
RAPPE

DE : LUC FLOISSAC, JEAN-FRANÇOIS COLLART, AGNES POUGET, NATHALIE TORNAY, LAURE FERNANDEZ, PATRICK LOISEL, ALAIN CHATELET.

A : HELENE VARLET (ADEME)

DATE : 15 DÉCEMBRE 2008

Rapport final.



Sommaire

RAPPE.....	1
1 Objectifs du projet.....	4
2 Description du bâtiment.....	4
2.1 Plan de masse.....	5
2.2 Matériaux.....	5
2.3 Pathologies.....	6
3 Scenarii.....	7
3.1 Bâtiment simplifié.....	7
3.2 Scénario A : Bâtiment existant.....	7
3.2.1 Simulations thermiques : besoin de chauffage.....	7
3.2.2 Simulations thermiques – confort d’été.....	9
3.2.3 Influence de l’orientation de serres.....	9
3.3 Scénario B : Bâtiment isolé par l’extérieur sans serre.....	9
3.3.1 Scénario B1 : Bâtiment isolé par l’extérieur avec double vitrages standard.....	10
3.3.2 Scénario B2 : Bâtiment isolé par l’extérieur avec double vitrages à l’argon $U = 1,5$	11
3.3.2.1 Simulations thermiques : besoin de chauffage.....	12
3.3.2.2 Simulations thermiques – semaines chaudes.....	13
3.3.2.3 Simulations thermiques – semaines la plus froide.....	14
3.4 Scénario C : Bâtiment isolé par l’extérieur avec serre et vitrages à l’argon.....	14
3.4.1 Simulations thermiques : besoin de chauffage.....	15
3.4.1.1 Simulations thermiques – semaine de canicule.....	16
3.4.1.2 Simulations thermiques – semaine la plus froide.....	17
3.4.2 Comparatif des besoins de chauffage entre les différents scenarii.....	18
3.4.3 Comparatif des coûts de chauffage entre les différents scenarii (en 2006).....	19
3.4.4 Evolution des coûts de chauffage selon l’augmentation du coût de l’énergie.....	20
4 Préconisations.....	21
4.1 Gestion des soubassements.....	21
4.1.1 Influence de la position des fenêtres en tableau.....	21
4.2 Isolation des murs.....	22
4.3 Isolation des combles.....	24
4.4 Menuiseries extérieures et vitrages.....	25
4.5 Volets.....	26
4.6 Corniche.....	27
4.7 Chauffage.....	28
4.8 Ventilation.....	28
5 Economie / performance thermique et environnementale.....	29
5.1 Comparatif de deux techniques d’isolation par l’extérieur.....	29
5.2 Récapitulation de solutions de réhabilitation.....	30
6 Contrôles qualité.....	31
7 Coût des travaux.....	32
7.1 Coût des travaux par postes :.....	32
8 Comparaison de stratégies de démolition / reconstruction.....	34
9 Conclusions.....	35

Objet

Ce document a pour but de récapituler les solutions architecturales et techniques réalisées lors de la réhabilitation lourde d'un bâtiment ancien. Ces travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre du projet RAPPE lauréat de l'appel à projet du PREBAT.

Equipe

Les travaux ont été réalisés par l'équipe suivante.

Luc Floissac : chercheur (GRECAU)
Alain Chatelet : chercheur (GRECAU)
Jean-François Collart : Architecte
Agnès Pouget : Architecte
Nathalie Tornay : Architecte (doctorante au GRECAU)
Laure Fernandez : Architecte (doctorante au GRECAU)
Patrick Loisel : SA HLM des Chalets

Moyens utilisés :

- Les simulations thermiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Pléiades+Comfie d'Izuba Energies dans sa version 2.13.
- Les calculs de ponts thermiques ont été réalisés avec le logiciel Therm version 5.2.14.

1 Objectifs du projet

Les objectifs du projet sont centrés sur une approche économique et performante de la rénovation. Elles mettent l'accent sur la nécessité d'adapter les techniques de rénovation aux spécificités des bâtiments anciens traditionnels.

Ces objectifs se déclinent de la manière suivante :

- Rénover le bâtiment sans modifier sa volumétrie.
- Aménager 3 appartements (dont 1 pour handicapé).
- Utiliser certaines technologies contemporaines indiscutables.
 - Fermetures et vitrages performants.
 - Dispositifs de chauffage à haut rendement.
- Revisiter de manière critique certaines pratiques
 - Ventilation.
 - Négligence de l'inertie thermique
 - Mauvais traitement des problèmes de vapeur d'eau,
 - Fragilité des isolants
- Diminuer la consommation énergétique
 - Constatée à : 223 Kwh ef / m² / an
 - Espérée à : 40 Kwh ep / m² / an de besoins de chauffage.
- Restreindre les émissions de CO2 liées à la rénovation du bâtiment.
- Réaliser l'opération à un coût raisonnable pour une rénovation lourde (environ 1100 € HT / m² habitable).

2 Description du bâtiment.

Le bâtiment à rénover est une vieille maison toulousaine comportant 3 appartements mitoyens s'étalant chacun sur 2 niveaux (RDC, 1^o étage).



2.1 Plan de masse



Le bâtiment situé dans les faubourgs de la ville de Toulouse est orienté sud-est.

2.2 Matériaux

Les matériaux de construction présents sont les suivants :

- à l'extérieur, les murs sont constitués de « briques foraines » parfois associées à des galets et sont recouverts par un enduit de ciment partiellement dégradé.
- Le sol du RDC est constitué d'une dalle de béton coulée sur une ancienne dalle de terres cuites posées à la chaux sur le sol.
- Les murs de refend sont constitués d'un soubassement de pierre et de briques cuites surmonté d'adobes (briques de terre crue). Compte tenu de leur présence à l'intérieur du bâtiment, ces murs lourds ont un grand intérêt du fait de leur capacité :
 - o à contribuer à l'inertie thermique du bâtiment.
 - o à participer passivement à la régulation de la vapeur d'eau.
- Les cloisons, principalement construites en briques foraines de 5 cm d'épaisseur, sont très endommagées et souvent mal placées. Elles seront donc démolies. Selon leur état, on suggère d'en récupérer certaines afin de les réutiliser.
- Le plancher de l'étage est en bois de 2,7 cm d'épaisseur. Il repose sur des lambourdes. L'ensemble est dans un état qui ne justifie pas son remplacement.
- Le plafond de l'étage est lui aussi un plancher de bois de 2,7 cm d'épaisseur surmonté d'un comble perdu ventilé.
- Les menuiseries anciennes (intérieures ou extérieures) sont très endommagées.
- Le système de chauffage est ancien et mal conçu. Il doit être complètement remplacé.

2.3 Pathologies

Plusieurs sondages ont été réalisés afin de mettre en évidence les pathologies affectant le bâtiment.

Comme souvent dans les bâtiments anciens mal rénovés, la présence de ciment sur les façades et de béton dans le sol du RDC et de larges « trottoirs » de ciment autour du bâtiment a contribué à guider l'eau du sol vers les murs.

Le soubassement de certaines cloisons ainsi que la partie inférieure des menuiseries du RDC sont très dégradées.

Heureusement, aucune barrière étanche (film plastique) à l'eau et à la vapeur d'eau n'a été apposée au niveau de la dalle du RDC. En effet, un film étanche posé à cet endroit aurait renforcé par capillarité l'engorgement en humidité des murs périphériques et de refend. Il ne sera donc pas nécessaire de casser la dalle du RDC.

3 Scenarii

Différents scénarii ont été testés afin de valider ou infirmer les solutions techniques et / ou architecturales envisagées. Lorsque cela était suffisant, certaines options ont été validées à partir de modèles simplifiés du bâtiment. D'autres n'ont pu être réalisées en raison des limites inhérentes à tout logiciel.

3.1 Bâtiment simplifié

Certaines dispositions architecturales ont été testées à partir d'un modèle simplifié du bâtiment afin de mesurer leur impact sur le bilan thermique de celui-ci. Compte tenu des contraintes morphologiques existantes et de l'orientation du bâtiment, nous avons essayé de mesurer l'impact de la position des fenêtres en tableau ainsi que de l'orientation de serres qui pourraient lui être accolées.

On rappellera que l'orientation sud-est de la façade principale est peu favorable aux apports solaires gratuits.

