



AUDITS ENERGETIQUES ET ARCHITECTURAUX DE BATIMENTS ANCIENS POUR LA VILLE DE GRENOBLE (38)

*1 juin 2010
Phases 2 et 3
rapport final*



Thermi Fluides – *Bureau d'études énergétiques*
ZI des fours – 01 350 Culoz – T 04.79.87.00.90 – F 04.79. 87.16.45

Sylvie Amsellem – *Architecte du patrimoine*
ZI des fours – 01 350 Culoz – T 04.79.87.00.90 – F 04.79. 87.16.45

Nobatek – *CRT spécialisé Construction et Aménagement Durable*
67 rue de Mirambeau – 64 600 Anglet – T 05.59.03.61.29 – F 05.59.63.55.41

Ces études ont été réalisées grâce au soutien financier de l'ADEME.

Le contenu de ce rapport est la propriété de la Ville de Grenoble. Toute reproduction ou utilisation du contenu est autorisée si la mention Ville de Grenoble est précisée.

Rapport rédigé par Sylvie Amselem, Antoine Dugue (Nobatek) et Guillaume Vitali (Thermi Fluides)

Contexte, enjeux et présentation de l'étude	6
PHASE 2, 1^{ère} partie SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE.....	8
I. Principe de l'étude énergétique.....	9
1. Calcul du besoin de chauffage sous PLEIADE+COMFIE	9
2. Hypothèses sur le calcul des consommations autres que celle du chauffage	10
a. Estimation des besoins d'eau chaude sanitaire	10
b. Estimation de la consommation des appareils domestiques.....	11
c. Estimation de la consommation gaz des plaques de cuisson	11
d. Estimation de la consommation électrique des plaques de cuisson	11
3. Hypothèse sur les rendements des installations de chauffage.....	11
4. Relevés des consommations réelles.....	12
II. Description des systèmes constructifs sous PLEIADE	13
1. Description des parois	13
a. Murs extérieurs	13
b. Planchers intérieurs.....	15
c. Murs intérieurs.....	16
d. Toiture	16
e. Menuiseries extérieures.....	16
2. Ventilation des appartements.....	17
3. Modélisation du climat et des masques lointains.....	18
4. Modélisation des masques proches et des quartiers.....	18
a. Rue Philis de la Charce	18
b. 1 Place St André.....	19
c. 97 rue St Laurent.....	19
5. Autres hypothèses de modélisation sous PLEIADE+COMFIE	19
III. Résultats des simulations - HIVER.....	20
1. Analyse des résultats.....	21
IV. Résultats des simulations – ETE	22
1. Analyse des résultats.....	23
2. Analyse du confort d'été	26
V. Conclusions.....	27
PHASE 2, 2^{ème} partie ANALYSE HYGROTHERMIQUE	28
I. Présentation, études sur les risques liés à l'humidité	29
3. Généralités sur les risques liés à l'humidité	29
4. Explication des phénomènes en présence (équations dans le modèle de calcul WUFI)	30
a. La diffusion d'eau en phase liquide et en phase vapeur	30
b. Phénomènes de capillarité	30
5. Paramètres physiques des matériaux de construction	30
a. Teneur en eau.....	30
b. Humidité Relative	31
c. Activité de l'eau.....	31
d. Isotherme de Sorption	31
e. Diffusion, résistance de diffusion à la vapeur d'eau	32
6. Les familles de matériaux isolants.....	32
7. La méthode de Glaser est limitée, le logiciel WUFI comme solution.....	33

a.	La méthode de Glaser et ses limites.....	33
b.	Le logiciel WUFI	35
c.	Inconvénients de WUFI	35
II.	Fonctionnement du logiciel WUFI et approches	36
8.	Géométrie du mur et Matériaux :	36
a.	Géométrie et maillage.....	36
b.	Les matériaux	36
9.	Conditions aux limites	37
10.	Paramètres de simulation	39
a.	Durée de la simulation	39
b.	Choix des valeurs enregistrées.....	39
11.	Différentes approches pour évaluer différents risques	39
a.	Risque d'accumulation	39
b.	Paramètres hygrothermiques réajustés pour les simulations sur l'ensemble du bâtiment .	40
c.	Risque de condensation sur la paroi interne.....	40
d.	Avec ou sans pare vapeur et test de différents pare vapeurs.....	40
12.	Mur existant, comme un mur idéal.....	41
e.	Comportement.....	42
a.	Les valeurs des paramètres thermiques	42
b.	Limitations de ce modèle	43
III.	Etude au niveau des irrégularités.....	44
13.	Remarques générales.....	44
a.	Pont mortier	44
b.	Evacuation de l'eau	44
c.	Implications sur les simulations	45
14.	Cas de base, isolation par l'intérieur, isolation par l'extérieur.	45
a.	Travail avec les isopleths.....	45
b.	Travail avec les flux de masse de diffusion d'eau :.....	46
c.	Analyse	48
d.	Choix de l'isolant pour l'isolation par l'extérieur	48
15.	Pare vapeur	49
a.	Paramètres de simulation communs aux trois cas.....	49
b.	Analyse	49
16.	Ajout d'une lame d'air côté intérieur	52
17.	Choix de l'isolant pour isolation par l'intérieur.....	53
a.	Analyse	55
b.	Préconisations	55
18.	Jonction Plancher	56
a.	Analyse	58
IV.	Préconisations et conclusions.....	59

PHASE 3 PROPOSITIONS D'AMELIORATIONS	60
Introduction.....	61
I. Traitement de l'humidité	62
II. Isolation des murs.....	64
1. Isolation par l'extérieur	64
a. Avantage et contraintes :	64
b. Prescriptions particulières de mise en œuvre	65
2. Isolation par l'intérieur.....	67
a. Avantage et contraintes :	67
b. Prescription de mise en œuvre	68
III. Isolation des planchers.....	71
1. Isolation des planchers sur caves	71
a. Avantage et contraintes :	71
b. Prescription de mise en œuvre	71
2. Isolation des planchers supérieurs en bois entre niveaux	72
a. Avantage et contraintes :	72
b. Prescription de mise en œuvre	72
IV. Isolation des combles.....	73
1. Combles non aménagés	73
2. Combles aménagés : Isolation par l'intérieur.....	73
3. Combles aménagés : Isolation par l'extérieur:.....	73
V. Les menuiseries extérieures	75
1. Remplacement des vitrages	75
2. Changement complet des menuiseries anciennes à simple ou double vitrage pose d'un ensemble cadre +ouvrant neuf :	77
3. Conservation des menuiseries d'origine simple vitrage pose d'une double fenêtre coté intérieur du logement:	79
VI. Occultation et protection	81
VII. La fermeture des parties communes.....	83
VIII. Remplacement des systèmes de chauffage – chauffage au gaz	85
VI. Chauffage électrique	87
VII. Amélioration de la ventilation	88
VIII. Utilisation des énergies renouvelables pour la production d'ECS	90
IX. Utilisation des énergies renouvelables pour la production d'électricité	93
Conclusion	96

Contexte, enjeux et présentation de l'étude

La réduction des émissions de CO₂ est un défi majeur pour le secteur de l'habitat et dans ce contexte le parc existant représente une part importante des logements en France. À la différence d'autres secteurs, le bâtiment offre des gisements d'économie multiples mais présente aussi des visages multiples avec le parc ancien (constructions d'avant 1945) et le parc récent (constructions d'après 1945). Dans le cas des logements récents, les techniques d'amélioration sont connues et un recours aux énergies renouvelables est possible. L'objectif est la généralisation d'une enveloppe très fortement isolée, d'une bonne aération avec récupération d'énergie et des équipements à très faible consommation pour avoir des bâtiments très performants et peu énergivores voire des bâtiments capables de produire leur propre énergie pour des constructions neuves.

Le cas du bâti ancien reste plus complexe car ces bâtiments ont des caractéristiques et des particularités qui n'existent pas dans le cadre des constructions plus récentes : les systèmes constructifs sont complexes avec des parois présentant une grande hétérogénéité derrière les enduits de façade. Les murs sont épais avec une inertie forte qui agit sur la thermique d'été et/ou sur la thermique d'hiver des logements. La perméabilité des logements est souvent mauvaise avec des défauts d'étanchéité dans les appartements. Et surtout ces immeubles possèdent un intérêt patrimonial en raison de la typologie architecturale des édifices, intérieure et/ou extérieure et de leur implantation dans un périmètre de protection tel qu'une ZPPAUP (Zone de Protection du Patrimoine Architectural Urbain et Paysager).

La ville de Grenoble lance régulièrement des campagnes de ravalement obligatoire en centre ville et cette obligation de ravalement s'applique à l'ensemble des façades principales, arrières et pignons. L'objectif est de valoriser le patrimoine bâti du centre historique de Grenoble et d'embellir le centre ville. La ville de Grenoble participe financièrement à ces opérations pour aider les copropriétés à faire face aux coûts importants d'un ravalement de façade et la ville de Grenoble aimerait pouvoir étudier les économies d'énergie pouvant être générées par des travaux complémentaires d'amélioration énergétique de ces bâtiments. Le but de cette étude est donc de réaliser un diagnostic complet sur 3 bâtiments anciens et de donner des préconisations et solutions d'améliorations qui peuvent s'appliquer au bâti ancien. Cette étude s'est donc déroulée en trois phases :

Phase 1 : relevés sur site et diagnostic des bâtiments

Phase 2 : bilans énergétiques et hygrothermiques à partir d'outils numériques (STD et Wufi)

Phase 3 : propositions d'améliorations et de mise en oeuvre

Cette étude a été menée par une équipe complémentaire composée du bureau d'études énergétiques Thermi Fluides, de l'architecte du patrimoine Sylvie Amselem et du CRT Nobatek, spécialisé dans la construction et l'aménagement durable. Thermi Fluides a été en charge des études de sites, des simulations thermiques dynamiques des bâtiments et de l'analyse des impacts des différentes possibilités de rénovation sur le confort et la facture énergétique. L'étude des risques liés à l'humidité dans les parois a été faite par Nobatek. Sylvie Amselem a fourni son expertise sur les bâtiments historiques de Grenoble, sur leurs spécificités, et sur l'impact sur le caractère architectural des solutions de rénovation.

Le croisement de ces trois analyses a permis de valider les différentes préconisations qui concluent ce rapport pour la rénovation énergétique : sur les procédés de mise en œuvre, les systèmes énergétiques les plus appropriés, et les matériaux à privilégier.

Ce document est le rendu final des phases 2 et 3 et se décompose en 3 parties :

Partie 1 : présentation de la partie énergétique de la phase 2 durant laquelle des calculs par simulation thermique dynamique ont été réalisés pour aboutir à une modélisation des immeubles afin de calculer les différentes pistes d'améliorations qui pourraient être préconisées

Partie 2 : présentation de la partie hygrothermique de la phase 2 durant laquelle des calculs sur les risques d'humidité ont été faits pour les parois des bâtiments

Partie 3 : présentation de la phase 3 de l'audit énergétique durant laquelle des propositions d'améliorations ont été faites en tenant des comptes des aspects particuliers liés à la rénovation du bâti ancien

PHASE 2, 1^{ère} partie

SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

I. Principe de l'étude énergétique

La modélisation sera faite sous PLEIADE+COMFIE qui est un logiciel de simulation thermique dynamique. La simulation thermique dynamique simule au pas de temps horaire le métabolisme du bâtiment en fonction de la météo, de l'occupation des locaux, des apports solaires, etc...

Au final on accède aux températures, besoins de chauffage et apports solaires heure par heure dans les différentes zones prédéfinies du bâtiment. La STD permet de prendre en compte l'inertie thermique du bâtiment, les ponts thermiques, le comportement des usagers, la stratégie de régulation et de mener à bien les études de sensibilité afférentes aux différents paramètres.

La méthodologie mise en œuvre sera de modéliser les immeubles et leurs environnements afin de retrouver ou d'approcher les consommations des appartements pendant la phase hivernale afin de valider le modèle avant de tester des solutions techniques d'amélioration car nous connaissons les consommations de chauffage des différents occupants des appartements.

1. Calcul du besoin de chauffage sous PLEIADE+COMFIE

Le bâtiment étudié sera modélisé par une ou plusieurs zones thermiques, chaque zone étant considérée à température homogène. Une zone sera délimitée par un certain nombre de parois qui sont elles-mêmes découpées en mailles. Une zone peut regrouper plusieurs pièces et une maille correspond au volume d'air contenu dans la zone et aux parois internes supposées être à la même température que l'air.

La simulation thermique consistera à étudier l'évolution des températures et des besoins énergétiques du bâtiment sur une certaine période (par exemple une année) avec un certain pas de temps (par exemple heure par heure pour le calcul des besoins de chauffage). Le bilan thermique sera effectué pour chaque maille de la manière suivante : l'énergie stockée durant le pas de temps, qui dépend de la capacité thermique de la maille sera égale à l'énergie reçue (par l'équipement de chauffage, le rayonnement solaire, les occupants...) moins l'énergie perdue (déperditions).

Nous avons choisi d'étudier les appartements suivants pour les copropriétés étudiées :

- appartements xxx au 97 rue St Laurent
- appartements xxx 6 rue Philis de la Charce
- appartements xxx au 1 Place St André

Ces appartements ont été sélectionnés car un test d'infiltrométrie a été effectué durant la phase 1 et que par conséquent les défauts de perméabilité ont été mesurés par infiltrométrie.

Ils sont également représentatifs des différentes configurations que l'on peut retrouver : orientation différentes, appartements avec exposition simple ou multiple ou appartement avec un chauffage collectif desservant 4 appartements.

2. Hypothèses sur le calcul des consommations autres que celle du chauffage

L'estimation des consommations réelles de chauffage des occupants nécessite au préalable certaines hypothèses sur les usages domestiques de l'énergie afin d'obtenir la consommation de chauffage.

Ces hypothèses portent sur :

- l'eau chaude sanitaire
- la consommation de gaz (plaque de cuisson)
- l'usage en électricité domestique pour les logements chauffés électriquement

Les paragraphes suivants résument les principales hypothèses qui ont été formulées dans ces cas.

a. Estimation des besoins d'eau chaude sanitaire

Le calcul de la consommation d'ECS se fait en fonction du nombre d'occupants dans l'appartement et on adoptera les besoins d'eau chaude suivants pour estimer la consommation d'ECS :

Nombre d'occupants	Besoins eau chaude (litres/jour)	Besoins eau chaude été (litres/jour)
1	40	20
2	80	40
3	120	60
4	160	80

La température moyenne en entrée est de 13°C et en sortie on produit de l'eau à 55°C soit un écart de température de 42°C. On appliquera une pondération sur les mois de juin/juillet/août et septembre pour prendre en compte le fait que le besoin d'ECS est moindre en été.

Dans le cas de production ECS électrique, on appliquera une énergie de 2 kWh/jour pour le maintien en température du ballon ECS alors que dans le cas des chaudières gaz, la production d'ECS est instantanée et on utilisera un rendement moyen de 0,8 sur la production d'ECS.

La formule qui donne le besoin d'ECS annuel est la suivante :

$$\text{BECS (kWh/an)} = \text{Besoin annuel (litres/an)} \times \text{Ecart de température} \times \text{Capacité calorifique eau}$$

La consommation finale en mode de production électrique sera donc :

$$\text{CECS (kWh/an)} = \text{BECS} + 2 * 365$$

La consommation finale en mode de production gaz sera donc :

$$\text{CECS (kWh/an)} = \text{BECS} / 0.8$$

b. Estimation de la consommation des appareils domestiques

Pour le calcul des consommations des appareils domestiques, on utilisera une méthode basée sur un calcul approché (méthode DEL2). La consommation annuelle est basée sur la surface du logement et plusieurs formules existent en Europe. Pour la France, la méthode DEL préconise de prendre la surface habitée S et de multiplier par 31 pour avoir la consommation électrique des appareils domestiques.

c. Estimation de la consommation gaz des plaques de cuisson

La consommation annuelle gaz des plaques de cuisson est estimée à partir de plusieurs sources : estimation des consommations à partir du site web de Gaz de France et utilisation des consommations des habitants se chauffant à l'électrique et ayant juste une plaque de cuisson gaz. La valeur retenue est de 327 kWh/an d'EP.

d. Estimation de la consommation électrique des plaques de cuisson

La consommation électrique des plaques de cuisson est estimée en considérant que la plaque fonctionne 30 min par jour avec une puissance de 2,1 kW ce qui correspond à 383 kWh/an d'énergie finale. Cette valeur est plutôt en accord avec la valeur prise précédemment pour la cuisson gaz et on adopte au final une seule et même valeur pour le gaz et l'électricité = 350 kWh/an d'EF.

3. Hypothèse sur les rendements des installations de chauffage

Le calcul des consommations de chauffage à partir de PLEIADE nécessite de faire des hypothèses sur l'installation de chauffage car comme expliqué précédemment PLEIADE calcule le besoin de chauffage mais il faut convertir ce besoin de chauffage en consommation finale de chauffage.

Pour cela il faut tenir compte des rendements suivants dans le calcul en consommation finale :

- rendement de la chaudière ou du moyen de production
- rendement des émetteurs
- rendement du réseau

Le rendement global est donc fonction de ces 4 rendements. On prendra des valeurs différentes pour l'installation en chauffage collectif et les installations en chauffage individuel car le rendement du réseau est plus mauvais en collectif.

On utilisera les valeurs suivantes :

	Collectif	Individuel
Rendement chaudière	0.82	0.88
Emetteurs	0.9	0.95
Réseau	0.9	0.95
Global	0.66	0.8

4. Relevés des consommations réelles

Voici les relevés de consommation fournis par GEG pour l'électricité et pour le gaz les appartements que nous avons choisis d'étudier :

	Copropriété	Source énergie	Consommation annuelle moyenne (kwh)
appartement	St Laurent	gaz	12668
appartement	St Laurent	gaz	16927
appartement	Philis de la Charce	gaz	34160
appartement	Philis de la Charce	gaz	7551
appartement	St André	élec	7376
Appartement	St André	élec	5471

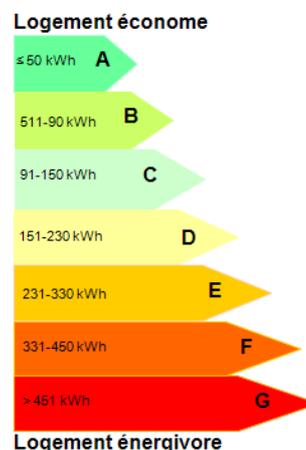
Ces consommations sont des consommations brutes qui comprennent tous les usages : ECS, table de cuisson ou encore utilisation domestique de l'électricité. L'estimation des différentes consommations se fait suivant les hypothèses précédentes et le résultat obtenu est synthétisé dans le tableau suivant :

	Conso C (kwh)	Ratio (kwh/m ²)	Conso C + ECS (kWh)	Ratio (kwh/m ²)	Ratio EP (kWhEP/m ² /an)
appartement	11267	108	12318	118	118
appartement	15526	121	16577	130	130
appartement	32759	202	33810	209	209
appartement	6150	60	7201	71	71
appartement	4540	72	5360	85	219
Appartement	3179	69	3999	87	224

Les valeurs pour les 2 appartements du 1 place St André semblent très faibles en comparaison des autres valeurs car on est à 86 kWh/an/m² pour la consommation réelle ECS/chauffage ce qui est comparable à des valeurs pour des appartements neufs. Ces valeurs sont très surprenantes car ces appartements sont sous combles avec des toitures non-isolées pour chacun des appartements. Pour l'appartement 3 cette faible valeur peut s'expliquer par le fait que l'on suppose suite aux relevés architecturaux la mise en place d'une isolation sur une grande partie de l'appartement.

