + chauffage) divisée par le ΔT du régime d'émission puissance 1,3 (exposant n des radiateurs courants). Cette grandeur permet en fait de se ramener à la surface spécifique des émetteurs :



Graphique 1 : Prix des radiateurs en fonction de la puissance installée et du régime de température

Par conséquent pour les projets dont l'émission est assurée par des radiateurs, on pourra calculer la moins value sur les émetteurs du fait de l'isolation performante et la plus value sur le régime de

température bas, sur la base de la puissance installée en référence pour le chauffage (10 kW/logement, calculé pour la référence RT de l'exemple décrit précédemment) et le régime de référence 70/50.

Pour les projets dont l'émission n'est pas assurée par des radiateurs, on prendra en référence le coût moyen constaté sur les études de coût effectuées dans la région, à savoir **15,40 €/ (W / K^{1,3})** (où le terme en K^{1,3} est l'écart logarithmique entre la température du radiateur et celle de la pièce à l'exposant n permettant de calculer la puissance d'un radiateur. L'indicateur Puissance / $\Delta T^{1,3}$ est proportionnel à la surface du radiateur).

- Prix de la régulation par robinets thermostatiques (référence) : on prend le coût moyen par logement constaté sur les études de coût effectuées dans la région, à savoir **270 €/ logement** (corps de vannes, têtes thermostatiques, une tête simple réglage par logement et un thermostat d'ambiance par logement).

Pour les bureaux

Pour des bureaux, la référence est la climatisation réversible type VRV avec cassettes.

Coût de référence : 100 €/m² utiles

La chaufferie collective est supprimée avec la même méthodologie que pour les logements.

Pour les écoles

Pour les écoles, la référence est la chaudière gaz avec des radiateurs 70/50 partout plus une émission par air pour le restaurant.

Coût de référence :

- Chaudière : interpolé sur les données de coût des chaudières. De même que pour les logements, la référence doit être une chaudière performante à condensation et modulante (il faut en effet rattraper les ponts thermiques moins performants de notre référence par rapport à la référence RT 2005).
- Radiateur : **15,40 € par W/K^{1,3}** (cf § Emission / régulation terminale), prix moyen constaté. La puissance installée est calculée sur la base du *Ubat ref* du calcul RT 2005 et du débit de ventilation.
- Batterie chaude pour le restaurant : le cas ne s'est pas présenté sur les 11 projets étudiés.

Si l'émission est assurée par un plancher chauffant, on distingue deux cas :

- Si le plancher chauffant permet vraiment d'améliorer la performance du projet (pompe à chaleur), on remplace le plancher par les émetteurs de référence. La chape est remplacée par une chape de ragréage (**7 €/m²**). L'isolant sous chape est supprimé, et remplacé par un isolant sous la dalle.

Dans le cas d'une chaudière Gaz à condensation, le surcoût est partagé entre technique et architecture. En effet, le plancher améliore le rendement de la chaudière Gaz mais on aurait obtenu les mêmes performances avec des radiateurs basse température pour un coût moins élevé. Aussi nous avons compté uniquement en surinvestissement technique la différence de prix entre des radiateurs au régime 50/40 et la référence (régime 70/50).

- Si le plancher chauffant ne permet pas d'améliorer la performance du projet (génération dont le rendement est insensible à la température de retour, notamment chaufferie bois et réseau de chaleur urbain), alors le plancher chauffant a plutôt une fonction architecturale (éviter les radiateurs disgracieux et source de risque de collision pour les enfants en bas âge). Dans ce cas, le plancher chauffant est conservé comme référence.

La chaufferie collective est conservée en changeant la chaudière et les éléments suivants :

- Calorifuges : la référence RT 2005 est basée sur des isolants de classe 2. On suppose que 50% du prix est lié au calorifuge et 50% à la pose.
- Pompes basse consommation à vitesse variable : elles sont remplacées en référence à des pompes de base à vitesse fixe. On constate que le prix des pompes basse consommation à vitesse variable est environ le double du prix des pompes classiques.
- Comptage / sous comptage : ils sont supprimés dans la référence, sauf ceux rendus nécessaires par la RT 2005 (consommation de chauffage et de refroidissement en tertiaire de plus de 400 m², consommation d'éclairage si la surface éclairée dépasse 1000m²).
- Les autres équipements performants sont traités au cas par cas.

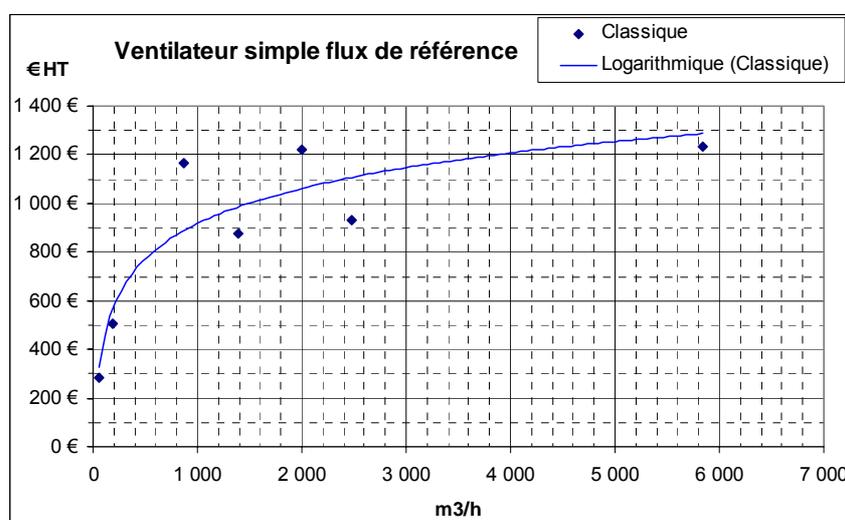
1.3.2 Ventilation

Référence de la RT 2005 : VMC Hygro A.

Pour les logements

La référence pour l'étude de prix est la VMC hygro A. Le calcul de la référence se fait avec la méthodologie suivante :

- Suppression du réseau de soufflage, remplacé par des entrées d'air autoréglables (nombre identique au nombre de bouches de soufflage) : Coût de référence **39 €U**
- Suppression des faux plafond et soffites liés au réseau de soufflage.
- Remplacement du groupe double flux par un extracteur simple : coût de référence interpolé sur les prix constatés :



Graphique 2 : prix de référence des ventilateurs simple flux classiques en fonction du débit de pointe

Pour les bureaux et les écoles

La référence RT 2005 pour les bâtiments autres que d'habitation est la ventilation d'extraction et de compensation, soit la ventilation double flux sans échangeur de chaleur :

- Les faux plafond sont conservés (courants dans les bureaux).
- Remplacement du groupe double flux par deux ventilateurs simples (un pour le soufflage, un pour la reprise). Coût de référence interpolé sur les prix constatés : voir graphique ci-dessus.

NB : Les bâtiments scolaires construits actuellement sont soit en ventilation « naturelle » par ouverture des fenêtres soit en ventilation double flux. Nous excluons la ventilation naturelle par ouverture des

fenêtres qui ne procure pas un service comparable au projet étudié (les mesures montrent que les taux de CO₂ dépassent le taux maximum réglementaire de 1300 ppm en une heure de cours et que l'ouverture de fenêtres à l'interclasse ne suffit pas à le faire redescendre sous le niveau réglementaire). La ventilation naturelle par conduit et tirage thermique ne permet pas quant à elle de contrôler le débit, ce qui est incompatible avec un bâtiment peu consommateur.

Nous conservons donc comme référence la référence du calcul RT 2005.

1.3.3 Eau Chaude Sanitaire

Référence de la RT 2005 : système utilisant de l'électricité : référence ballon électrique ; production par un autre système : référence utilisation de la génération de chauffage, et ballon de même volume.

Référence pour l'étude : Production individuelle par chaudière gaz double service. Ceci impose que les chaudières individuelles aient une puissance minimale de 24 kW par logement, ce qui est de toutes façons le cas de la grande majorité des chaudières murales individuelles.

Méthodologie :

- Suppression du système collectif, distribution collective (bouclage) compris. La moitié du coût de référence de la chaudière gaz double service est affecté au poste *Chauffage performant*, l'autre moitié au poste *ECS performante*.
- Distribution ECS en logement conservée (poste *Plomberie*)
- Suppression de l'installation d'ECS solaire (capteurs, liaison solaire, ballon solaire...).

Comptage / sous comptage : compteurs (hors compteurs individuels d'eau froide) supprimés dans la référence. Surcoût affecté au poste *Suivi des performances*.

1.3.4 Plomberie

Double alimentation EF-EC pour les lave-vaisselle : Ce dispositif a pour but de réduire les consommations électriques des lave vaisselle en leur fournissant une eau préchauffée par une génération performante et non par une résistance électrique. Il est supprimé dans la référence : remplacé par une attente simple (identique à celle du lave vaisselle). Surcoût moyen constaté **10 € par logement**.

Economiseurs d'eau : Valeurs par défaut :

- WC avec chasse double commande 3 / 6 l : surcoût de **8,40 € unité**.
- Douchette à turbulence baignoire ou douche : surcoût de **12,20 € unité**.
- Limiteur autorégulé de débit évier / lavabo : surcoût de **7 € / unité**.

1.3.5 Electricité

Equipement des logements :

- La fourniture de lampe basse consommation dans les logements est supprimée dans la référence. Si le coût n'apparaît pas dans le DPGF, on compte **11 €U** (prix moyen constaté).
- Interrupteur commandant la prise de courant audio-visuel : Ce dispositif a pour but de permettre aux utilisateurs d'éteindre complètement les appareils du poste audio-visuel au lieu de les laisser en veille. Il est supprimé dans la référence. Si le coût n'apparaît pas dans le DPGF, on compte **30 € logement** (prix moyen constaté).

- Réglette de salle de bain ou cuisine avec tube fluorescent : référence réglette à incandescence, Prix de référence : **30 €/ unité**.

Eclairage performant des communs : Luminaires de référence :

- Hall, couloirs, escaliers d'un bâtiment de logements : Hublot antivandale, source à incandescence. Coût moyen constaté : **60 €/ unité**.
- Sous sol, locaux techniques : Luminaire étanche avec tube T8 : moyenne constatée **75 €/ unité**.

Eclairage intérieur des bâtiments tertiaires : Luminaires de référence :

- Bureaux, classes, circulation : Carré 60x60 équipé de 4 tubes T8 : prix de référence **100 €/ unité**.
- Sanitaires : Hublot antivandale, source à incandescence, **60 €/ unité**.

Eclairage extérieur :

- Borne classique : **200 €/ unité**.
- Pour un éclairage par mât performant, on le remplace par des bornes en nombre suffisant pour assurer le même service (environ 3 par mât).
- Commande par détecteur de présence : remplacé par une commande par interrupteur.

Eclairage de sécurité :

BAES classique : moyenne constatée : **80 €/ unité** (moyenne entre BAES classiques et étanches).

1.3.6 Installation photovoltaïque

Elle est supprimée et remplacée par la surface correspondante en couverture du projet (tuiles, couverture zinc...). Le surcoût des abergements est pris en compte le cas échéant.

1.3.7 Ascenseur

Ascenseur sans local machine et éclairage asservi :

- Moteur performant à variation de fréquence : surcoût forfaitaire de **3000 €HT**
- Asservissement de l'éclairage au trafic est estimé à **150 €HT**

2 Présentation des projets

2.1 Logement

2.1.1 Revel – OPAC 38

Projet	Intitulé du projet	Construction de 7 logements et 7 garages			
	Localisation	Revel (38)			
	Maître d'Ouvrage	OPAC 38			
	SHAB	486,6 m ²	SHON	549 m ²	
	Nombre de logements	7	Nombre d'étage	R+1	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Atelier DEDALES			
	Economiste	BETREC I.G.			
	BE fluides	GTI			
	AMO HQE	AGEDEN			
Enveloppe	Procédé constructif	Béton, charpente bois. Façade Sud en ossature bois.			
	Compacité	1,77 m ² de surface déperditive par m ² SHAB			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 1,5 m ³ /h/m ²	n50 = 3,7 vol/h	
	Murs extérieurs	ITE 20cm LdV (R=4,88 m ² .K/W) sous enduit ou sous bardage			
		Mur ossature bois : ossature de 14,5cm avec LdV + 6cm LdV continus			
		U =	Respectivement 0,195 et 0,22 W/m ² .K		
	Plancher bas	12cm polyuréthane sur terre plein R=4 m ² .K/W			
		Ue =	0,164 W/m ² .K		
	Toiture	30 cm LdV en faux-plafond donnant sur combles non aménagés			
		U =	0,132 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Balcons désolidarisés en structure métallique			
	Menuiseries	Vitrage	Triple	Cadre	Bois
		Occultations :		Volets battants bois	
Uw =		1,1 W/m ² .K	Surface en tableaux	67 m ²	
A*		A3	Soit 14 % de la SHAB		
Systèmes	Chauffage	Chaudière gaz à condensation modulante			
		Puissance installée	55 kW soit 113 W/m ²		
		Emission	Radiateurs régime 65/55		
	Rafrâchissement	-			
		Puissance installée	- kW		
	Ventilation	Double flux. CTA collective à roue			
		Débit de pointe	1050 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
	ECS	Solaire appoint Gaz			
		Capteurs solaires	12 m ² soit 1,7 m ² par logement		
	Photovoltaïque	Capteurs cristallins : 6,5 kWc			
Performance	Objectif / label	BBC (zone H1c, >400m, soit Cep ≤ 65 kWh _{ep} /m ² _{SHON})			
	Calcul RT 2005	Cep = 65 kWh _{ep} /m ² _{SHON} hors production photovoltaïque			
	Simulation dynamique	Confort d'été uniquement.			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.1.2 Epagny, Jardins République – SOGIMM

Projet	Intitulé du projet	Construction de 51 logements et 4 locaux commerciaux		
	Localisation	Epagny (74)		
	Maître d'Ouvrage	SOGIMM Maurice Monod Constructeur		
	SHAB	4081 m ²	SHON	3394 m ²
	Nombre de logements	51	Nombre d'étage	R+3
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Atelier GALBE		
	Economiste	CE2T Ingénierie		
	BE fluides	ADF – Agence des Fluides		
	AMO HQE	ETAMINE		
Enveloppe	Procédé constructif	Béton, charpente bois		
	Compacité	1,37 m ² de surface déperditive par m ² SHAB		
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 0,10 à 0,77	n50 = 0,50 à 1,89 vol/h
			m ³ /h/m ²	
	Murs extérieurs	ITE polystyrène graphité 16cm R=5 m ² .K/W		
		Terrasse R+3 et Hall : bardage stratifié LdV 10+7,5 (R=5,4 m ² .K/W)		
	U =	Respectivement 0,19 et 0,21 W/m ² .K		
	Plancher bas	Flocage 15cm R=3,19 m ² .K/W		
		U =	0,35 W/m ² .K	
	Toiture	En combles non aménagées : LdR 30cm R=7,5 m ² .K/W		
		Terrasse : Polyuréthane 12cm R=5 m ² .K/W / Terrasse bâtiment C : 24 cm		
	U =	Respectivement 0,13 , 0,19 et 0,10 W/m ² .K		
Ponts thermiques	Balcons désolidarisés en structure métallique			
Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre	PVC
	Occultations :	Volets roulants PVC		
	Uw = A*	1,7 W/m ² .K A2	Surface en tableaux	809 m ² Soit 24 % de la SHAB
Systèmes	Chauffage	Chaufferie bois déchiqueté – appoint Gaz		
		Puissance installée	Bois : 220 kW – Gaz 300 kW soit 127 W/m ²	
		Emission	Radiateurs basse température	
	Rafrâchissement	-		
		Puissance installée	- kW	
	Ventilation	Double flux. Ventilateurs collectifs, échangeurs individuels.		
		Débit de pointe	7830 m ³ /h	Efficacité échangeur
	ECS	Bois appoint Gaz (hors période de chauffe)		
		Capteurs solaires	-	
	Photovoltaïque	-		
Performance	Objectif / label	Minergie et BBC (zone H1c, >400m, soit Cep ≤ 65 kWh _{ep} /m ² _{SHON})		
	Calcul RT 2005	Cep = 63 kWh _{ep} /m ² _{SHON}		
	Simulation dynamique	-		
	Mesures	Campagne de mesure en cours		

2.1.3 Epagny, Le Pérenne – OPAC 74

Projet	Intitulé du projet	Construction de 15 logements			
	Localisation	Epagny (74)			
	Maître d'Ouvrage	OPAC 74			
	SHAB	978 m ²	SHON	1213 m ²	
	Nombre de logements	15	Nombre d'étage	R+3	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Atelier GALBE			
	Economiste	CE2T Ingénierie			
	BE fluides	ADF – Agence des Fluides			
	AMO HQE	-			
Enveloppe	Procédé constructif	Béton, charpente bois			
	Compacité	1,24 m ² de surface déperditive par m ² SHAB			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 0,53 à 1,11 m ³ /h/m ²	n50 = 0,93 à 1,3 vol/h	
	Murs extérieurs	ITE polystyrène graphité 16cm R=5 m ² .K/W			
		Terrasse R+3 et Hall : bardage stratifié LdV 10+7,5 (R=5,4 m ² .K/W)			
		U =	Respectivement 0,19 et 0,21 W/m ² .K		
	Plancher bas	Flocage 15cm R=3,19 m ² .K/W			
		U =	0,35 W/m ² .K		
	Toiture	En combles non aménagées : LdR 30cm R=7,5 m ² .K/W			
		Terrasse : Polyuréthane 12cm R=5 m ² .K/W			
		U =	Respectivement 0,13 et 0,19 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Balcons désolidarisés en structure métallique			
	Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre	PVC
		Occultations :	Volets roulants PVC		
Uw = A*		1,7 W/m ² .K A2	Surface en tableaux	127 m ² Soit 13 % de la SHAB	
Systèmes	Chauffage	Chaudière Gaz à condensation modulante			
		Puissance installée	80 kW soit 82 W/m ²		
		Emission	Radiateurs basse température		
	Rafrâchissement	-			
		Puissance installée	- kW		
	Ventilation	Double flux. Ventilateurs collectifs, échangeurs individuels.			
		Débit de pointe	2020 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
	ECS	Solaire appoint Gaz			
		Capteurs solaires	25 m ² soit 1,7 m ² par logement		
Photovoltaïque	-				
Performance	Objectif / label	BBC (zone H1c, >400m, soit Cep ≤ 65 kWh _{ep} /m ² _{SHON})			
	Calcul RT 2005	Cep = 60 kWh _{ep} /m ² _{SHON}			
	Simulation dynamique	-			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.1.4 Ancône, les Santolines – DAH

Projet	Intitulé du projet	Les Santolines - Construction de 4 logements			
	Localisation	Ancône (26)			
	Maître d'Ouvrage	DAH			
	SHAB	361 m ²	SHON	410 m ²	
	Nombre de logements	4	Nombre d'étage	R+1	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Charles et Evelyne COLOMB			
	Economiste	BETREC I.G.			
	BE fluides	Cabinet O. SIDLER			
	AMO HQE	-			
Enveloppe	Procédé constructif	Béton, charpente bois			
	Compacité	1,85 m ² de surface déperditive par m ² SHAB			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 0,4 m ³ /h/m ²	n50 = 1 vol/h	
	Murs extérieurs	ITE polystyrène 20cm R=5,7 m ² .K/W			
		U =	0,18 W/m ² .K		
	Plancher bas	14 cm polystyrène TH30 sur terre plein (R=4,7 m ² .K/W)			
		Ue =	0,22 W/m ² .K		
	Toiture	40 cm LdV en faux-plafond sous combles non aménagés (R=10 m ² .K/W)			
		U =	0,10 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Balcons désolidarisés en structure métallique			
	Menuiseries	Vitrage	Double au Sud	Cadre	Bois
			Triple ailleurs		
		Occultations :	Volets roulants, volets coulissants bois, brise soleil		
Uw = A*		1,7 / 0,9 W/m ² .K A4	Surface en tableaux	71 m ² Soit 20 % de la SHAB	
Systèmes	Chauffage	Pompe à chaleur eau-eau (forage sur nappe)			
		Puissance installée	12 kW soit 33 W/m ²		
		Emission	Radiateurs (régime 45/35)		
	Rafrâichissement	-			
		Puissance installée	- kW		
	Ventilation	Double flux. CTA collective à plaques			
		Débit de pointe	720 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
	ECS	Solaire appoint par la Pompe à Chaleur			
		Capteurs solaires	6,9 m ² soit 1,7 m ² par logement		
	Photovoltaïque	-			
Performance	Objectif / label	Passif			
	Calcul RT 2005	Cep = 45 kWh _{ep} /m ² _{SHON}			
	Simulation dynamique	-			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.1.5 Bron – ZAC Fort – OPAC 69