3.2 Scénario A : Bâtiment existant

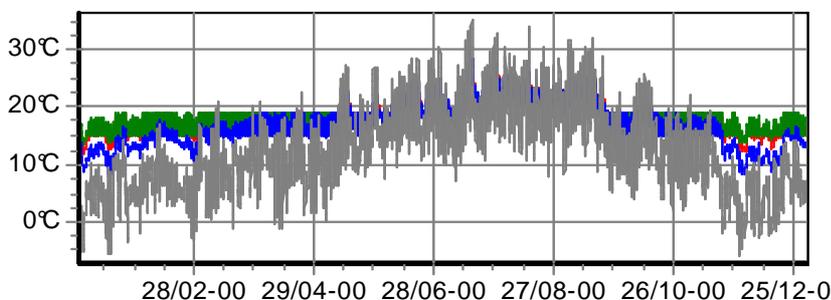
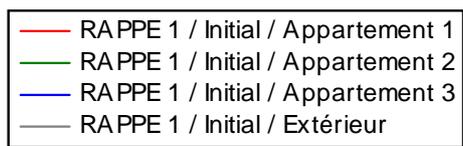
Les simulations thermiques ont été réalisées de manière à décrire le bâtiment actuel (simple vitrage, absence d'isolation et sol sur terre-plein). Les besoins de chauffage (127 kWh ef / m² / an en moyenne) obtenues sont cohérents avec les moyennes nationales dans des bâtiments anciens.

Zones	Besoins Chauffage kWh	Surface chauffée	kWh /m ²	Puiss. Chauff	T° Min °C	T° Moyenne °C	T° Max °C
Sans isolation	42142	332	126,9	11475			
Appartement 1	11732	90	130,4	3375	11,9	18,5	28,5
Appartement 2	14972	126	118,8	4725	13,5	18,6	27,7
Appartement 3	15439	116	133,1	3375	8,2	17,4	28,5

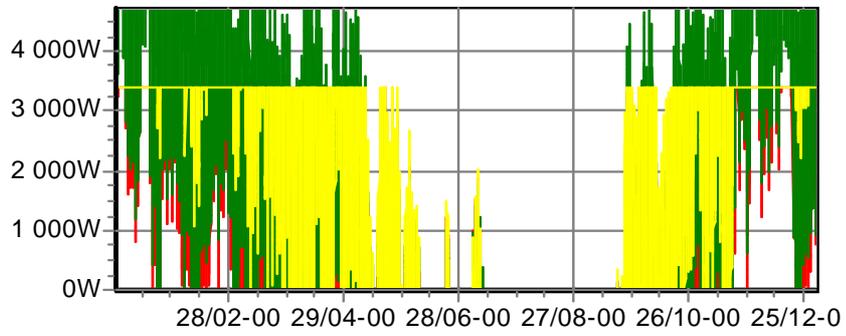
3.2.1 Simulations thermiques : besoin de chauffage

Les graphiques ci-dessous montrent respectivement l'évolution des températures et la puissance de chauffage nécessaire pour les trois appartements sur une période d'un an (année 2000).

Température depuis Lundi 1 Janvier durant 364 jours (1)



Puissance de chauffe depuis Lundi 1 Janvier durant 364 jours

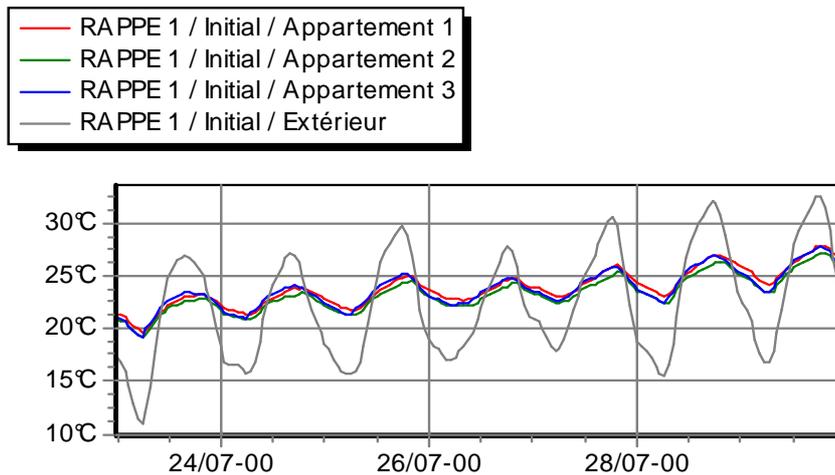


3.2.2 Simulations thermiques – confort d'été

Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la température à l'intérieur des trois appartements au cours d'une période chaude.

- La courbe grise représente l'évolution des températures extérieures.
- Les courbes rouge, bleu et verte représentent l'évolution des températures intérieures.

Température depuis Lundi 23 Juillet durant 7 jours



La simulation a été réalisée sur une année complète. Les graphiques portent uniquement sur la semaine la plus chaude comprise entre le 23/07/2000 et le 30/07/2000.

On remarquera qu'à la fin de la période mesurée, la température maximale atteinte à l'intérieur du bâtiment est de 28,5°C ce qui reste relativement confortable. Ceci est notamment lié à la forte inertie du bâtiment.

3.2.3 Influence de l'orientation de serres

Une des options architecturales utilisables pour augmenter la surface de vitrage fournissant des apports solaires gratuits consistent à accoler une serre à chaque appartement. Nous avons cherché à savoir s'il était impératif de les orienter plein sud ou de les aligner avec le bâtiment.

Les simulations numériques réalisées montrent que l'influence de l'orientation de la paroi de la serre (triangulaire dans ce cas) est marginale. Une différence d'orientation de 45° (afin d'être plein sud) se traduit seulement par une augmentation d'environ 1% des apports solaires. Ceci ne justifie pas de diminuer l'habitabilité des serres par une différence d'alignement avec le bâtiment.

3.3 Scénario B : Bâtiment isolé par l'extérieur sans serre

Pour des raisons d'efficacité et de facilité de mise en œuvre, l'isolation des murs par l'extérieur a été sélectionnée. Les combles perdus, faciles d'accès seront isolés par un matériau en vrac.

Les murs extérieurs seront isolés avec des panneaux de feutre de bois de 10 cm d'épaisseur ce qui offre une résistance thermique de la paroi de 2,8.

Les combles seront isolés par une couche de 30 cm de ouate de cellulose (ou produit équivalent) en vrac ce qui offre une résistance thermique de la paroi de 7,45.

Le sol du RDC, n'est pas isolé. Mais une isolation périphérique extérieure réalisée avec de la pouzzolane participera à l'isolation du sol du bâtiment.

3.3.1 Scénario B1 : Bâtiment isolé par l'extérieur avec double vitrages standard

Les menuiseries sont remplacées par des nouvelles menuiseries avec double vitrage standard en 4/16/4 mm.

Zones	Besoins Chauffage	Surface chauffée		Puiss. Chauff	T° Min	T° Moyenne	T° Max
	kWh		kWh /m ²		°C	°C	°C
Isolation	11351	332	34,2	10328			
Appartement 1	3095	90	34,4	3375	15,0	20,0	27,9
Appartement 2	3435	126	27,3	3578	15,0	20,0	27,4
Appartement 3	4821	116	41,6	3375	15,0	19,9	27,5

3.3.2 Scénario B2 : Bâtiment isolé par l'extérieur avec double vitrages à l'argon U = 1,5

L'utilisation de doubles vitrages à l'argon se traduit par une diminution des besoins de chauffage de 894 kWh / an.

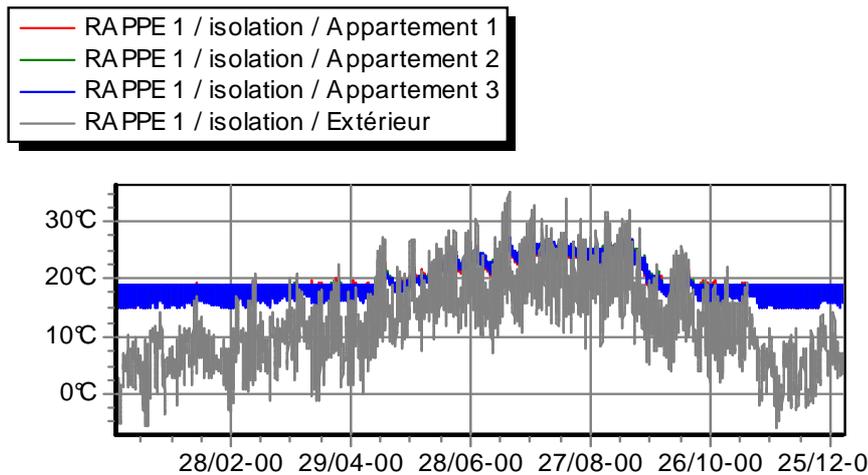
Zones	Besoins Chauffage kWh	Surface chauffée	kWh /m ²	Puiss. Chauff	T° Min °C	T° Moyenne °C	T° Max °C
Isolation 4-16-4 Argon	10457	332	31,5	10254			
Appartement 1	2729	90	30,3	3375	15,0	20,1	27,8
Appartement 2	3176	126	25,2	3504	15,0	20,1	27,4
Appartement 3	4552	116	39,2	3375	15,0	19,9	27,5

3.3.2.1 Simulations thermiques : besoin de chauffage

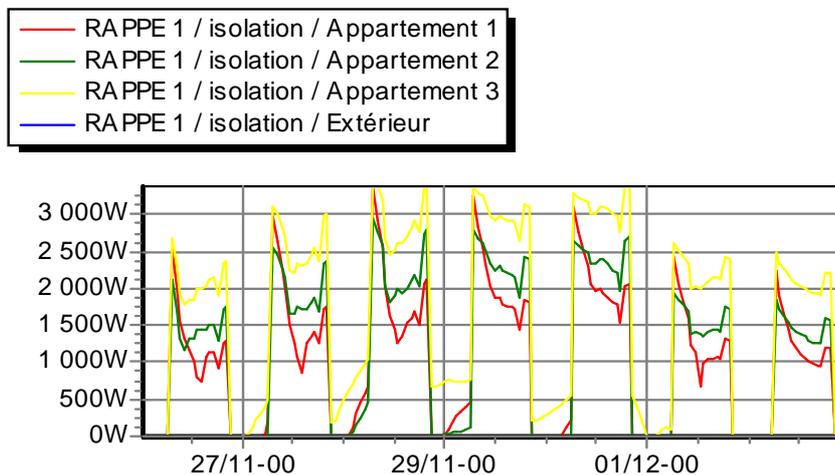
Les graphiques ci-dessous montrent respectivement l'évolution des températures sur une période d'un an (année 2000) et la puissance de chauffage nécessaire sur la période de la semaine la plus froide pour les trois appartements.