En utilisant la classification DPE pour le classement des appartements, on obtient le résultat suivant :

- 1 appartement classe B
- 2 appartements classe C
- 3 appartements classe D



II. Description des systèmes constructifs sous PLEIADE

1. Description des parois

a. Murs extérieurs

La première étape dans nos calculs est la modélisation géométrique des parois. Pour cela nous utiliserons les données recueillies durant la phase 1 en collaboration avec Sylvie Amselem. La composition des murs pour les 3 copropriétés sera la suivante :

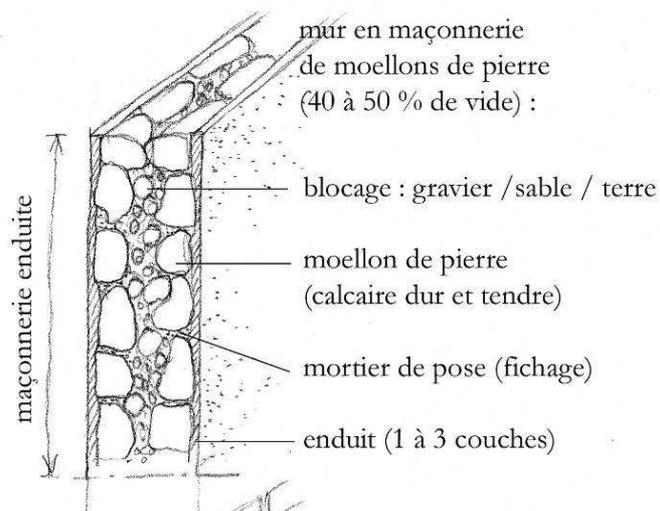


Schéma de construction des murs en maçonnerie moellons de pierre

La paroi se décomposera de la manière suivante :

Enduit extérieur à la chaux 3 cm

Calcaire dur 20 cm

Blocage de 5 cm de mortier avec 40 à 50 % de vide

Calcaire dur 20 cm

Enduit intérieur chaux 3 cm+plâtre de 2 cm

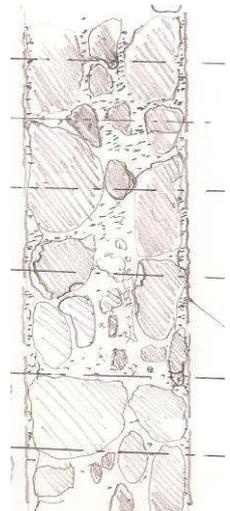
Le logiciel PLEIADE+COMFIE possède une grande base de données de matériau et donc voici la modélisation de la paroi utilisée pour les calculs :

Composants	T	cm	kg/m ²	λ	R	Extérieur
Enduit à la chaux	M	3.0	42	0.700	0.04	
Calcaire dur	M	20.0	480	2.200	0.09	
Mortier	M	5.0	100	1.150	0.04	
Calcaire dur	M	20.0	480	2.200	0.09	
Plâtre courant	M	2.0	20	0.350	0.06	
Total		50.0	1122		0.32	Intérieur

Pour tenir compte de la porosité (40 à 50 % de vide), on réalise une paroi complexe avec la même description que précédemment mais avec de l'air à la place du mortier et une répartition 50%/50% de chacune des parois.

Cette modélisation reste très linéaire alors que les parois sont très hétérogènes. Pour vérifier que la composition de paroi homogène retenue peut être utilisée pour les calculs, nous procédons à une étude paramétrique de la résistance de la paroi en fonction des matériaux.

Description	Composition	Résistance
sans vide beaucoup de pierre et mortier	24 % enduit et mortier / 76 % pierre	0,32
vide assez important	18 % enduit et mortier / 56 % pierre / 26% air	0,37
vide très important	20 % enduit et mortier / 36 % pierre / 44% air	0,41
blocage, mortier et l'enduit majoritaire	60 % enduit et mortier / 20 % pierre / 20% air	0,55
vide peu important	20 % enduit et mortier / 64 % pierre / 16% air	0,42
moellon de pierre majoritaire	16 % enduit et mortier / 80 % pierre / 4% air	0,46



On voit que la résistance de la paroi varie entre le cas où il n'y a pas ou peu d'air et le cas où il y a beaucoup d'enduit. Toutefois il faut noter que le cas où il n'y a que de l'enduit est un cas limite et qu'il est difficile de savoir quelle proportion il représente en moyenne surfacique sur 1 m² de mur.

Au final nous décidons d'introduire une majoration légère (+0,05 m²K/W) de notre coefficient initial obtenu avec 50% d'air et 50% de mortier pour prendre en compte cette inhomogénéité.

Il reste quand même une incertitude sur les calculs précédents de la résistance des parois à savoir : quelle est la résistance thermique des lames d'air ?

Le transfert dans ce cas est essentiellement radiatif et convectif et tout phénomène de conduction est exclu car les lames d'air sont bien trop grandes. Une augmentation des « lames » d'air augmente le transfert convectif et diminue les capacités isolantes des lames d'air. Par hypothèse nous utilisons une résistance $R=0,18 \text{ W/m}^2/\text{K}$ pour du transfert convectif par analogie avec les résistances superficielles d'échange vers une paroi. On utilise cette valeur de résistance quelque soit l'épaisseur du vide d'air à l'intérieur du mur. Cette valeur est obtenue à partir des règles Th-U fascicule 4 (Parois Opaques).

Des valeurs par défaut de la résistance thermique sont données au tableau VIII pour des lames d'air non ventilées dont les émissivités des deux faces sont au moins égales à 0,8. Les valeurs de la colonne « horizontal » s'appliquent également à des flux thermiques inclinés jusqu'à $\pm 30\%$ par rapport au plan horizontal.

Épaisseur de la lame d'air mm	Résistance thermique R (m ² .K)/W		
	Flux ascendant	Flux horizontal	Flux descendant
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

- Ces valeurs correspondent à une température moyenne de la lame d'air de 10 °C.
- Les valeurs intermédiaires peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

- Calcaire dur ou calcaire tendre

Thermiquement il n'y a pas beaucoup de différence entre le calcaire dur ($\lambda=2,2$ W/m/K) et le calcaire tendre ($\lambda=1,8$ W/m/K) mais le calcaire tendre est légèrement moins conducteur que le calcaire dur.

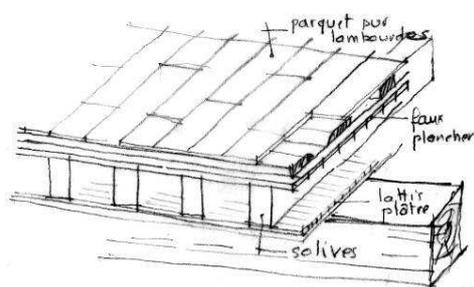
- R retenu dans les calculs

Au final, le R retenu pour les parois est de : $R=0,5$ m² K / W

Cette valeur prend en compte l'effet du calcaire tendre et dur ainsi que l'effet du mortier et des vides d'air à l'intérieur de la paroi

b. Planchers intérieurs

Les planchers intérieurs sont modélisés de la manière suivante :



Détail de plancher avec lattes plâtre en sous face des solives

Composants	T	cm	kg/m ²	λ	R	
Bois léger	M	2.5	13	0.150	0.17	Extérieur ↓ Intérieur
Mortier	M	3.0	60	1.150	0.03	
Carrelage	M	2.0	46	1.700	0.01	
Total		7.5	119		0.21	

c. Murs intérieurs

Les murs intérieurs peuvent être de 2 types : même composition que celle des murs extérieurs quand il y a des refends lourds dans les logements cloison brique, pleine pour les cloisons anciennes, ou plâtrière, avec enduit au plâtre

Dans ce cas la modélisation des murs sera la suivante :

Composants	T	cm	kg/m ²	λ	R	Extérieur ↓ Intérieur
Plâtre courant	M	2.0	20	0.350	0.06	
Brique creuse de 5 cm	E	5.0	36	0.500	0.10	
Plâtre courant	M	2.0	20	0.350	0.06	
Total		9.0	76		0.22	

d. Toiture

D'une manière générale, il y a pas ou très peu d'isolant en toiture et nous utiliserons une description avec 10 cm de laine de verre par défaut pour toutes les toitures.

Composants	T	cm	kg/m ²	λ	R	Extérieur ↓ Intérieur
Terre cuite	M	1.0	19	1.150	0.01	
Lame d'air > 1.3 cm	E	1.5	0	0.090	0.16	
Laine de verre	M	10	1	0.041	2.44	
Placoplatre BA 13	E	1.3	11	0.320	0.04	
Total		13.8	31		2.65	

Cette valeur sera ajustée si besoin après les premières simulations au cas par cas.

e. Menuiseries extérieures

Les menuiseries extérieures sont en simple vitrage ou double vitrage. Les coefficients utilisés sont :

- Simple vitrage avec $U_w = 5 \text{ W/m}^2/\text{K}$
- Double vitrage avec $U_w = 3,5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ si les menuiseries sont anciennes ou double vitrage avec $U_w = 2,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ si les vitrages sont récents

2. Ventilation des appartements

Les résultats des mesures d'infiltrométrie sont synthétisés dans le tableau suivant :

	Surface au sol (m ²)	Surface de l'enveloppe (NF EN 13829) (m ²)	Surface de l'enveloppe (RT 2005) (m ²)	Volume (m ³)	n ₅₀ (h ⁻¹)	Q ₄ Pa-surf (m ³ /h/m ²)	Surface équivalente (cm ²)
Mesure 1	63	231	102	190	9,28	4,11	231
Mesure 2	129	465	160	439	9,04	4,58	841
Mesure 3	104	402	151	281	6,51	1,84	410
Mesure 4	46	177	74	117	10,9	3,55	291
Mesure 5	128	420	163	378	10,7	4,76	1384
Mesure 6	165	470	339	435	16,3	4,17	2521

Le calcul du débit d'infiltration se fait à partir de la norme NF EN 12 831 qui donne la formule suivante pour exprimer ce débit :

$$V_{inf} = 2 \times V \times n_{50} \times e \times \epsilon [m^3/h]$$

Avec : - e, le coefficient d'exposition.

- n₅₀ le résultat du test d'infiltration
- V le volume de la zone considérée
- ε, un facteur correctif de hauteur

Une des hypothèses pour l'utilisation de cette formule est que l'air rentre par infiltration sur 2 faces du bâtiment. Les essais ont montré qu'il y avait également un transfert important intra-plancher ce qui a pour conséquence de réduire de facto la valeur du n₅₀ car il y a une part importante de fuites vers les étages inférieurs ou supérieurs.

	n ₅₀ (h ⁻¹)	Vinf (m ³ /h)	n vol/h	Vinf/2 (m ³ /h)	n vol/h	Règle CETE
Mesure 1	9,28	106	0,56	53	0,28	0,46
Mesure 2	9,04	238	0,54	119	0,27	0,45
Mesure 3	6,51	110	0,39	55	0,20	0,33
Mesure 4	10,9	77	0,65	38	0,33	0,55
Mesure 5	10,7	242	0,64	121	0,32	0,53
Mesure 6	16,3	425	0,98	212	0,49	0,81

Pour la suite des calculs on décide de retenir un taux d'infiltration calculé suivant la norme NF-12831 divisé par 2 pour prendre en compte les transferts vers des zones chauffées qui réduit le débit d'infiltration mesuré par infiltrométrie.

3. Modélisation du climat et des masques lointains

Les masques lointains sont calculés à partir de PLEIADE à l'aide du programme CARNAVAL.

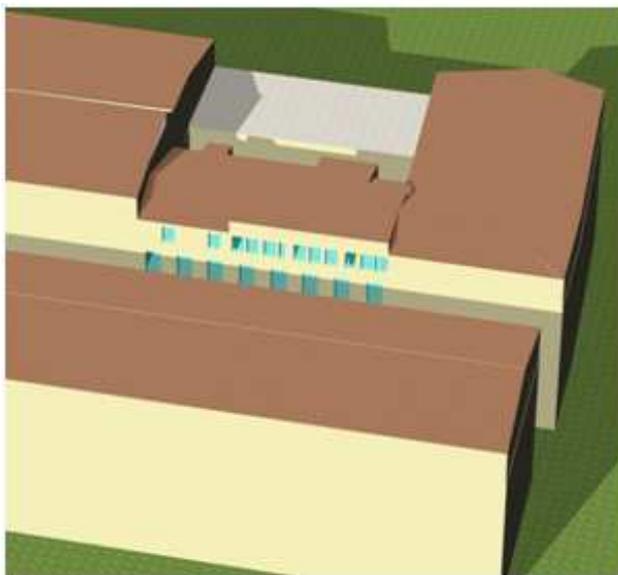
Le climat de Grenoble a été recréé à partir de données météo et le fichier est mis au format TRY. Ce format est fait à partir de données européennes entre les années 1980 et 1990.

	T° Max (°C)	Moyenne T° Max (°C)	Moyenne T° (°C)	Moyenne T° Min (°C)	T° Min (°C)	Durée d'insolation (h)	Irradiation globale J/cm²
Janv	12.0	6	1.8	-3	-8.1	86	0.87
Fev	14.4	8.4	4.2	-2.5	-7.6	94	1.52
Mars	19.1	13	7.7	2	-3.2	140	2.68
Avril	22.2	16	10.9	5	-0.3	173	3.92
Mai	26.3	20	15.3	9	3.7	202	5.01
Juin	30.4	24	18.4	12	6.6	244	5.59
Juil	32.4	26	21.3	14	8.6	296	5.33
Aout	32.4	26	20.3	13	7.6	253	4.44
Sept	28.3	22	17.3	11	5.6	208	3.38
Oct	22.2	16	12.2	7	1.7	148	1.98
Nov	16.1	10	6.5	3	-2.2	100	0.99
Dec	12.0	6	3	-1	-6.2	85	0.72

4. Modélisation des masques proches et des quartiers

Les quartiers autour des immeubles ont été modélisés pour tenir compte des masques proches. Les modélisations obtenues sont les suivantes :

a. Rue Philis de la Charce



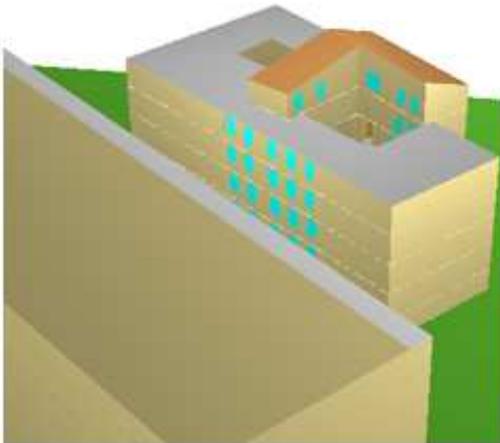
Rue Philis de la Charce le 11 mars à 10h

b. 1 Place St André



Place St André à 16 h le 11 mars avec effet de l'église qui masque en partie la façade de l'immeuble

c. 97 rue St Laurent



97 rue St Laurent vu depuis les hauteurs de la Bastille

5. Autres hypothèses de modélisation sous PLEIADE+COMFIE

- Période de chauffage

La période de chauffage initiale de simulation s'étend du 15 octobre au 30 avril. Les deux scénarii annuels suivants sont retenus en fonction des relevés initiaux de la phase 1 :

Température de 19°C en journée et réduit de nuit de 2°C

Température de 19°C en journée et réduit de nuit de 1°C

III. Résultats des simulations - HIVER

Les principaux résultats pour les besoins de chauffage sont synthétisés dans les tableaux suivants :

- 97 rue St Laurent

	Besoins		Puissance
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m ²	Chauffage W
Appart 1 zone 1	8417	90	7462
Appart 1 zone 2	4724	111	3153
Appart 2	10118	95	8398

- 6 rue Philis de la Charce

Zone	Besoins		Puissance
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m ²	Chauffage W
Appart 3	5988	52	4030
Appart 4 zone 1	18193	109	13011
Appart 4 zone 2	5331	133	3858

- 1 place St André

Zone	Besoins		Puissance
	Chauffage kWh	Chauffage kWh/m ²	Chauffage W
Appart 5	3887	90	3585
Appart 6	6470	89	5663

Comparaison des résultats consommation réelle / calculs PLEIADE+COMFIE

	Conso réelle C kWh	Besoins calculé STD kWh	Consommation calculée STD kWh	Ecart conso réelle/STD
Appart 2	11267	10118	12647	12%
Appart 1	15526	13141	16426	6%
Appart 3	6150	5988	7485	21%
Appart 4	32759	24181	36637	12%
Appart 5	3179	3650	3650	15%
Appart 6	4540	6225	6225	37%

1. Analyse des résultats

Les résultats montrent une disparité raisonnée avec un écart qui va de 6 à 37% si on regarde les écarts entre les consommations réelles et les consommations obtenues à partir de la STD avec un écart moyen autour de 15%.

Cet écart peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- Comportement des occupants différents de celui du scénario car malgré le diagnostic et le relevé des habitudes, il est difficile de définir de manière conventionnel un scénario type d'occupation et de température
- Taux d'infiltration pour le renouvellement d'air surévalué car il y a d'importants transferts intra-plancher et que le taux mesuré par infiltrométrie ne reflète pas la valeur réelle

Plusieurs hypothèses supplémentaires ont été faites pour approcher les résultats des simulations avec les consommations réelles :

- Il y avait initialement un grand écart sur l'appartement 6 (+300%) et nous avons supposé que les murs étaient doublés pour obtenir un résultat qui approche plus la réalité en se basant en partie sur les relevés architecturaux où on pouvait voir une épaisseur de mur plus importante
- Les scénarios de consigne de température ont été légèrement modifiés pour l'appartement 2 car il y a plusieurs pièces non chauffées en hiver et qu'il n'y a pas 2 personnes en permanence dans l'appartement

Le même scénario de consigne a été appliqué à l'appartement 1 car les propriétaires sont très sensibles à la température dans l'appartement et qu'il y a un thermostat d'ambiance avec fonction jour/nuit pour réguler la température.

Dans le cas des appartements chauffés électriquement : des scénarios plus fins ont également été adoptés pour tenir compte du mode d'usage différent de ce mode de chauffage car il y a un fonctionnement beaucoup plus intermittent qu'avec un chauffage gaz.

IV. Résultats des simulations – ETE

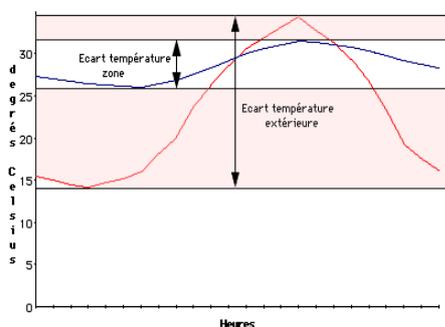
On utilise les indices suivants pour suivre l'évolution du confort d'été au sein des appartements simulés :

- Moyenne Surchauffe Max

L'indice « Moyenne Surchauffe Max » correspond à la moyenne du dépassement de la température de 27°C lors de la surchauffe la plus intense, exprimée en dixième de degré. Ainsi un indice « Surchauffe » de 34 signifie que la température de la zone sera en moyenne de 3,4° supérieure à la température de confort de 27°C pendant la période de surchauffe maximale.

- Amplification de T°Ext

Cet indice représente le pourcentage d'amplification (augmentation ou réduction) de la température extérieure dans la zone étudiée. Ainsi un indice de 125 signifie qu'en moyenne sur la période de simulation l'écart maxi-mini de température dans la zone sera égal à 1,25 fois l'écart maxi-mini extérieur. Si l'indice est > 100 les variations de température dans la zone seront amplifiées par rapport à l'extérieur (c'est le cas d'une serre par exemple). Si au contraire l'indice est < 100, les variations de température dans la zone seront réduites par rapport à l'extérieur (cas d'une zone à forte inertie)



On s'intéressera tout particulièrement aux appartements (zones) suivants :

Appartement 4 zone 2 qui représente des appartements sous combles

Appartement 1 zone 2 qui représente la zone exposée plein sud

Les 2 appartements du 1 place St André car ils sont sous combles

Appartement 3 et 4 car ces zones sont exposées est avec des masques importants

Toutes les simulations sont réalisées sans scénario spécifique sur les occultations possibles des ouvrants ce qui est le cas le plus défavorable dans lequel on peut se placer.