Projet	Intitulé du projet	ZAC du Fort de Bron - Construction de 22 logements			
	Localisation	Bron (69)			
	Maître d'Ouvrage	OPAC 69			
	SHAB	1592 m ²	SHON	1965 m ²	
	Nombre de logements	22	Nombre d'étage	R+4	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	UNANIME			
	Economiste	GETCI			
	BE fluides	Cabinet O. SIDLER			
	AMO HQE	-			
Enveloppe	Procédé constructif	Monomur de terre cuite, charpente bois			
	Compacité	1,18 m ² de surface déperditive par m ² SHAB			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 0,4 à 1,3 m ³ /h/m ²	n50 = 1,35 à 1,7 vol/h	
	Murs extérieurs	Monomur de 50cm			
		U =	0,26 W/m ² .K		
	Plancher bas	Flocage 11cm R=2,5 m ² .K/W			
		U =	0,36 W/m ² .K		
	Toiture	30 cm LdV en combles non aménagés (R=7,5 m ² .K/W)			
		12 cm de polyuréthane en toiture terrasse (R=5 m ² .K/W)			
		U =	Respectivement 0,13 et 0,20 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Traitement classique.			
	Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre	PVC
		Occultations :	Volets roulants PVC et brise soleil terre cuite		
Uw =		1,7 W/m ² .K	Surface en tableaux	222 m ²	
A*		A2	Soit 14 % de la SHAB		
Systèmes	Chauffage	Chaudières Gaz condensation modulantes			
		Puissance installée	60 + 60 kW soit 75 W/m ²		
		Emission	Radiateurs (régime 50/40)		
	Rafrâichissement	-			
		Puissance installée	- kW		
	Ventilation	Double flux. CTA collective à roues			
		Débit de pointe	3600 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
	ECS	Gaz			
		Capteurs solaires	-		
	Photovoltaïque	-			
Performance	Objectif / label	THPE RT2000 (Cep ref -20%)			
	Calcul RT 2005	Cep = 101 kWh _{ep} /m ² _{SHON} (C du calcul RT 2000 rapporté à la SHON)			
	Simulation dynamique	-			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.1.6 Tour de Salvagny – OPAC 69

Projet	Intitulé du projet	Place du Marché - Construction de 29 logements et 7 commerces			
	Localisation	La Tour de Salvagny			
	Maître d'Ouvrage	OPAC 69			
	SHAB	1997 m ²	SHON	2658 m ²	
	Nombre de logements	29	Nombre d'étage	R+3	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Atelier T. ROCHE			
	Economiste	SLETEC Ingenierie			
	BE fluides	Cabinet O. SIDLER			
	AMO HQE	TRIBU			
Enveloppe	Procédé constructif	Monomur de terre cuite, charpente bois			
	Compacité	1,84 m ² de surface déperditive par m ² SHAB			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	Non connu	Non connu	
	Murs extérieurs	Monomur de 50cm			
		U =	0,26 W/m ² .K		
	Plancher bas	Flocage 11cm R=2,4m ² .K/W			
		Ue =	0,36 W/m ² .K		
	Toiture	30 cm LdV en faux-plafond donnant en combles			
		Terrasse : 12cm de polyuréthane R=5m ² .K/W			
		U =	Respectivement 0,13 et 0,20 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Traitement classique.			
	Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre	Logements PVC 274m ² Commerces Alu 237m ²
		Occlusions :	Volets roulants PVC et pergolas		
		Véranda	Véranda chaude orientation principale Sud		
Uw =		1,7 W/m ² .K	Surface en tableaux	511 m ² avec commerces	
A*		Non connu		Soit 26 % de la SHAB	
Systèmes	Chauffage	Chaudière gaz à condensation modulante			
		Puissance installée	120 kW (+87 kW en secours) soit 104 W/m ²		
		Emission	Radiateurs (régime 50/40)		
	Rafraîchissement	-			
		Puissance installée	- kW		
	Ventilation	Double flux. 3 CTA collectives à roue			
		Débit de pointe	4380 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
	ECS	Solaire appoint Gaz			
		Capteurs solaires	45 m ² soit 1,5 m ² par logement		
Photovoltaïque	-				
Performance	Objectif / label	THPE (Cep ref -20%)			
	Calcul RT 2005	Cep = 73 kWh _{ep} /m ² _{SHON}			
	Simulation dynamique	-			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.1.7 Vaugneray – Les Visitandines – Commune

Projet	Intitulé du projet	Réhabilitation du couvent des Visitandines en 28 logements			
	Localisation	Vaugneray (69)			
	Maître d'Ouvrage	Commune de Vaugneray			
	SHAB	1829 m ²	SHON	2195 m ²	
	Nombre de logements	28	Nombre d'étage	R+2	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Luca LOTTI			
	Economiste	BETEREM Rhône Alpes Centre			
	BE fluides	BETEREM Rhône Alpes Centre			
	AMO HQE	-			
Enveloppe	Procédé constructif	Réhabilitation			
	Compacité	2,19 m ² de surface déperditive par m ² SHAB			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	Non connu	Non connu	
	Murs extérieurs	Principalement ITI polystyrène 120mm R=3,1 (1451 m ²) ITE polystyrène 150 mm R=3,9 sous enduit hydraulique			
		U =	Respectivement 0,28 et 0,23 W/m ² .K		
	Plancher bas	11,5 cm de polystyrène en vide sanitaire R=3,35m ² .K/W			
		Ue =	0,15 W/m ² .K		
	Toiture	14cm de polyuréthane R=5,8m ² .K/W			
		U =	0,17 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Traitement classique.			
	Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre	Bois
		Occultations :		Volets pliants bois	
		Uw =	1,6 W/m ² .K	Surface en tableaux	497 m ²
	Systèmes	Chauffage	Chaudière Bois + appoint Gaz		
Puissance installée			Bois 80 kW – Gaz 120 kW soit 109 W/m ²		
Emission			Radiateurs (régime 80/60)		
Rafrâichissement		-			
		Puissance installée	- kW		
Ventilation		Simple flux hygro B.			
		Débit de pointe	1050 m ³ /h	Efficacité échangeur	-
ECS		Solaire, appoint par une chaudière Gaz dédiée de 70 kW			
		Capteurs solaires	40 m ² soit 1,4 m ² par logement		
Photovoltaïque		-			
Performance	Objectif / label	BBC rénovation (Cep < 96 kWh _{ep} /m ² _{SHON})			
	Calcul RT 2005	Cep = 71 kWh _{ep} /m ² _{SHON}			
	Simulation dynamique	-			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.2 Tertiaire

2.2.1 Grenoble – LFI

Projet	Intitulé du projet	Immeuble de bureaux innovants à énergie positive			
	Localisation	ZAC de Bonne – Grenoble (38)			
	Maître d’Ouvrage	LFI			
	SU	1599 m ²	SHON	1865 m ²	
	Nombre de logements	-	Nombre d’étage	R+6	
Equipe de maîtrise d’oeuvre	Architecte	CHARON et RAMPILLON			
	Maître d’œuvre chantier	HTC			
	BE fluides	CHOULET			
	AMO HQE	ADDENDA			
Enveloppe	Procédé constructif	Béton – ossature bois au RdC et mezzanine			
	Compacité	1,33 m ² de surface déperditive par m ² SU			
	Etanchéité à l’air	Test d’infiltrométrie	I4 = 0,57 m ³ /h/m ²	n50 = 0,86 vol/h	
		Murs extérieurs	ITE laine de verre 200mm (λ=0,032) sous bardage architectural Ossature bois : LdV 145 + 200mm LdV extérieure sous bardage		
	Plancher bas	U =	0,15 W/m ² .K		
		Terre plein : 7cm polystyrène (R=2,4 m ² .K/W) Sur LNC : 16cm polystyrène (R=6,7 m ² .K/W)	Ue = Respectivement 0,21 et 0,14 W/m ² .K		
	Toiture	Terrasse : 24cm polyuréthane	U = 0,10 W/m ² .K		
		Ponts thermiques	Traitement classique – rupteurs de pont thermique au R+6		
	Menuiseries	Vitrage	Triple	Cadre	Bois alu isolée
		Occultations :	Brise soleil orientable, bouchon thermique		
		Uw =	0,85 W/m ² .K	Surface en tableaux	236 m ²
		A* A4	Soit 18 % de la SU		
	Systèmes	Chauffage	Pompe à chaleur eau-eau (forage sur nappe)		
Puissance installée			30 kW soit 22 W/m ²		
Emission			Batterie sur le soufflage d’air		
Rafraîchissement		Géocooling (rafraîchissement passif sur eau de nappe)			
		Puissance installée	- kW		
Ventilation		Double flux. CTA collective à roue			
		Débit de pointe	5680 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
ECS		Pas d’ECS.			
		Capteurs solaires	-		
Photovoltaïque		Capteurs cristallins : 48,3 kWc			
Performance	Objectif / label	Bâtiment à énergie positive			
	Calcul RT 2005	Cep = 21 kWh _{ep} /m ² _{SHON} hors Photovoltaïque, -47 kWh _{ep} /m ² _{SHON} avec.			
	Simulation dynamique	Besoin de chauffage 25 kWh/m ²			
		Consommations tous usages estimée : 31 à 42 kWh _{ep} /m ² _{SU} Production photovoltaïque : 36 kWh _{ep} /m ² _{SU}			
Mesures	Campagne de mesure en cours				

2.2.2 ZAC Thiers – UTEI

Projet	Intitulé du projet	Construction d'un immeuble tertiaire – ZAC Thiers			
	Localisation	Lyon (69)			
	Maître d'Ouvrage	UTEI			
	SU	4215 m ²	SHON	4515 m ²	
	Nombre de logements	-	Nombre d'étage	R+6	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	AUDART – FAVARO Associés			
	Economiste	GEC Rhône Alpes			
	BE fluides	ENERPOL			
	AMO HQE	ENERPOL			
Enveloppe	Procédé constructif	Béton			
	Compacité	1,11 m ² de surface déperditive par m ² SU			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 0,62 m ³ /h/m ²	n50 = 1,02 vol/h	
	Murs extérieurs	ITE polystyrène sous bardage architectural			
		U =	0,23 W/m ² .K		
	Plancher bas	Sur parking : PSE 11,5 cm (R=2,55 m ² .K/W)			
		Sur LNC : flocage 8 cm (R=2 m ² .K/W)			
	Toiture	Terrasse : 15cm de polyuréthane (R=5 m ² .K/W)			
		U =	0,19 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Traitement classique.			
	Menuiseries	Vitrage	Double + store + simple	Cadre	Bois alu
		Occultations :		Stores inclus dans les menuiseries	
		U _w =	1,5 W/m ² .K	Surface en tableaux	722 m ²
A*		A3	Soit 17 % de la SU		
Systèmes	Chauffage	Sous station de chauffage urbain			
		Puissance installée	332 kW soit 79 W/m ²		
		Emission	Poutres froides, ventilo convecteurs, batterie		
	Rafrâchissement	Sous station de réseau de froid urbain			
		Puissance installée	437 kW soit 104 W/m ²		
	Ventilation	Double flux. CTA collective à roue.			
		Extraction simple flux des sanitaires.			
	ECS	Débit de pointe	VDF 15 000 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
			VSF 870 m ³ /h		-
	Photovoltaïque	Ballons électriques décentralisés de 15 litres.			
Capteurs solaires		-			
Performance	Objectif / label	BBC : Cep < Cep ref – 50%			
	Calcul RT 2005	Cep = 59 kWh _{ep} /m ² _{SHON}			
	Simulation dynamique	-			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.3 Bâtiment d'enseignement

2.3.1 Ecole – Saint Christo en Jarez

Projet	Intitulé du projet	Construction d'une école publique de 6 classes			
	Localisation	Saint Christo en Jarez (42)			
	Maître d'Ouvrage	Commune de Saint Christo en Jarez			
	SU	1080 m ²	SHON	1080 m ²	
	Nombre de logements	-	Nombre d'étage	RdC	
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	Fabienne DUPUY POULAT			
	Economiste	Cabinet PH MASSARDIER			
	BE fluides	M2B			
	BE HQE	TRIBU			
Enveloppe	Procédé constructif	Murs ossature bois et agglo.			
	Compacité	NC			
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 3,5 m ³ /h/m ²	n50 = 7,5 vol/h	
	Murs extérieurs	Ossature bois : LdR 16 cm dans l'ossature (R=4,55 m ² .K/W) + 10cm LdV en doublage intérieur (R=3,1 m ² .K/W)			
		Murs agglo : 20cm LdV intérieure (R=6,3 m ² .K/W)			
		U =	Respectivement 0,17 et 0,16 W/m ² .K		
	Plancher bas	Sur VS / LNC : LdR / PSE 13cm (R=3,6 m ² .K/W) + R=2,1 sous chape			
		Sur terre plein : 7cm PSE (R=2 m ² .K/W) + R=2,1 sous chape			
		U =	0,16 W/m ² .K		
	Toiture	Terrasse 10cm LdR + 20cm LdV (R=8.15 m ² .K/W)			
		Rampants 12cm LdR sur bac acier + 28cm LdV sous bac (R=10 m ² .K/W)			
		U =	Respectivement 0,12 et 0,10 W/m ² .K		
	Ponts thermiques	Traitement classique.			
Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre	Bois	
	Occultations :	Brise soleil, stores intérieurs ou extérieurs			
	Uw = A*	1,6 W/m ² .K A3	Surface en tableaux	173 m ² Soit 16 % de la SU	
Systèmes	Chauffage	Sous station de chauffage urbain (réseau de chaleur bois)			
		Puissance installée	115 kW soit 111 W/m ²		
		Emission	Plancher chauffant et appoint ponctuel radiateur		
	Rafraîchissement	-			
		Puissance installée	-		
	Ventilation	Double flux. 2 CTA à roue. Extraction simple flux des sanitaires.			
		Débit de pointe	VDF 5 250 m ³ /h	Efficacité échangeur	90%
			VSF 190 m ³ /h		-
	ECS	Ballons électriques et bouclage			
		Capteurs solaires	-		
Photovoltaïque	Membrane d'étanchéité photovoltaïque amorphe : 22,8 kWc				
Performance	Objectif / label	BBC : Cep < Cref – 50%			
	Calcul RT 2005	Cep = 95 kWh _{ep} /m ² _{SHON} hors Photovoltaïque, 40 kWh _{ep} /m ² _{SHON} avec.			
	Simulation dynamique	NC			
	Mesures	Campagne de mesure en cours			

2.3.2 Crèche – Montrevel

Projet	Intitulé du projet	Construction d'un pôle multi-accueil et centre de loisir		
	Localisation	Montrevel-en-Bresse (01)		
	Maître d'Ouvrage	Communauté de Communes de Montrevel-en-Bresse		
	SU	1608 m ²	SHON	1845 m ²
	Nombre de logements	-	Nombre d'étage	R+1
Equipe de maîtrise d'oeuvre	Architecte	MEGARD Architecture		
	Economiste	ECPI		
	BE fluides	FLUITEC		
	BE HQE	CSD Azur		
Enveloppe	Procédé constructif	Monomur de terre cuite, ossature bois		
	Compacité	1,79 m ² de surface déperditive par m ² SU		
	Etanchéité à l'air	Test d'infiltrométrie	I4 = 0,48m ³ /h/m ²	n50 = 1,18 vol/h
	Murs extérieurs	Monomur 37,5 - Ossature bois : Ouate de cellulose projetée 12cm + Fibre de bois 2cm + bardage douglas thermos huilé		
		U =	Respectivement 0,35 et 0,33 W/m ² .K	
	Plancher bas	Sur local non chauffé : PSE 10cm (R=3,58 m ² .K/W) + R=2 sous chape		
		U =	0,27 W/m ² .K	
	Toiture	Charpente : 25cm de ouate de cellulose (R=5,95 m ² .K/W)		
		Terrasse végétalisée : verre cellulaire 10cm (R=2 m ² .K/W)		
		U =	Respectivement 0,28 et 0,37 W/m ² .K	
	Ponts thermiques	Traitement classique.		
	Menuiseries	Vitrage	Double	Cadre
Occultations :		Store extérieur à lames orientables ou en toile		
Uw = A*		1,7 W/m ² .K A3	Surface en tableaux	449 m ² Soit 28 % de la SU
Systèmes	Chauffage	Chaudière Gaz à condensation modulante		
		Puissance installée	100 kW soit 62 W/m ²	
		Emission	Plancher chauffant	
	Rafrâchissement	-		
		Puissance installée	-	
	Ventilation	Simple flux. Prise d'air par un puits canadien en béton.		
		Débit de pointe	9765 m ³ /h	Efficacité échangeur
	ECS	Ballons électriques.		
		Capteurs solaires	-	
	Photovoltaïque	Capteurs cristallins : 8,2 kWc		
Performance	Objectif / label	Cep < Cref – 40%		
	Calcul RT 2005	Cep = 108 kWh _{ep} /m ² _{SHON} hors Photovoltaïque		
	Simulation dynamique	NC		
	Mesures	Campagne de mesure en cours		

3 Résultats de l'étude

NB : à partir de ce point du rapport, nous avons classé les projets par type (logements, bureaux, bâtiments d'enseignement) et par ordre décroissant de Cep hors installation photovoltaïque.

3.1 Analyse poste par poste – lots architecturaux

3.1.1 Isolation des murs

Tableau 1 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Surinvestissement en € / m ² SHON	48,5 €	63,8 €	6,1 €	57,6 €	35,5 €	19,9 €	49,0 €	13,3 €	27,0 €	36,2 €	23,7 €
Coût affecté au Choix architectural	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	7,4 €	3,0 €	0,0 €	141,5 €	123,2 €	0,0 €	5,9 €

Justification des coûts affectés comme *Choix architectural* :

- Jardin République : Petite surface en bardage stratifié remplacé par ITE courante ;
- Le Pérenne : Petite surface en bardage stratifié remplacé par ITE courante ;
- ZAC Thiers : Bardage architectural remplacé par le bardage "Fréquence" du projet LFI ;
- LFI : Bardage architectural remplacé par le bardage "Fréquence". Par ailleurs la référence est une ITI sur voile béton et non une façade rideau. Voir la note à ce sujet page 54 ;
- Montrevel : Surcoût du monomur de 37,5 cm injustifié thermiquement car moins performant que la référence.

Analyse par typologie d'isolation

Dans ce qui suit, on présente la performance U des parois en W/m².K. Celle-ci est plus pertinente que la résistance thermique des isolants car elle intègre les ponts thermiques structurels (notamment dans le cas de l'ossature bois). Le cas échéant nous avons recalculé les valeurs qui n'intégraient pas ces ponts thermiques en utilisant le document *Détermination et calcul des ponts thermiques linéiques et intégrés des constructions bois* publié par le CSTB.

On présente également la valeur U dégradée avec les ponts thermiques de type L9 (PT L9) qui sont les ponts thermiques de liaison plancher intermédiaire – mur extérieur, et les ponts thermiques de refend – mur extérieur, **dont la valeur est intrinsèquement liée au type d'isolation**. Aussi il est plus pertinent de comparer les performances globales du mur avec ses ponts thermiques. On tient ainsi compte notamment des ponts thermiques importants inévitables en isolation par l'intérieur (sauf mise en œuvre de rupteurs de pont thermique, qui sont très chers).

Le calcul utilisé est le suivant :

$$U_{\text{dégradé}} = U + \frac{\psi_{L9} \times \text{Linéaire}_{L9}}{\text{Surface}_{\text{Mur}}}$$

Tableau 2 : détail pour l'isolation par l'extérieur :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Type 1			0,23	0,195	0,19	0,19	0,18	0,23	0,15		
U du mur en W/m ² .K			0,25	0,22	0,21	0,21	0,21	0,25	0,154		
U dégradé avec les PT L9			79,4 €	78,6 €	95,9 €	75,2 €	107,0 €	371,1 €	81,1 €		
Coût au m ² de mur			79,4 € *1	52,9 €	73,1 €	50,4 €	82,8 €	336,1 €	54,9 €		
+ moins value béton / enduit			PSE	LdV	PSE	PSE	PSE	PSE	LdV		
Isolant			Enduit	Enduit	Enduit	Enduit	Enduit	Architectural	Stratifié		
Parement			Petite surface						Bardage		
Remarque									"Fréquence"		
Type 2					0,21	0,21			0,15		
U du mur en W/m ² .K					0,23	0,23			0,154		
U dégradé avec les PT L9					160,7 €	225,6 €			312,4 €		
Coût au m ² de mur					144,0 €	209,2 €			286,2 €		
+ moins value béton / enduit					LdV	LdV			LdV		
Isolant					Stratifié	Stratifié			Architectural		
Parement					Petite surface	Petite surface					
Remarque											

*1 Seule une petite surface est concernée – comme il s'agit d'une rénovation le choix de l'ITE n'impacte pas le gros œuvre.