NB : Les différences de besoin de chauffage entre les scénarii B1 et B2 sont très faibles.

Température depuis le lundi 1 janvier durant 364 jours



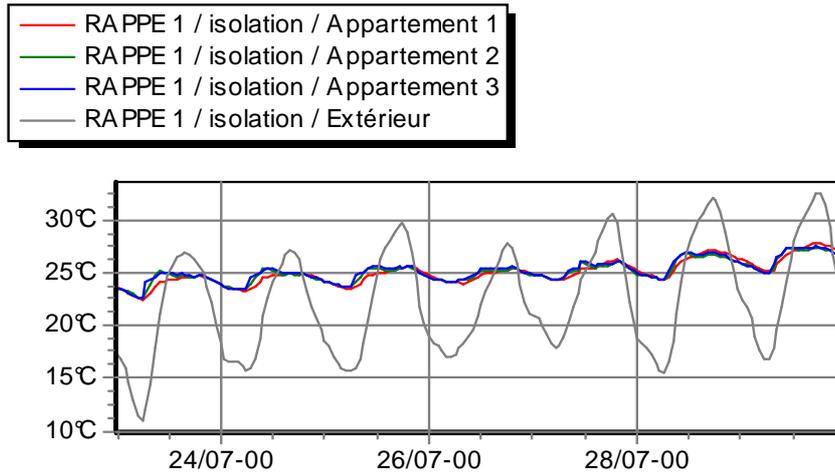
Puissance de chauffe depuis le lundi 26 novembre durant 7 jours



3.3.2.2 Simulations thermiques – semaines chaudes

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution de la température à l'intérieur des trois appartements au cours d'une période chaude. La simulation a été réalisée sur une année complète. Les graphiques portent uniquement sur la semaine la plus chaude.

Température depuis Lundi 23 Juillet durant 7 jours

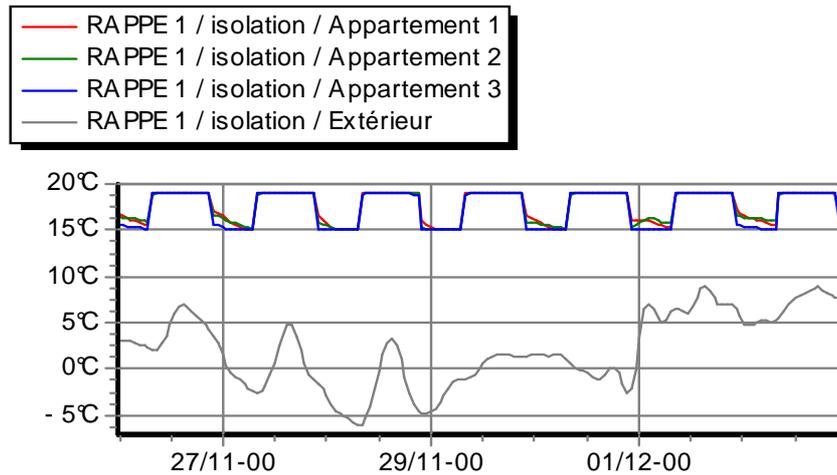


On remarquera qu'à la fin de la période mesurée, la température maximale atteinte à l'intérieur du bâtiment est de 28.5°C en été. L'isolation rapportée sur le bâtiment n'a pas d'effet visible sur son confort d'été déjà excellent.

3.3.2.3 Simulations thermiques – semaines la plus froide

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution de la température à l'intérieur des trois appartements au cours de la semaine la plus froide. La simulation a été réalisée sur une année complète. Les graphiques portent uniquement sur la semaine la plus froide.

Température depuis Lundi 26 Novembre durant 7 jours



On remarquera que pendant la nuit, conformément à la consigne de chauffage, la température minimale est de 15°C. Le confort d'hiver est donc nettement amélioré par l'apport d'isolation.

3.4 Scénario C : Bâtiment isolé par l'extérieur avec serre et vitrages à l'argon

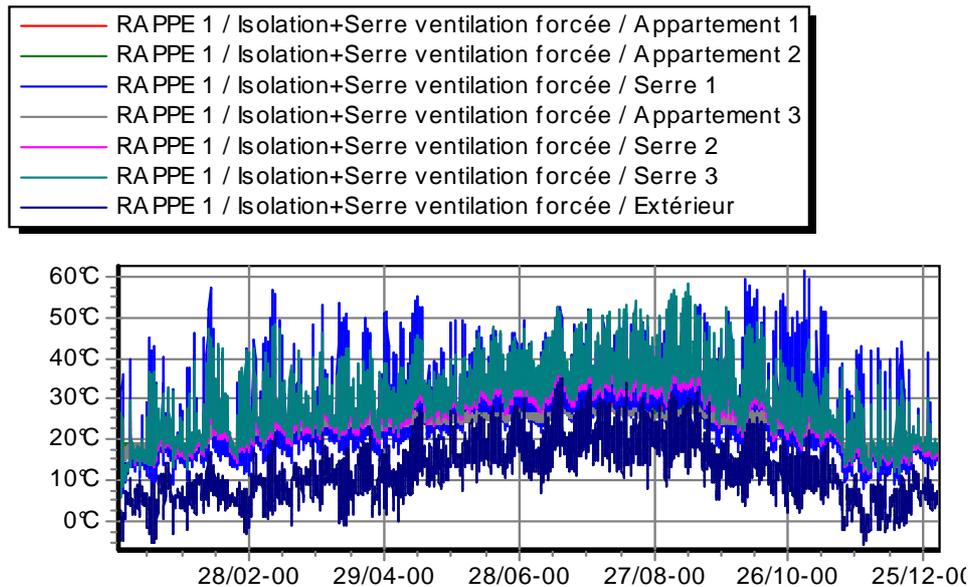
Zones	Besoins Chauffage kWh	Surface chauffée		Puiss. Chauff	T° Min °C	T° Moyenne °C	T° Max °C
			kWh /m²				
Isolation + serre + ventilation	4594	332	13,8	11107			
Appartement 1	1345	90	14,9	3375	15,0	23,2	32,0
Appartement 2	1353	126	10,7	4357	15,0	23,4	30,6
Serre 1					5,8	26,2	61,7
Appartement 3	1895	116	16,3	3375	15,0	23,2	29,1
Serre 2					7,4	27,4	52,7
Serre 3					5,9	29,4	58,4

3.4.1 Simulations thermiques : besoin de chauffage

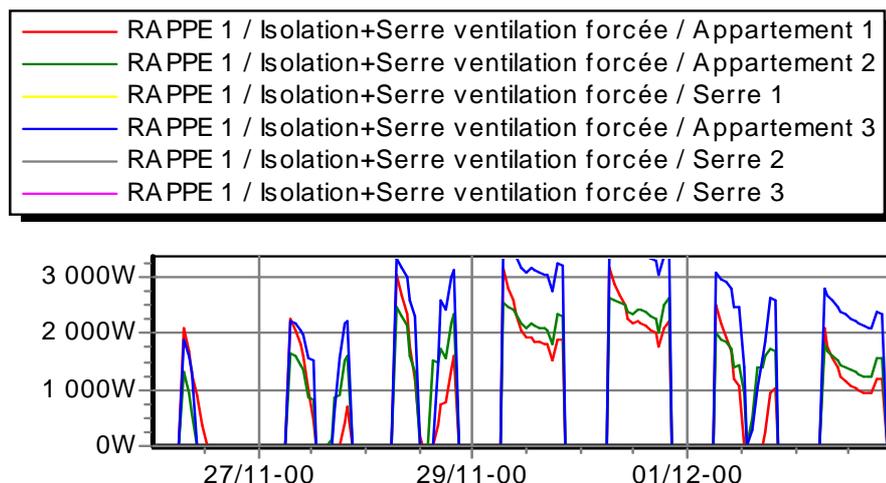
Les graphiques ci-dessous montrent respectivement l'évolution des températures sur une période d'un an (année 2000) et la puissance de chauffage nécessaire sur la période de la semaine la plus froide pour les trois appartements.