- Indice de BRAGER

Cet indice donne le niveau de confort en fonction de la température extérieure et permet de prendre en compte l'adaptation des occupants. Il part du postulat que 90% des occupants ont une tolérance de plus ou moins 2,5°C et que cette tolérance s'élève à 3,5°C pour 80% des occupants. Ce modèle n'est valable qu'entre 5 et 32°C de température moyenne extérieure et la température idéale pour 90% de la population reste comprise entre 17 et 22°C par temps froid et entre 26 et 31°C en période de canicule.

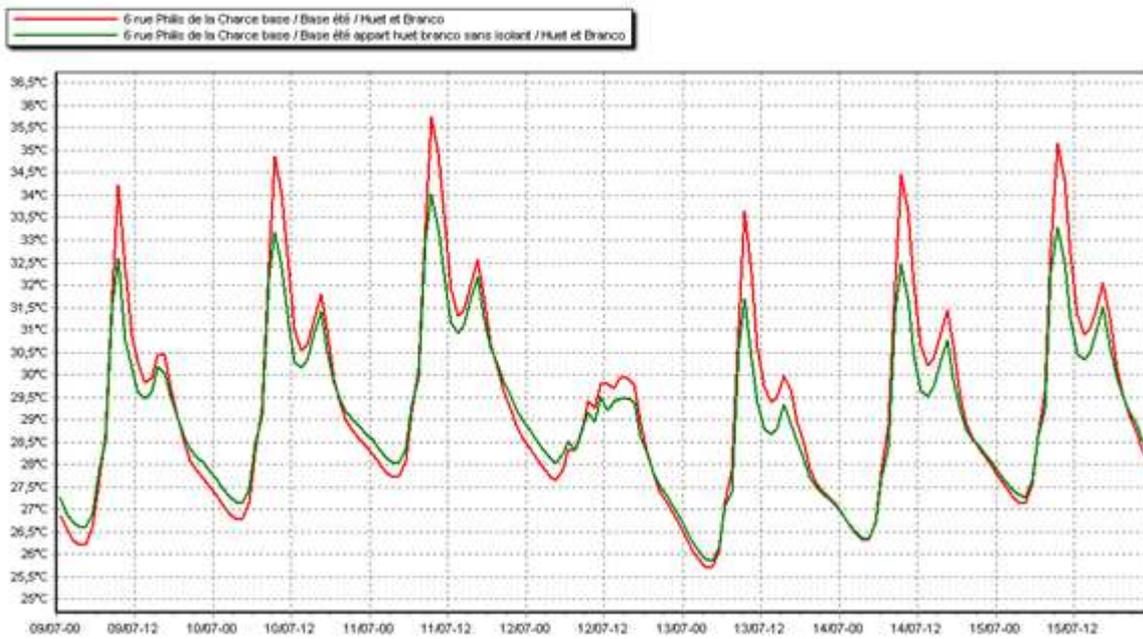
1. Analyse des résultats

Zone	Moyenne Surchauffe max 1/10°C	Amplification de température extérieure %
Appart 1 zone 2	26.66	21.79
Appart 1 zone 1	16.44	12.31
Appart 2	19.62	15.53
Appart 3	28.68	40.77
Appart 4 zone 1	31.18	24.46
Appart 4 zone 2	25.76	17.26
Appart 6	35.24	34.25
Appart 5	13.61	21.66

Dans le tableau précédent : on voit que la température reste raisonnée dans quasiment tous les appartements à l'exception de ceux de l'appart 3 et 6. Cela s'explique par le fait que ces appartements sont isolés ou doublés avec un complexe isolant et que par conséquent il n'y a plus d'inertie dans l'appartement à l'exception du refend central.

On remarque également que la moyenne de surchauffe estivale n'est pas très importante dans les appartements 4 zone 2 car les ouvertures sont très petites pour ces appartements ce qui limite la surchauffe estivale. En comparaison, la surchauffe pour les appartements situés au 4^{ème} étage dans la partie droite de l'immeuble face à la cage d'escaliers est plus importante : 32.5 en 1/10°C en moyenne avec une température maximale de 34,16°C en été.

Pour voir l'effet de l'inertie, on remplace les murs isolés de l'appartement 3 par des murs de 50 cm sans isolation. L'effet d'atténuation sur la semaine la plus chaude se traduit par une diminution de 0,5°C en moyenne et atténue le pic de température d'environ 1,5°C.



Le point de l'inertie sera très important dans la recherche des préconisations d'améliorations car on voit que d'un point de vue confort il y a un rôle très important de l'inertie.

- Zone de Brager

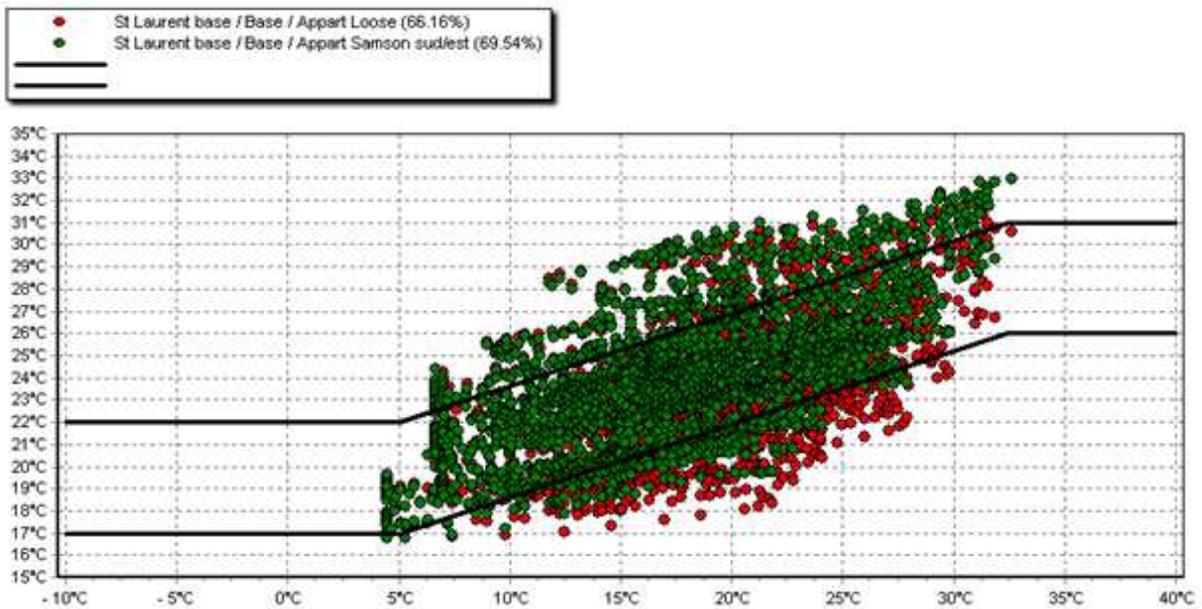


Diagramme de Brager – Immeuble St Laurent

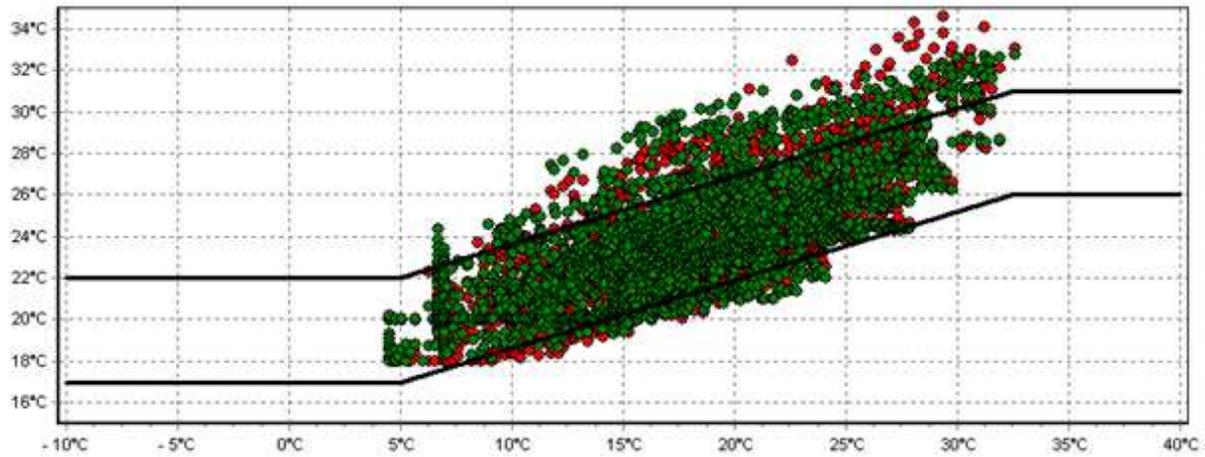
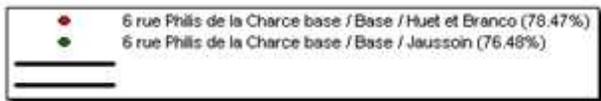


Diagramme de Brager – Immeuble Rue Phillis de la Charce

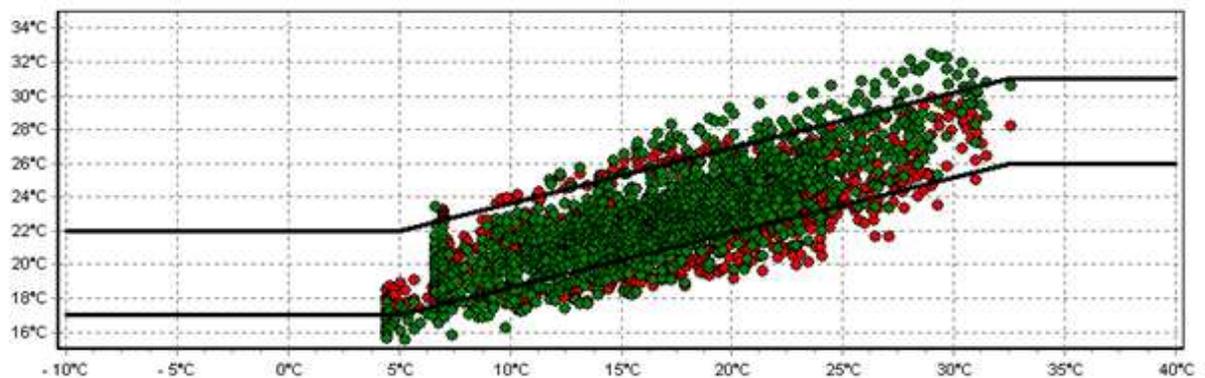
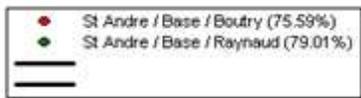


Diagramme de Brager – Immeuble St André

Les graphes précédents donnent le confort vis-à-vis de l'indice de Brager sur la période estivale qui va du 1 juin au 30 août. En abscisse est représentée la température extérieure et en ordonnée la température intérieure. Chaque point représente le couple (Text ;Tint) pour un jour de l'année dans la zone thermique considérée. Le taux de confort varie autour de 75% pour l'ensemble des appartements (pourcentage des points compris entre les droites noires en fonction des scénarios d'occupation). Cet indice traduit également un niveau acceptable pour le confort d'été.

2. Analyse du confort d'été

On voit que le confort d'été est une problématique qui n'en est pas forcément une aujourd'hui pour de nombreux appartements visités car l'inertie des murs à un rôle important dans ces appartements. A la différence des constructions récentes où l'inertie se fait en partie avec le plancher intermédiaire en béton lourd, les appartements dans le centre ancien ne bénéficient pas de cette inertie car on a des planchers bois dans tous les appartements. Ce sont donc les murs en pierre de 50 cm qui stockent une partie de l'énergie en journée pour atténuer le pic de chaleur. Le problème du confort d'été risque de se poser si on isole les murs par l'intérieur avec un complexe isolant classique car l'inertie va totalement disparaître dans l'appartement et on risque de voir apparaître des surchauffes inconfortables en été bien que plusieurs voies seraient possibles pour atténuer ces surchauffes estivales :

- Protections solaires efficaces et bien placées pour atténuer les apports solaires
- Surventilation nocturne par ouverture des ouvrants pour déstocker l'énergie – cette solution n'est pas toujours applicable en raison de la proximité du centre ville et du bruit qui peut être généré par le tram ou par les passants en période estivale.
- Mise en place d'une isolation avec des plâtres diphasiques à changement de phase pour redonner de l'inertie au mur

V. Conclusions

Les calculs sous PLEIADE+COMFIE ont permis d'aboutir à une modélisation de 6 appartements avec un modèle qui s'approche de la réalité sans dépasser une marge d'erreur de 50% dans le plus mauvais des cas. Cette modélisation devrait nous permettre de tester plusieurs pistes d'améliorations pour contribuer à améliorer le bilan énergétique de ce type de bâtiment. Il conviendra avant tout de respecter le confort des occupants pour éviter de préconiser des solutions qui iraient à l'inverse de l'effet souhaité comme la mise en place d'une isolation par l'intérieur qui réduirait les consommations de chauffage mais qui diminuerait le confort d'été et aboutirait à l'utilisation d'un groupe individuel de climatisation monobloc.

Les différentes pistes d'améliorations qui seront étudiées par STD et par étude hygrométrique si besoin pour confirmer qu'elles n'ont pas d'incidences sur le bâti :

- Mise en place d'enduit isolant par l'extérieur – cette solution présente l'avantage d'apporter un bénéfice sur la consommation hivernale car elle permet d'augmenter la résistance des murs tout en conservant l'inertie des parois internes.
- Isolation des différentes parties du bâti à commencer par les combles ou la toiture. On regardera aussi la mise en place d'une isolation intérieure et si des moyens efficaces peuvent être mis en œuvre pour limiter la surchauffe estivale
- Remplacement de simples vitrages par du double vitrage ou mise en place de double fenêtres en conservant le simple vitrage en place.
- Remplacement du système de chauffage car la phase 1 de l'audit a montré que le matériel en place était souvent ancien avec des rendements parfois très dégradés
- Utilisation des énergies renouvelables telles que solaire thermique ou solaire photovoltaïque. En pratique ces systèmes seront difficiles à mettre en place mais on pourra quand même étudier le gain obtenu en fonction des surfaces déployées

Cette liste n'est pas exhaustive et pourra être complétée au cours de la phase 3. Nous n'avons pas abordé volontairement le problème de la ventilation et de la perméabilité des logements car il s'agit là d'un problème complexe et qu'il n'y a pas de solution aisée à mettre en œuvre. Ce sujet fera aussi partie de notre réflexion dans la phase 3 de l'étude mais sera certainement plus difficile à étudier sous PLEIADE+COMFIE.

PHASE 2, 2^{ème} partie
ANALYSE HYGROTHERMIQUE

I. Présentation, études sur les risques liés à l'humidité

Le cas que nous traitons ici est un projet de rénovation énergétique de bâtiments anciens et plus particulièrement l'amélioration de l'isolation de l'enveloppe. De par le fait que l'étude porte sur des bâtiments historiques, les contraintes sont fortes. La rénovation sera faite dans le but d'améliorer les performances thermiques des bâtiments pour ainsi réduire la facture énergétique, mais aussi dans le but d'améliorer le confort intérieur pour les usagers.

Différentes solutions de rénovation seront envisagées : quel choix de matériau isolant ? Privilégier l'isolation par l'intérieur ou par l'extérieur ? Utiliser un pare vapeur ou non ? Mais en changeant la composition des murs, nous changeons aussi leurs comportements par rapport à l'eau. Ainsi la solution couramment utilisée pour la rénovation historique – ajout d'un isolant côté intérieur pour préserver la façade extérieure – augmente fortement les risques liés à l'humidité dans la paroi.

Il s'agira donc d'évaluer ces risques pour les différentes solutions envisagées, évaluer la pertinence de la pose d'un pare-vapeur et voir l'impact sur les performances thermiques de la présence d'eau dans les matériaux.

Pour cela nous utiliserons le logiciel WUFI. Logiciel développé par le Fraunhofer Institute, qui permet de faire de la simulation de transferts couplés de masse et de chaleur dans une paroi.

3. Généralités sur les risques liés à l'humidité

Cette étude porte essentiellement sur les risques liés à l'humidité dans les parois des trois bâtiments étudiés. Il s'agit de caractériser ces parois et d'évaluer par la suite différentes solutions de rénovation. Il y a différents types de risques liés à l'humidité :

- Une humidité élevée peut entraîner des condensations superficielles, celles-ci entraînent un inconfort pour les usagers et risquent d'entraîner un pourrissement de la paroi. De plus, il y a un risque de développement de moisissure.
- La condensation interstitielle a lieu au sein de la paroi, à l'interface entre deux matériaux. Il est plus difficile de s'en rendre compte, et elle entraîne une dégradation du mur.
- Lorsqu'il y a de l'eau en grande quantité au sein de la paroi (par condensation ou par infiltration), il y a un risque lié au gel possible de celle-ci. En effet, le volume de la glace étant plus grand que celui de l'eau liquide, si l'eau est amenée à geler, il y a un risque structurel pour la paroi (éclatement dans des briques par ex).
- Lorsque les matériaux ont une humidité relative plus élevée que la normale, l'eau entraîne une dégradation de leurs qualités thermiques. La conductivité thermique augmente sensiblement ce qui implique une isolation de la paroi plus faible.

4. Explication des phénomènes en présence (équations dans le modèle de calcul WUFI)

a. La diffusion d'eau en phase liquide et en phase vapeur

Il faut différencier deux grands modes de transport selon qu'on est en phase liquide ou en phase vapeur mais dans les deux cas, ce sont des phénomènes de diffusion.

La diffusion désigne la tendance naturelle d'un système à rendre homogènes les concentrations des espèces chimiques en son sein, ici en eau. C'est un phénomène de transport irréversible qui se traduit par la migration de l'eau, un déplacement des zones de forte concentration vers celles de faible concentration.

En phase liquide, c'est la loi de Darcy qui régit le mouvement et en phase vapeur c'est la loi de Fick.

b. Phénomènes de capillarité

La capillarité est l'étude des interfaces entre deux liquides non miscibles, entre un liquide et l'air ou entre un liquide et une surface. Elle est prise en compte par WUFI aux interfaces entre matériaux.

5. Paramètres physiques des matériaux de construction

Quand on veut étudier les propriétés hygrothermiques d'un matériau pour une étude en régime dynamique, il faut connaître en plus de sa conductivité thermique, sa masse volumique et sa capacité thermique massique qui nous donnent la valeur de la diffusivité thermique. Mais aussi, la porosité de celui-ci ; celle-ci nous donne la quantité maximale d'eau que peut accueillir le matériau. Sa résistance à la diffusion de vapeur d'eau, valeur sans dimension, et les coefficients de transport en phase liquide traduisent le comportement du matériau par rapport à l'eau.

Pour analyser le comportement à l'eau, nous pouvons parler d'humidité relative, d'activité de l'eau dans le matériau, de quantité d'eau absolue ou relative. Ces paramètres sont un peu techniques et le lien entre ceux-ci n'est pas intuitif. Nous allons donc en présenter quelques uns.

a. Teneur en eau

Tout produit, qu'il soit minéral, animal ou végétal contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse m :

- la masse d'eau m_e
- la masse sèche $m_s = m - m_e$

On définit alors l'humidité ou teneur en eau d'un produit :

$$w = \frac{m_e}{m_s} \text{ en kg.kg}^{-1}$$

Pour l'air on peut parler d'humidité absolue. C'est la masse d'eau pour un volume donné. C'est ce que dans l'étude, on appellera la quantité d'eau w .

b. Humidité Relative

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

$$HR = \frac{P_v}{p_{vs}(T)} \text{ en \%}$$

c. Activité de l'eau

L'activité de l'eau dans un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau p_v à la surface du produit et la pression de vapeur d'eau pure à la température T du produit.

$$a_w = \frac{P_v}{p_s(T)} \text{ en \%}$$

On définit l'humidité relative à partir de l'activité de l'eau. Si on considère que le produit est en équilibre avec l'air ambiant, on a égalité des températures et des pressions de vapeur du produit et de l'air. En écrivant p_v , p_{va} , T et T_a les pressions de vapeur et les températures respectivement du produit et de l'air, on a pour l'humidité relative de l'air :

$$HR_a = \frac{P_{va}}{p_s(T_a)} = a_w$$

L'intérêt de cette grandeur est qu'elle varie faiblement avec la température alors que la pression de vapeur d'eau varie fortement.