NB : la méthodologie de prise en compte des moins values sur le béton (dalle, mur, acier) est décrite au paragraphe 1.2.2.

Tableau 3 : détail pour les murs à ossature bois :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Type 1				0,22					0,15	0,17	0,33
U du mur en W/m ² .K				0,22					0,15	0,17	0,33
U dégradé avec les PT L9				190,1 €					341,0 €	222,4 €	216,8 €
Coût au m ² de mur				132,0 €					282,9 €	164,3 €	158,7 €
+ moins value béton / enduit				LdV					LdV	LdV	Ouate
Isolant				Mélèze brut					Architectural	Mélèze	Douglas
Parement				Façade Sud							
Remarque											

NB : la moins value béton / enduit correspond au mur béton de référence avec son enduit extérieur. En effet le mur à ossature bois assure à la fois la fonction structurelle du mur (porter les dalles) et la fonction d'isolation.

Tableau 4 : détail pour le Monomur :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Type 1											
U du mur en W/m ² .K	0,26	0,26									0,35
U dégradé avec les PT L9	0,31	0,30									0,39
Coût au m ² de mur	181,5 €	189,9 €									120,6 €
+ moins value béton / enduit	123,4 €	131,8 €									62,5 €
Nature	Terre cuite	Terre cuite									Terre cuite
Epaisseur	50cm	50cm									37,5 €
Remarque											

NB : la moins value béton / enduit correspond au mur béton de référence avec son enduit extérieur. En effet le Monomur assure à la fois la fonction structurelle du mur (porter le bâtiment) et la fonction d'isolation.

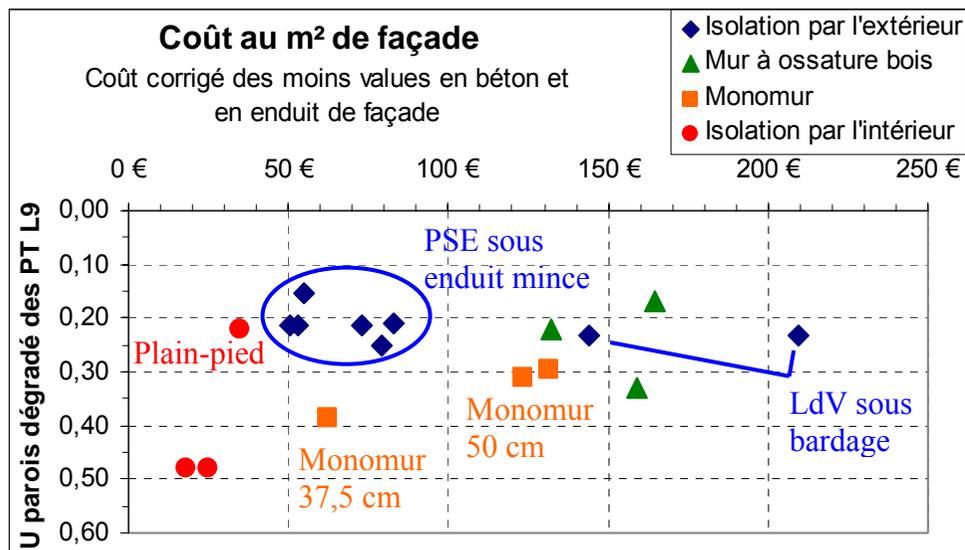
Malgré la présence de planelles en nez de dalle, les ponts thermiques de type L9 dégradent la performance globale du mur de façon non négligeable.

Tableau 5 : détail pour l'isolation par l'intérieur :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Type 1											
U du mur en W/m ² .K			0,28							0,16	
U dégradé avec les PT L9			0,48							0,22	
Coût au m ² de mur			18,0 €							34,7 €	
Isolant			PSE							LdV	
Remarque											
Type 2											
U du mur en W/m ² .K			0,28								
U dégradé avec les PT L9			0,48								
Coût au m ² de mur			25,0 €								
Isolant			LdV								
Remarque											

On note que les ponts thermiques de type L9 dégradent particulièrement les performances de ce type de mur.

Graphique synthétique :



Graphique 3 : performances des murs extérieurs en fonction de leur prix pour différents types d'isolation

de voile béton permet par ailleurs une économie sur les fondations pour un projet complètement en ossature bois. Une étude économique à part entière serait nécessaire pour comparer ce procédé constructif aux procédés classiques.

- L'isolation par l'extérieur permet d'atteindre d'excellentes performances, et de traiter efficacement les ponts thermiques de type L9, ainsi que les ponts thermiques Refend – Mur (non pris en compte dans la dégradation du U). Les niveaux de prix sont très variables : de 50 €/m² pour du PSE sous enduit (projet *Le Pérenne*) à 286 €/m² pour du PSE sous bardage architectural (projet *LFI*). **On note que le prix est beaucoup plus influencé par la nature du parement que par la performance thermique.**

Il nous semble également que ces niveaux de prix reflètent encore un **coût d'apprentissage** pour toutes les techniques d'isolation relativement nouvelles en France que sont les murs à ossature bois et le monomur de 50cm [A noter que l'INEED, premier bâtiment en France à avoir utilisé du monomur de 50 cm n'a pas présenté globalement de surcoût : en valeur Février 2005, le coût total était de 1057 € HT/m²SHON pour un bâtiment de bureaux. C'était le prix du marché]. Les coûts présentés au m² de façade seront amenés à baisser dans les années à venir.

On observe que :

- L'isolation par l'intérieur ne permet pas d'atteindre des performances élevées. Le seul projet présentant une performance globale comparable aux projets en isolation par l'extérieur est le projet *St Christo*, qui est de plain-pied (donc pas de pont thermique L9, seulement des ponts thermiques de refend) et qui présente un niveau d'isolation important (20cm). En revanche, son coût est faible.
- Les performances atteintes avec le Monomur sont limitées, même en 50cm d'épaisseur. Les ponts thermiques L9 restent assez impactant malgré la présence de planelles en bout de dalle. Les prix observés sont élevés, ce qui est en grande partie dû au caractère innovant de l'utilisation d'une telle épaisseur en France, mais ils devraient chuter.
- Les murs à ossature bois permettent d'atteindre d'excellentes performances (même en tenant compte des ponts thermiques structurels), et ce en conservant une épaisseur de mur très raisonnable (30cm pour atteindre U=0,17 W/m².K sur le projet *St Christo*). Le coût en est élevé, mais les exemples représentés dans cette étude concernent des surfaces faibles en ossature bois. A noter que l'absence

Remarque complémentaire : dans le cas des maisons individuelles (hors du cadre de la présente étude), l'ossature bois permet de se passer de dalle intermédiaire béton, ce qui génère des économies importantes sur le gros œuvre et les fondations. Cependant la perte de cette inertie peut poser des problèmes en termes de confort d'été.

Impact de la compacité

Comme on le voit dans la description des projets, la compacité, définie comme le rapport de la surface de déperditions à la SHab, est très variable d'un projet à l'autre. Ceci est dû à trois phénomènes :

- Plus un projet est petit, moins il est compact. Ceci découle de la définition de la compacité que nous avons choisie. Quoi qu'on fasse, une maison individuelle sera toujours moins compacte qu'un immeuble collectif. Elle aura toujours plus de surfaces déperditives par m² habitable que le collectif.
- A taille de projet égale, les projet de plain-pied sont nettement moins compacts que les projets sur plusieurs étages. Ceci doit nous inciter à éviter à tout prix les projets de plain-pied. Dans le cas des ERP (établissement recevant du public) il est très important de trouver des solutions pour permettre l'accès aux personnes à mobilité réduite (utilisation de la pente naturelle du terrain, rampe d'accès, demi-niveaux, et en dernier recours ascenseur...)
- Les décrochés de façade, lorsqu'ils sont trop nombreux, détériorent la compacité assez rapidement. Il est important de trouver un équilibre entre architecture et compacité. On note d'ailleurs que c'est uniquement l'enveloppe chauffée qui doit être compacte. On peut envisager de laisser des locaux non chauffés en décroché (ascenseur, escalier, coursives, locaux techniques...).

Nous insistons sur ce point car **la compacité a un impact très important sur le coût d'un projet. A performances égales, un projet peu compact coûtera beaucoup plus cher :**

- On devra mettre en œuvre une surface plus importante de murs pour la même surface habitable (impact sur le gros œuvre et les fondations) ;
- Pour atteindre les mêmes performances, on devra mettre en œuvre des niveaux d'isolation plus importants, voire des installations techniques plus performantes.

Tableau 6 : impact de la compacité sur les niveaux de prix d'isolation des murs :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Compacité	1,18	1,84	2,19	1,77	1,37	1,24	1,85	1,11	1,33	NC	1,79
Surcoût par rapport à une compacité de 1,18 m ² déperditif par m ² SHON	0,0 €	22,9 €	2,8 €	19,2 €	4,9 €	1,0 €	17,7 €	0,0 €	3,0 €	NC	8,0 €
Surcoût restant (au m ² SHON)	48,5 €	40,9 €	3,3 €	38,4 €	30,6 €	19,0 €	31,3 €	13,3 €	23,9 €	36,2 €	15,6 €

La méthode utilisée ici est la suivante : $Coût_corrigé = Coût \times \frac{Compacité_projet}{Compacité_1,18}$

NB : ce calcul ne prend en compte ni la nécessité d'isoler plus pour atteindre une performance donnée, ni le surcoût induit sur le gros œuvre et les fondations.

3.1.2 Isolation de la toiture

Tableau 7 : Résultat global :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Résistance thermique en m ² .K/W											
- En combles	7,5	7,5		7,3	7,5	7,5	10,0				5,95 *4
Prix au m ² de paroi	17,3 €	11,0 €		37,9 € *1	16,1 €	11,3 €	20,6 €				17,2 €
- En toiture terrasse	5,0	4 / 6,4	5,8		5 / 10	5,0		5,0	8,8	10,2 *3	2,0 *5
Prix au m ² de paroi *2	80,3 €	35,8 / 46,2 €	38,0 €		53,9 / 83,2 €	60,4 €		58,1 €	85,0 €	39,2 €	158,4 €
Surinvestissement en € / m ² SHON	0,1 €	1,3 €	2,3 €	1,1 €	2,7 €	0,9 €	8,3 €	2,1 €	3,2 €	8,2 €	0,5 €

*1 Faux plafond compris

*2 étanchéité comprise

*3 R=3,2 sur bac acier sous étanchéité + 7 sur faux plafond

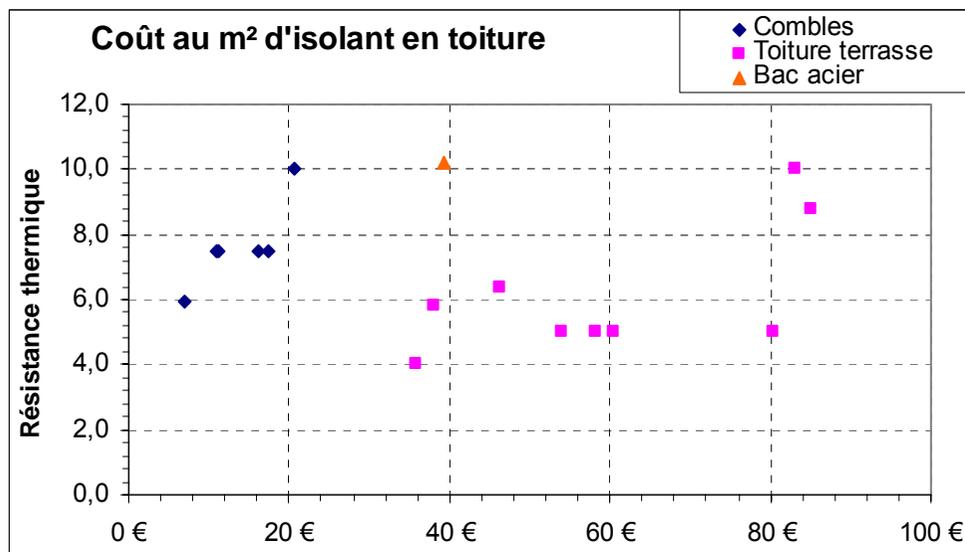
*4 ouate de cellulose soufflée

*5 verre cellulaire

On observe que :

- L'isolation de la toiture n'a pas un impact économique important. C'est pourquoi il n'est pas rare de rencontrer sur les projets performants des épaisseurs d'isolants importantes, surtout en combles.
- Le prix isolant + étanchéité en toiture terrasse est clairement plus élevé que pour les isolants en combles. Lorsque la décomposition du prix est indiquée dans les CCTP on voit que l'isolant pèse un peu plus de 50% du prix. Le prix de l'étanchéité est très variable notamment en fonction de la complexité des relevés à effectuer.
- La compressibilité pour les isolants en toiture terrasse accessible n'est pas bloquante, puisqu'on observe des résistances thermiques jusqu'à 10 m².K/W.
- Pour la toiture végétalisée du projet *Montrevel*, il a été choisi d'utiliser du verre cellulaire, qui est un isolant à très forte compressibilité, mais cher. Il existe des solutions avec une compressibilité suffisante pour cette application à moindre coût.

Graphique 4 : résistance thermique des isolants en toiture en fonction de leur prix au m²



3.1.3 Isolation du plancher bas

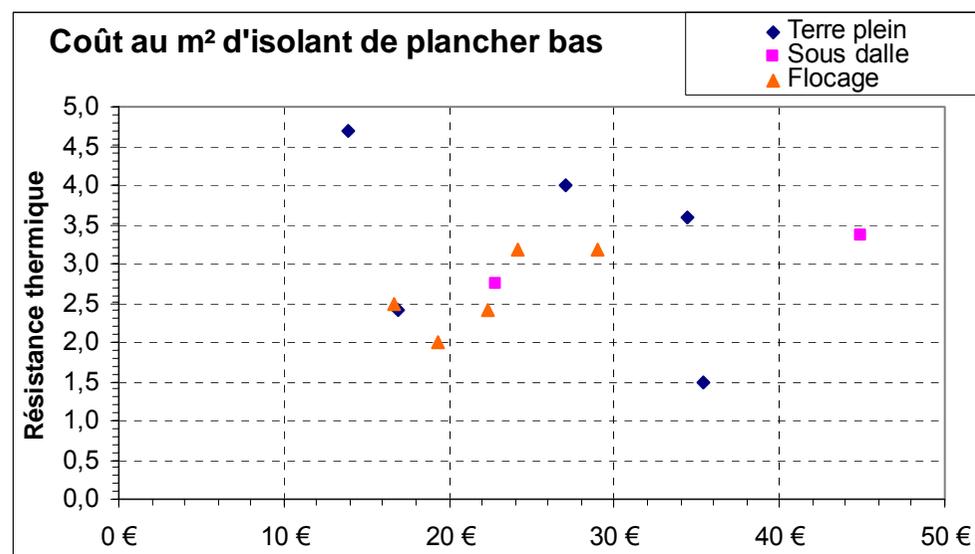
Tableau 8 : Résultat global :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Résistance thermique en m ² .K/W											
- En terre plein				4,0			4,7		2,4 *3	3,6 *3	1,5 *3
Prix au m ² de paroi				27,0 €			13,9 €		16,9 €	34,4 €	35,4 €
- Sous dalle		2,8	3,4					2,6	6,6 *3	3,6 *3	3,6 *3
Prix au m ² de paroi		22,8 €	44,9 €					NC	280,6 € *1	69,4 € *2	NC
- Sous dalle - flocage	2,5	2,4			3,2	3,2		2,0			
Prix au m ² de paroi	16,7 €	22,3 €			24,2 €	29,0 €		19,3 €			
Surinvestissement en € / m ² SHON	0,0 €	0,8 €	0,9 €	5,7 €	0,7 €	0,8 €	3,3 €	0,0 €	4,4 €	5,3 €	0,8 €

*1 Prolongement de l'isolation par l'extérieur sous une dalle en surplomb

*2 Coût important dû à la présence d'un parement type fibres

*3 Hors isolant du plancher chauffant, compté au poste Emission performante



Graphique 5 : résistance thermique des isolants de plancher bas en fonction de leur prix au m²

Les seuls projets pour lesquels ce poste dépasse 2 €/m² sont :

- *LFI* où une part de l'isolation est en fait un retour d'isolation par l'extérieur en sous face de dalle en surplomb, d'où un coût au m² d'isolant très important ;
- *Revel* et *Santolines* qui sont des bâtiments en R+1 et *St Christo* qui est de plain-pied. Pour ces derniers projets avec peu d'étages l'impact économique rapporté à la SHON est logiquement plus important que pour les autres projets.

L'isolation du plancher bas n'a donc pas un impact économique majeur. Ceci nous conduit à encourager une forte isolation du plancher bas.

Les maîtres d'œuvre hésitent souvent à préconiser des isolants très performants au niveau du plancher bas. En effet, la norme du calcul de déperdition et du calcul RT incite à peu isoler les terre plein, en supposant que les échanges thermiques sont plus faibles avec le sol qu'avec l'air extérieur. On peut douter de la réalité de ce phénomène, que l'on ne constate pas en simulation dynamique même avec des modèles les plus complets.

Le fait que l'isolation du plancher bas n'est pas un poste économique majeur devrait permettre de se décomplexer sur l'utilisation d'isolations importantes. **A performance égale, il apparaît qu'il est plus économique de bien isoler le plancher bas que de chercher à compenser un plancher bas peu isolé par une surisolation des murs.**

3.1.4 Traitement des ponts thermiques

Tableau 9 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Traitement classique											
Surinvestissement en € / m ² SHON	0,00 €	0,04 €	1,99 €	4,98 €	1,86 €	1,67 €	0,82 €	0,02 €	3,29 €	0,00 €	1,07 €
Balcons désolidarisés											
Linéaire de pont thermique évité				45,5	175,0	40,0	11,1				
Impact sur le Ubat				-18%	-8%	-6%	-4%				
Surinvestissement en € / m ² SHON				23,2 €	53,6 €	27,8 €	22,1 €				

Le traitement des ponts thermiques ne génère pas des surcoûts importants, sauf pour les balcons désolidarisés. Il s'agit en l'occurrence de balcons autoportés en structure généralement métallique.

Il nous semble que l'impact économique des balcons désolidarisés est trop important par rapport au gain énergétique qu'ils permettent.

Il convient d'ajouter une nuance pour le projet *Revel*, où l'impact sur le Ubat n'est pas négligeable pour un surcoût *relativement* faible. En effet il s'agit de coursives présentant une grande longueur, et située au niveau R+1 uniquement, donc nécessitant une structure légère et peu de fondations.

On note également que ces balcons désolidarisés présentent un intérêt architectural par la liberté qu'apporte la structure autoportée. En particulier ils permettent de créer des balcons d'une surface importante qu'il serait sans doute plus difficile à réaliser avec une dalle béton en porte à faux.



Photo 1 : Exemple de balcon autoporté
(projet Jardin République à Epagny)

Remarque complémentaire : les projets étudiés ne comportaient pas de balcon semi-désolidarisé en béton avec un isolant traversant la dalle au droit des murs. La rupture du pont thermique n'est pas parfaite, car il subsiste des points d'accroche, et le gain thermique n'est pas proportionnel au ratio de linéaire d'isolant sur le linéaire total à cause des concentrations de flux. Cependant leur surcoût en est quasiment nul par rapport à un balcon classique.