NB : Le terme ventilation forcée recouvre l'utilisation d'une VMC afin de forcer l'air chaud des serres à entrer dans les appartements.

Température depuis Lundi 1 janvier durant 364 jours



Puissance de chauffe depuis lundi 26 novembre durant 7 jours

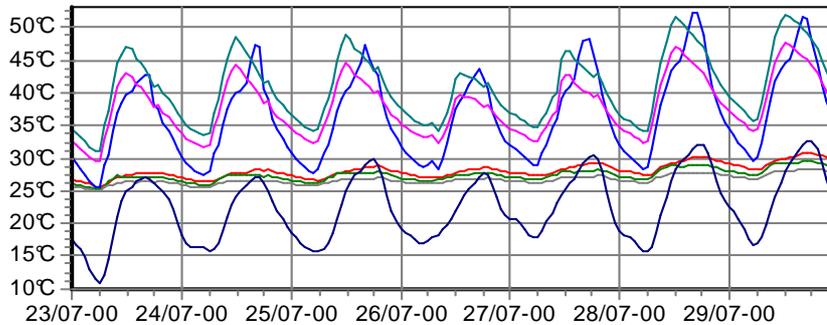
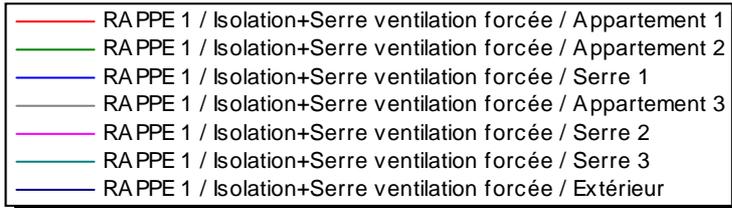


3.4.1.1 Simulations thermiques – semaine de canicule

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution de la température à l'intérieur des trois appartements au cours d'une période de canicule.

Nous remarquerons qu'à la fin de la période mesurée, la température maximale atteinte à l'intérieur du bâtiment est de 32°C en été.

Température depuis Lundi 23 Juillet durant 7 jours



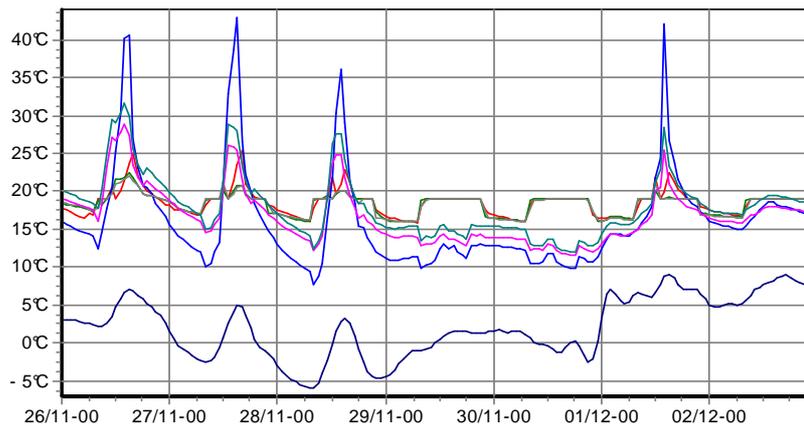
3.4.1.2 Simulations thermiques – semaine la plus froide

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution de la température au cours de la semaine la plus froide :

- à l'intérieur des trois appartements,
- à l'extérieur,
- dans les serres.

La température des serres (peu isolées et sans inertie) varie fortement à l'image de la température extérieure. A l'intérieur du bâtiment, les consignes de chauffage sont respectées sans difficultés. C'est donc au niveau des besoins de chauffage que des différences se feront sentir avec le scénario précédent.

Température depuis Lundi 26 Novembre durant 7 jours



3.4.2 Comparatif des besoins de chauffage entre les différents scenarii

Zones	Besoins Chauffage kWh	Surface chauffée	kWh /m ²	Puiss. Chauff	T° Min °C	T° Moy °C	T° Max °C	Economie relative	
								/A	/B1
Scénario									
(A) Sans isolation	42 142	332	126,9	11 475					
Appartement 1	11 732	90	130,4	3 375	11,9	18,5	28,5		
Appartement 2	14 972	126	118,8	4 725	13,5	18,6	27,7		
Appartement 3	15 439	116	133,1	3 375	8,2	17,4	28,5		
(B1) Isolation	11 351	332	34,2	10 328				73%	
Appartement 1	3 095	90	34,4	3 375	15,0	20,0	27,9		
Appartement 2	3 435	126	27,3	3 578	15,0	20,0	27,4		
Appartement 3	4 821	116	41,6	3 375	15,0	19,9	27,5		
(B2) Isolation + 4-16-4 Argon	10 457	332	31,5	10 254				75%	3%
Appartement 1	2 729	90	30,3	3 375	15,0	20,1	27,8		
Appartement 2	3 176	126	25,2	3 504	15,0	20,1	27,4		
Appartement 3	4 552	116	39,2	3 375	15,0	19,9	27,5		
(C) Isolation + serre + ventilation	4 594	332	13,8	11 107				89%	18%
Appartement 1	1 345	90	14,9	3 375	15,0	23,2	32,0		
Appartement 2	1 353	126	10,7	4 357	15,0	23,4	30,6		
Serre 1					5,8	26,2	61,7		
Appartement 3	1 895	116	16,3	3 375	15,0	23,2	29,1		
Serre 2					7,4	27,4	52,7		
Serre 3					5,9	29,4	58,4		

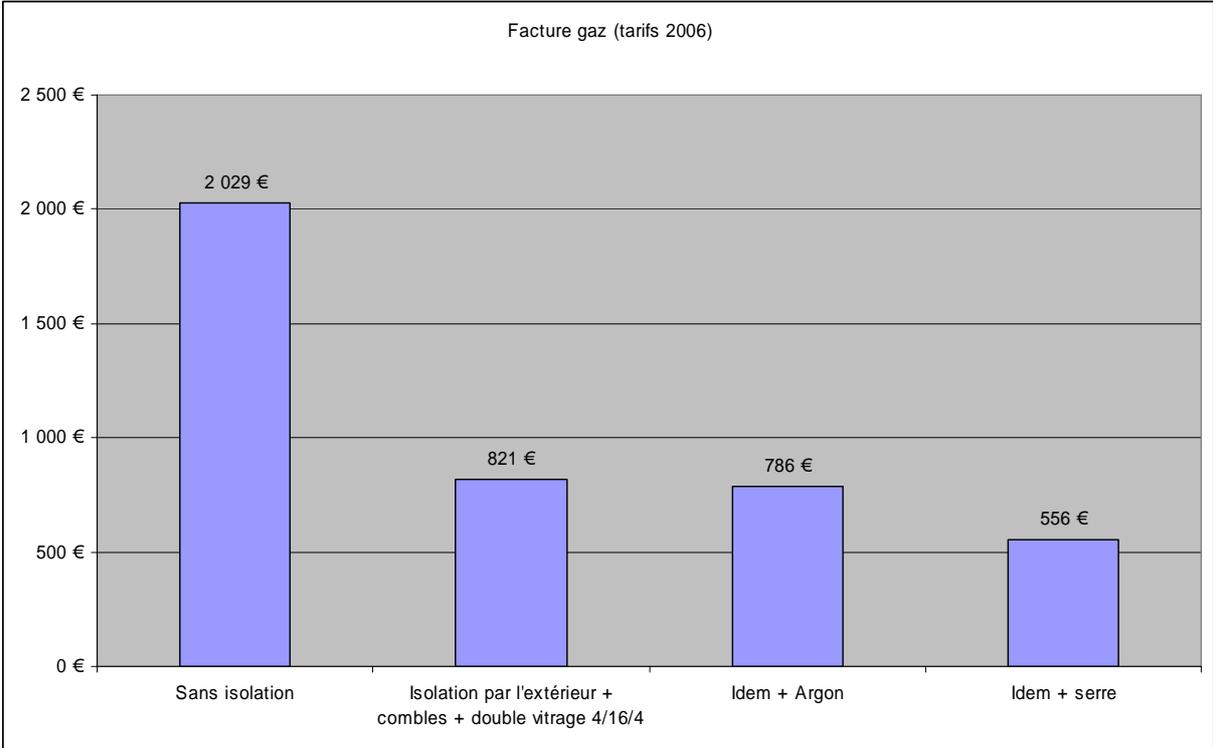
Les besoins de chauffage évoluent très nettement selon les scenarii de rénovation.

L'isolation par l'extérieur et l'utilisation de doubles vitrages permet d'économiser 73% des besoins de chauffage.