Dans toute cette étude, l'humidité relative d'un matériau sera en fait l'activité de l'eau dans ce matériau.

d. Isotherme de Sorption

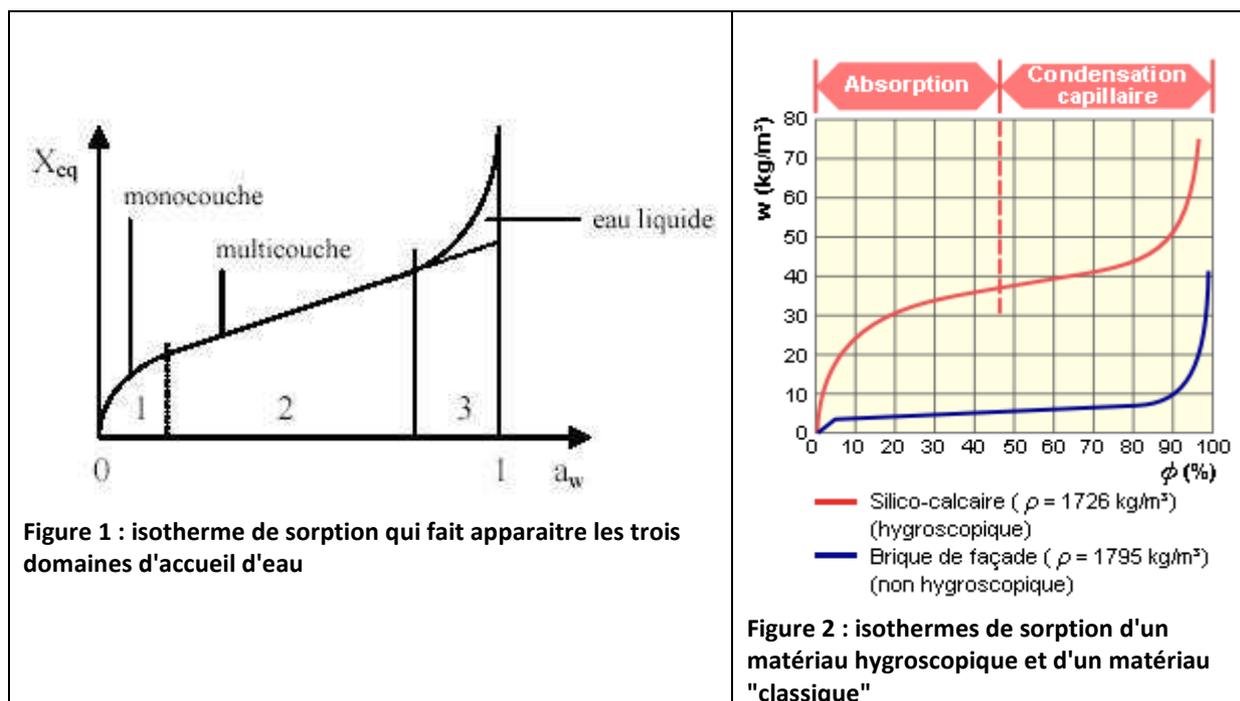
L'isotherme de sorption est la courbe donnant la teneur en eau d'un produit en fonction de l'humidité relative à une température fixée.

Isotherme de sorption pour différent type de matériau.

Une isotherme de sorption d'un matériau présente de manière générale trois zones :

- constitution d'une zone mono couche de molécules d'eau sur les pores du matériau
- adsorption de plusieurs couches de molécules à la surface des pores qui correspond à la condensation capillaire
- eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau

Un matériau hygroscopique est un matériau où la condensation capillaire se forme rapidement (pour des humidités relatives faibles). Il a ainsi une grande capacité à adsorber et désorber de l'eau. Ceci se traduit par une pente forte au « début » de son isotherme de sorption, puis une pente plus faible pour des humidités relatives plus modérées.



e. Diffusion, résistance de diffusion à la vapeur d'eau

Pour exprimer le comportement par rapport à la diffusion de vapeur d'eau au sein d'un matériau, on utilise usuellement la résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ . On la trouve dans la base de données de la réglementation thermique pour chaque matériau. C'est la grandeur qui caractérise la capacité du matériau à « laisser passer » la vapeur d'eau.

La valeur S_d , qui s'obtient en multipliant le μ par l'épaisseur du matériau considéré, est l'équivalent d'air de la couche considérée. Par ex, une couche de 250mm de calcaire d'un μ de 150, représente $0,250 \cdot 150 = 37,5m$ d'air. Donc une couche de 250mm de calcaire est équivalente à 37,5m d'air pour la diffusion de vapeur d'eau.

6. Les familles de matériaux isolants

A partir des propriétés hygrothermiques des matériaux on peut distinguer différentes classes ou familles d'isolants. Chacune correspondant à un type de comportement à l'eau du matériau.

Ainsi, la première correspond aux matériaux qui n'accueillent pas d'eau en leur sein, ils sont aussi très résistants à la diffusion de vapeur d'eau. Ce sont surtout les mousses, et matériaux plastiques comme le polystyrène extrudé ou expansé...

Les matériaux se comportant comme l'air par rapport à l'eau composent la seconde partie. Ce sont les laines minérales. En effet, on considère que l'eau diffuse en leur sein comme elle diffuse dans l'air. Leurs résistances à la diffusion de vapeur d'eau est donc très faible, et ils accueillent très peu d'eau en leur sein.

Enfin, la troisième famille est celle des matériaux hygroscopiques, voir définition en I.3.d. Les matériaux à base de bois sont très actifs par rapport à l'eau (ils accueillent plus rapidement), mais la supportent moins bien. La fibre de bois, la ouate de cellulose. D'autres matériaux comme le béton cellulaire et le silicate de calcium peuvent supporter de hautes teneurs en eau mais sont moins actifs par rapport à l'eau.

Le tableau suivant récapitule et ordonne cette classification.

Famille	Exemples	Accueil d'eau	Peut être exposé à de hautes HR ?	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau ?
1	Polystyrène expansé ou extrudé	Nul	-	Haute
2	Laine minérale	Faible	Non	Faible
3	Fibre de bois, béton cellulaire, Silicate de calcium	Grand	Oui (nuance pour le bois)	Faible - Moyenne

7. La méthode de Glaser est limitée, le logiciel WUFI comme solution

a. La méthode de Glaser et ses limites

Il existe une norme européenne (EN13788) intitulée : « Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments -- Température superficielle intérieure permettant d'éviter l'humidité superficielle critique et la condensation dans la masse -- Méthodes de calcul. ». Mais cette norme se base sur des calculs faits à partir de la méthode de GLASER, qui considère seulement le transport par diffusion de vapeur d'eau et ne considère pas les transferts sous phase liquide.

L'apparition de l'humidité dans l'enveloppe des bâtiments est généralement attribuée aux phénomènes de diffusion et de condensation de l'air humide intérieur. La méthode de GLASER (calcule stationnaire de diffusion de vapeur), facile à utiliser n'est malheureusement qu'un outil simplifié qui ne permet que d'éviter les risques de condensation dans la masse. Il y a cependant d'autres sources d'humidité, comme la pluie battante, les remontées capillaires, l'humidité de construction qui peuvent aussi affecter l'ensemble du patrimoine bâti : monuments historiques et constructions récentes. Ces phénomènes ne peuvent pas être traités correctement avec la méthode de Glaser qui ne décrit que le processus de diffusion, car d'autres mécanismes apparaissent, comme la rétention d'eau et le transport en phase liquide. Il en est de même pour d'autres phénomènes comme la condensation en été, les cycles humidification-séchage, le gel-dégel, le stockage transitoire d'humidité et la perte de chaleur par évaporation, qui peuvent soit entraîner des dommages, soit augmenter la consommation d'énergie.

Pour prévoir et suivre les mouvements d'humidités dans l'enveloppe d'un bâtiment, de nombreux outils de simulation ont été développés dans le monde et validés au cours des dernières années. Un de ceux-ci est le logiciel WUFI, développé par le Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP).

b. Le logiciel WUFI

Le programme PC WUFI (Wärme und Feuchte instationär - Chaleur et humidité transitoires), développé (Kunzel [1]) par l'IBP et validé ([2]) par des expériences de laboratoire et des mesures en sites extérieurs, permet de réaliser des calculs réalistes du transfert transitoire de chaleur et de masse dans les composants de construction à plusieurs couches soumis à des conditions climatiques naturelles.

WUFI peut-être utilisé pour évaluer:

- le temps de séchage d'une maçonnerie emprisonnant son humidité de construction
- le risque de condensations interstitielles
- l'influence de la pluie battante sur un composant d'une paroi extérieure
- l'effet de réparations ou d'interventions postérieures
- la performance hygrothermique d'éléments de toiture ou de mur sous des sollicitations non anticipées ou dans différentes zones climatiques.

c. Inconvénients de WUFI

WUFI ne propose pas de profils de températures ou d'humidité relative dans la paroi, mais seulement des visualisations d'évolution dans le temps de variables en une maille ou groupe de mailles donnés.

L'exploitation du logiciel est très technique. En effet, les phénomènes pris en compte sont complexes et il faut rentrer des paramètres caractérisant la paroi par rapport à ces phénomènes : indice d'infiltration d'eau, conditions aux limites...

II. Fonctionnement du logiciel WUFI et approches

8. Géométrie du mur et Matériaux :

a. Géométrie et maillage

Nous devons dans un premier temps modéliser géométriquement le mur et définir son maillage. Un premier travail d'audit a été fait par Sylvie Amselem. Elle a défini les compositions des parois auxquelles nous nous intéressons. Il est important de constater que celles-ci ne sont pas partout les mêmes. L'épaisseur dépend en effet de la hauteur (forme pyramidale). Nous devons donc nous placer dans un cas qui soit représentatif.

En accord avec le bureau d'étude Thermi Fluides, la paroi type considérée se compose de :

- 3 cm d'enduit chaux
- 20 cm de calcaire dur
- 5cm de mortier avec une grande porosité
- 20 cm de calcaire dur
- 2 cm d'enduit plâtre intérieur

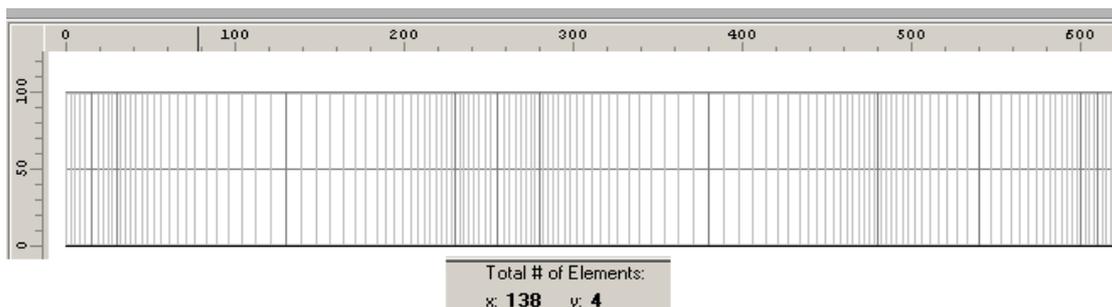


Figure 3 : Géométrie et maillage du mur existant

b. Les matériaux

Le logiciel WUFI dispose d'une grande base de données de matériaux. Nous serons amenés à faire des simulations de nombreux cas et ainsi utiliser différents matériaux. Nous présentons dans l'annexe 1 de ce document, la liste de tous les matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les valeurs des paramètres hygrothermiques de ces matériaux à sec.

Nous présentons dans le tableau suivant les matériaux qui correspondent le plus à ceux de la paroi considérée et leurs caractéristiques.

Matériaux	Epaisseur	Masse Volumique	Porosité	Capacité Thermique Massique	Conductivité Thermique	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau
Unité	[mm]	[Kg/m3]	[m3/m3]	[J/Kg.K]	[W/m.K]	[.]
Lime Plaster	30	1600	0,33	850	0,7	12
Lime Stone	200	2440	0,13	850	2,25	140
Bonding Mortar	50	1350	0,44	850	0,8	16
Lime Stone	200	2440	0,13	850	2,25	140
Cement Plaster	20	2000	0,3	850	1,2	25

9. Conditions aux limites

Une fois la solution considérée, et le maillage défini, il faut définir les conditions aux limites pour notre mur. La condition pour la limite extérieure est donnée par le fichier météo de la ville de Grenoble. Ce fichier donne heure par heure les données météorologiques qu'utilise WUFI : la radiation solaire (directe et indirecte), la température extérieure, l'humidité relative extérieure, le vent (direction et vitesse), et la pluviométrie qui a la particularité d'être décomposée selon les 4 axes cardinaux. Ceci afin de pouvoir prendre en compte de façon fine, les apports d'eau par la pluie qui "tombe" directement sur le mur.

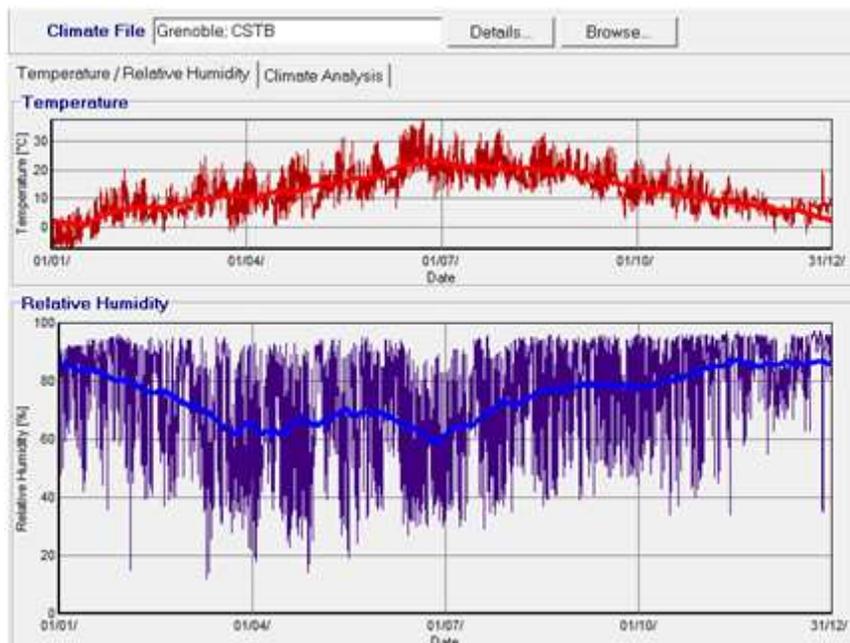


Figure 4 : Température et humidité relative du fichier météo de Grenoble pour la condition à la limite extérieure

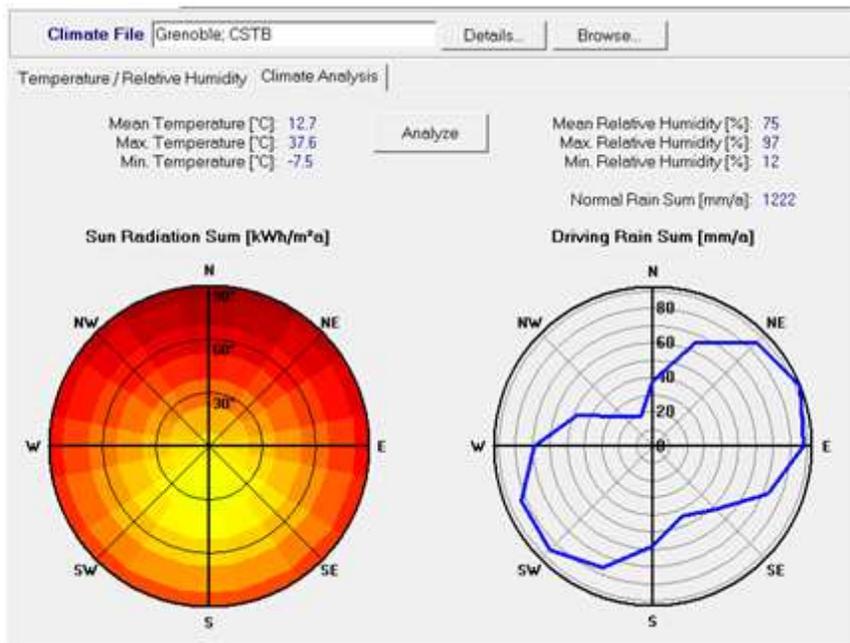


Figure 5 : Ensoleillement et pluviométrie du fichier météo de Grenoble pour la condition à la limite extérieure

Côté intérieure, la condition à la limite est une ambiance avec une température qui oscille sur l'année entre 20° et 22°C, et une humidité relative entre 40 et 60%. Elle correspond à une recommandation d'un groupe technique allemand. (WTA Recommendation 6-2-01/E).

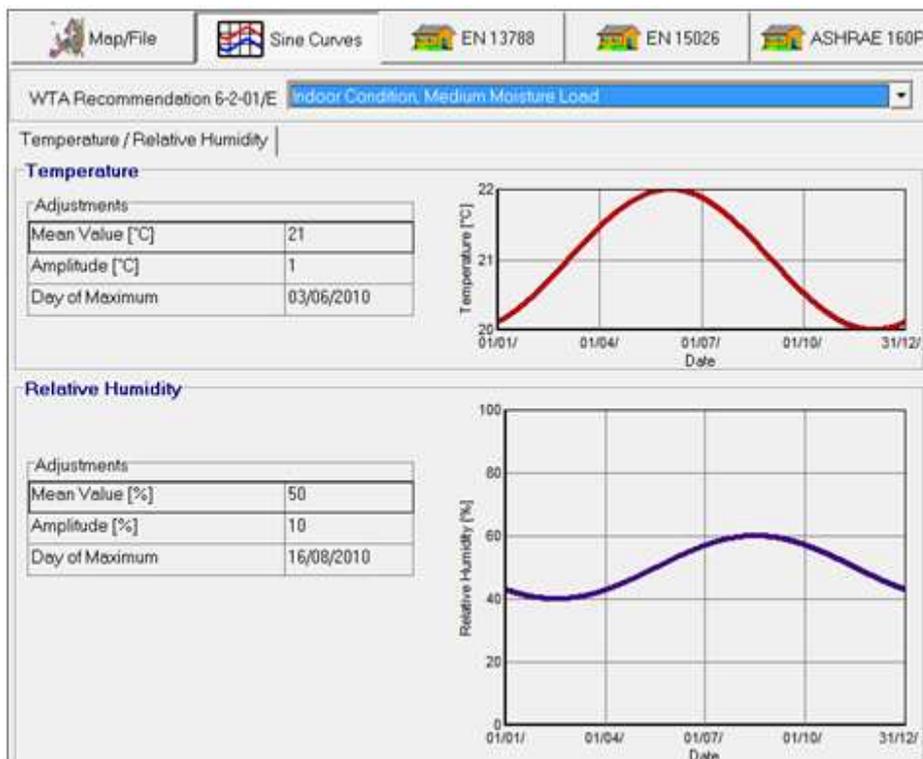


Figure 6 : Température et Humidité relative pour la condition à la limite intérieure

10. Paramètres de simulation

a. Durée de la simulation

Le pas de temps par défaut est de 1h, c'est celui que nous prendrons pendant toute l'étude. Par contre, nous choisirons la durée de la simulation. En effet, si l'on veut évaluer le risque de condensation, faire une simulation sur 5 ans avec comme conditions initiales une teneur en eau pour chaque matériau relativement élevée (nous prendrons la teneur en eau qui correspond à une humidité relative de 80%) est suffisant. Nous ne cherchons pas toujours le régime établi, mais bien l'évolution de la teneur en eau dans les matériaux : tendance à la hausse ou à la baisse.