3.1.5 Menuiseries performantes, portes isolantes, étanchéité à l'air

Tableau 10 : Résultat global :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Surface de fenêtre rapporté à la SHAB	14%	26%	22%	14%	24%	13%	20%	17%	17%	16%	28%
Surinvestissement en € / m ² SHON											
Menuiseries extérieures	0,0 €	8,0 €	0,0 €	7,5 €	0,0 €	0,0 €	54,9 €	0,0 €	17,4 €	0,0 €	0,0 €
Bouchon thermique									133,4 €		
Véranda bioclimatique		3,0 €									
Portes isolantes	0,0 €	0,3 €	2,5 €	1,7 €	1,9 €	0,0 €	2,0 €	0,0 €	3,9 €	0,0 €	0,0 €
Etanchéité à l'air	0,2 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	5,2 € *1	0,0 €	2,9 €
Surcoût affecté au poste QEB pour les menuiseries en bois	0,0 €	0,0 €	34,0 €	18,3 €	0,0 €	0,0 €	26,0 €	27,2 €	14,7 €	7,7 €	28,4 €

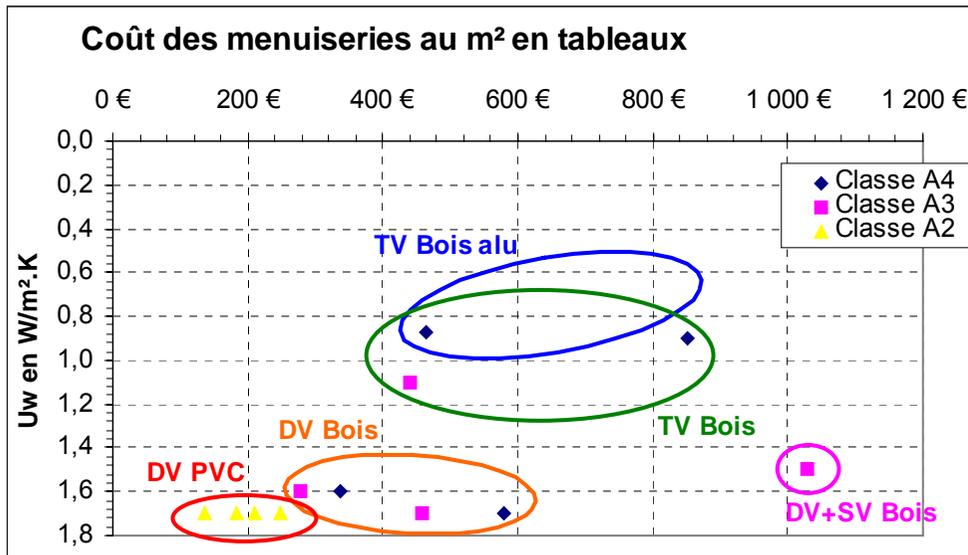
*1 : dont la création d'un sas pour l'ascenseur

Rappel : il est compté un surinvestissement nul pour les projets dont les menuiseries ont des performances thermiques égales ou moins performantes que celles de la référence. D'autre part, comme expliqué au paragraphe 1.2.4, on a décompté séparément le surcoût « thermique » des menuiseries performantes et le surcoût « environnemental » des cadres en bois.

Détail des Menuiseries extérieures : Tableau 11 :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
SHON en m ²	1965 m ²	2658 m ²	2195 m ²	549 m ²	4081 m ²	1213 m ²	410 m ²	4515 m ²	1865 m ²	1080 m ²	1845 m ²
Prix des fenêtres au m ² en tableaux											
Triple vitrage cadre bois alu									464,8 € *1		
Performance Uw en W/m ² .K									0,9 W/m ² .K		
Classe d'étanchéité à l'air									A4		
Triple vitrage cadre bois				441,5 €			850,4 €				
Performance Uw en W/m ² .K				1,1 W/m ² .K			0,9 W/m ² .K				
Classe d'étanchéité à l'air				A3			A4				
Double + store + simple cadre bois alu								1 029,0 €			
Performance Uw en W/m ² .K								1,5 W/m ² .K			
Classe d'étanchéité à l'air								A3			
Double vitrage cadre bois				337,8 €			579,0 €			278,4 €	457,0 €
Performance Uw en W/m ² .K				1,6 W/m ² .K			1,7 W/m ² .K			1,6 W/m ² .K	1,7 W/m ² .K
Classe d'étanchéité à l'air				A4			A4			A3	A3
Double vitrage cadre PVC	209,4 €	247,7 €			135,5 €	184,3 €					
Performance Uw en W/m ² .K	1,7 W/m ² .K	1,7 W/m ² .K			1,7 W/m ² .K	1,7 W/m ² .K					
Classe d'étanchéité à l'air	A2	NC			A2	A2					

* En détail 725,0 €/m² pour les menuiseries équipées pour l'accès pompier et 451,8 €/m² pour les autres.



Graphique 6 : performance des menuiseries par typologie en fonction de leur prix au m²

NB : a titre de comparaison, nous avons contacté un menuisier allemand qui proposait une promotion sur ses menuiseries PVC triple vitrage ($U_w=1,1$ W/m².K) à 150 € HT / m². Ceci nous renseigne sur le surcoût réel du triple vitrage. Ceci doit constituer un avertissement pour les menuisiers français : avec le développement de la demande en France, les constructeurs européens vont être intéressés par le marché français. S'ils n'adaptent pas leur niveau de prix, les menuisiers français auront à faire face à une rude concurrence.

Notons que certains menuisiers français sont déjà prêts : voir le menuisier de l'opération *LFI* Berriat Bâtiment qui a fourni des menuiseries de grande qualité à un prix très compétitif. Plus connu, Bieber confirme que le surcoût à la fabrication d'un triple vitrage n'est que de 8%. Il sort aujourd'hui 60% de sa production en triple vitrage. D'ici un an et demi il espère passer à 80% de sa production en triple vitrage.

Enseignements à en tirer :

- Alerter la filière des menuiseries performantes que le niveau de prix actuel du marché français ne pourra pas soutenir la concurrence européenne.
- La filière française risque de tuer dans l'œuf le marché du triple vitrage si elle maintient un surcoût non justifié par rapport au double vitrage.

Le constat immédiat est que **les prix des menuiseries sont très variables et souvent irrationnels**. Les critères objectifs (performance, nature du cadre, taille de l'opération) ne suffisent pas à expliquer les variations de prix.

Par exemple, on peut observer que le prix des menuiseries les plus performantes des projets étudiés (*LFI*) sont à un prix comparable à celui des menuiseries du projet *Montrevel*, dont les performances sont celles de la référence RT, alors qu'il s'agit de deux de projets tertiaire de taille similaire.

Ceci nous conduit à penser que certains prix pratiqués notamment pour les triples vitrages sont des prix d'apprentissage, voire des prix d'opportunité, et qu'ils ne reflètent en aucun cas la réalité du surcoût des menuiseries performantes.

Bouchon thermique (pour mémoire)

Afin de limiter les déperditions de chaleur par les fenêtres pendant la nuit, l'équipe du projet *LFI* a eu l'idée de réaliser un caisson fortement isolé se rabattant par l'intérieur devant les menuiseries.

Malgré l'intérêt technique du dispositif, le coût nous semble cependant prohibitif par rapport au gain énergétique. C'est évidemment un prix d'apprentissage, puisque la réalisation a été faite sur mesure et non en série (il s'agissait donc de prototypes).

Véranda bioclimatique

Un seul projet comporte des vérandas, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions générales.

Une telle véranda chaude bien conçue constitue une véritable chaudière pour le logement. Le mur non isolé et le vitrage non isolant permettent de transférer la chaleur du soleil à l'intérieur.

Ce type de véranda, si elle est bien conçue (suffisamment d'inertie, de préférence trois côtés en contact avec le logement, possibilité de surventiler la nuit...), est confortable été comme hiver.

On note que le surcoût constaté est très raisonnable par rapport à une loggia non fermée (à surface de vitrage isolant constante).

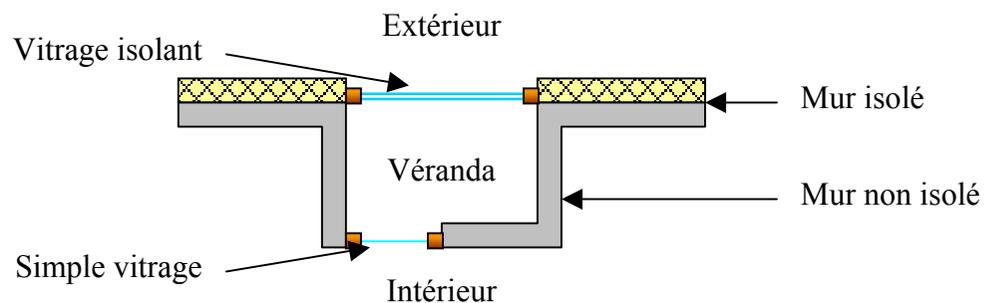


Schéma de principe d'une véranda chaude bioclimatique

Portes isolantes

Portes palières : Le prix des portes palières est influencé aussi bien par la qualité phonique, coupe feu, anti-intrusion, etc... que par la performance thermique (voir graphique 7).

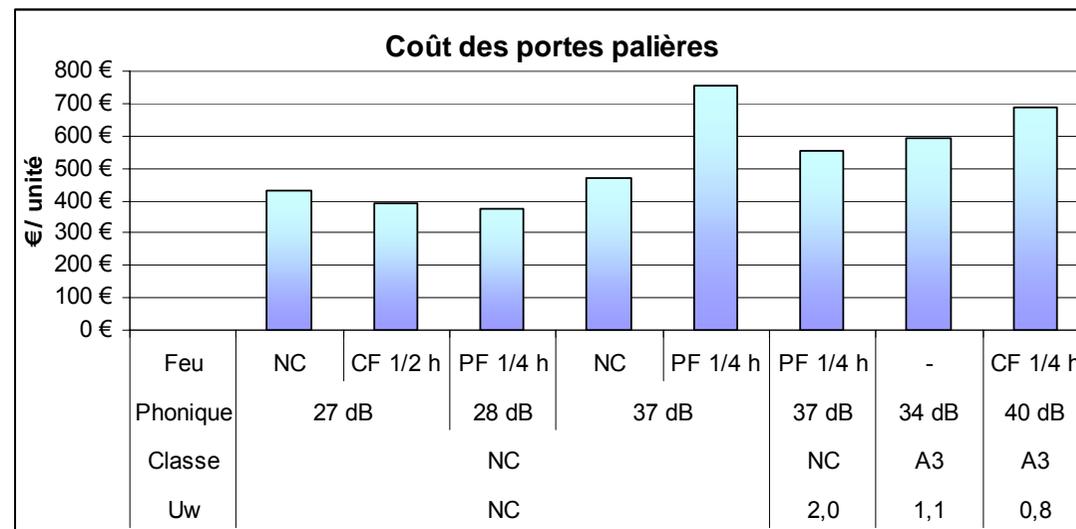
Autres portes : De façon générale le prix des portes dépend énormément d'autres critères que la thermique (vitrage feuilleté, aspect architectural...).

Le poste portes isolantes n'a pas un impact économique majeur.

Graphique 7 : prix des portes palières classées par performances thermiques, d'étanchéité, phonique et coupe feu

NB : « NC » signifie « Non Connu »

NB : pour le projet *Santolines* les portes palières sont très chères (3000 €



par unité). Il s'agit de portes ayant un U_w de $1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, classées A3, pare flamme ½ heure. Ces caractéristiques sont plutôt classiques et n'expliquent pas ce niveau de prix. Le surcoût a donc été calculé sur la base des portes de performance équivalente d'un autre projet.

Étanchéité à l'air

Rappel technique : pourquoi faire des bâtiments étanches à l'air ?

- La non étanchéité à l'air des bâtiments est une source de pertes thermiques. Ceci est d'autant plus perceptible que le bâtiment est bien isolé. Il est en effet inutile de surisoler un bâtiment et de le laisser traversé par des courants d'air...
- La non étanchéité à l'air peut également générer des pathologies dans les bâtiments. En effet l'air chaud et humide du logement peut traverser par une fuite la paroi isolée et arriver dans une zone froide où l'humidité va condenser.

On entend parfois dire que les bâtiments doivent « respirer ». Ceci nous semble tout à fait inexact. Les bâtiments doivent perspirer (laisser migrer la vapeur d'eau) mais ils doivent pour être sains, confortables et thermiquement efficaces être dotés d'une enveloppe la plus étanche à l'air possible.

L'étanchéité à l'air d'un bâtiment est mesurée par un test d'infiltrométrie. Les bâtiments étudiés dans le cadre de cet Appel à Projet PREBAT ont tous subi un tel test. Il s'agit de mettre en dépression et/ou en surpression le bâtiment à l'aide d'une porte soufflante et de mesurer le flux d'air passant par les infiltrations. On procède généralement à la recherche des fuites à l'aide d'une caméra thermique ou de fumigènes.

Photo 2 : porte soufflante ou blower door (Source : Alsatech)



Tableau 12 : Rappel des niveaux de performance atteints :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Résultat du test d'infiltrométrie											
14 en m ³ /h par m ² sous 4 Pa	0,43 à 1,29	NC	NC	1,5	0,10 à 0,77	0,53 à 1,11	0,40	0,62	0,57	3,50	0,48
n50 en vol/h sous 50 Pa	1,35 à 1,71	NC	NC	3,7	0,50 à 1,89	0,93 à 1,3	1,00	1,02	0,86	7,50	1,18

Points concourant à une très bonne étanchéité à l'air :

Une bonne étanchéité à l'air ne s'improvise pas sur le chantier. Elle est l'aboutissement d'un travail de conception détaillé d'une part et d'une réalisation soignée d'autre part. Un carnet de détail nous semble essentiel lors de la rédaction du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE). L'idée générale est de pouvoir faire le tour de n'importe quelle coupe du bâtiment en suivant la barrière étanche à l'air.

- Jonction menuiserie – maçonnerie : la classique mousse précomprimée permet une bonne étanchéité à l'eau mais par une étanchéité parfaite à l'air. Le joint silicone ne reste pas durablement étanche. Aussi il nous semble important de prévoir un produit spécifique, par exemple une membrane d'étanchéité à l'air avec adhésif butyl. Le coût en est de 2,5 €/ml, ce qui est un surcoût minime par rapport au gain en terme de performances.
- Les menuiseries elles-mêmes doivent être très étanches. Aussi pour les projets visant un haut niveau de performance nous recommandons le classement A4. On rappelle qu'une menuiserie A4 est 3 fois plus étanche qu'une menuiserie A3 et 10 fois plus étanche qu'une menuiserie A2.
- Les coffres de volets roulants sont souvent des sources de fuites importantes. Préférer systématiquement les tringles oscillantes aux enrouleurs. Si le budget le permet, les commandes électriques permettent un traitement parfait. Privilégier les coffres extérieurs ou les volets battants ou coulissants.
- Pour les portes palières, on préconise la présence d'un seuil suisse. Celui-ci est d'ailleurs souvent prévue pour atteindre les performances phoniques voulues. Coût constaté : 20 € par porte.
- Jonction mur toiture :
 - o Pour les toitures terrasses en béton, pas de difficulté.
 - o Pour les charpentes bois, prévoir un freine vapeur (ou pare vapeur) continu. Attention, comme l'a prouvé le test d'infiltrométrie du projet *St Christo*, le pare vapeur collé aux lés d'isolants type laine ne permet pas du tout d'assurer l'étanchéité à l'air. En l'occurrence, les fuites étaient trop importantes pour permettre la mesure. Un film continu et positionné de façon à ne pas être percé par les suspentes de faux plafond tout en protégeant l'isolant contre la vapeur d'eau est nécessaire.
 - o Pour les toitures en bac acier, prévoir des cloisoirs parfaitement adaptés aux ondulations du bac, et compléter par un adhésif entre cloisoirs et bacs. On peut également doubler le bac d'un pare vapeur. Mais la liaison bacs acier/murs reste une des plus délicates à rendre étanche.
- Pour les murs à ossature bois, un freine vapeur est également nécessaire pour les mêmes raisons que pour les toitures en charpente bois.

Ordre de grandeur de prix : de 3,5 €/m² de mur pour un pare vapeur, 8 €/m² pour un freine vapeur agrafé, à 10 €/m² pour un freine vapeur tramé avec contre lattage pour insufflation de ouate et toutes sujétions de raccords d'étanchéité. Ce prix est inclus dans le prix des murs à ossature bois du paragraphe 3.1.1.

- Les murs en parpaing nus ne sont pas étanches à l'air. Les agglos sont poreux en partie courante même si les joints sont parfaitement réalisés. Prévoir systématiquement un enduit fin sur les murs extérieurs.
- Joints de dilatation : prévoir une membrane d'étanchéité formant une ondulation dans l'épaisseur du joint de dilatation.
- Fourreaux : tous les réseaux (électriques, eau chaude, eau froide, chauffage, ventilation) sont autant de points faibles potentiels qu'il convient de traiter avec des produits adaptés (manchettes, adhésifs ...). L'ordre de grandeur de prix constaté (mais sur une seule opération : donc à confirmer) est de 100 à 150 € par gaine technique (traitement en tête et en pied de gaine technique).
- La cage d'ascenseur est une véritable cheminée souvent placée au cœur du volume chauffé. Des solutions existent, mais n'ont pas été mises en œuvre dans les projets suivis, hormis sur l'immeuble LFI où chaque étage dispose d'un sas, comme l'entrée au rez de chaussée.

Globalement, l'étanchéité à l'air est surtout une question de bonne conception de l'enveloppe. Les surinvestissements associés sont faibles, et totalement justifiés par le gain en performance.

3.2 Analyse poste par poste – lots fluides

Remarque préliminaire : la décomposition détaillée des coûts par élément ne permet pas de tirer des ratio pertinents. Il semble que chaque entreprise a sa façon de chiffrer les lots techniques, en ventilant le coût de sa main d'œuvre sur tel ou tel élément. Aussi il est plus pertinent de raisonner globalement (lot par lot) sur l'ensemble des lots techniques.

3.2.1 Ventilation

Tableau 13 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Surinvestissement en € / m ² SHON											
- Ventilation double flux	11,7 €	18,8 €		38,5 €	32,3 €	24,3 €	36,4 €	9,8 €	11,3 €	34,5 €	
Dont : CTA collective à roue	3,7 €	3,9 €		16,5 €			19,5 €	9,8 €	11,3 €	30,6 €	
CTA à plaques					17,8 €	11,2 €					
Echangeurs individuels											
Réseau de soufflage	3,9 €	10,8 €		19,4 €	9,1 €	6,5 €	7,4 €				
Faux plafonds	4,1 €	4,1 €		2,6 €	5,4 €	6,6 €	5,9 €				
Régulation du débit										3,9 €	
- Puits canadien béton / simple flux											8,5 €
Dont : Puits canadien											19,6 €
Moins valeur réseau SF											-12,7 €
Régulation du débit											3,4 €
- Simple flux hygro (référence en logt)			0,0 €								

Pour mémoire, part de l'économie sur le poste chauffage réalisée par la diminution de la puissance à installer du fait de la récupération de chaleur :

Moins values réalisées grâce à la ventilation double flux par la diminution des puissances installées											
Chauffage	3,3 €	2,2 €		8,3 €	2,1 €	4,3 €	3,6 €	6,4 €	3,9 €	13,0 €	
Emetteurs	4,9 €	3,5 €		2,9 €	3,6 €	3,7 €	2,9 €	4,3 €	0,0 €	0,0 €	
Total moins value sur le chauffage	8,2 €	5,7 €		11,2 €	5,7 €	7,9 €	6,5 €	10,7 €	3,9 €	13,0 €	
Plus value restante pour la VDF	3,5 €	13,1 €		27,3 €	26,5 €	16,4 €	29,8 €	-0,9 €	7,4 €	21,5 €	

NB : On rappelle que la référence RT2005 des projets autres que de logement est la ventilation d'extraction et de soufflage sans récupération d'énergie.

Graphique synthétisant ces résultats : voir graphique 8 page 49.

Ventilation double flux :

Les coûts du lot ventilation double flux sont peu homogènes, sans raison technique évidente (même efficacité de l'échangeur de 90%, ventilateurs basse consommation...). On voit notamment pour les projets *Jardin République* et *Le Pérenne*, dont le système de ventilation est strictement identique, et pour une taille de réseau identique (*Jardin République* comporte 4 bâtiments de taille comparable au *Pérenne*) que le surcoût du poste Ventilation varie de 33 % d'une entreprise à une autre. Comme pour le triple vitrage, il nous semble qu'**il reste une part d'irrationnel dans les prix de la ventilation double flux**. C'est la signature d'un marché naissant, à la recherche du prix d'équilibre. Aussi ce coût est appelé à baisser avec la multiplication des projets en double flux.