L'utilisation de vitrages à l'argon est plus discutable puisque l'économie réalisée se limite à 3% supplémentaires.

En revanche, grâce aux apports solaires gratuits, les serres permettent d'économiser encore 18% de chauffage. Ceci au prix d'une augmentation des températures maximales d'été qui nous fait rejeter cette hypothèse pour lui préférer des panneaux solaires thermiques susceptibles de fournir eau chaude sanitaire et complément de chauffage à un prix inférieur à celui des serres.

3.4.3 Comparatif des coûts de chauffage entre les différents scenarii (en 2006)



3.4.4 Evolution des coûts de chauffage selon l'augmentation du coût de l'énergie

Sans isolation			
Augmentation annuelle coût de l'énergie			
Année	1,5%	3%	6%
1	2 029 €	2 029 €	2 029 €
10	2 320 €	2 648 €	3 428 €
20	2 693 €	3 558 €	6 140 €
30	3 125 €	4 782 €	10 995 €
Total	76 177 €	96 544 €	160 431 €

Isolation + double vitrage 4/16/4			
Augmentation annuelle coût de l'énergie			
Année	1,5%	3%	6%
1	821 €	821 €	821 €
10	939 €	1 071 €	1 387 €
20	1 089 €	1 440 €	2 484 €
30	1 264 €	1 935 €	4 449 €
Total	30 821 €	39 061 €	64 910 €

Idem + Argon			
Augmentation annuelle coût de l'énergie			
Année	1,5%	3%	6%
1	786 €	786 €	786 €
10	899 €	1 026 €	1 328 €
20	1 043 €	1 378 €	2 378 €
30	1 210 €	1 852 €	4 259 €
Total	29 504 €	37 393 €	62 137 €

Idem + serre			
Augmentation annuelle coût de l'énergie			
Année	1,5%	3%	6%
1	556 €	556 €	556 €
10	636 €	725 €	939 €
20	738 €	975 €	1 682 €
30	856 €	1 310 €	3 012 €
Total	20 868 €	26 447 €	43 948 €

4 Préconisations

4.1 Gestion des soubassements

Dans ce bâtiment ancien, une isolation intérieure du sol du RDC pourrait conduire à provoquer des remontées d'humidité dans les murs périphériques. Elle conduirait en sus à :

- Diminuer le confort d'été par perte d'inertie thermique.
- Augmenter les besoins de chauffage par les consommations d'énergie engendrées par les changements d'état de l'eau dans les matériaux (cycle évaporation / condensation).

On recommande donc de réaliser :

- Un drainage du terrain.
- Un nettoyage, décaissage, drainage de l'arrière du bâtiment qui est noyé sous les gravats.
- Un piquage des enduits de ciment qui empêchent l'humidité de sortir des murs.
- Une isolation périphérique extérieure avec 20 cm de pouzzolane qui aura l'avantage de contribuer au drainage des soubassements.
- Une démolition de la dalle du RDC.

Après sondage de la dalle, cette dernière option ne sera pas réalisée en raison :

- De l'absence de film de plastique sous la dalle de ciment qui diminue les risques de transport de l'humidité sous la dalle vers les murs périphériques.
- Du coût de démolition / réfection de la dalle béton existante.

4.1.1 Influence de la position des fenêtres en tableau

Les fenêtres existantes susceptibles de bénéficier d'apports solaires gratuits sont orientées SE. Elles sont généralement relativement étroites (80 cm) et de taille moyenne (152 cm).

Par ailleurs, à l'intérieur, les tableaux seront traités avec des couleurs claires afin de favoriser l'éclairage naturel du bâtiment.



A l'arrière du bâtiment le sol est plus haut que la dalle intérieure. Des gravats l'encombrent.



La dalle de ciment et carrelage réalisée sur l'ancien dallage de terre cuite posé sur un lit de chaux est heureusement dépourvue de film plastique. Il ne sera donc pas indispensable de casser cette dalle pour éviter les remontées d'humidité dans les murs.

Les simulations numériques réalisées montrent que l'influence de l'ombre des tableaux de fenêtres est marginale lorsque les menuiseries sont en retrait de 30 cm par rapport au nu extérieur de la façade.

4.2 Isolation des murs

Les remontées d'humidité des murs sont combattues en facilitant l'évacuation de celle-ci.

Ceci se traduit par :

- La démolition des cloisons intérieures posées sur le sol sans coupure capillaire.
- Le piquage des enduits de ciment ou de plâtre qui contribuent à enfermer l'humidité dans les murs.
- L'utilisation de matériaux isolants perméables à la vapeur d'eau qui ne freineront pas l'évacuation de l'humidité.



- L'isolation des murs périphériques est réalisée par l'extérieur en fixant des panneaux de feutre de bois sur les façades.
- Les bas de murs sont isolés sur les 50 premiers centimètres avec des plaques de liège vissées et collées. En effet, ce matériau est insensible à l'humidité ainsi qu'aux remontées capillaires.



Fixation des butées de support de l'isolation.



Traitement des seuils de portes avec protection de l'isolant par de la tôle à larmes.



Gestion du soubassement, des plaques de liège isolant le soubassement. Une bavette permet de gérer la transition entre le liège et le feutre de bois.



L'enduit de 8 mm à base de chaux est réalisé en 3 passes Il est armé d'une trame de fibre de verre.



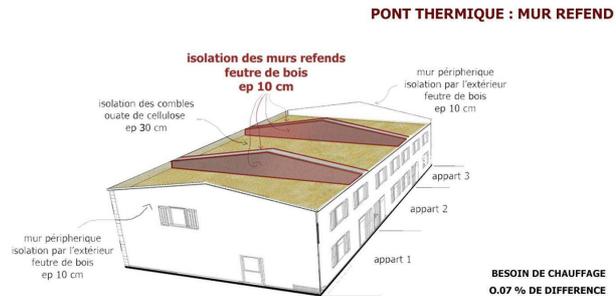
Aux angles, les plaques d'isolant sont appareillées. Les mortaises sont retaillées lorsque nécessaire.



4.3 Isolation des combles

L'isolation des combles sera réalisée par épandage d'un matériaux en vrac. On préconise des fibres végétales ou de la ouate de cellulose sur une épaisseur d'au moins 30 cm.

Dans les combles perdus, les murs périphériques pourraient être isolés extérieurement et intérieurement afin d'éviter de créer des ponts thermiques. Les simulations thermiques réalisées montrent que les économies de chauffage apportées sont de moins de 0,1%. Cette option est donc écartée.



4.4 Menuiseries extérieures et vitrages

Les menuiseries intègrent des doubles vitrages en 4-16-4 mm à l'argon.

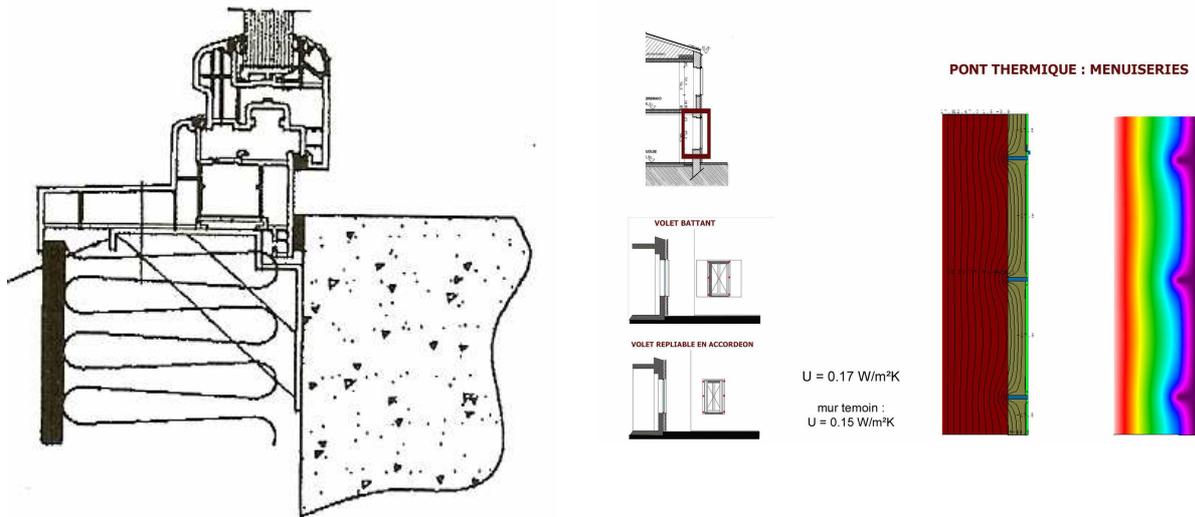
Les menuiseries sont posées au nu extérieur des murs de manière à ne pas créer de ponts thermiques.