Pour évaluer les valeurs de teneur en eau pendant le régime établi, nous pouvons nous baser sur la simulation faite pour évaluer le risque de condensation pour déterminer plus finement les conditions initiales de teneur en eau et simuler quelques années en plus jusqu'à atteindre le régime établi. Ou nous pouvons tout de suite faire une simulation sur une longue durée (entre 7 et 15ans) et ainsi à la fois évaluer le risque d'accumulation et les valeurs pour le régime établi.

b. Choix des valeurs enregistrées

Nous travaillerons avec les valeurs de teneur en eau, d'humidités relatives, de températures et les flux de masse d'eau sous phase liquide et vapeur.

11. Différentes approches pour évaluer différents risques

a. Risque d'accumulation

Il ne faut pas chercher à évaluer le risque de condensation en soi même, mais celui d'accumulation. En effet, le fait de trouver de l'eau sous forme liquide dans les matériaux peut être normal. Un matériau relativement sec, n'accueille en son sein que de l'eau en phase vapeur. Un matériau dans une ambiance "normale", peut accueillir en plus de la phase vapeur, de la phase liquide. Ceci est très normal pour les matériaux dits hygroscopique comme le bois et ses matériaux dérivés.

Mais dans des conditions de très fortes humidités, il y a une grande présence d'eau liquide et c'est ce que l'on veut éviter. Car celle ci mène à une détérioration structurelle de la paroi, un inconfort intérieur (risque de condensation plus grand sur la paroi interne), risque de gel, risque de développement de champignons et aussi détérioration des qualités de la paroi en termes d'isolation thermique.

Nous pouvons évaluer le risque d'accumulation en simulant le mur sur quelques années et en ayant comme conditions initiales une quantité d'eau relativement importante dans le mur (ici nous prendrons la quantité d'eau qui correspond à une humidité relative de 80%). Il y a accumulation si à la fin de la simulation il y a plus d'eau dans l'ensemble du mur ou dans un des matériaux qu'au début. Il est clair que cette accumulation continuera sur les années suivantes. Et il en résultera une très forte teneur en eau, ce qui entraîne de nombreux risques comme dit précédemment.

b. Paramètres hygrothermiques réajustés pour les simulations sur l'ensemble du bâtiment

Nous pouvons relever la quantité d'eau moyenne (sur une année) en régime établi. Et en se référant à la base de données de WUFI, calculer la conductivité thermique du matériau considéré pour cette teneur en eau. Nous pouvons faire de même pour la capacité thermique massique et la masse volumique. Pour les formules de ces calculs voir Annexe 2.

c. Risque de condensation sur la paroi interne

Pour évaluer le risque de condensations sur la paroi interne, il faut analyser la quantité d'eau sur la surface intérieure. Il faudrait ainsi éviter que l'humidité relative de celle-ci passe au dessus de 80%. De plus nous pouvons voir quelle est la température de la surface intérieure.

Mais comme nous faisons le choix de la condition à la limite sur la paroi côté intérieure, les valeurs que nous pouvons voir seront très proches des valeurs imposées par la condition à la limite. Cette analyse n'est donc pas forcément pertinente.

d. Avec ou sans pare vapeur et test de différents pare vapeurs

Dans les cas où il semble y avoir accumulation, ou les cas où la teneur en eau moyennée de certains matériaux sur une année de régime établi est relativement haute. Il est intéressant de voir l'effet qu'aurait un pare vapeur posé côté intérieur derrière la plaque de plâtre et donc de vérifier si sa pose entraîne une diminution de la teneur en eau.

Nous pouvons choisir un cas, d'isolation par l'intérieur par exemple, et comparer les valeurs de teneur en eau avec et sans pare vapeur.

Nous pouvons aussi tester un pare vapeur dit intelligent ou hygro-régulant, c'est à dire avec un facteur de résistance à la diffusion de vapeur variable en fonction de l'humidité.

12. Mur existant, comme un mur idéal

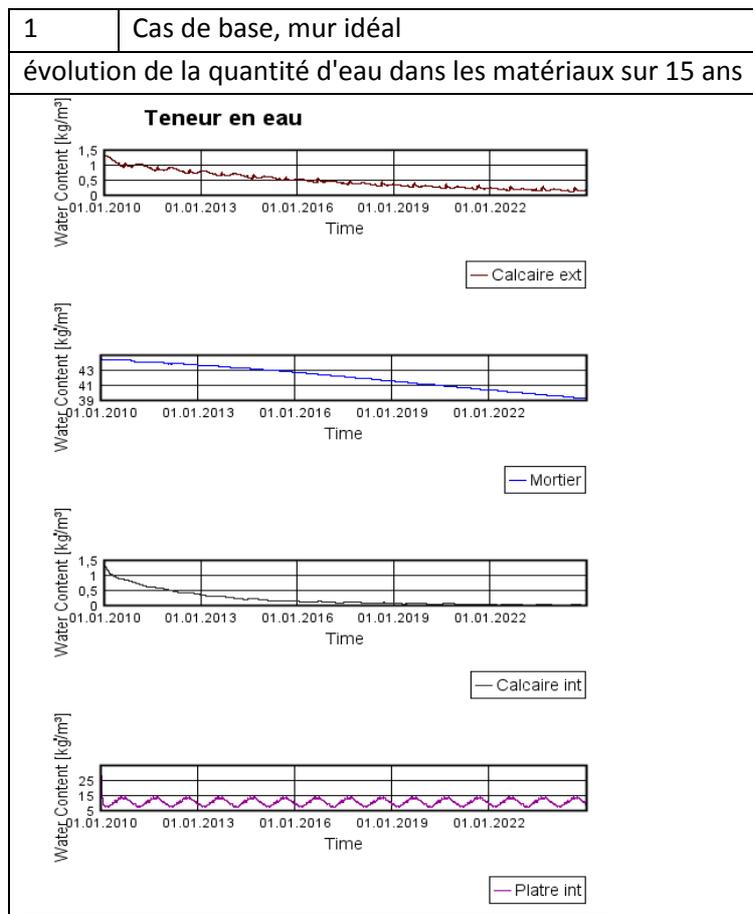
Nous nous intéressons dans un premier temps à la paroi type que nous avons défini selon les descriptions de l'architecte du patrimoine. En effet, il est pertinent de savoir quel est le comportement de celle-ci par rapport à l'humidité, et aussi d'évaluer ses performances thermiques.

Paramètres de simulation :

Simulation	1
Durée	15 ans
Températures initiales	10°C
Humidité Relative initiales	80%

La condition d'humidité relative de 80% se traduit pour les teneurs en eau des différents matériaux par les valeurs suivantes :

Matériau	W ini [kg/m ³]
Enduit	30
Calcaire	1,3
Plâtre	35
Mortier	44,5



e. Comportement

Nous voyons que le comportement global du mur sur 15ans, est un séchage. En effet la teneur en eau globale du mur (somme des teneurs en eau) diminue continuellement pendant ces 15ans.

On note même qu'au bout de 15 ans le mur est toujours dans une phase de séchage. En effet, il est clair que la quantité d'eau dans le mortier va continuer à descendre.

On remarque surtout que la quantité d'eau dans le mortier descend très lentement, alors que dans les calcaires elle est rapidement descendue : elle a été divisée par deux en 1 an. Ceci s'explique facilement : les pierres calcaires ne stockent normalement pas d'eau, l'état de départ n'est donc pas un état possible d'équilibre pour elles. Elles évacuent donc leurs eaux. Ainsi en régime établi, la quantité d'eau en leur sein est à peu près de 0kg/m^3 .

Le mortier lui, est "pris" entre les deux couches de calcaire. Hors ces couches de calcaire sont particulièrement peu perméables à la vapeur d'eau, le séchage du mortier par diffusion se fait donc très lentement.

Le plâtre voit sa teneur en eau tout de suite en régime établi. Elle dépend en fait uniquement de la condition intérieure. Celle ci étant une sinusoïde de période une année, de valeur moyenne HR=50% et d'amplitude 20.

a. Les valeurs des paramètres thermiques

Les formules ont été établies et appliquées dans l'annexe 2.

Déjà comme les pierres calcaires ne stockent pas d'eau, la valeur de la conductivité thermique, de la capacité thermique massique ou de la masse volumique restent inchangées.

Pour le plâtre, on peut lire une valeur moyenne de 10kg/m^3 .

Sa masse volumique :

$$\rho = \rho(\text{plâtre sec}) + w = 2010\text{kg/m}^3.$$

Le plâtre accueille donc très peu d'eau.

La conductivité thermique du plâtre est de :

$$\lambda = 1,26\text{W/m.K}$$

La majoration de la conductivité thermique est donc de 5%.

Sa capacité thermique massique :

$$C_p = 855 \text{ J/kg.K}$$

Voir les calculs en annexe 2.

L'augmentation du λ est de 5% ce qui est minime. Dans le cas le plus défavorable, (en hiver) elle est en fait de 8%.

Pour le mortier, il faut définir quelle est sa quantité d'eau moyenne sur une année en régime établi. Nous voyons que sur 15 ans, avec 45kg/m³ comme condition initiale, le régime établi n'est toujours pas atteint.

Nous devons faire d'autres simulations avec des conditions initiales différentes : teneur en eau plus faible. De ces simulations nous considérerons que la valeur moyenne en régime établi de la teneur en eau du mortier est de W=32kg/m³ (équivalent à HR = 65%).

$\lambda = 1,26 \text{ W/m.K}$

La majoration est ici de 10%

b. Limitations de ce modèle

Des simulations ont été faites à partir de cette géométrie en considérant une isolation par l'extérieur ou par l'intérieur, et en considérant ou non la pose d'un pare-vapeur. Dans tous les cas, nous pouvons constater qu'il y a séchage du mur, la vitesse, elle est variable.

Cependant cette géométrie ne peut être représentative de la réalité. En effet, en coinçant le mortier entre les deux blocs de calcaire, nous bloquons tout transfert d'humidité.

Or de façon générale, les problèmes liés à l'humidité sont dus à une mauvaise installation, une mauvaise pose d'isolant, la présence de ponts thermiques à des points d'infiltration ou une mauvaise ventilation intérieure plus que à une mauvaise conception de parois.

Il nous faut donc étudier les irrégularités du mur, les lignes selon lesquelles il y a diffusion de vapeur d'eau. C'est ce qui a constitué la suite de notre travail.

III. Etude au niveau des irrégularités

13. Remarques générales

On a vu que en considérant le mur de façon idéale comme la succession des couches de : enduit extérieur, calcaire, mortier, calcaire et enduit intérieur, les risques sont faibles. Ceci est du en grande partie au fait qu'il y a très peu de transferts d'eau dans le mur car les deux couches de calcaire se comportent comme des pare-vapeurs et bloquent les transferts.

Mais un double constat nous force à centrer notre étude sur certaines irrégularités de la façade.

a. Pont mortier

On sait que la composition du mur est très irrégulière et hétérogène, alors que nous l'avons pris régulier et homogène dans la première partie. On sait que dans la réalité il existe des joints mortier entre les différents blocs calcaire. Le mortier lui diffuse beaucoup mieux l'eau. Les transferts sont donc plus conséquents selon ces lignes.

Le schéma suivant présente une coupe supérieure du mur considéré, dans la première partie nous avons étudié la coupe n°3, ici nous nous intéresserons à la coupe n°4.

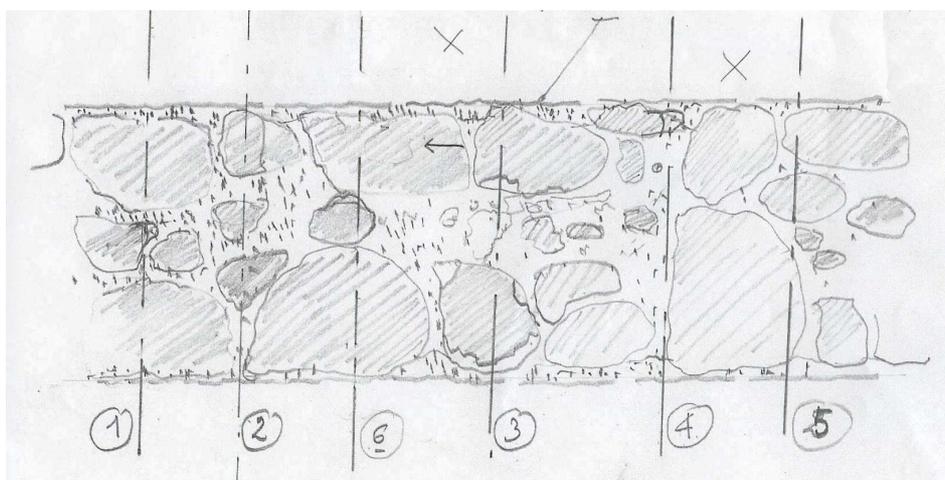


Figure 7 : Coupe de la façade étudiée

Par analogie avec l'étude thermique et les ponts thermiques, on peut appeler ces lignes des ponts mortier car il y a ici selon ces lignes de la diffusion de masse d'eau.

Cependant on constate qu'il est très difficile de chiffrer la part de ces ponts mortiers sur les façades. Cette impossibilité à quantifier nous oblige à adopter un raisonnement qualitatif.

b. Evacuation de l'eau

Dans les premières simulations, les conditions initiales de teneur en eau étaient élevées, cependant dans la suite du calcul les apports d'eau dans la paroi provenaient « seulement » de la pluie qui bat sur la façade et de la suction de l'eau liquide. Ceci, alors que les visites des bâtiments ont établi qu'il

pouvait aussi y avoir des apports d'eau par infiltration (au niveau de la toiture par exemple), et des remontées d'eau qu'elles se fassent par capillarité ou effet de mèche.
 Nous savons donc que ce mur relativement poreux, accueille une grande quantité d'eau mais que son comportement est stable étant donné que ces caractéristiques ne sont que peu détériorées après plus de 200ans d'existence.

c. Implications sur les simulations

Comme mentionné plus haut, il est impossible de chiffrer les apports d'eau ou les quantités qui diffusent au sein de la paroi. Cependant on peut affirmer que de bloquer les transferts d'humidité alors que l'on ne limite pas les apports d'eau entrainera des risques d'accumulation d'eau et donc très probablement à terme, de la condensation capillaire et des possibles détériorations.

Nous allons donc dans la suite considérer comme géométrie de mur le schéma suivant. L'isolant intérieur, le pare vapeur et le plâtre intérieur résultant de la rénovation dans le cas d'une isolation par l'intérieur.

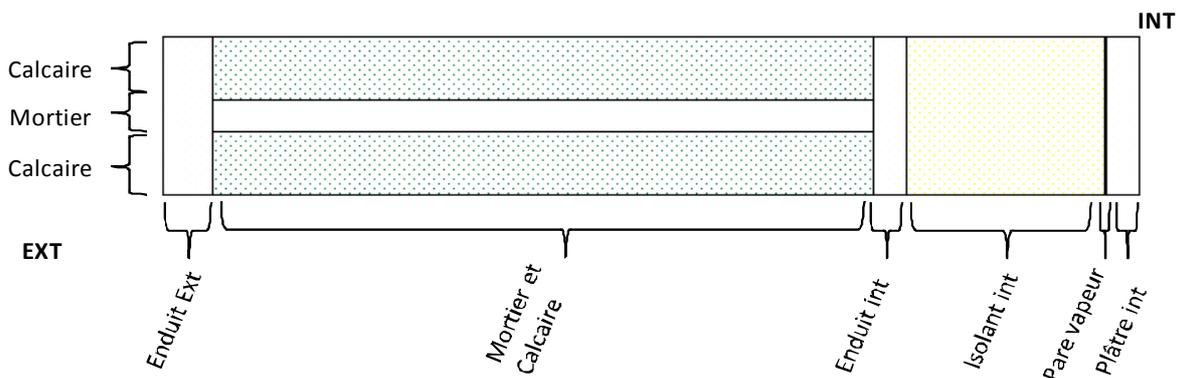


Figure 8 : schéma du pont mortier modélisé sous WUFI

Nous étudierons donc à nouveau les comportements selon que l'isolation se fasse par l'intérieur ou par l'extérieur, l'impact du choix de l'isolant, l'influence de la pose d'un pare-vapeur et de l'introduction d'une lame d'air.

14. Cas de base, isolation par l'intérieur, isolation par l'extérieur.

L'isolant utilisé ici est le béton cellulaire présenté en annexe 1. On notera comme il sera vu dans le paragraphe suivant que celui est « performant » comme isolant intérieur et que donc que les résultats avec un autre isolant intérieur seraient moins bons.

<i>Simulation</i>	<i>2.a, 2.b, 2.c</i>
<i>Durée</i>	<i>5 ans</i>
<i>Températures initiales</i>	<i>10°C</i>
<i>Humidité Relative initiales</i>	<i>80%</i>

a. Travail avec les isopleths

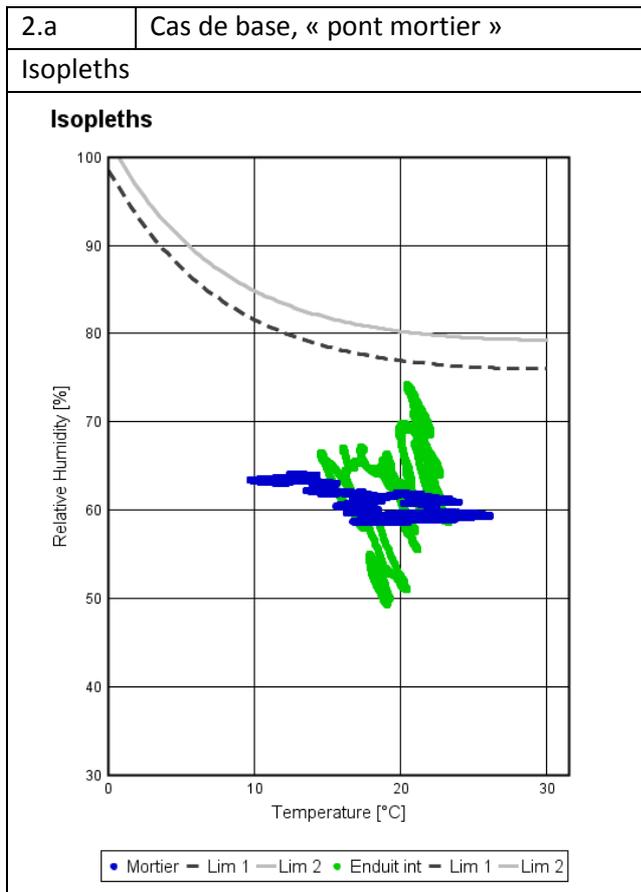
Nous travaillons sur des graphes sur lesquels on place les couples température, humidité relative pour un matériau à chaque pas de temps de la simulation. Pour une année, nous pouvons ainsi visualiser tous les couples (T, HR) pour toutes les heures. Ces courbes sont alors appelées isopleths car étant fermées, elles tracent un contour.

L'intérêt est que les risques liés à l'humidité sont définis par ce couple. En effet c'est à température froide et humidité relative élevée qu'il y a des risques mécaniques et détérioration des qualités thermiques des matériaux. Et c'est pour des températures et humidités relatives élevées qu'il y a des risques de développement de moisissure. Ces courbes de risque de développement de moisissure apparaissent sur les graphes suivant mais ne sont valables que pour des surfaces exposées à l'air, donc ici ne servent que comme repères.