On note qu'*a priori* **le type de récupérateur de chaleur (échangeur collectif à roue, à plaques ou échangeur individuel à plaques) n'a pas un impact majeur sur le coût de l'installation**. Généralement c'est la taille du projet qui détermine le type d'échangeur collectif : on préfère généralement les échangeurs à plaques sur les petites opérations et les échangeurs à roue sur les opérations plus importantes.

On note également que certains projets tertiaires ont intégré une **régulation du débit en fonction de la présence**. Il s'agit de moduler les débits extraits, notamment dans des pièces comme les classes où le débit est calculé pour maintenir un taux de CO₂ inférieur à la réglementation, ce qui nécessite un débit proportionnel au nombre de personnes. Ces systèmes permettent de réduire à la fois les charges de chauffage et la consommation des ventilateurs par rapport à la solution classique qui est de ventiler le débit maximum en permanence. *A priori* (peu d'études existent sur le tertiaire) il n'y a pas comme dans les logements un impact sur la qualité de l'air, les débits rapportés au volume des pièces étant globalement plus élevés.

Le surcoût de la ventilation double flux nous semble justifié pour les raisons suivantes :

- La ventilation double flux est le seul système permettant de réduire les pertes thermiques par ventilation **sans dégrader la qualité de l'air intérieur**. En effet l'alternative de la ventilation simple flux hygroréglable a comme principe de réduire les débits de ventilation, ce qui augmente logiquement la concentration en polluants de l'air intérieur. Or les études menées sur la qualité de l'air intérieur ont bien montré l'impact qu'a la concentration de ces polluants sur la santé des occupants (voir ci-après le paragraphe consacré à ce sujet).
- D'un point de vue énergétique, le calcul RT 2005 juge la plupart du temps de façon assez défavorable la ventilation double flux par rapport à la ventilation simple flux hygroréglable. La consommation des ventilateurs est moins élevée en simple flux et la consommation de chauffage est un peu plus élevée car le calcul RT 2005 se base sur un débit de ventilation moyen issu de l'avis technique du système, basé sur un scénario de présence. Or il nous semble que les débits pris en compte pour la ventilation simple flux hygroréglable sont trop favorables car le scénario de présence pris en compte ne correspond pas à la réalité constatée. Cet impact du calcul RT, qui reste un calcul conventionnel et non une prévision, est très handicapant pour la ventilation double flux dont la gestion de la variation de débit n'est pas bien prise en compte correctement par le calcul RT.
- Enfin le fait d'installer une ventilation double flux génère des économies sur la puissance installée dans les installations de chauffage (chaudière, distribution et émetteurs de chaleur. Le surinvestissement restant suite à cette estimation est de **4 à 30 €/m² en logement et de 0 à 22 €/m² en tertiaire**.

NB : notre avis détaillé sur la question du type de ventilation et de la qualité de l'air intérieur est téléchargeable sur :

<http://www.enertech.fr/rubrique-Les+installations+thermiques-46-205.html#page>

Remarque sur le choix du type d'échangeur :

Le constat que le type de récupérateur de chaleur a peu d'impact économique nous semble un apprentissage très important, car par ailleurs les échangeurs à roue sont bien préférables aux échangeurs à plaques (pour les applications courantes comme le logement) car il n'y a pas de risque de formation de givre dans une roue. Or pour les échangeurs à plaques (individuels ou collectifs) il est nécessaire de prévoir un système de dégivrage, qui est soit une résistance électrique, le plus souvent mal régulée et qui génère une consommation électrique très importante (voir campagne de mesure), soit une régulation permettant de dégivrer l'échangeur avec la chaleur de l'air extrait, qui revient à dégrader l'efficacité de l'échangeur aux périodes les plus froides, c'est à dire au moment où on en a le plus besoin. **Ces deux retours d'expérience nous incitent à encourager les échangeurs à roue dès que la taille du projet le permet.** Mais il faut faire très attention, dans l'aménagement de la CTA, à l'emplacement respectif de la roue et des deux ventilateurs, car **mal conçue la CTA avec échangeur à roue peut conduire à un recyclage d'air très important.** Dans l'idéal, le ventilateur de soufflage devrait être en amont de la roue dans le sens d'air (la roue est donc en forte surpression côté soufflage), et le ventilateur d'extraction en aval. Mais en pratique, le règlement de sécurité contraint à ce que le ventilateur d'extraction soit aussi en amont. Mais c'est acceptable dès lors que le ventilateur de soufflage est correctement positionné.

On note au passage qu'une autre solution très performante pour éviter tout problème de givrage de l'échangeur est le puits canadien (aéraulique ou à eau glycolée).

Remarque sur la maintenance des installations de ventilation :

Une des objections fréquentes à la ventilation double flux est la question de la maintenance. Et les campagnes de mesure effectuées montrent que le problème d'encrassement des filtres est bien réel, et qu'il conduit à une réduction des débits. Il est donc nécessaire de prévoir une intervention de maintenance régulière pour le nettoyage des filtres. Celle-ci doit avoir lieu tous les 4 mois en zone urbaine (ceci correspond à une réduction des débits d'air de 10% à cause de l'encrassement).

Le coût de cette intervention est à comparer au coût généré par la solution de référence :

- Dans la référence, des chaudières individuelles sont installées, qui nécessitent une intervention chaque année dans chaque logement (avec la difficulté d'entrer dans chaque logement). Les projets performants comportent une chaufferie collective dont la maintenance est plus facile.
- La ventilation de référence (simple flux hygroréglable) comporte également un risque d'encrassement. Les bouches d'entrée d'air et d'extraction sont également progressivement obturées par les poussières et les graisses ce qui réduit (encore !) le débit d'air. En toute rigueur, la maintenance de ces éléments devrait être effectuée de façon systématique, avec là encore la difficulté de pénétrer dans chaque logement. La fréquence de nettoyage devrait être la même que celle d'un filtre collectif.... Gare aux comparaisons de systèmes à qui ont n'applique pas les mêmes contraintes.

Au final il faut considérer :

- soit que la ventilation double flux apporte un service de meilleure qualité (santé des occupants), au prix d'une maintenance régulière ;
- soit qu'il faut également nettoyer les entrées et sorties d'air en simple flux pour apporter le même service qu'en double flux, au prix d'une maintenance qui n'est pas effectuée actuellement.

Ventilation simple flux :

Seulement deux des projets étudiés étaient en simple flux :

- Le projet *Visitandines* : il faut souligner qu'il s'agit d'une opération de réhabilitation. En effet faire passer un réseau de ventilation double flux en rénovation ou réhabilitation n'est pas toujours aisé. C'est faisable cependant pour un coût acceptable¹, et il existe également des solutions de ventilation double flux décentralisée.
- Le projet *Montrevel*, où le choix a été fait de privilégier l'investissement dans un puits canadien.

Puits canadien :

Un seul projet présente un puits canadien. Cependant ce projet ne nous semble pas représentatif de la généralité des puits canadiens.

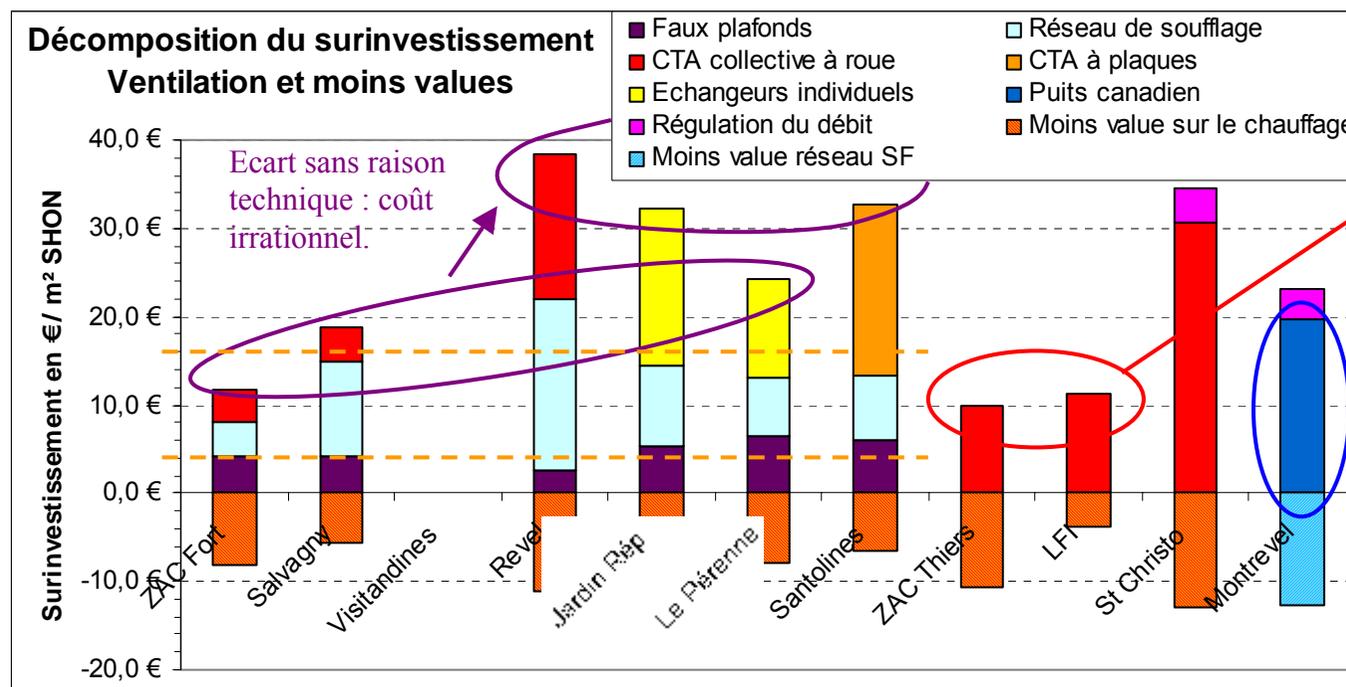
- Le choix du béton pour réaliser le puits canadien n'est peut être pas optimal : nous avons réalisé un puits canadien d'un bâtiment tertiaire (l'INEED, à côté de la gare de Valence TGV) pour 11 € du m² SHON avec des conduits PVC au lieu de 19,6 €/m² pour le projet *Montrevel*.
- La réalisation de ce puits canadien n'est pas exemplaire, car lors de l'instrumentation nous avons constaté la présence d'eau stagnante dans le conduit, ce qui ne doit jamais se produire si le puits canadien est réalisé dans les règles de l'art (pente respectée et puisard pour évacuer la condensation).

Aussi il nous semble qu'il ne faut pas rester sur cet exemple. Un puits canadien peut être moins cher, et on rappelle ses multiples intérêts :

- En été, le puits canadien contribue à rendre le bâtiment confortable en apportant un air frais. C'est particulièrement important pour les bâtiments à faible inertie (maisons à ossature bois sans dalle intermédiaire béton notamment).
- En hiver, le préchauffage de l'air par le sol supprime tout risque de givrage de l'échangeur de chaleur de la ventilation double flux. (voir ci dessus le paragraphe *Remarque sur le choix du type d'échangeur*).

¹ Voir à ce sujet notre étude économique sur un ensemble de rénovations à Mulhouse, disponible sur notre site [Hwww.enertech.fr](http://www.enertech.fr).

Graphique synthétique



Niveau de surcoût à retenir pour la double flux en logement : 4 à 16 €/m² SHON en tenant compte de la moins value sur le chauffage

Graphique 8 : Décomposition du surinvestissement du poste Ventilation.

Ce graphique présente les surinvestissements des solutions retenues, ainsi que l'estimation de la moins values réalisées sur les installations de chauffage en réduisant la puissance installée grâce à la récupération de chaleur sur l'air extrait en ventilation double flux.

On observe des écarts de coût inexplicables entre installations de ventilation double flux très comparables techniquement. Ceci illustre selon nous une certaine irrationalité des prix de la ventilation double flux.

Une fois retranchée la moins value sur le chauffage, les niveaux de prix qui nous semblent refléter la réalité su marché sont de 4 à 16 €/m² en logement et de 0 à 8 €/m² en tertiaire.

Il n'y a pas a priori d'écart mesurable entre les échangeurs à roue et les échangeurs à plaques.

Niveau de surcoût à retenir pour la double flux en bureau : 0 à 8 €/m² SHON en tenant compte de la moins value sur le chauffage

Puits canadien cher, retenir plutôt 11 €/m² SHON (INEED).

3.2.2 Chauffage performant et local chaufferie

Tableau 14 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Surinvestissement en € / m ² SHON											
Chauffage performant	9,6 €	3,8 €	41,2 €	21,9 €	52,9 €	20,5 €	53,4 €	69,2 €	-51,7 €	7,1 €	-1,5 €
Dont : Chauffage gaz	11,8 €	2,5 €		13,5 €		17,6 €					-1,5 €
Réseau de chaleur			12,9 €		38,2 €			6,8 €		7,1 € *3	
Chaufferie bois											
PAC géothermique							26,1 €		-69,3 €		
Forage sur nappe							25,9 €		6,2 €		
Alimentation gaz	-3,2 €	-2,7 €	0 € *1	-3,8 €	-3,2 €	-2,7 €	-2,9 €				
Distribution de chaleur	1,0 €	4,0 €	28,3 €	12,2 €	17,8 €	5,6 €	4,4 €	21,0 €	4,2 €		
Rafrachissement											
Dont : Réseau de froid								9,2 €			
Géocooling									7,2 €		
Distribution de froid								32,1 €	0,0 €		
Local chaufferie	4,2 €	0,1 €	29,7 €	21,3 €	9,6 €	10,6 €	0,3 €	0,0 €	2,4 €	-	-
Dont : Local chaufferie	4,2 €	0,1 €	9,9 €	21,3 €	3,2 €	10,6 €	0,3 €	0,0 €	2,4 €	-	-
Silo à bois			19,8 €		6,4 €						
Type de local chaufferie	Parking	Parking	Sous sol	Accolée	Parking	Parking	Combles	Parking	Terrasse		
Suivi des performances (pour mémoire)	0,0 €	1,0 €	1,6 €	0,0 €	1,1 €	0,0 €	2,7 €	3,6 €	19,6 € *2	11,2 €	0,0 €

*1 Projet dont les logements sont raccordés en gaz pour la cuisson. Pas de moins value par rapport à la référence où les chaudières individuelles doivent être raccordées

*2 Instrumentation très détaillée (volonté du Maître d'Ouvrage)

*3 Pris en charge par le syndicat intercommunal

On rappelle que la référence en logement est la chaudière individuelle gaz double service à condensation, dont une partie du coût est affecté comme référence au poste ECS performante. La référence nécessite l'alimentation en gaz des logements, ce qui génère une moins value pour les projets où il n'y a pas de gaz pour la cuisson. La référence pour les bureaux est le VRV. La référence pour les bâtiments scolaires est la chaudière gaz.

Chaufferies Gaz

On constate un surcoût très modéré pour les projets en chaufferie Gaz. Ceci est dû à deux phénomènes :

- La performance de l'enveloppe et de la ventilation permet de réduire la puissance installée. On note que l'on aurait encore pu faire plus d'économies si les installations n'avaient pas été surdimensionnées (certains projets ont des chaudières en « secours » exigées par le maître d'ouvrage, qui nous semblent aujourd'hui absolument inutiles).

- Ce type de chaufferie ne nécessite pas un local important (par exemple pour le projet *Le Pérenne* la chaudière est une chaudière murale !). Parmi les projet chauffés au gaz, seul le projet Revel présente un surcoût important pour le local chaufferie, car elle n'est pas intégrée au bâtiment mais accolée.
- Le surcoût de ce poste est en fait principalement lié à la performance des chaudières mises en œuvre : il s'agit de chaudières à condensation et modulantes, c'est à dire que leur puissance varie en fonction du besoin de chaleur du bâtiment. Ceci permet d'améliorer nettement les rendements de génération, notamment en mi-saison.

On retient que si tous ces projets n'avaient pas été surdimensionnés, on aurait probablement fait une moins value sur la puissance installée qui compense le surcoût de la performance de la chaudière. Voir par la suite le paragraphe concernant le surdimensionnement.

Réseaux de chaleur et de froid

Le coût du raccordement aux réseaux de chaleur est plus élevé que la solution de référence VRV. On observe que :

- Le coût du raccordement est surtout fonction de la longueur du réseau à créer, et assez peu dépendant de la puissance installée.
- Le projet *ZAC Thiers*, raccordé au réseau de chaud et de froid de l'agglomération lyonnaise. Il est alimenté à 45% par la chaleur issue de la valorisation des ordures ménagères, 42 % au fioul et 13 % au gaz. Une chaufferie bois de 20 MW a été construite en 2006 afin d'atteindre un taux de 60 % en énergies renouvelables et fatales (ordures ménagères).
- Pour ce projet une part importante du surcoût est dû non à la génération mais à la distribution (la référence étant les VRV, qui sont plus décentralisés).
- Le projet *Saint Christo* est raccordé à un réseau de chaleur issu d'une chaufferie bois, ce qui contribue à la performance du projet. Le coût du raccordement n'est pas pris en charge directement par la Commune mais par le SIEL, syndicat intercommunal qui gère le réseau de chaleur. A titre de comparaison, nous avons tout de même fait figurer ce coût dans le tableau 14. Pour information, la chaufferie bois et le réseau alimentant plusieurs bâtiments publics et des bâtiments privés a coûté 321 000 € (200 kW en bois). Le prix du kWh est actuellement estimé à 70,4 €/kWh et l'abonnement à 28 €/kW.
- Le coût de la distribution est conservé dans la référence (chaufferie gaz).

Chaufferies bois

Deux projets se sont orientés vers une chaufferie bois. On constate une ventilation du surcoût très différente : pour les *Visitandines*, le surcoût de la chaudière est faible, mais les réseaux sont chers, alors que pour *Jardins République* le surcoût est visible sur la chaufferie elle-même Ceci est probablement dû à une ventilation différente du coût de la main d'œuvre (voir remarque initiale sur les lots techniques).

Concentrons nous sur le prix global :

- On note que ces chaufferies sont surdimensionnées par la mise en œuvre d'une chaudière gaz qui sert à la fois de secours et de génération ECS en été (où il est souvent peu pertinent de remettre en route la chaudière bois). Les chaudières bois étant maintenant d'une grande fiabilité, la chaudière de secours

ne nous semble plus pertinente. On aurait pu réaliser des économies en dimensionnant la chaudière bois sur la moitié ou les deux tiers du chauffage seul et utiliser le Gaz comme appoint et comme préparateur ECS indépendant.

- Le surcoût du silo est radicalement différent : dans le projet *Jardins République*, le silo et la chaufferie sont en fait mis en commun pour 4 bâtiments. Le surcoût plus important des *Visitandines* est en fait un effet d'échelle. En revanche la configuration du projet *Jardin République* a nécessité un réseau de chaleur enterré pour relier les 4 bâtiments, ce qui impacte le sous poste *Distribution commune*.
- Le rendement d'une chaudière bois est très peu influencé par la température de retour. Aussi une chaufferie bois permet de générer une moins value sur l'émission de chaleur (voir paragraphe 3.2.3) puisqu'il est souhaitable que les retours soient à des températures élevées, et donc les émetteurs plus petits.

On retient que le surcoût d'une chaufferie bois tient beaucoup à la conception du silo. Les silos économiques sont soit des silos de grande capacité mis en commun pour une opération importante, soit un silo situé dans un espace nécessaire mais inutile (typiquement un vide sanitaire de hauteur suffisante), soit encore un silo en toile pour une petite opération.

Le surinvestissement de ces chaufferies nous semble justifié énergétiquement par le gain en énergie primaire qu'ils permettent sur le chauffage comme sur une partie de l'ECS : le facteur de conversion en énergie primaire pour le bois est inférieur à 0,2 (analyse de cycle de vie, conventionnellement le calcul RT 2005 BBC prend 0,6. La RT 2012 prend la valeur de 1,0 mais module le Ce à viser, ce qui revient au même mais occulte la réalité physique).

NB : ce facteur de conversion n'est valable que si le bois reste une énergie renouvelable, c'est à dire s'il n'est pas surexploité. Cela revient à dire que l'énergie bois est pertinente sur les bâtiments dont l'enveloppe est déjà performante. Se contenter de mettre une chaufferie bois sur des bâtiments non isolés serait un non-sens et doit être vigoureusement combattu.