Après discussion avec le maître d'ouvrage, les menuiseries sont en PVC. Les doubles vitrages en 4-16-4 à l'argon permettent d'avoir des fermetures dont le U est de 1,5. Une pose soigneuse des menuiseries en veillant à l'étanchéité à l'air de l'interface menuiserie / murs est réalisée au travers :

- D'une géométrie de pose plane.
- De la pose systématique de deux joints de calfeutrement :
 - Joint à écraser.
 - Joint à la pompe.



Préparation des tableaux



Un double joint vient étanchéifier le contact la maçonnerie et le dormant.

Des équerres métalliques permettent de fixer la menuiserie à la maçonnerie.

Les ponts thermiques correspondent aux fixations de la menuiserie sur la maçonnerie et au contact avec cadre de la menuiserie.

Sur ces points singuliers, le U passe de 0,15 W/m²K à 0,17 W/m²K.

4.5 Volets

La fixation des volets nécessite d'être adaptée aux contraintes liées :

- A l'isolation par l'extérieur.
- A la minimisation des ponts thermiques.

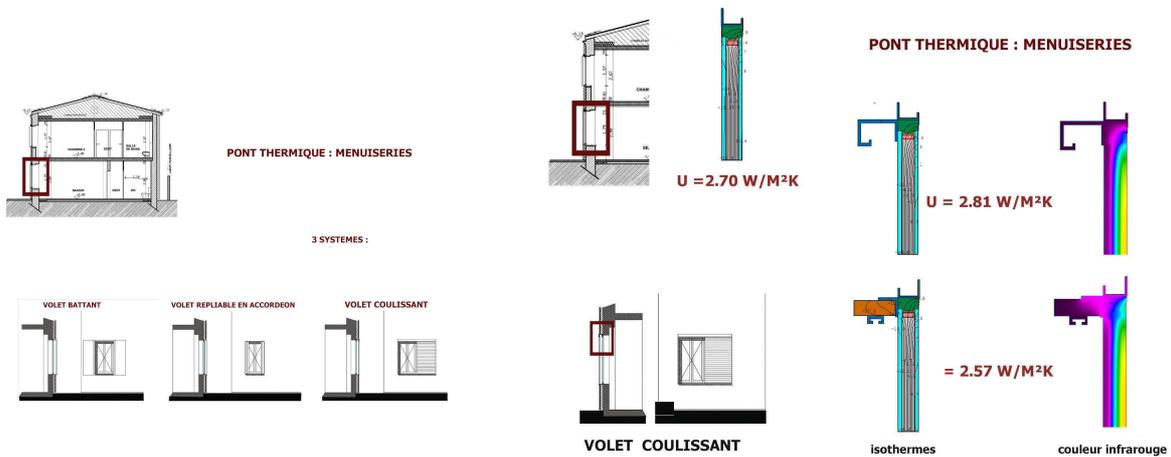
Plusieurs solutions sont envisageables :

- Volets battants fixés dans la maçonnerie au travers de l'isolant qui posent un problème de positionnement de la quincaillerie de fermeture des volets.
- Volets coulissants fixés dans la maçonnerie au travers de l'isolant.
- Volets repliables (persiennes) fixés sur le cadre de la menuiserie.

Les deux premières solutions présentent l'inconvénient de générer quelques ponts thermiques au travers des attaches.

La seconde nécessite un bon alignement de l'ouverture dans le plan de la façade.

Le choix s'est donc porté sur des volets sous forme de persiennes. Dans ce cas, les volets sont fixés au dormant et ne génèrent pas de ponts thermiques supplémentaires. On notera toutefois que des volets coulissants auraient sans doute été plus esthétiques.



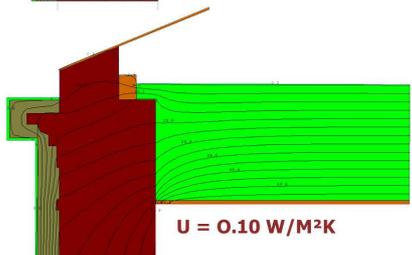
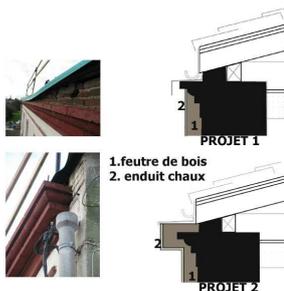
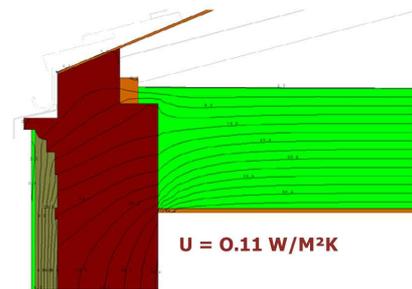
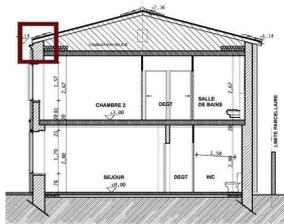
4.6 Corniche

Une corniche de terre cuite domine la façade principale. En bon état, elle a bien assuré son rôle technique de support de la gouttière et de protection des chevrons.

Pour des raisons techniques et économiques il a été décidé de la conserver. Une évaluation thermique a été réalisée afin de savoir s'il était ou non utile de l'isoler complètement par l'extérieur.



PONT THERMIQUE : CORNICHE



Compte tenu des contraintes techniques, une isolation complète de la corniche est inenvisageable.

Deux solutions sont envisagées :

- Isolation complète de l'extérieur de la corniche **avec** sur épaissement ($U=0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$).
- Isolation de la partie inférieure de la corniche **sans** sur épaissement ($U=0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Compte tenu de la très faible différence de déperdition thermique entre les deux, la solution la plus simple et la plus économique a été sélectionnée. La corniche sera donc isolée sans sur épaissement.

4.7 Chauffage

Des chaudières individuelles au gaz permettent de chauffer indépendamment chaque appartement. Un conduit de fumée est systématiquement construit et offre la possibilité d'installer un poêle à granulés de bois en complément.

4.8 Ventilation

Compte tenu :

- Des conditions climatiques hivernales relativement douces de la région toulousaine,
- De la durée relativement courte de l'hiver dans cette région.
- Des difficultés de réalisation d'une installation soignée de VMC double flux.
- Des impératifs économiques (moins de 1000 € HT pour une VMC simple flux contre environ 3500 € HT pour une VMC double flux).

Le choix du système de ventilation s'est donc porté sur une VMC simple flux.

5 Economie / performance thermique et environnementale

5.1 Comparatif de deux techniques d'isolation par l'extérieur

Le tableau ci-dessous présente les conditions de réalisation et de prix de deux types de matériaux (polystyrène, feutre de bois) couramment utilisés dans le domaine de l'isolation par l'extérieur.

	Polystyrène *	Feutre de bois *
Surface posée / jour / 2 personnes	70 m ²	50 m ²
Type enduit	Base organique (résines) Copolymères acrylique Charge = marbre	Base minérale (chaux) Silicate de potassium Charge = marbre
Temps pose enduit	1 h / m ²	1h40 / m ²
Prix isolant 10 cm (HT entreprise)	9,8 € / m ²	30 € / m ²
Prix fournitures (HT entreprise)	32 € / m ²	48 € / m ²
Prix fourni posé enduit	70 € / m ²	110 € / m ²
Changement climatique	+ 4,3 kg CO ₂ / m ²	-30,8 kg CO ₂ / m ²
Énergie Grise	31 kWh / m ²	1 kWh / m ²

Comparaison de deux techniques d'isolation par l'extérieur. Le feutre de bois présente l'avantage d'être perméable à la vapeur d'eau et d'avoir un bon bilan environnemental mais a un coût plus élevé.

** Dans les 2 cas, la pose des menuiseries à l'extérieur fait diminuer le coût de l'isolation par l'extérieur*

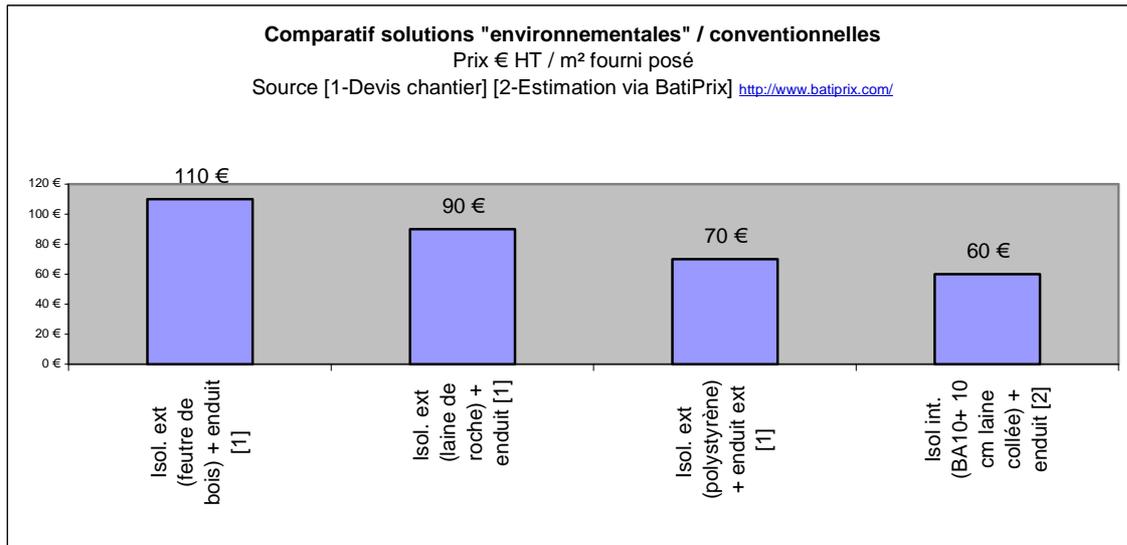
** Les prix indiqués ont été fournis par la société qui a posé l'isolation extérieure. Elle est familière des deux techniques de pose.*

5.2 Récapitulation de solutions de réhabilitation

Le tableau ci-dessous récapitule le coût de différents systèmes d'isolation.