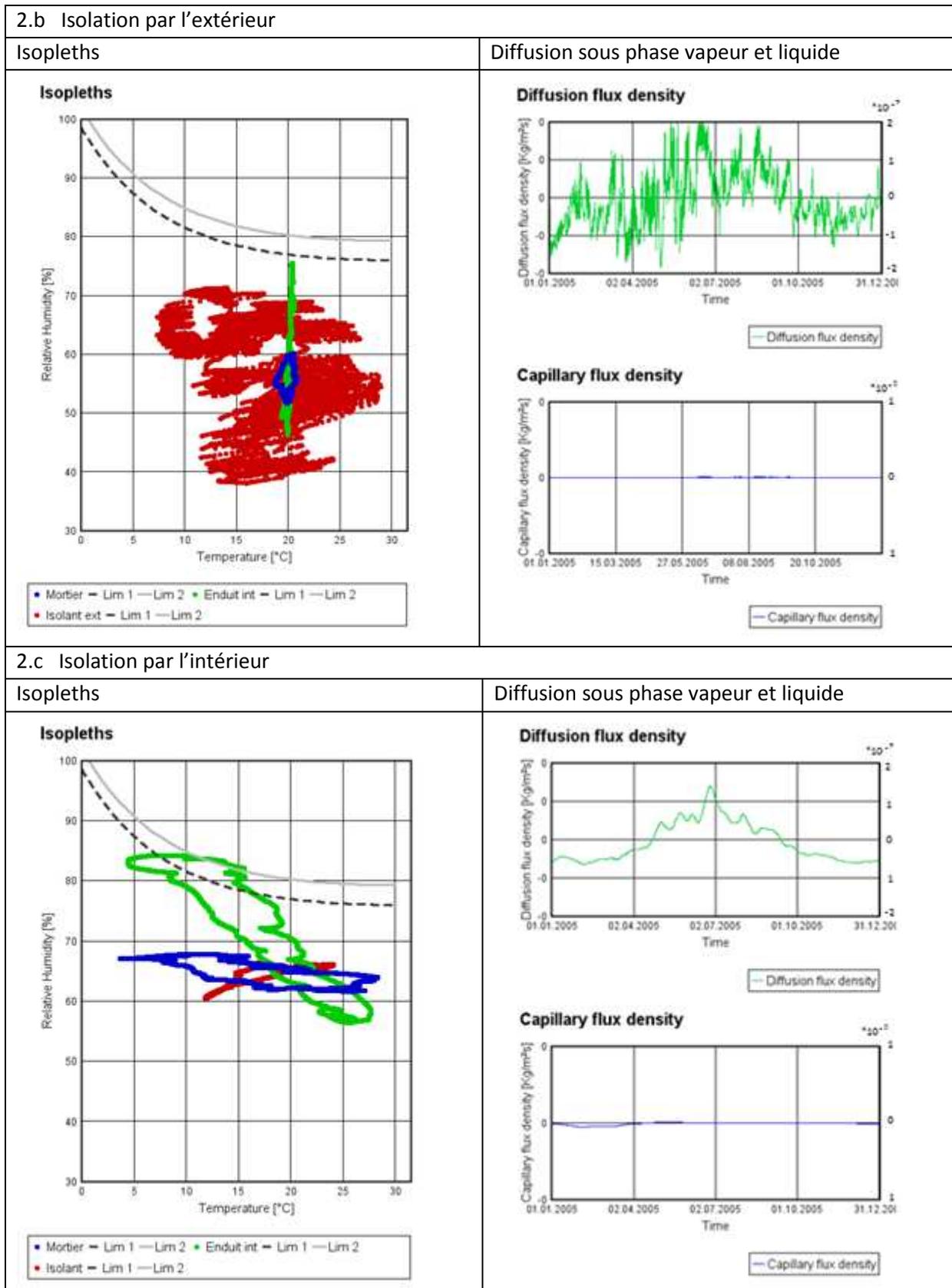
b. Travail avec les flux de masse de diffusion d'eau :

On peut évaluer les quantités d'eau qui diffusent dans le mur en certains endroits. Nous pouvons distinguer le transfert sous phase vapeur (diffusion flux density) et le flux sous phase liquide (capillary flux density).

On dit qu'il y a condensation capillaire quand le matériau a en son sein une certaine quantité d'eau (partie 3 de l'isotherme de sorption figure 1) qui remplit certains pores du matériau ; c'est dans ce cas là qu'il peut y avoir transfert par capillarité. Le fait qu'il y ait transfert nous renseigne donc sur une forte présence d'eau au sein du matériau considéré.



Cette simulation nous sert de référence pour les suivantes. On relève que les variations de températures de l'enduit sont importantes, et que des valeurs du couple (T, HR) sont relativement proches de la limite de risques de développement de moisissure.



c. Analyse

De façon générale, on note que les variations de températures dans la partie structurale du mur sont plus grandes dans le cas d'une isolation par l'intérieur.

Dans le cas de l'isolation par l'extérieur, les couples (T, HR) pour l'isolant sont beaucoup plus dispersés du fait qu'il y a plus de variations de températures et de teneur en eau. Mais on voit que l'humidité relative ne dépasse pas les 70% et que la température associée est alors de 10°C. Les risques liés à l'humidité et les détériorations thermiques seront alors très faibles. De plus les, le matériau isolant peut mieux supporter ces variations que le mortier.

Les variations de températures sont très amples dans le cas d'une isolation par l'intérieur, notamment pour l'enduit intérieur et le mortier. Les teneurs en eau sont là aussi plus élevées que dans le cas d'une isolation par l'extérieur. Le fait qu'il y ait une légère diffusion par capillarité dans le mortier le confirme.

Il y a donc notamment des risques de condensation à l'interface enduit intérieur isolant et un risque de gel d'eau liquide dans le mortier.

De plus nous savons que l'isolation par l'extérieur traite mieux les ponts thermiques. Hors les ponts thermiques peuvent induire des températures froides sur les parois intérieures, qui augmentent grandement les risques de condensation superficielle.

A ces avantages, s'ajoutent les considérations purement thermiques qui favorisent l'utilisation de l'isolation par l'extérieur. Il est donc clair que celle-ci est à privilégier.

d. Choix de l'isolant pour l'isolation par l'extérieur

Il faut un isolant qui laisse diffuser la vapeur d'eau. Ainsi les enduits extérieurs à base de chaux/chanvre qui ont la particularité de bien s'adapter à une configuration complexe, et de pouvoir être exposés à l'humidité sont une solution. L'Unilit20 en est un exemple.

Mais pour des raisons architecturales, techniques et économiques, l'isolation par l'intérieur est souvent privilégiée. Nous allons donc l'étudier plus particulièrement, en évaluant l'impact de la pose d'un pare-vapeur, et de celui d'une lame d'air puis en analysant les différents types d'isolant.

15. Pare vapeur

Nous voulons analyser ici la pertinence de la pose d'un pare-vapeur. Nous avons vu que la pose d'un isolant côté intérieur impliquait que la teneur en eau du mur était plus élevée et qu'il pouvait y avoir condensation capillaire. L'introduction d'un pare-vapeur côté intérieur limiterait ces transferts ? Quelles seraient alors les évolutions de teneur en eau dans les différents matériaux ?

Nous commençons donc avec une humidité relative relativement élevée pour voir comment le mur se comporte. Peut-il alors évacuer la quantité d'eau initiale ?

La simulation se fait sur 5ans, pour une humidité relative de départ de 80% dans tous les matériaux. La composition du mur est celle de la simulation 2.c (figure 8) avec isolant intérieur et selon les trois cas proposés, sans pare-vapeur, avec un pare vapeur de $S_d=100m$ ou avec un pare-vapeur hygro régulant. Les caractéristiques de ce pare-vapeur sont présentées dans l'annexe 1.

a. Paramètres de simulation communs aux trois cas

<i>Simulations</i>	<i>3.a, 3.b, 3.c</i>
<i>Durée</i>	<i>5 ans</i>
<i>Températures initiales</i>	<i>10°C</i>
<i>Humidité Relative initiales</i>	<i>80%</i>

Pour la description des évolutions, nous pouvons distinguer trois caractéristiques. En premier, le comportement de la teneur en eau, si celle-ci diminue, augmente ou se stabilise. Puis dire si l'amplitude et la moyenne de la teneur en eau sont élevés, moyennes ou faibles.

		3.a	3.b	3.c
Enduit	Amplitude	Elevée	Moyenne	Faible
	Teneur moyenne	Elevée	Moyenne	Faible
	Comportement	Stabilise	Diminue lentement	Diminue
Isolant	Amplitude	Faible	Elevée	Faible
	Teneur moyenne	Faible	Elevée	Faible
	Comportement	Stabilise	Diminue lentement	Diminue

b. Analyse

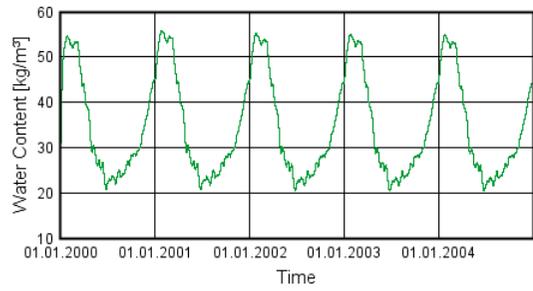
Dans le cas de base, il y a de fortes variations dans l'enduit mais pas dans l'isolant. En effet l'isolant qui est ici de la laine de verre accueille peu d'eau car il peut expulser l'eau vers l'intérieur. Alors que dans l'enduit c'est la pose de l'isolant qui fait que l'amplitude est grande, car les variations de températures le sont aussi. Ici le risque se situe au niveau de l'enduit, et à l'interface enduit/isolant.

La pose d'un pare-vapeur diminue les variations de teneur en eau dans l'enduit mais augmente celle de l'isolant. On peut penser que cette fois-ci l'isolant ne peut évacuer l'eau qui est en son sein, il y a donc une certaine accumulation. Les valeurs atteintes sont élevées.

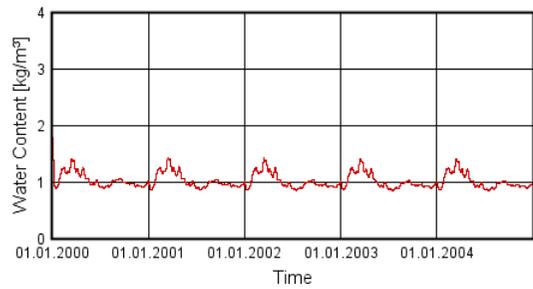
Du fait du pare vapeur, il y a moins d'échange d'eau avec l'extérieur, donc la teneur en eau de l'enduit est en moyenne plus faible, car moins d'eau de pluie n'entre dans le mur et diffuse jusqu'à l'enduit.

Enfin, le pare-vapeur hygro réglable semble cumuler les avantages des deux autres scénari. Les pics de teneur en eau de l'isolant semblent écrêtés. Quand l'humidité relative autour du pare-vapeur est élevée, il laisse évacuer l'eau dans l'isolant et il limite cependant les fluctuations sur l'ensemble du mur.

3.a Quantité d'eau sans pare vapeur

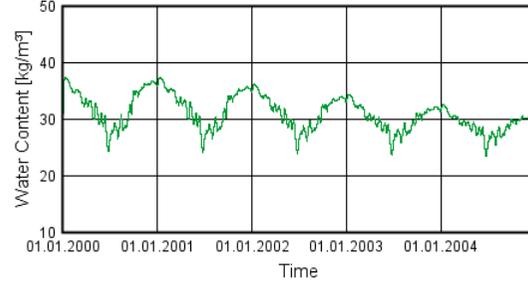


— Enduit

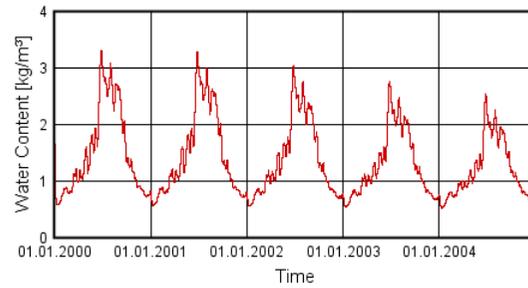


— Isolant

3.b Quantité d'eau avec un pare-vapeur
Sd=100m

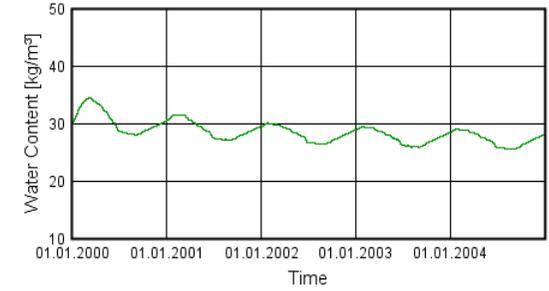


— Enduit

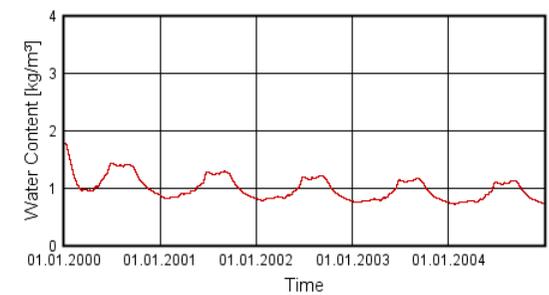


— Isolant

3.c Quantité d'eau avec un pare-vapeur
hygro-régulant



— Enduit



— Isolant

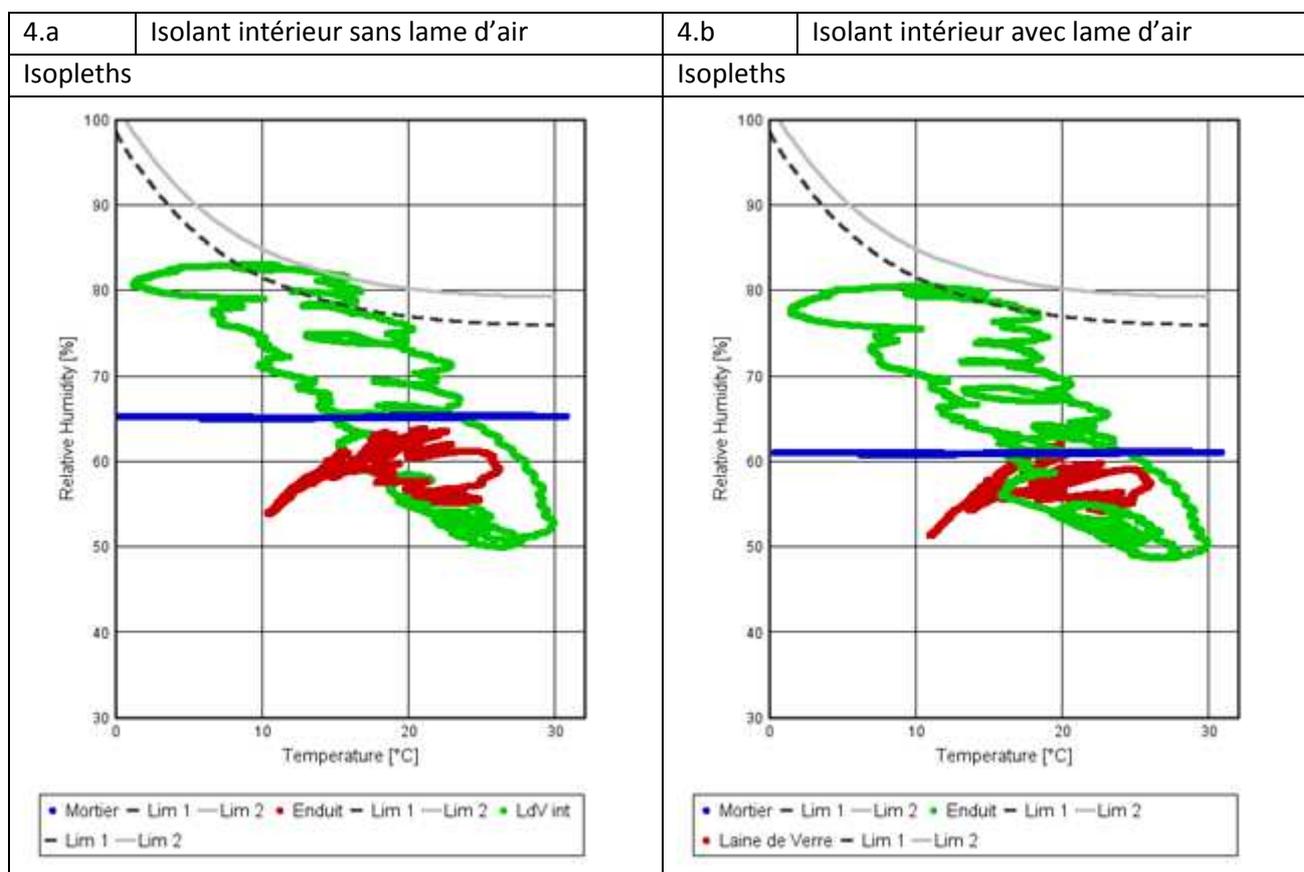
16. Ajout d'une lame d'air côté intérieur

Ici nous voulons évaluer l'influence d'une lame d'air entre l'enduit intérieur et l'isolant. Cette lame d'air est souvent laissée par défaut car l'enduit intérieur est souvent irrégulier, compliquant la pose de l'isolant. On place ainsi souvent l'isolant derrière une lame d'air de faible épaisseur (ordre de 3cm).

Nous modélisons le cas déjà présenté sans puis avec une lame d'air de 3cm entre l'enduit intérieur et l'isolant. Cette lame d'air est considérée non ventilée.

<i>Simulations</i>	<i>4.a, 4.b</i>
<i>Durée</i>	<i>5 ans</i>
<i>Températures initiales</i>	<i>10°C</i>
<i>Humidité Relative initiales</i>	<i>50%</i>

Nous traçons les isopleths pour la dernière, une fois le régime pseudo-établi atteint, nous pouvons ainsi voir l'influence de cette lame d'air au niveau thermique et au niveau de l'humidité.



De façon comparative, on voit qu'il y a une translation verticale des isopleths de l'enduit intérieur et du mortier. Le fait qu'il n'y ait pas de variation horizontale montre que l'influence de la lame d'air au niveau thermique est très faible.

Les valeurs d'humidités relatives sont elles diminuées de l'ordre de 5%. Ceci montre que la lame d'air a tendance à baisser la teneur en eau des matériaux contigus, mais que cette influence reste minime.

Une humidité relative de 80% pour l'air est très haute, et le risque de condensation superficielle reste élevé, alors qu'un matériau hygroscopique peut supporter plus facilement de telles valeurs d'humidités relatives.

17. Choix de l'isolant pour isolation par l'intérieur

Nous travaillerons selon les classes d'isolant définies dans la première partie. Ainsi des simulations ont été réalisées avec 4 isolants différents :

Polystyrène expansé, de la famille 1, cas a

Laine de verre, de la famille 2, cas b

Fibre de bois, de la famille 3, cas c

Béton cellulaire, de la famille 3, cas d

Ce sont toutes des simulations sur 5 ans où l'on étudie plus précisément les évolutions sur la dernière année, donc en régime pseudo-établi. On compare les quantités d'eau qui diffusent entre le mortier et l'enduit intérieur, et les teneurs en eau de l'enduit.

<i>Simulations</i>	<i>4.a, 4.b, 4.c, 4.d</i>
<i>Durée</i>	<i>5 ans</i>
<i>Températures initiales</i>	<i>10°C</i>
<i>Humidité Relative initiales</i>	<i>50%</i>

La surface sur laquelle on se place pour considérer les diffusions d'eau sous phases vapeur et liquide est la surface qui a pour coupe le segment rouge sur le schéma suivant.