Pompes à chaleur sur nappe phréatique

Les projets *Santolines* et *LFI* sont équipés de pompes à chaleur sur nappe phréatique. Les surcoûts associés sont très différents, car la référence n'est pas la même : chaudière gaz individuelle pour les *Santolines* et climatisation réversible type VRV pour *LFI*.

Concernant le projet *Santolines*, on note :

- Il s'agit du seul projet où la génération de chaleur n'est pas surdimensionnée.
- Le coût des forages sur nappe avec la pompe et l'échangeur associé représente 25,9 €/m² SHON, soit la moitié du surcoût. Ce coût nous semble trop important, car quatre forages ont été réalisés pour 2 utiles. Les deux autres étaient des forages de contrôle du niveau de la nappe. Le coût de revient au mètre linéaire de forage utile est de 417 € / ml, ce qui est très élevé. Pour mémoire, le coût classique d'un forage en France est plutôt de 60 à 80 €/ml, et en Suisse où ces forages sont courants il est de 45 €/ml. **Une marge très importante de réduction des coûts existe donc sur ce poste.**

Concernant le projet *LFI*, on note :

- Le système de pompe à chaleur sur nappe phréatique génère une moins value par rapport à la référence, car la puissance installée est réduite par la performance de l'enveloppe et on remplace la climatisation par le géocooling (sur batterie réversible chauffage / rafraîchissement).

- Le coût des forages sur nappe avec la pompe et l'échangeur associé représente 7 €/m² SHON, avec un coût au mètre linéaire de 230 € / ml, ce qui nous semble encore bien trop élevé.
- La comparaison avec le projet *UTEI (ZAC Thiers)* nous semble éloquent : malgré les échelles de projets assez différentes, on note que le projet qui a fait le choix d'une conception sans climatisation, avec seulement un rafraîchissement passif par géocooling présente non un surcoût mais une moins value, alors que la conception classique avec climatisation active et distribution 4 tubes génère un surcoût important. Ce phénomène avait déjà été observé à l'INEED, bâtiment sans climatisation et sans surcoût, l'un des moins consommateurs de France, et dont le coût total était exactement au niveau du marché, donc sans aucun surcoût. Ceci prouve, soit dit en passant, que le coût d'un bâtiment performant n'est pas un « empilement » de surcoûts, mais qu'il y a aussi de nombreuses moins values induites, et que finalement, il peut parfaitement être moins cher qu'un bâtiment ordinaire.

NB : dans le cas du projet LFI, l'équipe a prévu des murs extérieurs en béton, ce qui n'aurait pas été le cas dans un projet traditionnel. L'idée était d'apporter plus d'inertie pour améliorer le confort d'été. Le surcoût est de 70 €/m² environ par rapport à une solution traditionnelle de façade rideau.

Or il nous semble que cette mesure a en fait peu d'impact sur le confort d'été, car une seule face des voiles béton est en contact avec l'intérieur et permet donc le stockage de chaleur et de frais. En fait la majorité de l'inertie mobilisable est fournie par les dalles et les murs intérieurs : 4 800 m² d'échange pour les dalles et murs intérieurs, contre 1 100 m² d'échange pour les murs extérieurs.

Cette analyse est confirmée par les simulations dynamiques réalisées par ADDENDA (AMO de l'opération) qui montrent que le remplacement des voiles extérieurs béton par une façade légère en ossature bois ne fait augmenter les températures maximales par zone que de 0,2 à 0,7°C. L'ensemble des températures reste inférieures à 28°C sans rafraîchissement, ce qui permet donc d'assurer un confort d'été passif même sans les voiles béton extérieurs.

Le choix des voiles bétons extérieurs a plutôt été retenu afin de pouvoir traiter plus facilement l'étanchéité à l'air du bâtiment par rapport à une façade légère (cela ne serait d'ailleurs peut-être plus vrai aujourd'hui du fait de l'évolution des compétences des entreprises mais aussi de leur sensibilisation).

Nous n'avons donc pas retenu le surcoût des voiles béton extérieurs dans notre étude.

Les pompes à chaleur géothermiques ou sur nappe phréatique nous semblent très intéressantes pour les bâtiments basse consommation pour deux raisons :

- Une pompe à chaleur géothermique émettant sur un plancher chauffant très basse température (25/30 voire moins) permet de chauffer un bâtiment avec un COP annuel supérieur à 5.
- La possibilité de faire du géocooling solutionne habilement la principale difficulté des bâtiments très isolés qui est le confort d'été. Le géocooling a pour principe d'utiliser directement l'eau des forages (sans faire fonctionner la pompe à chaleur) pour rafraîchir le bâtiment. La consommation d'énergie est très faible (pompe de forage et pompe de distribution), et on génère une moins value par rapport à une climatisation. De plus cette technique permet de réinjecter de la chaleur dans les forages, ce qui contribue à les régénérer pour la saison de chauffe suivante.

Le surcoût nuisible du surdimensionnement

Tableau 15 : Impact économique du surdimensionnement :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Puissance installée en W/m ² SHAB											
Production de chaud	130 *1	104	109	113	127	82	33	79	19	111	62
Production de froid	-	-	-	-	-	-	-	104	Géocooling	-	-
Surcoût dû au surdimensionnement	7,5 €	4,3 €	4,9 €	0,4 €	7,8 €	0,9 €	0,0 €	0,0 € *2	0,0 €	0,0 € *2	0,0 €
Surinvestissement utile (hors surdimensionnement)	2,1 €	-0,5 €	36,3 €	21,5 €	45,1 €	19,6 €	53,4 €	69,2 €	-51,7 €	7,1 €	-1,5 €

*1 Pièces marché. La puissance a été réduite en EXE.

*2 Réseau de chaleur : impact économique du surdimensionnement négligeable

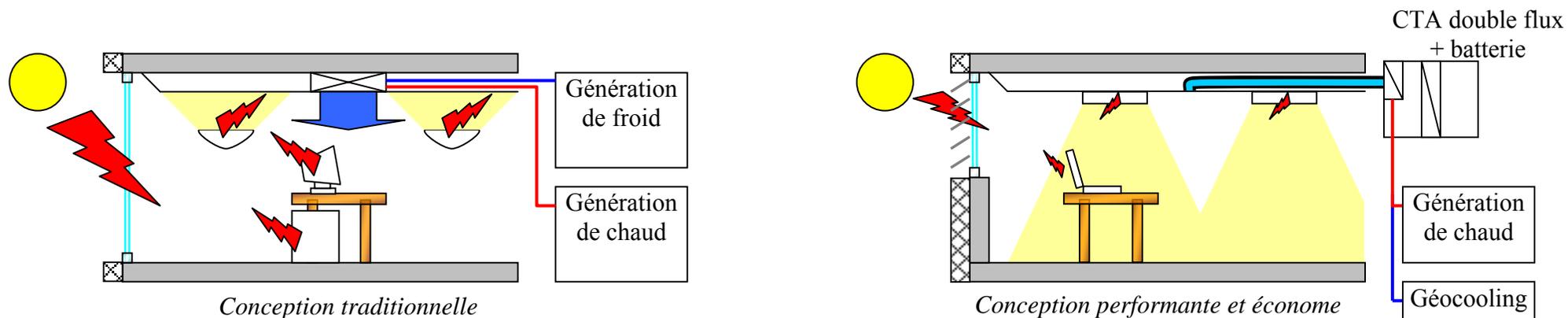
Tout surdimensionnement nous semble nuisible pour deux raisons :

- Economiquement, le surdimensionnement entraîne des surcoûts inutiles (jusqu'à 8 € / m² SHON sur les opérations suivies) ;
- Techniquement, dans la plupart des cas une installation surdimensionnée a un moins bon rendement d'exploitation. En effet on augmente les pertes par arrêt et remise en route (il faut remettre en température le circuit primaire).

Conception performante des bâtiments basse consommation

Afin de concevoir des bâtiment performants avec un surinvestissement limité, il nous semble nécessaire de repenser la façon dont on conçoit les bâtiments :

- La priorité doit être de **réduire les charges à la source** :
 - o l'enveloppe performante réduit les besoins de chauffage ;
 - o la maîtrise des surface vitrées et la réduction des consommations d'électricité spécifique permettent de réduire voire de supprimer les besoins de climatisation en tertiaire. Un rafraîchissement passif (type géocooling, CTA avec rafraîchissement adiabatique...) devient suffisant dans la plupart des cas (reste éventuellement à climatiser de façon classique un local type serveur...).
- Cette démarche doit permettre de **réduire la puissance** du système de chauffage et de **simplifier les systèmes** de rafraîchissement, et de **compenser une partie du surinvestissement placé dans l'enveloppe par une moins value sur les systèmes**.



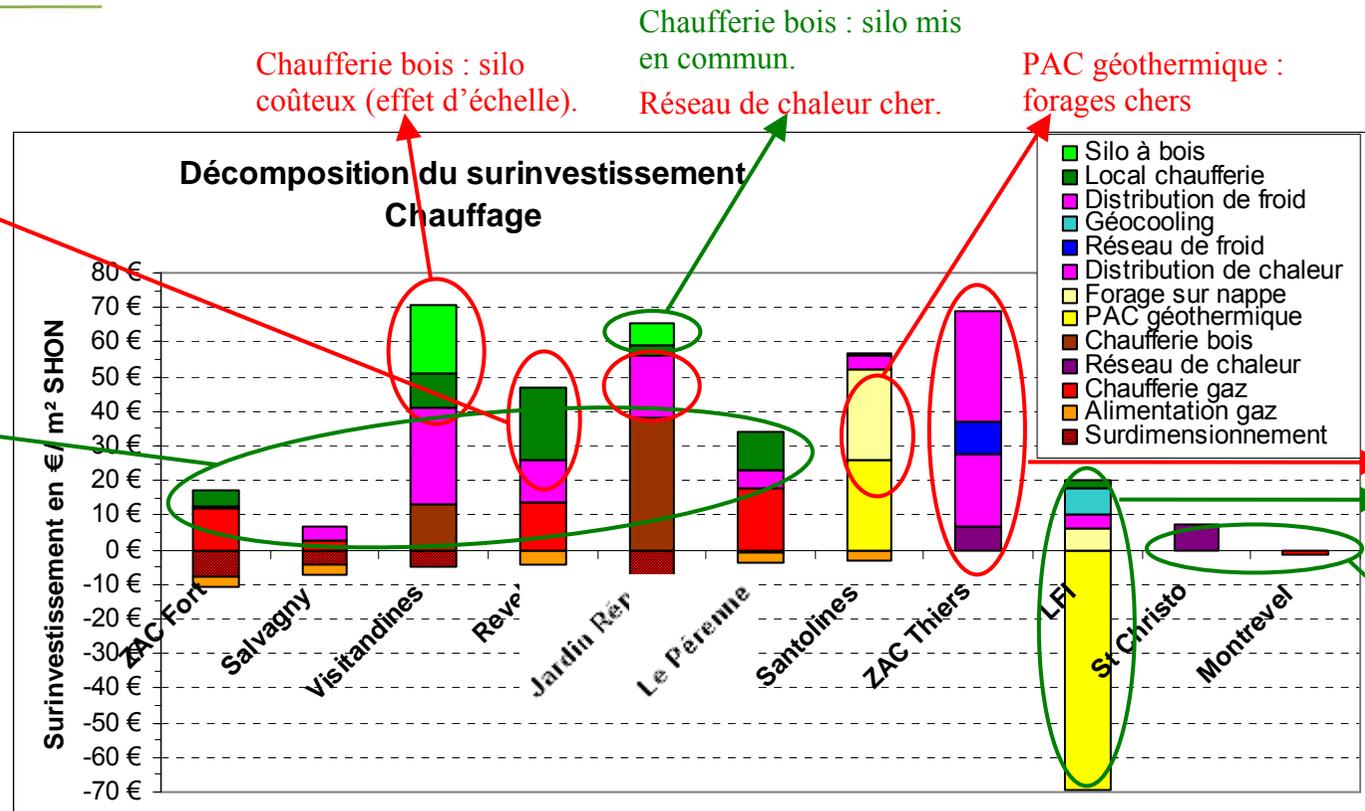
Ceci implique que la maîtrise d'œuvre renonce à la conception classique des bâtiments actuels (prendre acte de la charge et dimensionner en conséquence avec une marge de sécurité importante) pour s'orienter vers une conception plus intégrée, où l'on se donne les moyens de réduire les consommations sur tous les postes, y compris l'électricité spécifique (éclairage, bureautique...), concrétisée par un dimensionnement où le bureau d'étude a le courage de calculer au plus juste, de façon à compenser la performance des systèmes voire de générer des économies.

Graphique synthétique

Chaufferie gaz non intégrée.

Chaufferie gaz : la réduction des puissances compense la performance de la chaudière.

On pourrait réduire encore le coût en évitant le surdimensionnement.



Bureaux : conception classique
Bureaux : pas de climatisation active

Ecoles : surcoûts faibles par rapport à la référence chaufferie gaz.

Graphique 9 : décomposition du surinvestissement du poste Chauffage.

Ce graphique présente les surinvestissements des solutions retenues, ainsi que les moins values réalisées sur l'alimentation gaz par rapport à l'alimentation individuelle de chaque logement, et la moins value qui aurait été possible si l'installation n'avait pas été surdimensionnée.

En logement, on note que le surdimensionnement empêche bien souvent de concrétiser la réduction des besoins de chauffage (grâce à la performance de l'enveloppe et de la ventilation) par une moins value sur ce poste. Sans surprise, les chaufferies bois sont plus chères que les chaufferie gaz, notamment en raison de la chaudière elle même et du silo. C'est également le cas des PAC géothermique, le surcoût étant surtout dû aux forages.

Par ailleurs, on observe le poids parfois important du local chaufferie surtout s'il est accolé au bâtiment.

Le cas des bureaux est frappant, car la conception classique avec climatisation active génère un surinvestissement important alors que la conception basée sur la réduction des apports internes et solaire et le rafraîchissement passif génère une moins value par rapport à la référence.

3.2.3 Emission et régulation terminale

Tableau 16 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Surinvestissement en € / m ² SHON											
Emission											
- Radiateur 80/60			-13,9 €								
- Radiateur 65/55				-2,2 €							
- Radiateur 60/40					-0,7 €	-3,4 €					
- Radiateur 50/40	0,1 €	-3,5 €									
- Radiateur 45/35							-4,2 €				
- Plancher chauffant (part technique)										-	15,0 €
- Plancher chauffant (part fonctionnelle)										57,9 €	39,9 €
- Poutre froide								11,0 €			
- Batterie chaude / froide sur CTA									0,0 €		
Régulation terminale											
- Robinets thermostatiques	0,0 €		0,0 €	0,0 €		0,0 €					0,0 €
- Robinets thermostatiques + 1 thermostat par logement					12,6 € *1						
- 1 thermostat et 1 vanne électrothermique par pièce		2,1 €					8,8 €				
- Simple loi d'eau (plancher chauffant)									1,1 €		0,0 €
- Régulation par demi plateau											
- 1 thermostat et 1 vanne électrothermique par pièce										8,4 €	
- Régulation intégrée aux émetteurs								0,0 € *2			

*1 Vanne trois voies permettant une loi d'eau pour chaque logement, commandée par un thermostat par logement.

*2 Intégré au poste Chauffage performant

Emission

Pour les radiateurs, on note en toute logique que plus le régime de température est élevé, moins les radiateurs sont de dimensions importantes et donc moins ils sont chers. On valorise donc d'autant mieux la performance de l'enveloppe par des économies sur les émetteurs que le régime de température est élevé. C'est notamment le cas pour le projet *Visitandines*, équipé d'une chaudière bois. En effet, le rendement des chaudières bois n'est pas affecté par le régime de température puisque pour des raisons d'une autre nature (combustion, corrosion) la température de retour sur le corps de chaudière doit être élevée. La moins value importante réalisée ici amortit une partie du surcoût de la chaufferie bois.

Attention cependant, dans le cas des chaufferies Gaz, le rendement des chaudières à condensation est directement affecté par le régime de température : plus l'eau revient froide, plus le rendement est bon. L'idéal est de revenir à 40°C (régime 60/40 ou 50/40). Pour ces projets la performance des émetteurs est plus que compensée par la moins value liée à la diminution de la puissance installée (performance de l'enveloppe), puis surtout par la réduction importante du coût d'exploitation induit par ces basses températures.

Les planchers chauffants présentent un coût important. Il ne faut cependant pas attribuer systématiquement l'intégralité de ce surcoût à la performance énergétique. En effet, on note que pour le projet *St Christo*, un plancher chauffant a été mis en place alors que techniquement il n'a aucun intérêt. En effet, la génération de chaleur étant un réseau de chaleur bois, la température de retour n'a aucun impact sur le rendement de génération. Le choix du plancher chauffant est ici purement un choix architectural, qui permet d'éviter la présence de radiateurs (choix esthétique et aspect fonctionnel), voire un choix lié à l'amélioration du confort des utilisateurs. Pour le projet *Montrevel*, la génération est une chaudière Gaz à condensation, aussi du point de vue technique des radiateurs au régime 50/40 auraient permis un rendement quasiment aussi bon, à moindre coût. Il s'agit donc en grande partie d'un choix architectural.

NB : Les plancher chauffants nous semblent en revanche totalement justifiés d'un point de vue technique lorsqu'ils sont associés à une pompe à chaleur. Ce cas ne s'est pas présenté sur les opérations suivies (le projet *Santolines* est équipé de radiateurs très basse température et dans le projet *LFI* l'émission se fait par une batterie intégrée à la CTA).

Impact économique du surdimensionnement

Tableau 17 : impact économique du surdimensionnement des émetteurs pour les logements :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Coût des émetteurs	15,9 €	11,2 €	6,6 €	9,3 €	11,8 €	11,9 €	9,5 €				
Coût pour 40 W/m ² SHON installés	10,4 €	9,9 €	4,8 €	3,6 €	5,8 €	7,2 €	12,9 €				
Surcoût du surdimensionnement	5,5 €	1,3 €	1,8 €	5,7 €	6,0 €	4,7 €	-	-	-	-	-
Surinvestissement utile des émetteurs (hors surdimensionnement)	-5,4 €	-4,8 €	-15,7 €	-7,9 €	-6,7 €	-8,1 €	-4,2 €	11,0 €	0,0 €	0,0 €	15,0 €

Ce tableau présente une estimation du surcoût généré par le surdimensionnement des émetteurs de chaleur. Ce calcul a été réalisé uniquement sur les logements, pour lesquels les ratio de puissance installée à ce niveau de performance sont situés entre 30 et 40 W/m². Nous avons donc comparé le coût qu'auraient eu des émetteurs d'une puissance de 40 W/m² à celui du projet (sans changer le régime de température). Le surinvestissement « utile » est ce qui reste de surinvestissement si les émetteurs n'avaient pas été surdimensionnés. Cette valeur est systématiquement négative, c'est à dire qu'on aurait dû réaliser une moins value par rapport à la référence, grâce à la performance de l'enveloppe et de la ventilation.

Une moins value plus importante sur le poste *Emission* aurait pu être dégagée si les émetteurs n'avaient pas été surdimensionnés.

Par exemple sur l'opération *Jardin République* le calcul de déperditions a été mené avec 3 facteurs de surpuissance : les infiltrations ont été supposées de 6 vol/h sous 50 Pa alors qu'on visait 10 fois moins, une surpuissance de relance de 25% a été ajoutée, puis encore 20% de surpuissance pour les émetteurs. On arrive à 56 W/m² alors que vu le niveau de performance de l'enveloppe environ 30 W/m² auraient été suffisants (ZAC de Bonne à Grenoble, les mesures montrent que dans des bâtiments similaires, la puissance ponctuelle maximale (sur un pas de temps de 10 minutes) atteinte pour le chauffage est de 36 W/m²Shab lors un hiver très rigoureux (2009-2010), et si on raisonne au pas de temps de l'heure, ce qui est bien suffisant, elle n'est plus que de 24 W/m²Shab). Résultat : la moins value sur les émetteurs aurait pu être de 6,7 € / m² SHON au lieu de 0,7 € / m² SHON.

Régulation terminale

La référence est la régulation terminale par robinets thermostatiques. Or ce type de régulation ne permet pas de valoriser les apports gratuits (soleil, apports internes). En effet, les robinets thermostatiques ont une bande proportionnelle trop large et très difficile, voire impossible, à prédéterminer par le concepteur : à titre d'exemple, avec une bande proportionnelle de 2°C (ce qui est déjà faible), si l'équilibre est obtenu lorsque la consigne est dépassée de 1,5°C, le robinet est encore ouvert à 25% et le radiateur émet encore 60 à 70% de sa puissance à ouverture maximale ! Dans nombre de bâtiments équipés de robinets thermostatiques où nous avons réalisé des mesures, les températures de consigne n'étaient pas respectées. Le dépassement moyen de consigne est de 2°C, ce qui génère sur un bâtiment performant 30% de surconsommation de chauffage.