L'isolation par l'extérieur est plus onéreuse que l'isolation par l'intérieur. Elle présente pourtant une série d'avantages non négligeables :

- Très forte diminution des ponts thermiques.
- Conservation de l'inertie du bâtiment qui permet de garantir un bon confort estival.
- Belles finitions intérieures à coût faible (pierres et briques apparentes).



Dans les combles, l'utilisation de 30 cm de ouate de cellulose (d'origine renouvelable 20 € HT / m²) se fait quasiment à coût égal avec la laine de verre (19 € m²).

6 Contrôles qualité

Durant la réalisation du chantier un soin particulier a été porté à l'étanchéité à l'air du bâtiment. Ceci a été réalisé sans surcoût mais en veillant aux détails. Ceci a été en particulier le cas au niveau des interfaces :

- menuiseries / maçonnerie
- faux plafond / maçonnerie

Afin d'estimer la qualité des travaux réalisés, des validations seront réalisées au travers de deux campagnes de :

- Contrôle de l'étanchéité à l'air par infiltrométrie: pour un coût de 765 € HT / appartement.
- Contrôle des ponts thermiques par thermographie (immeuble R+1 – 3 logements) pour un coût de 2295 € HT.

7 Coût des travaux

NB : Les coûts de travaux fournis ci-après ne prennent pas en compte la subvention régionale pour les installations solaires thermiques.

7.1 Coût des travaux par postes :

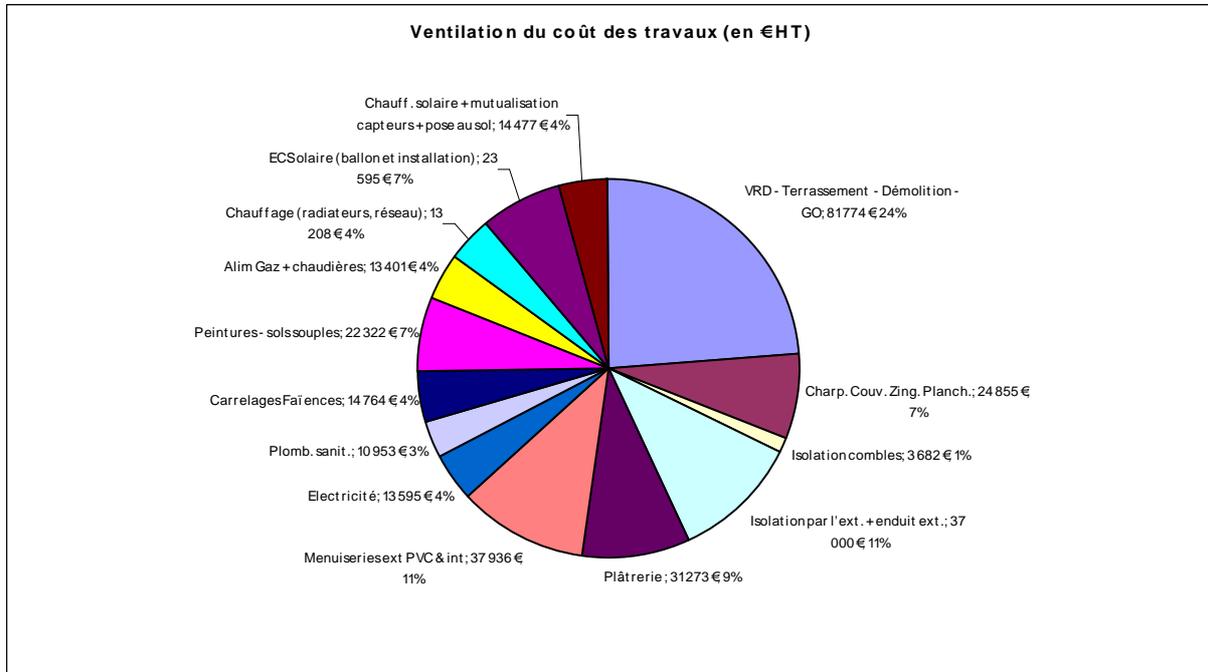
	Surf habitable (m ²) 285	SHON (m ²) 359
MONTANT DES TRAVAUX PAR LOTS	€ HT / m ² habitable	€ HT / m ² SHON
Hors solaire	1 069 €	896 €
Avec ECS et chauffage solaire	1 203 €	1 007 €
Lot	Montant € HT	
VRD - Terrassement - Démolition - GO	81 774 €	
Charp. Couv. Zing. Planch.	24 855 €	
Isolation combles	3 682 €	
Isolation par l'ext. + enduit ext.	37 000 €	
Plâtrerie	31 273 €	
Menuiseries ext PVC & int	37 936 €	
Electricité	13 595 €	
Plomb. sanit.	10 953 €	
Carrelages Faiences	14 764 €	
Peintures - sols souples	22 322 €	
Alim Gaz + chaudières	13 401 €	
Chauffage (radiateurs, réseau)	13 208 €	
ECSolaire (ballon et installation)	23 595 €	
Chauff. solaire + mutualisation capteurs + pose au sol*	14 477 €	
Total hors solaire	304 761 €	
Total	342 833 €	

* Des serres disposées en façade du bâtiment avaient été envisagées comme moyen d'appoint de chauffage. Cette solution a été écartée en raison :

- Du coût élevé des serres (estimé à 20 000 € HT pour 3 serres)
- Des risques de surchauffe estivale.

Ventilation du coût des travaux

On notera la place importante (24%) de la démolition et de la VRD dans le cas de cette réhabilitation lourde. L'isolation par l'extérieur et les menuiseries forment les postes suivants (11 % chacun).



8 Comparaison de stratégies de démolition / reconstruction

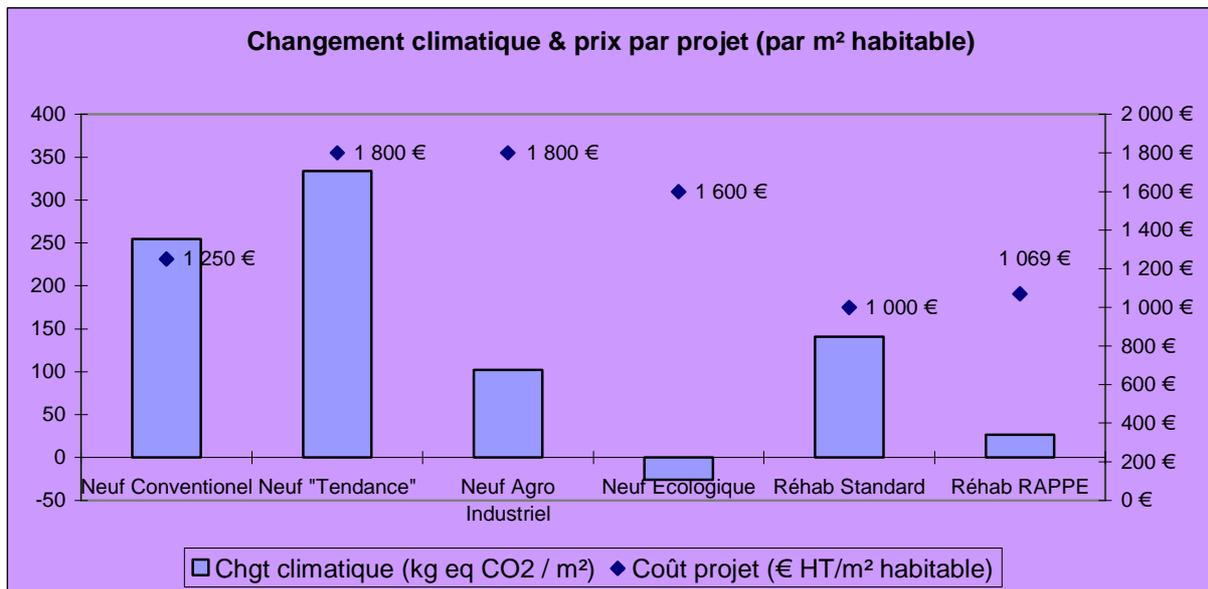
Le graphique ci-dessous montre une comparaison entre différentes stratégies de démolition / reconstruction ou de réhabilitation du bâtiment étudié. On a supposé le bâtiment reconstruit à l'identique sur le plan morphologique.