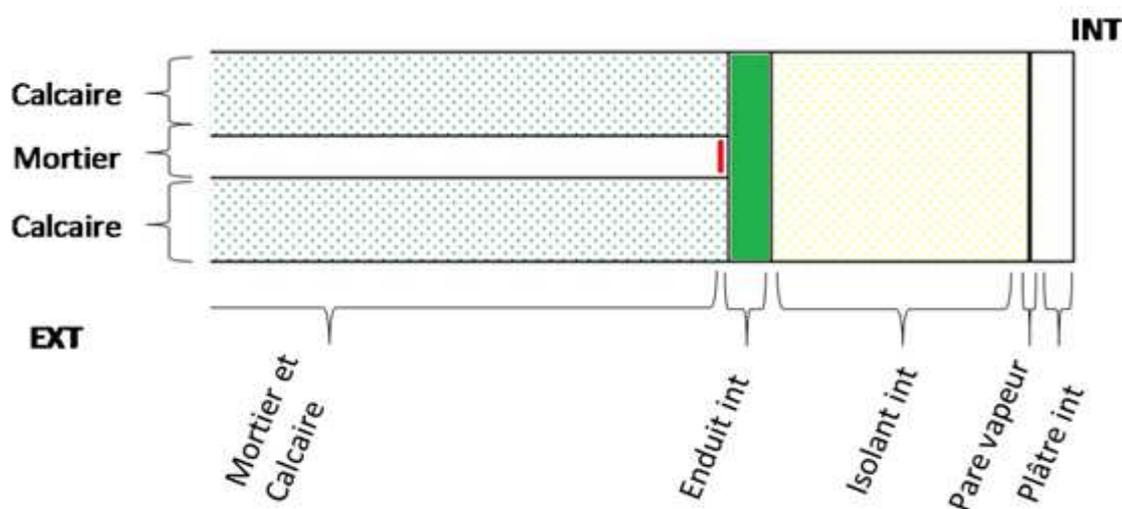
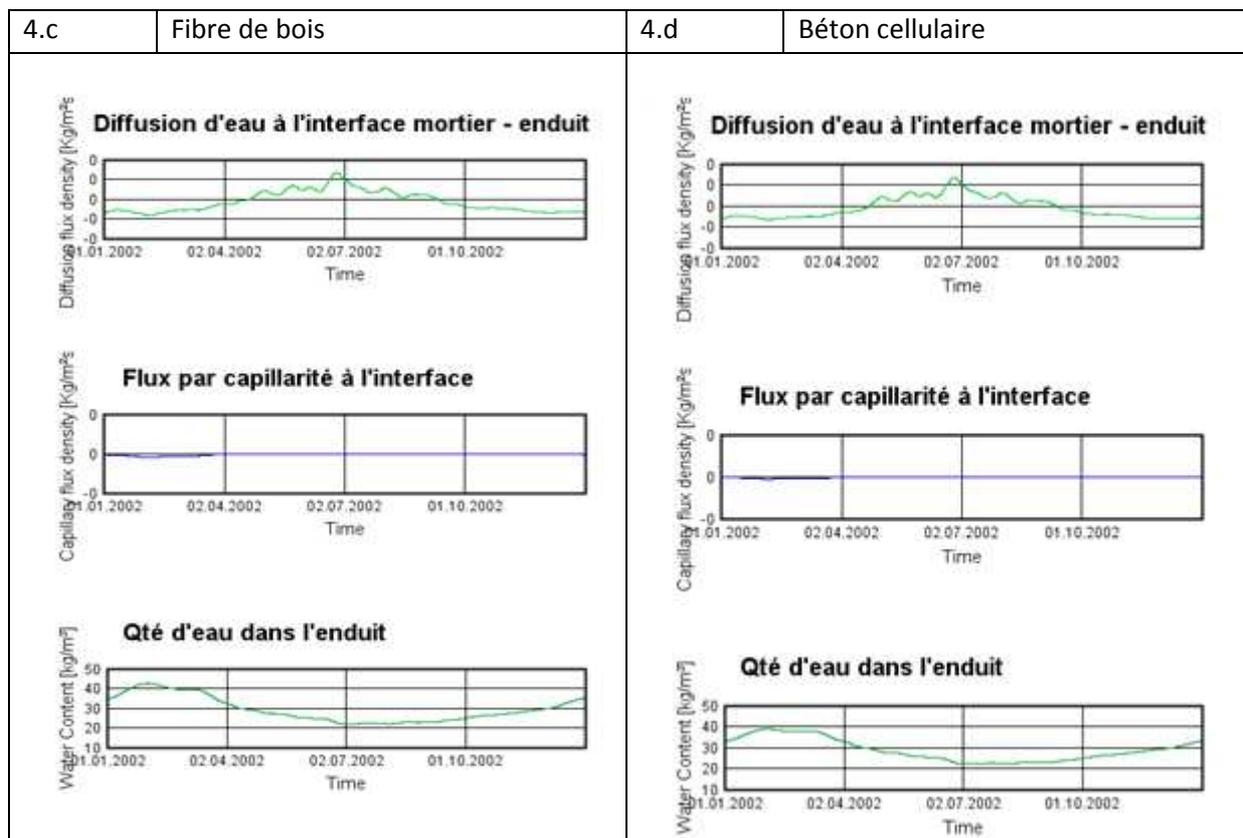
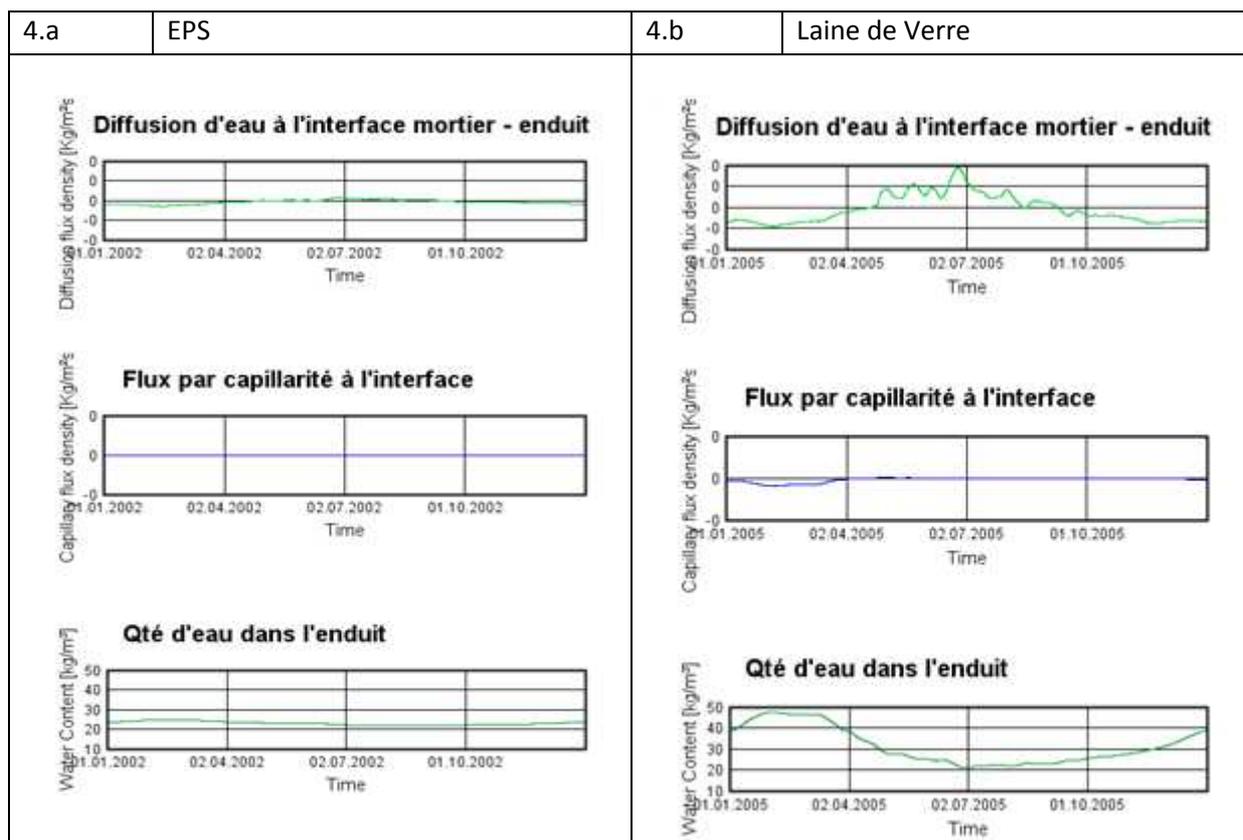


Figure 9 : schéma du « pont mortier » précisant où la mesure des flux et de teneurs en eau se font



Note : L'échelle des valeurs des flux de diffusion n'apparaît pas sur les graphes suivant. Les deux sont centrées sur 0, et pour la diffusion sous forme vapeur, chaque division verticale correspond à 10^{-7} kg/m²s et pour la diffusion par capillarité à 10^{-8} kg/m²s.

a. Analyse

4.a Pour l'EPS, il n'y a une très faible diffusion de vapeur d'eau et une teneur en eau faible dans l'enduit qui varie très peu. Ceci montre bien que les transferts d'eau sont très limités par l'isolant. Or dans le cas d'un apport d'eau par infiltration ou remontée, il y aura accumulation dans le mur car impossibilité d'expulsion.

4.b Pour la laine de verre, il y a une légère diffusion par capillarité. Celle-ci traduit la présence de condensation capillaire. Ceci peut être du au fait que la laine de verre peut accueillir que très peu d'eau, elle est donc rapidement saturée. Ceci est corrélé par le fait que la teneur en eau dans l'enduit est maximale pour ce cas là.

4.c et 4.d Les comportements de ces deux cas sont très proches. On notera cependant que la teneur en eau de l'enduit dans le cas du béton cellulaire est légèrement plus faible.

Un autre argument pour justifier l'emploi d'un tel isolant est qu'il peut plus facilement supporter des humidités relatives élevées.

Un autre argument qui va dans le sens du recours à un matériau hygroscopique du côté intérieur à coupler avec un frein vapeur ou l'absence totale de pare-vapeur est que dans le cas d'une haute humidité relative intérieure, cas que l'on retrouvera dans l'usage de salles d'eau, de cuisine, de buanderie... les matériaux hygroscopiques peuvent absorber une partie de l'eau, et ainsi diminuer la quantité d'eau dans l'air. L'effet induit est une amélioration du confort, et un risque plus faible de condensation superficielle sur les surfaces intérieures. Cette eau pourra être désorbée quand la teneur en eau de l'air de la pièce diminuera, c'est-à-dire quand elle sera ventilée.

On a ainsi un effet de lissage de l'humidité relative intérieure par les matériaux hygroscopiques, qui peut être caractérisé d'effet tampon.

b. Préconisations

Il est donc préconisé d'utiliser pour l'isolation par l'intérieur un isolant que l'on peut qualifier d'hygroscopique. Une condition supplémentaire est qu'il puisse bien supporter de hautes teneurs en eau. Dans ce cas là, un matériau comme le béton cellulaire est approprié. On pourrait aussi étudier un matériau comme le silicate de calcium qui a la particularité de très bien supporter de hautes teneurs en eau et d'être très hygroscopique.

18. Jonction Plancher

Il est d'usage de conseiller de laisser une lame d'air entre la solive et le mur. Celle-ci doit donc reposer sur des blocs calcaires mais ne pas toucher le mortier. Ceci est mis en avant dans le rapport (BATAN, [7]) « Connaissances des bâtiments anciens et économies d'énergie », dont la phrase suivante est un extrait :

« Dans le bâti ancien, les repos des abouts de poutres, en bois ou en fer, sont généralement réalisés en aménageant des espaces libres (niches) autour de ces pièces de structure ; ceci afin d'éviter le pourrissement du bois ou la rouille du fer au contact des maçonneries. »

L'idée est donc ici d'utiliser le logiciel WUFI pour vérifier la validité de cette solution technique. Et ensuite de voir dans le cas d'une isolation par l'intérieur l'impact sur la solive.

<i>Simulations</i>	<i>5.a, 5.b, 5.c, 5.d</i>
<i>Durée</i>	<i>5 ans</i>
<i>Températures initiales</i>	<i>10°C</i>
<i>Humidité Relative initiales</i>	<i>50%</i>

On étudie d'une part l'évolution de la teneur en eau du bois sur quelques centimètres en bout de solive en le comparant avec l'évolution de la teneur en eau de la solive sur l'ensemble de celle-ci. On peut ainsi voir si en bout de solive, si le bois est plus humide ou plus sec que dans le reste de la solive.

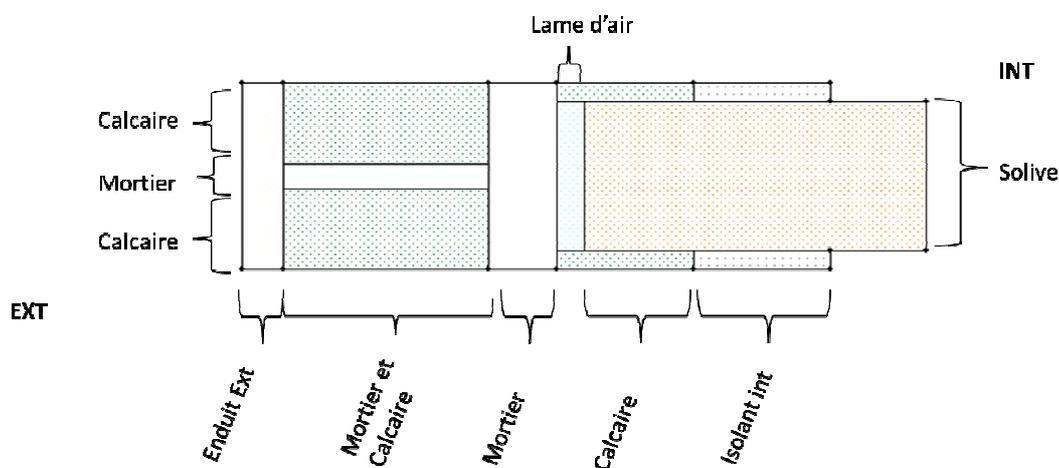
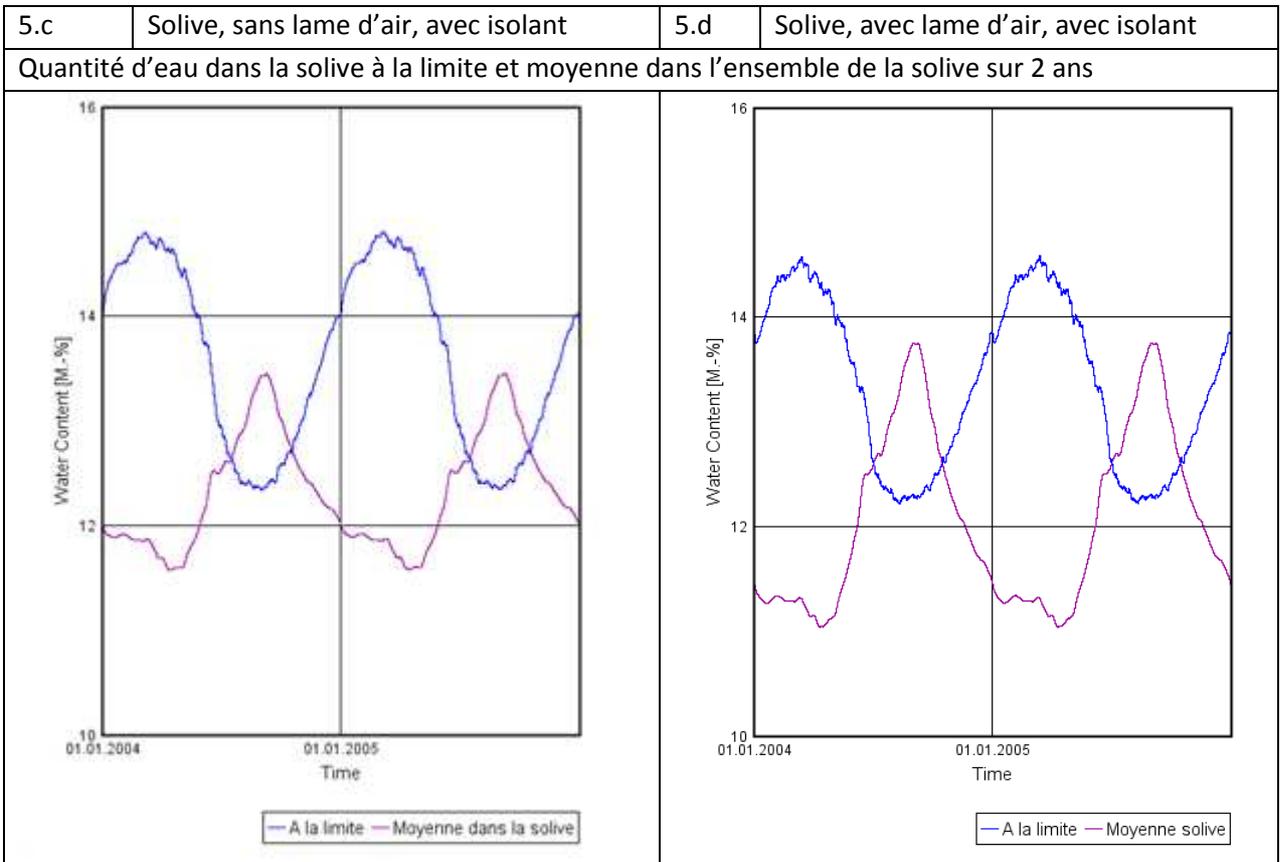
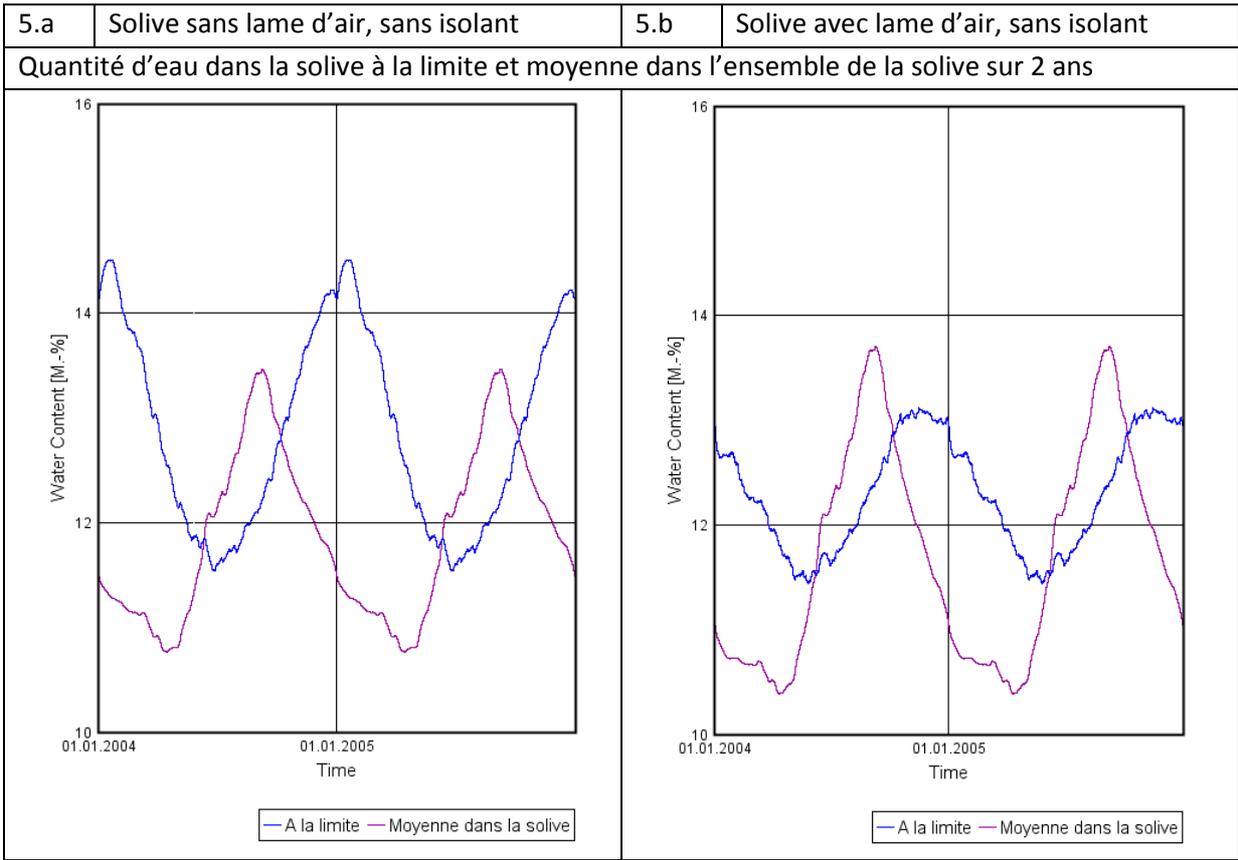


Figure 10 : Schéma du modèle pour WUFI de la jonction plancher

L'isolant est une laine minérale comme dans la première partie de l'étude. Les résultats devraient être les mêmes avec du béton cellulaire ou de la fibre de bois, car on étudie la teneur en eau dans le bois qui est lui-même un matériau hygroscopique. On peut par contre penser qu'avec un isolant type polyuréthane, ce devrait être « pire ».