Aussi les projets performants s'orientent-ils vers une régulation terminale plus précise et rapide. Plusieurs pistes sont explorées :

- La mise en place dans chaque pièce d'une vanne avec moteur électrothermique piloté par un thermostat simple. Le coût de ce système est très variable en fonction du matériel choisi. Nous recommandons des vannes simples (33 € prix public) et des thermostats simples (22 € prix public pour une précision de 0,5°C). Il reste que le câblage électrique et la main d'œuvre rendent ce système encore trop cher. (340 à 1171 € par logement, à comparer aux 232 à 447 € par logement pour les robinets thermostatiques). L'amplitude de la fourchette de prix nous amènerait à penser qu'il s'agit encore d'un prix d'apprentissage. Mais le moteur électrothermique est pourtant la solution généralisée de régulation des planchers chauffants. Il y a incohérence...

Dernière remarque : le système de régulation par vanne 2 voies et moteur électrothermique est piloté par un thermostat d'ambiance par pièce. Il faut impérativement brider le thermostat vers 20°C maximum, à défaut de quoi les usagers utiliseront des températures beaucoup trop élevées qui ruineront les économies attendues.

- La mise en place d'une vanne trois voies à l'entrée du logement, pilotée par un thermostat par logement a été mise en œuvre pour le projet *Jardin République*. L'idée est de se limiter à une régulation par logement mais d'aller plus loin qu'une régulation tout ou rien en recréant une loi d'eau adaptée à chaque logement. Le coût de cette solution nous semble trop important. Nous attendons le résultat de la campagne de mesure pour en indiquer la performance effective. Par ailleurs, il aurait mieux valu procéder avec une vanne deux voies progressive, ce qui aurait permis une variation de débit. En chaufferie, on aurait alors pu utiliser une pompe à débit variable et faire des économies importantes d'électricité...
- Enfin, on peut mettre en place une seule vanne électrothermique par logement, pilotée par un seul thermostat d'ambiance. Ce système ne permet pas de valoriser totalement les apports gratuits. Les résultats de campagne de mesure du projet *ZAC Fort* montrent que les simples robinets thermostatiques

comme régulation pièce par pièce ne permettent pas de limiter les écarts de température entre pièces. Aussi on peut observer des chambres dont la température est supérieure de 2°C à celle du séjour, au point que les occupants doivent ouvrir la fenêtre pendant la saison de chauffe pour abaisser la température pendant la nuit. Ceci montre que la température dans un logement très isolé est bien plus homogène que dans un bâtiment classique, **mais pas encore assez pour permettre une simple régulation par logement si les apports internes ne sont pas uniformes**. Aussi, si on se contente d'une régulation par logement avec un seul thermostat, on perd la possibilité de couper rapidement l'émission de chaleur lorsque la consigne est dépassée dans une pièce donnée (apports internes importants, menuiseries d'orientation différentes). **On se prive alors d'un gisement important de réduction des consommations de chauffage** (30% environ pour un écart de 2°C).

3.2.4 ECS performante

Tableau 18 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Surinvestissement en € / m ² SHON	-3,2 €	7,1 €	21,6 €	29,7 €	-6,6 €	33,0 €	21,8 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €
Génération performante	-7,6 €	-10,4 €	-3,0 € *1	-5,0 €	-9,9 €	-11,2 €	-3,1 €	0 € *2	- *3	0 € *2	0 € *2
Distribution	4,4 €	6,2 €	9,3 €	13,1 €	3,3 €	6,7 €	4,2 €	-	-	0 € *4	-
Installation solaire	-	11,3 €	15,3 €	21,6 €	-	37,6 €	20,7 €	-	-	-	-
Taux de couverture		30%	38%	NC		NC	54%				
m ² de capteur par logt		1,5 m ²	1,4 m ²	1,7 m ²		1,7 m ²	1,7 m ²				
Coût au m ² de capteur	-	839,8 €	826,1 €	1 220,1 €	-	1 813,6 €	1 255,1 €	-	-	-	-

*1 Génération assurée par un préparateur gaz indépendant

*2 Ballons électriques

*3 Pas d'ECS

*4 Distribution par bouclage

Génération performante

Logements :

On remarque que l'économie réalisée entre le projet performant et la référence (chaudière double service individuelle) compense totalement la création du réseau de distribution.

Un surcoût plus important est nécessaire pour le projet *Visitandines* où un préparateur ECS au gaz totalement indépendant a été mis en place. Ce système est très intéressant car on constate pour la génération ECS par la chaudière principale que le rendement de génération est fortement dégradé en été du fait du surdimensionnement de la chaudière par rapport au besoin d'ECS et des pertes du circuit primaire. Le générateur indépendant supprime la nécessité du circuit primaire (brûleur intégré au ballon) et fonctionne avec un rendement constant toute l'année.

Bâtiment tertiaire :

Dans les bâtiments tertiaires, les besoins en ECS étant faibles, on adopte souvent la génération par ballon électrique. Cette solution est identique à la référence.

On note deux variantes intéressantes :

- Le projet LFI où il n'y a pas de fourniture d'eau chaude : en effet, l'eau chaude n'est pas nécessaire pour les bureaux. Les lave main sont alimentés en eau froide. On génère une économie et une simplification importante grâce à la volonté de sobriété du maître d'ouvrage.
- A l'inverse, le projet *Saint Christo* dispose d'une distribution par bouclage, ce qui n'est ni performant (le bouclage 8760h/an, et contribue aux surchauffes en été), ni économique : on aurait pu prévoir des petits ballons décentralisés et sur isolés et supprimer le bouclage. C'est précisément l'intérêt du ballon électrique en tertiaire que de pouvoir le placer au plus près du besoin, sans nécessiter de bouclage. La campagne de mesure montrera assurément que l'essentiel de la consommation de l'ECS, compte tenu des besoins très réduits du bâtiment, sera constitué des pertes de la boucle.

ECS solaire

Le surcoût du poste ECS performante est au final uniquement généré par l'installation d'ECS solaire.

On constate des disparités plus ou moins importantes :

- Sur la conception : la surface installée varie peu mais elle varie de 1,4 à 1,7 m² par logement. Or généralement le dimensionnement optimal (en Rhône Alpes) nous semble être de 1,5 m² par logement : on atteint ainsi un taux de couverture intéressant (40 à 45 %) sans générer de risque de surchauffe en été (lorsqu'une part importante des occupants est en vacances). On note également que les règles habituelles de dimensionnement des installations de production d'ECS (solaire ou non) sont fondées sur des besoins dont les campagnes de mesure montrent qu'ils sont surévalués **d'un facteur 3**, en partie parce qu'ils ne tiennent pas compte de la présence des réducteurs de débit pourtant à l'origine d'une réduction importante de la consommation.
- Sur le prix des installations : le coût des installation solaires (capteurs, liaison solaire, module de transfert, ballon solaire, régulation) rapporté au m² de capteur varie de 826 à 1814 € / m². **Ce dernier niveau de prix nous semble aujourd'hui inadmissible.** Il est grand temps que les professionnels de ce secteur se ressaisissent et cessent de profiter des effets d'aubaines que sont les diverses subventions à l'énergie solaire thermique. A force de pratiquer des prix déraisonnables, les professionnels risquent de tuer la filière.

Récupération de chaleur sur eaux grises

Aucun des projets suivi n'a mis en œuvre de récupération de chaleur sur les eaux usées. Le principe en est de préchauffer l'eau froide avec l'eau encore chaude provenant notamment des douches. Ce type de récupération, assez courant au Canada, arrive actuellement sur le marché français. A suivre.

3.2.5 Plomberie

Tableau 19 : Résultat global :

Projet SHON en m ²	ZAC Fort 1965 m ²	Salvagny 2658 m ²	Visitandines 2195 m ²	Revel 549 m ²	Jardin Rép. 4081 m ²	Le Pérenne 1213 m ²	Santolines 410 m ²	ZAC Thiers 4515 m ²	LFI 1865 m ²	St Christo 1080 m ²	Montrevel 1845 m ²
Surinvestissement en € / m ² SHON											
Equipements hydro économes	0,75 €	0,50 €	0,34 €	0,49 €	0,39 €	0,37 €	0,69 €	0,05 €	0,00 €	0,24 €	0,04 €
Récupération d'eaux pluviales							1,7 €				8,7 €

C'est probablement avec le traitement de l'étanchéité à l'air la mesure la plus rentable que l'on peut prendre sur les bâtiments performants !

En effet pour ce coût dérisoire, les économies sur la consommations d'ECS atteignent 25 à 40%, ce qui est très important.

Une fois le retour d'expérience établi, **ces réductions de consommations pourront même permettre de repenser le dimensionnement des installations de fourniture d'ECS** (réduction de la puissance nécessaire pour chauffer l'eau, réduction du diamètre des conduits de distribution d'eau chaude et froide, réduction de la surface de capteurs solaires), ce qui aura un impact important sur le coût du poste *ECS performante*.

NB : cette économie n'est pas encore prise en compte dans le moteur RT 2005.

3.2.6 Maîtrise de la demande en électricité

Tableau 20 : Résultat global :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Surinvestissement en € / m ² SHON	4,76 €	6,75 €	9,37 €	0,00 €	3,91 €	3,13 €	4,58 €	7,46 €	18,14 €	8,12 €	11,91 €
Prise commandée poste audiovisuel	0,34 €	0,00 €	1,51 € *2	0,00 €	0,37 €	0,45 €	0,29 €	-	-	-	-
Eclairage performant en logement	0,75 €	1,15 €	0,00 €	0,00 €	0,41 €	0,00 €	0,78 €	-	-	-	-
Eclairage performant intérieur *1	1,12 €	3,07 €	4,44 €	0,00 €	0,18 €	0,20 €	0,72 €	5,51 €	16,80 €	0,55 €	5,20 €
Commande par détection / gradation	-	-	-	-	-	-	-	0,37 €	1,26 €	5,23 €	2,69 €
Eclairage performant extérieur	0,95 €	0,15 €	0,55 €	0,00 €	-	-	2,79 €	0,25 €	-	2,33 €	2,31 €
Ascenseurs	1,60 €	2,37 €	2,87 €	-	2,94 €	2,47 €	-	1,33 €	0,08 €	-	1,71 €

*1 Y compris BAES performants

*2 Deux prises par logement, chiffrées chères

Bâtiments de logements

La prise commandée du poste audio visuel a pour but de permettre aux utilisateurs d'éteindre les veilles des appareils à partir d'un interrupteur situé à côté de celui de l'éclairage du salon. L'économie constatée dans les logements où cette prise est utilisée est d'environ 6 kWh/m².an (énergie primaire) en moyenne. Ce qui justifie pleinement le surinvestissement de moins de 0,4 €/m² (temps de retour de moins de deux ans).

NB : les économies réalisées sur ce poste n'apparaissent pas dans le calcul RT 2005 qui ne prend pas en compte l'électricité spécifique hors éclairage.

La fourniture de lampes basse consommation dans toutes les pièces principales des logements permet de réduire d'environ 7 kWh/m².an en moyenne la consommation d'énergie primaire par rapport à la moyenne constatée (mix actuel de lampes à incandescence et lampes basse consommation). Le surinvestissement et l'économie réalisée varient en fonction du nombre de LBC fournies (de 2 par logement à ZAC Fort à 5 par logement à Salvagny). Il nous semble également pleinement justifié.

NB : le calcul RT 2005 prend en compte forfaitairement une puissance installée de 2W/m² en logement et des durées d'utilisation forfaitaires. Ainsi le calcul RT 2005 ne permet pas de valoriser la fourniture de lampes basse consommation. Aussi dans la référence logement BBC strict, ce poste de surinvestissement ne sera pas pris en compte.

L'éclairage performant des parties communes des logements présente un surinvestissement modéré pleinement justifié par les économies en énergie et en maintenance (les LBC et les tubes T5 ont une durée de vie supérieure à celle de leurs homologues moins performants respectivement d'un facteur 5 et 2).

NB : poste non pris en compte dans le calcul RT 2005.

De même, le surcoût des ascenseurs performants (contreponds, variation de fréquence, contrôle éclairage cabine, absence de réducteur de vitesse) est très raisonnable et rentable par l'économie de consommation électrique générée et surtout par la réduction de la puissance souscrite (abonnement moins cher).

NB : poste non pris en compte dans le calcul RT 2005.

Maîtrise de la demande d'électricité des bâtiments tertiaires

L'éclairage performant des bâtiments tertiaires génère un surcoût difficile à évaluer. Nous nous sommes efforcés de répartir le surcoût entre performance énergétique et choix esthétique. Les surinvestissements calculés sont logiquement assez variable en fonction de la performance obtenue. Ce surinvestissement nous semble absolument justifié pour les raisons suivantes :

- L'éclairage performant est plus confortable (on travaille l'homogénéité de la lumière, les contrastes, le rendu des couleurs...)
- L'éclairage est le second poste de consommation des bâtiments tertiaires performants après la bureautique. Un travail sur ce poste est absolument nécessaire pour abaisser significativement la consommation d'énergie tous usages confondus.
- La remarque précédente est encore plus importante pour les bâtiments qui se veulent à énergie positive.
- La réduction des consommations électriques conduit à une réduction des apports internes, ce qui ouvre la porte à une simplification des systèmes et à des économies importantes (voir à ce sujet le paragraphe 3.2.2).
- La réduction des apports internes induite permet d'améliorer le confort intérieur en été, et constitue une première étape pour se passer de climatisation.

Remarque complémentaire : ces constatations nous conduisent à recommander systématiquement des études Dialux (logiciel disponible gratuitement sur Internet) ou équivalent dès la phase de conception pour optimiser ce poste très important de consommation. Les fabricants de luminaires offrent aujourd'hui une large gamme de luminaires très performants (sources performantes, haut rendement optique, éclairage extensif...).

La réduction des consommations des appareils de bureautique n'apparaît pas dans cette étude car ces équipements ne figurent pas dans les lots associés à la construction. C'est cependant comme l'éclairage une problématique de plus en plus centrale dans la conception de bâtiments performants. Les actions possibles sont les suivantes :

- Systématiser l'utilisation d'ordinateurs portables, qui consomment beaucoup moins que les fixes. On privilégiera les diagonales d'écran raisonnables (la consommation d'un portable passe de 25 W pour un 15'' à 65 W pour un 17''...). Ceci peut se faire en renouvellement du parc existant en fin de vie (pas de surcoût).
- Ne pas surdimensionner les onduleurs : un onduleur utilisé à 50% de sa capacité a un rendement d'environ 50%, alors qu'il atteint 90% s'il est dimensionné au plus juste.
NB : il est inutile de raccorder sur onduleur les ordinateurs portables, qui disposent d'une batterie.
- Systématiser la programmation des veilles et arrêts automatiques de tous les appareils. Combien d'ordinateurs restent allumés la nuit et le week-end...
On note que ceci peut nécessiter de repenser la politique de sauvegarde des données (sauvegarde en fin de journée de travail et extinction automatique après sauvegarde...)
- Privilégier les serveurs basse consommation (arrivée prochaine sur le marché).

On rappelle que ces économies permettent également la simplification des systèmes, notamment de rafraîchissement et donc des économies importantes à la construction et à l'exploitation. Elles permettent aussi de concevoir des installations sans climatisation induisant donc une grosse moins value.

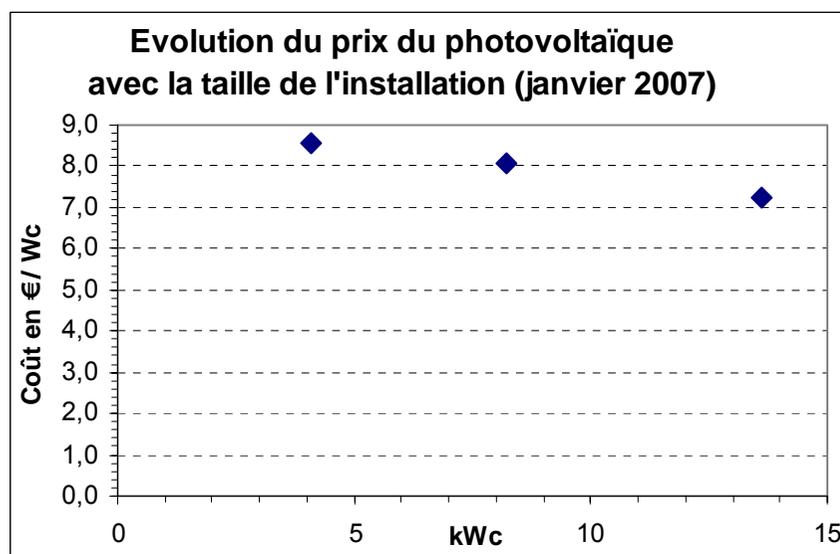
Cette problématique est essentielle pour les bâtiments qui se veulent à énergie positive, pour lesquels l'objectif d'énergie positive ne peut être atteint sans un minimum de responsabilisation des utilisateurs.

3.2.7 Photovoltaïque

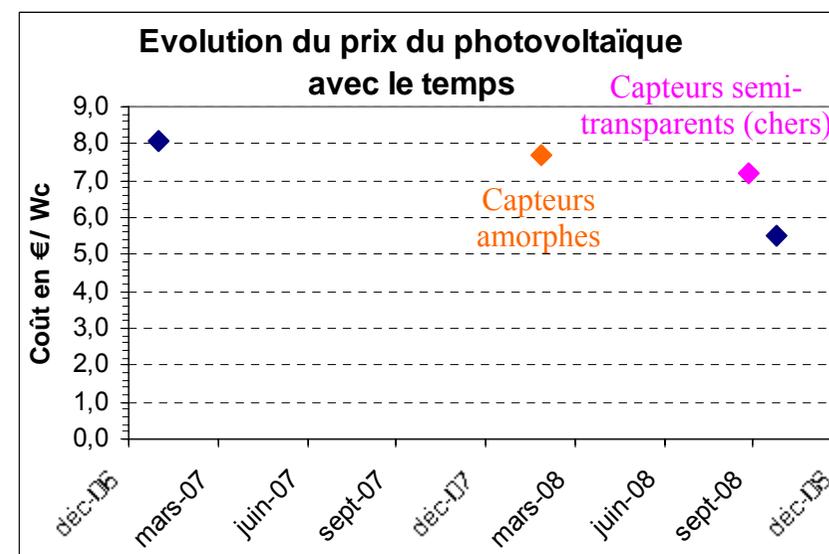
Tableau 21 : Résultat global :

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
Investissement en € / m ² SHON				62,1 €					186,0 €	152,4 €	36,1 €
Puissance installée en kWc				6,5 kWc					48,3 kWc	22,8 kWc	8,2 kWc
Coût au Watt crête installé				5,5 €/Wc					7,18 €	7,7 €/Wc	8,1 €/Wc

Les données de prix des opérations suivies permettent les observations suivantes :



Graphique 10 : Prix au Watt crête des devis de l'installation photovoltaïque du projet Montrevel en fonction de la puissance envisagée