Les stratégies étudiées sont les suivantes :

Stratégie	Fondations	Murs	Isolation	Finitions	Plancher	Couverture	Menuiseries ext.
Neuf Conventiennel	Béton armé [1]	Parpaings [3]	Int. : laine de verre	Plaques plâtre[4]	Béton [1]	Tuiles [6]	PVC [7]
Neuf « Tendance	Béton armé [1]	Monomur [5]	Monomur [5]	Plâtre	Béton [1]	Végétalisée [10]	Aluminium [8]
Neuf Agro Industriel	Béton armé [1]	Parpaings [3]	Ext. Feutre de bois	Plâtre	Béton [1]	Bac acier [11]	Bois [9]
Neuf écologique	Béton armé [1]	Oss. bois	Paille	Terre	Bois	Bardeaux	Bois [9]
	Soubassement	Murs	Isolation	Finitions	Plancher	Couverture	Menuiseries ext.
Réhab. Standard	Polyuréthane [2]	Existants	Intérieure : laine de verre [12]	Plaques plâtre [4]	Béton [1]	Tuiles [6]	PVC [7]
Réhab. RAPPE	Liège	Existants	Ext. Feutre de bois	Chaux	Bois	Tuiles [6]	PVC [7]

Sources : [1] FDES Béton prêt à l'emploi, [2] FDES Polyuréthane KNAUF, [3] FDES Blocalians, [4] FDES Syndicat National des industries du plâtre, [5] FDES GELIS, [6] FDES Fédération française des tuiles et briques, [7] FDES SNEP, [8] EAA - European Aluminium Association, [9] FDES FCBA, [10] FDES CSFE, [11] FDES SNPPA, [12] FDES ISOVER autres Izuba Equer.

En dehors de la réhabilitation « RAPPE », les prix ont été estimés en fonction des prix moyens du marché à Toulouse en 2008.



L'analyse du tableau ci-dessus montre les points suivants :

- Le coût d'une réhabilitation lourde performante d'un point de vue thermique et environnemental est comparable à celui de la destruction / reconstruction d'un bâtiment conventionnel. A ce prix, les performances thermiques et les prestations de la réhabilitation sont nettement meilleures (isolation par l'extérieur, confort d'été, faible besoin de chauffage, murs anciens apparents...).
- La reconstruction :

- surnommée ici «Tendance» du bâtiment avec des matériaux « techniques » cuits est plus onéreuse et moins vertueuse sur le plan environnemental que toutes les autres stratégies ;
- à partir de matériaux « Agro industriels » améliore nettement le bilan environnemental de l'opération mais à un prix relativement élevé ;
- dans une optique résolument écologique de matériaux locaux quasi bruts, est la plus performante sur le plan environnemental mais à un prix encore élevé.
- La réhabilitation selon les techniques les plus « standards » est la moins chère (du fait des économies d'échelle) mais conduit à se priver des qualités essentielles d'un bâtiment existant (inertie, matériaux de caractère).
- La réhabilitation telle que nous l'avons menée permet d'avoir des consommations d'énergie de fonctionnement faibles, un bilan environnemental très honorable à un coût très raisonnable tout en préservant certaines des qualités essentielles du bâtiment existant.

9 Conclusions

Lancé en 2006 (avant le Grenelle de l'environnement), ce projet avait anticipé la prise de conscience des enjeux du bâtiment en regard avec le changement climatique en se fixant des objectifs de minimisation des impacts environnementaux du processus de construction. Les objectifs de consommation d'énergie durant le fonctionnement du bâtiment avaient eux aussi été fixés à 50 kWh ep / m² / an de besoins de chauffage. Il est certain qu'aujourd'hui ces objectifs auraient été revus avec un niveau d'exigence plus élevé. Toutefois, nous estimons que dans ce cadre, les choix techniques réalisés auraient été très proches de ceux que nous avons réalisés.

Nous avons toutefois quelques regrets vis-à-vis des points suivants :

- Le choix des menuiseries PVC en raison de leur mauvais bilan environnemental et d'un vieillissement sujet à caution.
- Des volets bois coulissants extérieurs auraient sans doute été plus esthétiques et plus efficaces pour le confort d'été.
- Une isolation plus épaisse des murs aurait été utile.

Ce projet de recherche nous a permis de valider / infirmer une série d'idées et de principes relatifs à la réhabilitation lourde de bâtiment.

Les objectifs réglementaires :

Il convient d'insister sur le rôle clé du législateur dans le domaine des performances techniques de bâtiments. Il est certain que les nouvelles exigences thermiques qui vont être appliquées lors de la mutation de propriétaire de bâtiments vont concourir à en augmenter la performance thermique. Toutefois, l'expérience montre que les objectifs réglementaires ne sont valables que s'ils sont contrôlés. Dans ce cadre, ils favorisent une véritable émulation entre les entreprises (en l'absence de contrôle le moins disant l'emporte à coup sûr) et une montée en compétence des équipes de maîtrise d'oeuvre.

Rédaction des programmes de réhabilitation

Les cahiers des charges applicables aux entreprises doivent inclure :

- Des objectifs de performance avec obligation de résultats (plutôt que des obligations de moyens). Ces exigences peuvent porter par exemple sur les aspects thermiques, hygroscoPIques, environnementaux, étanchéité à l'air, confort, santé, coût global ...)
- Une série de contrôles sur chantier à intervalle régulier afin de favoriser la pédagogie auprès des entreprises et le contrôle de qualité durant le processus de mise en oeuvre. Ceci se traduit par un soin particulier demandé au niveau de la gestion des détails de mise en oeuvre (interfaces entre matériaux différents, pénétrations, étanchéité à l'air...).

Prise en compte des particularités du bâtiment réhabilité

Il est important de réaliser les opérations de réhabilitation en comprenant et respectant la conception initiale du bâtiment. Pour cette raison il est impératif de tenir compte des systèmes constructifs en différenciant les bâtiments anciens XIX ou moins (véritablement traditionnels), les constructions de l'entre deux guerres, les bâtiments conventionnels (schématiquement années 1950 -> 2000). Cette distinction très macroscopique mérite d'être nettement plus affichée afin de tenir compte des traditions constructives locales ou des particularités techniques d'un bâtiment donné. Dans cette optique :

- On évitera la confusion des techniques en ne réalisant pas un plaquage systématique des solutions du neuf à l'ancien.
- On préférera des performances moyennes plutôt que risquer des désordres (humidité, mauvaise gestion de la vapeur d'eau, surchauffes estivales ...)

D'une manière générale, chaque fois que cela est possible, la conception de la réhabilitation doit être réalisée en évitant de toucher aux structures du bâtiment. Ceci permet de conjuguer économie de l'opération et diminution des risques de mise en péril de l'édifice. Dans ce cadre, une légère diminution de l'ergonomie du bâtiment peut généralement être acceptée.

Ajustement des moyens

L'opération que nous avons réalisé montre que la surenchère technologique n'est pas nécessaire pour obtenir des résultats honorables. On préconise donc d'ajuster les moyens de manière pragmatique

- En réalisant des interventions « low tech » soigné (étanchéité à l'air, isolation par l'extérieur...)
- En limitant les systèmes ou procédés « high tech » lorsqu'ils sont véritablement justifiés (simulations thermiques dynamiques, systèmes de chauffage à rendement élevé...).

Bilan environnemental des interventions

Ce projet montre que l'impact environnemental d'une réhabilitation lourde est potentiellement inférieure à la démolition puis la reconstruction du bâtiment. Il est donc important de se donner les moyens de comparer différentes stratégies d'intervention. On notera en outre que l'utilisation de matériaux renouvelables à faible contenu énergétique et stockeur de carbone (fibres végétales...) et tout à fait compatible avec les nécessités d'une réhabilitation.

Insuffisances

Ce projet a montré que les décideurs et acteurs de la réhabilitation de bâtiments manquent d'outils susceptibles de les aider dans la prise de décision.

Il serait donc particulièrement profitable :

- De développer des outils de simulation adaptés à la rénovation (couplage humidité / ventilation / vapeur d'eau / thermique)
- De mettre à disposition des banques de données techniques sur les caractéristiques des matériaux anciens.
- De disposer de bilans environnementaux sincères contrôlés par des organismes indépendants.

Formation / sensibilisation

La réussite d'un projet est avant tout liée à la compétence de ses acteurs.

Pour cela, il est indispensable de développer la formation / sensibilisation

- Des maîtres d'ouvrages.
- Des concepteurs (architectes, BE...).
- Des entreprises.
- Des usagers.