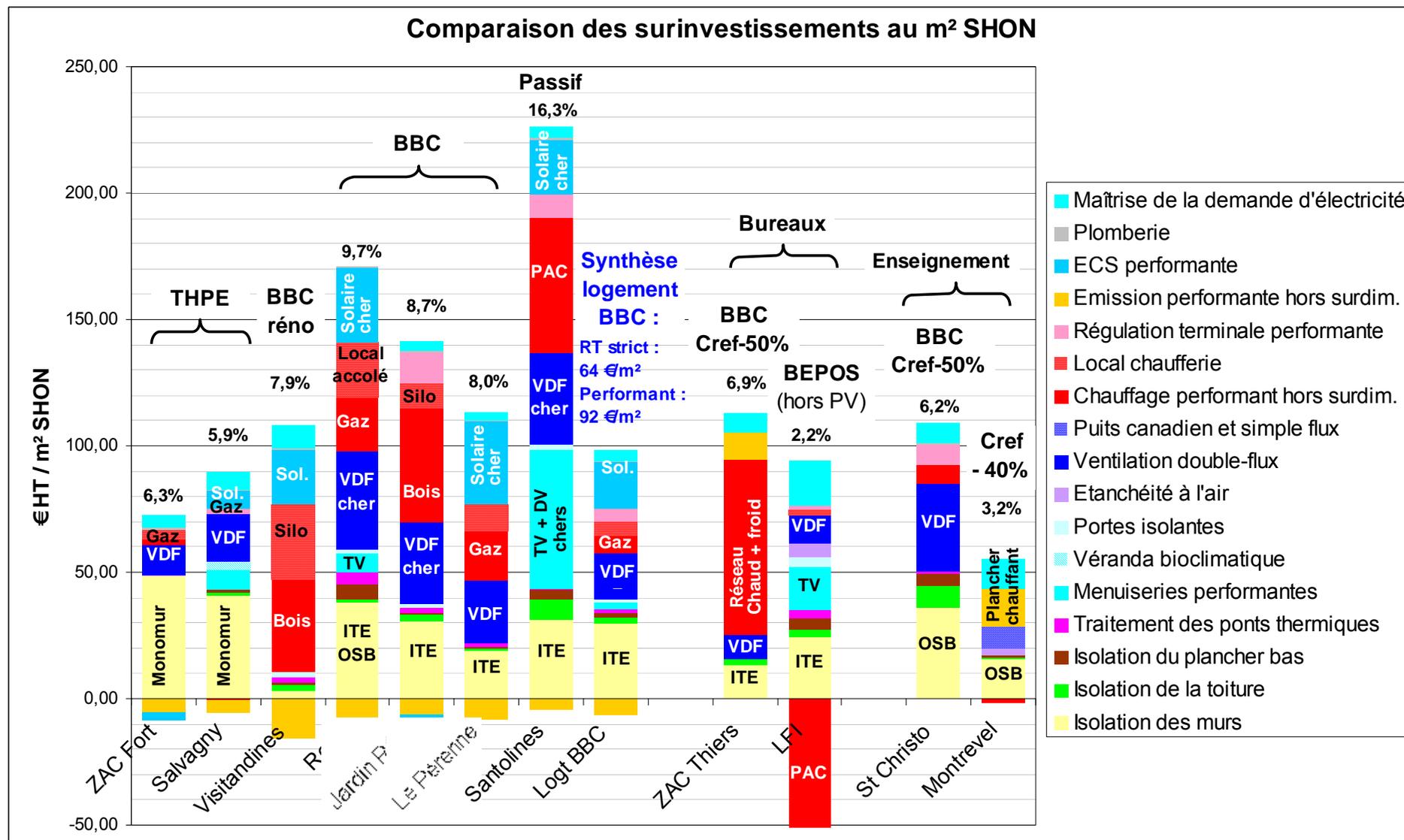


Graphique 11 : Prix au Watt crête des installations photovoltaïques des différentes opérations classées dans l'ordre chronologique de date de signature des marchés

On note que le prix au Watt crête installé d'une installation photovoltaïque (capteurs et onduleurs) diminue avec la puissance installée, et que le prix est en constante diminution depuis des années. On ne remarque pas de différence notable de prix entre les installations comportant des capteurs mono ou polycristallins et les capteurs amorphes (projet *Saint Christo*) servant de membrane d'étanchéité souple. Les capteurs semi-transparents restent plus chers.

NB : Une installation photovoltaïque est une opération rentable en elle-même. Aussi le coût de l'installation est à considérer intégralement comme un investissement. **Attention : les prix ci-dessus ne sont plus du tout d'actualité car le prix des photopiles baisse très vite ces dernières années.**

3.3 Bilan transversal



Graphique 12 : Graphique synthétique des surinvestissements (en €/m² SHON et en % du montant des travaux) liés à la performance énergétique

Tableau 22 : Récapitulation détaillée des surinvestissements en € HT par m² SHON (prix actualisés sur l'indice BT de Novembre 2009)

Projet	ZAC Fort	Salvagny	Visitandines	Revel	Jardin Rép.	Le Pérenne	Santolines	ZAC Thiers	LFI	St Christo	Montrevel
SHON	1965 m ²	2658 m ²	2195 m ²	549 m ²	4081 m ²	1213 m ²	410 m ²	4515 m ²	1865 m ²	1080 m ²	1845 m ²
Niveau de performance	THPE RT2000	THPE	BBC réno	BBC	BBC + Minergie	BBC	Passif	BBC	BEPOS	BBC	Cref - 40%
Performance Cep BBC en kWh/m ² SHON	101	73	71	65 hors PV	63	60	< 45	58,8	21 hors PV	95 hors PV	108 hors PV
Date des marchés	déc-06	juin-07	oct-09	oct-08	mai-08	févr-08	déc-08	mai-08	sept-08	févr-08	janv-07
Prix total opération au m ² SHON	1 015 €	1 431 €	1 178 €	1 682 €	1 469 €	1 308 €	1 363 €	1 642 €	1 946 €	1 760 €	1 688 €
<i>Isolation des murs</i>	48,5 €	63,8 €	6,1 €	57,6 €	35,5 €	19,9 €	49,0 €	13,3 €	27,0 €	36,2 €	23,7 €
Isolation des murs hors surcoût de la non compacité	48,5 €	40,9 €	3,3 €	38,4 €	30,6 €	19,0 €	31,3 €	13,3 €	23,9 €	36,2 €	15,6 €
Isolation de la toiture	0,1 €	1,3 €	2,3 €	1,1 €	2,7 €	0,9 €	8,3 €	2,1 €	3,2 €	8,2 €	0,5 €
Isolation du plancher bas	0,0 €	0,8 €	0,9 €	5,7 €	0,7 €	0,8 €	3,3 €	0,0 €	4,4 €	5,3 €	0,8 €
Traitement des ponts thermiques	0,0 €	0,0 €	2,0 €	5,0 €	1,9 €	1,7 €	0,8 €	0,0 €	3,3 €	1,1 €	0,0 €
<i>Balcon désolidarisé</i>				23,2 €	53,6 €	27,8 €	22,1 €				
<i>Inertie : voile béton extérieur au lieu de façade légère</i>									70,0 €		
Menuiseries performantes	0,0 €	8,0 €	0,0 €	7,5 €	0,0 €	0,0 €	54,9 €	0,0 €	17,4 €	0,0 €	0,0 €
<i>Bouchon thermique</i>									133,4 €		
Véranda bioclimatique		3,0 €									
Portes isolantes	0,0 €	0,3 €	2,5 €	1,7 €	1,9 €	0,0 €	2,0 €	0,0 €	3,9 €	0,0 €	0,0 €
Étanchéité à l'air	0,2 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	5,2 €	0,0 €	2,9 €
Ventilation double-flux	11,7 €	18,8 €		38,5 €	32,3 €	24,3 €	36,4 €	9,8 €	11,3 €	34,5 €	
Puits canadien et ventilation simple flux											8,5 €
<i>Chauffage performant</i>	9,6 €	3,8 €	41,2 €	21,9 €	52,9 €	20,5 €	53,4 €	69,2 €	-51,7 €	7,1 €	-1,5 €
Chauffage performant hors surdimensionnement	2,1 €	-0,5 €	36,3 €	21,5 €	45,1 €	19,6 €	53,4 €	69,2 €	-51,7 €	7,1 €	-1,5 €
Local chaufferie	4,2 €	0,1 €	29,7 €	21,3 €	9,6 €	10,6 €	0,3 €	0,0 €	2,4 €	0,0 €	0,0 €
<i>Emission performante</i>	0,1 €	-3,5 €	-13,9 €	-2,2 €	-0,7 €	-3,4 €	-4,2 €	11,0 €	0,0 €	0,0 €	15,0 €
Emission performante hors surdimensionnement	-5,4 €	-4,8 €	-15,7 €	-7,9 €	-6,7 €	-8,1 €	-4,2 €	11,0 €	0,0 €	0,0 €	15,0 €
Régulation terminale performante	0,0 €	2,1 €	0,0 €	0,0 €	12,6 €	0,0 €	8,8 €	0,0 €	1,1 €	8,4 €	0,0 €
ECS performante	-3,2 €	7,1 €	21,6 €	29,7 €	-6,6 €	33,0 €	21,8 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €	0,0 €
Plomberie	0,7 €	0,5 €	0,3 €	0,4 €	0,4 €	0,3 €	0,7 €	0,0 €	0,0 €	0,2 €	0,0 €
<i>Récupération EP</i>							1,7 €				8,7 €
<i>Suivi des performances</i>	0,0 €	1,0 €	1,6 €	0,0 €	1,1 €	0,0 €	2,7 €	3,6 €	19,6 €	11,2 €	0,0 €
Maîtrise de la demande d'électricité	4,8 €	6,7 €	9,4 €	0,0 €	3,9 €	3,1 €	4,6 €	7,5 €	18,1 €	8,1 €	11,9 €
<i>Photovoltaïque</i>				62,1 €					186,0 €	152,4 €	36,1 €
<i>Qualité environnementale</i>	0,0 €	14,2 €	28,7 €	19,1 €	0,0 €	0,0 €	26,0 €	28,2 €	14,7 €	8,9 €	30,4 €
Surinvestissement hors lignes grisées en €/m ² SHON	63,7 €	84,3 €	92,5 €	162,9 €	128,3 €	105,2 €	222,2 €	112,9 €	42,6 €	109,0 €	53,8 €
Surinvestissement hors lignes grisées en % du total	6,3%	5,9%	7,9%	9,7%	8,7%	8,0%	16,3%	6,9%	2,2%	6,2%	3,2%
Surinvestissement hors lignes grisées au logement	5 689 €	7 728 €	7 255 €	12 776 €	10 269 €	8 504 €	22 775 €				

NB : dans le tableau précédent, les lignes grisées ne sont pas comptabilisées dans le total et n'apparaissent pas dans le graphique 12, pour les raisons qui sont détaillées au fil du rapport et qui sont rappelées ici :

- Isolation des murs est remplacé par l'isolation des murs hors surcoût de la non compacité. En effet, la volonté de faire des bâtiments non compacts génère un surcoût qui n'a rien avoir avec la performance, puisqu'au contraire cela dégrade la performance de l'enveloppe. Ce surcoût est donc retranché ;
- Balcon désolidarisé : cette solution nous semble bien trop chère par rapport au gain énergétique. Voir le détail page 37 ;
- Inertie des voiles béton en mur extérieur : les murs béton extérieur ne contribuent pas au confort d'été à cause de la surface d'échange trop faible. Voir le détail page 51 ;
- Bouchon thermique : solution originale proposée dans un projet, mais dont le surcoût ne nous semble pas justifié par son impact sur les consommations d'énergie ;
- Chauffage performant : ce poste n'est pas compté directement, mais seulement une fois déduit le surcoût généré par le surdimensionnement ;
- Emission performante : de même, on retranche le surcoût du surdimensionnement ;
- Récupération des eaux pluviales : poste mentionné pour mémoire, sans impact énergétique direct ;
- Suivi des performances : poste mentionné pour mémoire ;
- Photovoltaïque : une telle installation est rentable en elle-même grâce au tarif de rachat. Le surinvestissement n'a pas à apparaître dans la performance énergétique.
- Qualité environnementale : étude partielle de ce vaste sujet, cité pour mémoire. La valeur comporte notamment le surcoût des menuiseries bois par rapport à leur équivalent thermique, celui des sols linoléum ou caoutchouc par rapport à un sol souple PVC, le local vélo, etc...

Surinvestissement représentatif du BBC : « Synthèse logement BBC »

On note que sur les trois opérations de logements BBC, chacune comporte une originalité (installation de ventilation double flux plus chère que les autres sans raison technique, local chaufferie non accolé, choix de l'énergie bois, installation solaire très chère), qui fait que **le prix total de l'opération n'est pas représentatif de la généralité des bâtiments BBC**. Nous proposons donc l'établissement d'une référence de coût pour les logements BBC, basée sur l'ensemble des opérations de logements en retenant pour chaque poste une solution standard permettant d'atteindre le niveau BBC (cette solution est globalement celle du projet *Le Pérenne*).

Définition du surinvestissement moyen BBC (calcul RT 2005 strict), pour l'établissement d'un surinvestissement de référence :

- Isolation des murs : moyenne des surinvestissements en ITE ;
- Isolation de la toiture, du plancher bas : moyenne des surinvestissements ;
- Traitement des ponts thermiques : pas de balcon désolidarisé ;
- Menuiseries performantes : moyenne des surinvestissements sauf *Santolines* (Triple Vitrage pour niveau Passif), pas de véranda ;
- Portes isolantes : moyenne des surinvestissements ;
- Etanchéité à l'air : moyenne des surinvestissements ;
- Ventilation : ventilation simple flux hygro. Dans le calcul RT 2005 la ventilation double flux aboutit à un Cep égal ou inférieur à la ventilation simple flux hygroréglable. Aussi on peut tout à fait faire une opération labellisée BBC avec une ventilation simple flux. On se place ici dans une référence BBC calcul RT 2005 stricte, sans considération de l'impact sanitaire du simple flux ni de la performance réelle. Pas de puits canadien ;

- Chauffage : moyenne des surinvestissements des chaufferie Gaz condensation modulantes, hors projet *Revel* (local chaufferie accolé) ;
- Local chaufferie : moyenne des surinvestissements des chaufferies Gaz, hors projet *Revel* (local chaufferie accolé) ;
- Emission performante : radiateurs à un régime permettant une bonne condensation (50/40 ou 60/40), moyenne des surinvestissements sur les projets correspondant ;
- Régulation terminale : robinets thermostatiques, car la vanne à moteur électrothermique et un thermostat par pièce, bien que plus performante, n'est pas valorisée par le calcul RT 2005 ;
- ECS performante : installation solaire, appoint Gaz. Moyenne des surinvestissements sur les projets correspondants, sauf *Le Pérenne* où le coût du solaire nous semble excessif ;
- Plomberie : les équipements hydroéconomiques ne sont pas pris en compte dans le calcul RT 2005 – non compté ;
- Maîtrise de la demande d'électricité : non pris en compte dans le calcul RT 2005 – non compté ;

Définition d'une référence BBC allant au-delà du calcul RT et intégrant des considération de qualité de l'air intérieur :

On ajoute à la référence BBC « calcul RT 2005 strict » les postes suivants :

- Ventilation double flux : moyenne des surinvestissements des 3 projets les moins chers, qui nous semblent représentatifs du prix réel de la ventilation double flux hors surcoût psychologique dû à la nouveauté ;
- Régulation terminale : une vanne électrothermique et un thermostat par pièce ;
- Plomberie : moyenne des surinvestissements constatés ;
- Maîtrise de la demande d'électricité : moyenne des surinvestissements constatés ;

Ces références constituent la huitième barre du graphique 12. On arrive au surcoût de référence BBC de 64 €/ m² SHON (BBC au sens RT strict) ou de 92 €/m² SHON (pour aller plus loin que le simple calcul réglementaire).

4 Conclusion

Bilan des surinvestissements constatés :

Le surinvestissement des **logements THPE** est compris entre **47 et 53 €/m²** (hors ventilation double flux, 64 et 84 €/m² avec), ce qui représente **3,7% à 4,6 %** du montant des travaux.

Le surinvestissement des **logements BBC et BBC rénovation** est compris entre **5,4% et 7,4%** du coût total des travaux (hors ventilation double flux, 8 à 10 % avec). Le **surinvestissement moyen des logements BBC** défini page précédente est de **64 €/m²** (93 €/m² si on ajoute une régulation terminale performante, la réduction des consommations d'ECS, la maîtrise de la demande en électricité et si la ventilation double flux est retenue).

Une seule opération de logement atteint le niveau **Passif**. Si le surinvestissement de **222 €/m²** peut sembler élevé, on constate que le prix total des travaux n'est que de **1 363 €/m² SHON**, donc l'un des moins élevés du panel, ce qui est loin d'être exorbitant. Avec 4 logements cette opération est aussi la plus petite, ce qui n'est évidemment pas favorable pour conduire une opération expérimentale comme celle-ci (pas d'effet d'échelle).

Pour les bâtiments de bureaux, on constate un surinvestissement de **113 €/m² (6,3%)** si la conception est traditionnelle, et **très faible (43 €/m² - 2,2% hors installation photovoltaïque)** si la conception permet de réduire les surchauffes en été et de se contenter d'un rafraîchissement passif comme dans le cas des bureaux de LFI.²

Si l'on prend en compte l'investissement dans les photopiles, cette opération de bureaux à énergie positive présente un surinvestissement (hors bouchons thermiques) de **229 €/m² SHON**, dont les 186 €/m² de photopiles qui sont rentables par elles-mêmes (au moyen du tarif d'achat du courant). Pour mémoire, se rajoute sur le prix de l'opération les bouchons thermiques et les murs béton sensé ajouter à l'inertie, ce qui amène au surcoût total de 432 €/m², sachant que l'impact réel sur la performance d'hiver et d'été de ces deux surcoûts reste à mesurer.

Pour les bâtiments d'enseignement, le surinvestissement constaté est de **54 à 109 €/m²**, ce qui représente de **3 à 6%** du montant des travaux.

De plus, l'étude détaillée de chaque poste a permis de mettre en lumière les messages forts suivants :

- L'isolation par l'extérieur permet une importante réduction des ponts thermiques qui justifie son surcoût. Celui-ci apparaît modéré une fois déduits les moins values que génère l'isolation par l'extérieur sur le gros œuvre.
- **La compacité a un impact majeur sur l'économie des projets.** A performances égales un projet peu compact coûtera plus cher en gros œuvre et nécessitera des épaisseurs d'isolant plus importantes, voire même introuvables dans le cas des bâtiments les plus performants.
- L'isolation des toitures et du plancher bas n'est pas un poste important. A performances égales il vaut mieux isoler fortement le plancher bas et la toiture que compenser un plancher bas peu isolé par une surisolation des murs.
- Considérations architecturales mises à part, les balcons totalement désolidarisés (autoportés) présentent un surcoût qui nous semble disproportionné par rapport au gain énergétique qu'ils génèrent.

² On note que ce résultat confirme l'expérience de l'INEED près de Valence TGV où le surinvestissement constaté était nul par rapport à un bâtiment de bureaux traditionnel.

- Le coût des menuiseries performantes est très variable. D'un côté, certains prix reflètent un coût d'apprentissage voire d'opportunisme. De l'autre, **de plus en plus de menuisiers « jouent le jeu » et proposent des menuiseries très performantes à un prix très compétitif.**
- L'étanchéité à l'air est devenue en quelques années une thématique très forte des bâtiments basse consommation. Elle nécessite surtout une bonne conception (carnet de détails), l'investissement étant très faible par rapport au gain énergétique.
- La ventilation double flux n'est pas nécessaire pour atteindre le niveau BBC selon le calcul RT 2005. On retient cependant que les dernières études consacrées à la pollution de l'air intérieur jettent un doute majeur sur l'impact de la ventilation hygro-réglable sur la concentration en formaldéhyde (cancérogène certain) dans les logements. **Nous tenons à alerter les maîtres d'ouvrage sur ce risque sanitaire, qui plaide en faveur de la ventilation double flux.**
- La leçon principale de cette étude nous semble porter sur la conception générale de l'enveloppe et des systèmes dans un bâtiment basse consommation : il nous semble essentiel pour construire des bâtiments performants à coût réduit que **la conception commence par la réduction des besoins :**
 - Avant de parler de systèmes de chauffage compliqués, on doit s'attacher à concevoir une forte isolation de l'enveloppe et une étanchéité à l'air parfaite. Cette conception doit ensuite être valorisée en dimensionnant au plus juste les installations pour dégager des moins values. **Tout surdimensionnement est à la fois nuisible à la performance énergétique et nuisible à l'économie du projet.**
 - Dans le même esprit les limiteurs de débit voire la récupération de chaleur sur eaux grises permettent de réduire la consommation d'Eau Chaude Sanitaire à la source. On peut ainsi limiter la taille d'installations comme le solaire thermique qui sont encore trop coûteuses et dont le surdimensionnement peut générer des problèmes de surchauffe des capteurs.
 - Avant d'envisager une climatisation active, il faut commencer par maîtriser des surfaces vitrées, prévoir les occultations nécessaires, et travailler à la réduction des consommations d'éclairage et de bureautique. Ces mesures contribuent à réduire le risque de surchauffe en été, et doivent permettre d'**éviter à tout prix le surcoût engendré par une climatisation active.** Un rafraîchissement passif (surventilation nocturne en logement, géocooling ou puits canadien en tertiaire) permet alors d'assurer le confort des utilisateurs à un coût maîtrisé.