Note : L'unité pour la teneur en eau est ici exprimée en kg d'eau/kg. C'est le pourcentage de masse d'eau en masse pour un échantillon de bois, c'est-à-dire la part de la masse d'eau dans un kilogramme de bois.

a. Analyse

Sans isolation, on voit que la teneur en eau à la limite est plus élevée sans lame d'air qu'avec lame d'air. On voit aussi que sans la lame d'air, la teneur en eau au bout de la solive est plus grande que la moyenne, il y a donc accumulation d'eau au bout de la solive. Par contre, l'introduction de la lame d'air fait que la teneur en eau baisse considérablement, et que dans ce cas, la teneur en eau y est plus faible que la moyenne. Ceci vient justifier le fait de laisser une lame d'air entre la solive et le mortier.

Avec l'introduction d'une isolation intérieure, on note dans un premier temps que la teneur en eau moyenne dans la solive est plus élevée. D'autre part, la différence entre la teneur en eau à la limite avec et sans lame d'air est très légère. Donc l'isolation vient augmenter les teneurs en eau, et ainsi augmenter les risques de pourrissement du bois, et la lame d'air entre le bout de la solive et le mortier ne suffit plus à les limiter.

IV. Préconisations et conclusions

Cette étude des transferts de masse et de chaleur nous a permis d'évaluer les risques liés à l'humidité pour différentes compositions de parois.

La complexité du mur due à son hétérogénéité et le fait qu'il y ait des apports d'humidité que l'on ne peut quantifier, nous ont obligé à adopter une approche qualitative. Ainsi, il faut chercher à limiter le moins possible les transferts naturels d'humidité qui permettent d'évacuer cette eau.

Nous avons pu confirmer que l'isolation par l'extérieur est l'alternative qui permet de mieux traiter à la fois l'aspect énergétique et hygrique : il y a moins de déperdition thermique tout en assurant un meilleur confort intérieur comparativement avec l'isolation par l'intérieur, et les risques liés à l'humidité dans le mur sont plus faibles. Dans ce cas, un enduit naturel qui ne freine pas la diffusion de vapeur et qui supporte bien de hautes humidités relatives est une solution appropriée.

Dans le cas d'une isolation par l'intérieur. La pose d'un pare-vapeur est déconseillée car elle limiterait les échanges d'eau et donc perturberait le comportement naturel du mur vis-à-vis de l'humidité. L'utilisation d'un pare-vapeur hygro-réglable ou intelligent est à étudier. Il serait intéressant d'avoir un retour d'expérience sur une telle solution.

Le choix de l'isolant est à faire parmi les matériaux hygroscopiques : fibre de bois, béton cellulaire, silicate de calcium, ceux-ci ayant un comportement qui s'adapte à la teneur en eau.

Il faut noter qu'une des raisons des problèmes liés à l'humidité est celle d'une ventilation intérieure trop faible. Si la rénovation rend l'enveloppe du bâtiment plus étanche, et donc limite la ventilation naturelle, il faut impérativement étudier de près la ventilation du bâtiment, et envisager des systèmes de ventilation mécanique.

On peut noter que l'on trouve des retours d'expérience sur différents projets de rénovation, en Italie (Mahlknecht M., [6]) par exemple, pour lesquels une instrumentation du bâtiment a été faite pour permettre le suivi. Il serait très intéressant pour ce projet de réaliser une telle instrumentation pour évaluer la pertinence des préconisations.

V.

PHASE 3 PROPOSITIONS D'AMÉLIORATIONS

Introduction

Les différences de comportement des 3 édifices sont dues à d'autres facteurs que ceux constructifs et les résultats des mesures dépendent principalement de l'implantation (mitoyenneté ou non), de l'orientation géographique, des proportions des ouvertures en façade, etc...Ces édifices fonctionnent pour 2 d'entre eux depuis plus de 3 siècles grâce à un équilibre qui s'est établi entre les différents matériaux, la souplesse de l'ensemble et le terrain sur lequel ils ont été construits.

Toute intervention même si elle paraît anodine peut avoir des conséquences sur l'équilibre constructif de l'édifice :

- Assèchement des sols
- Emprisonnement de l'humidité dans les fondations
- Décompression d'un plancher ou d'une voûte
- Démolition de cloisons « porteuses »
- Remplacement des planchers bois par des dalles béton ancrées dans des maçonneries en moellons de pierre.

Toutes les propositions d'intervention devront prendre en compte ces données. Elles concerneront les domaines suivants :

- Traitement de l'humidité
- Isolation extérieure et /ou Intérieure
- Murs
- Caves
- Combles
- Changement des menuiseries extérieures
- Changement des appareils de chauffage
- Régulation
- Ventilation
- Fermeture ou non des communs ouverts sur l'extérieur

I. Traitement de l'humidité

Dans les quartiers du centre de la ville de Grenoble les remontées d'humidité sont très présentes. Elles se traduisent sous forme de traces plus sombres sur les enduits à la chaux, et de décollement sur les enduits étanches.

Dans le cas de réalisation de travaux d'isolation en milieu humide, l'eau dégradant les propriétés thermiques des isolants Il conviendra de traiter en priorité ces problèmes d'humidité avant d'isoler.

En Rez de chaussé, les remontées ne peuvent pas être stoppées sans une intervention lourde
Les aménagements urbains et les matériaux imperméables utilisés pour les sols intérieurs, favorisent la concentration d'humidité dans les murs au-delà de ce qu'ils peuvent emmagasiner. Les murs en moellon ou en pierre de taille, agissent comme une mèche, et les remontées peuvent atteindre le plancher du premier niveau. Le rez-de-chaussée est généralement destiné aux commerces, ateliers ou réserves. D'une manière générale, les effets sont d'ordre esthétique et non structurels, à condition que les remontées n'atteignent pas un niveau de plancher bois, dans ce cas elles provoqueront le pourrissement des abouts de poutre.

Travaux d'amélioration :

Plusieurs niveaux d'intervention :

- **Méthode lourde** par création de barrière étanche mécanique et drains extérieurs et intérieurs. Ces systèmes sont efficaces mais très difficiles à mettre en œuvre, et très coûteux.

Ces travaux ne sont pas envisagés dans la présente étude

- **Méthode plus légère** par mise en place de système électromagnétique (type « Murtronic ») relativement efficace, mais à suivre dans le temps.

Coût de mise en œuvre (HT) = 4000 à 5000€ par immeuble

- **Travaux de base** : dans tous les cas il est nécessaire de favoriser l'évaporation et la ventilation des planchers bas, et des murs par des travaux relativement simples :

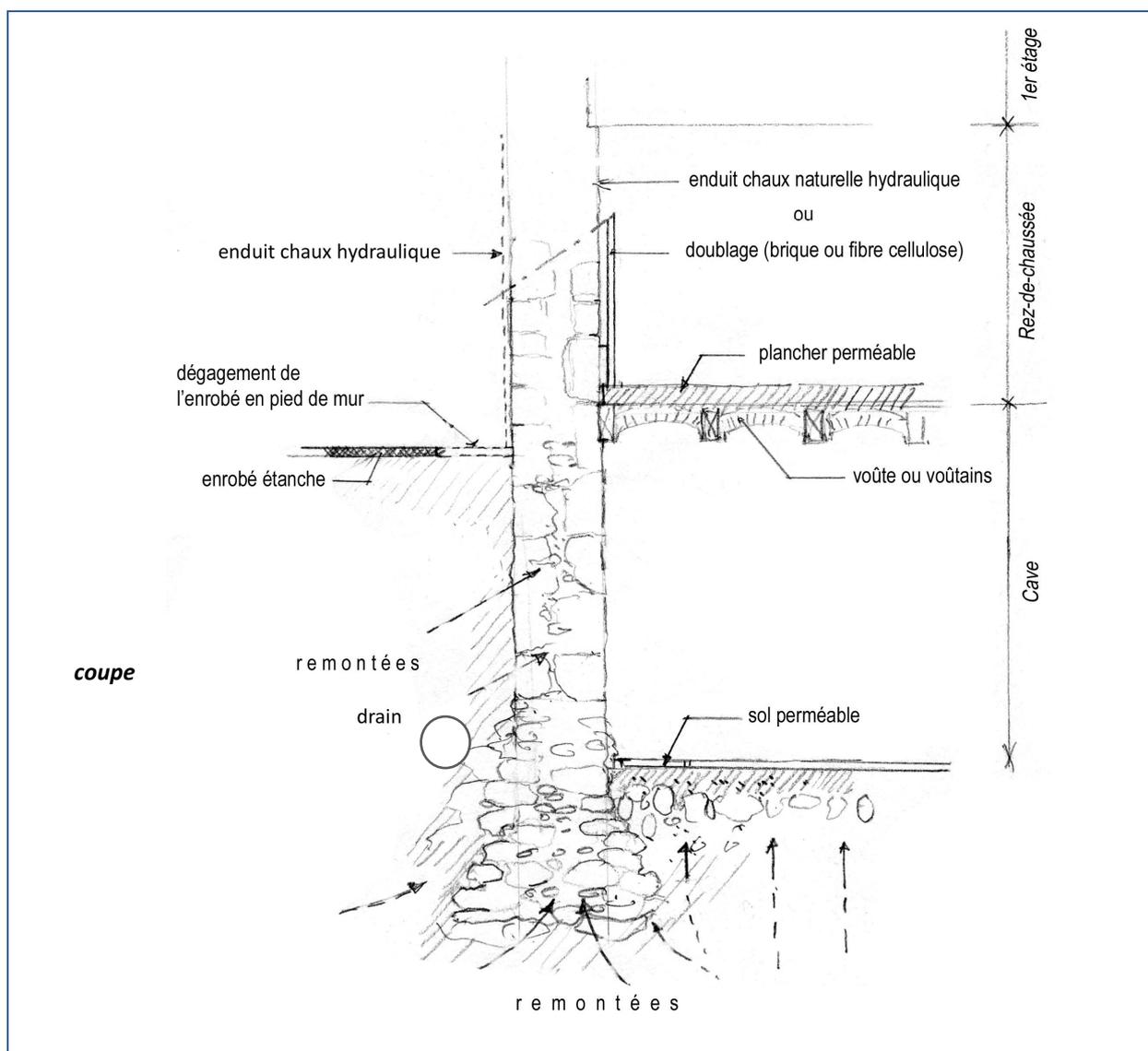
- * Drainage au dessus du niveau des semelles de fondation

- * Aménagement d'une bande perméable dans les sols affleurant le mur, intérieur et extérieur

- * Enduit : un enduit spécifique d'interposition, peut retarder l'apparition des sels présents dans les sols + couche de finition chaux en intérieur et extérieur.

*Ventilation au pied des murs : Torres et al¹ proposent dans leur étude “The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic building”, comme solution le fait de ventiler fortement la base des murs souffrant de remontée d’humidité. Cette étude a été faite sur des bâtiments historiques au Portugal, dont les parois sont composées de calcaire et mortier. Cette ventilation peut être naturelle, ou assurée par ventilation de type hygroréglable.

Coût : ces travaux ne peuvent être estimés forfaitairement sans la connaissance précise des travaux qui vont être réalisés par immeuble : longueur de drainage et condition de réalisation, dépose des sols et repose d’une dalle perméable.



Sch 1 : Coupe schématique de la migration d’eau dans les murs de fondation et de cave

¹ Torres et al, “The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic building”, in Construction and Building Materials, Aout 2010.

II. Isolation des murs

1. Isolation par l'extérieur

L'isolation par l'extérieur est une des possibilités d'amélioration de performance énergétique sur les 3 bâtiments anciens étudiés. La mise en œuvre doit respecter 2 règles:

- Permettre au mur de perspirer
- Respecter les contraintes architecturales

Selon les calculs des deux cas : isolation par enduit ou isolation par brique minérale on constate que le gain est important pour les appartements non-isolés et que cela permet de réduire significativement les déperditions et la consommation annuelle de chauffage.

a. **Avantage et contraintes :**

La mise en place d'une isolation extérieure par rapport à une isolation intérieure permet de réduire les ponts thermiques sur la dalle intermédiaire même si dans le cas du bâti ancien avec plancher bois, ces ponts thermiques ont une valeur moindre que dans le cas du bâti récent. Ce type de travaux nécessite un ravalement de façade et donc des travaux collectifs coûteux, difficile à voter en assemblée.

Il a été décidé d'étudier plus précisément 2 types d'isolants compatibles avec les matériaux et le fonctionnement de ces édifices:

- **Enduit à caractère isolant :**

Ils sont constitués de mortiers hydrauliques à base de chaux naturelle, chargés des particules de matériaux isolants (billes de polystyrène expansé, perlite expansée, vermiculite exfoliée, etc.). Ils peuvent être appliqués en forte épaisseur (de 3 à 8 cm) par projection mécanique.

	Valeur retenue				
	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
Gains sur la consommation annuelle de chauffage (%)	10	19	26	30	34

Coût indicatif global de mise en œuvre (HT) enduit 5 cm = 90€/m² + échafaudage 25€/m²
Consommation annuelle avant amélioration = 105 kWh/m²/an EF
Consommation annuelle après amélioration = environ 70 kWh/m²/an EF
Gain annuel (TTC/an) pour un appartement de 100 m² = 230 à 350 € suivant le mode de chauffage

- **Isolant rigide en plaque minérale**

Les plaques sont exclusivement minérales à faible conductivité thermique et ouvert à la diffusion de la vapeur d'eau (indice de résistance $\mu=3$)

Les matériaux de mise en œuvre doit respecter la perméabilité : colle et enduit de finition.

	Valeur retenue	
	10 cm	20 cm
Gains sur la consommation annuelle de chauffage (%)	43	50

Coût indicatif global de mise en œuvre (HT) 10 cm multisor = 70 à 90€ / m²+ 25€ m² échafaudage

Consommation annuelle avant amélioration = 105 kWh/m²/an EF

Consommation annuelle après amélioration = 63 kWh/m²/an EF

Gain annuel (TTC/an) pour un appartement de 100 m² = 250 à 420 € suivant le mode de chauffage

b. Prescriptions particulières de mise en œuvre

- **Enduit à caractère isolant à base de chaux naturelle et de matériaux minéraux expansés :**

jusqu'à 5 cm d'épaisseur, possible pour les 3 immeubles.

Prescription particulière : respect du relief de la modénature, (appuis et encadrements des baies, corniches). Le support doit être entièrement décrouuté avant travaux pour éviter tout risque de sur épaisseur et de superposition des supports.

Soubassement en pierre de taille (Saint Laurent ou Saint André) : pour des raisons architecturales et historiques, les soubassements en pierre de taille ne peuvent pas être isolés par l'extérieur. Ceux en moellons de pierre (Philis de la Charce), recevront le même type d'enduit après travaux d'assainissement prévus au §I.

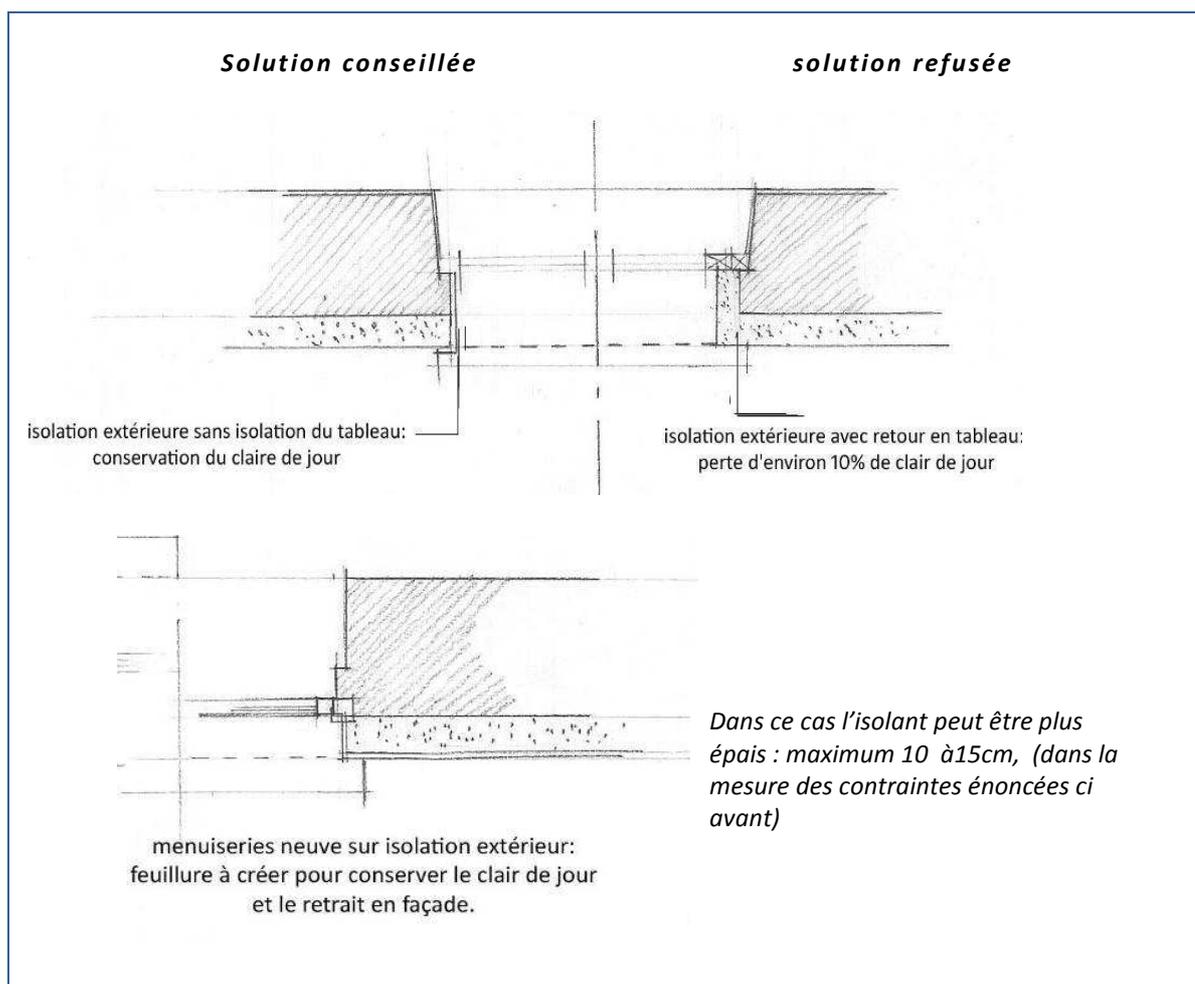
- **Isolant extérieur complexe plaque minérale + finition (pour 10 cm épaisseur)**

Techniques d'isolation possible uniquement sur façade Philis de la Charce et en pignon Rue Saint Laurent, qui sont des façades « lisses », sans aucun relief. Principe totalement exclu pour isoler les autres façades.

Ce dispositif est compliqué à mettre en œuvre au droit des ouvertures (encadrements et appuis des baies). Le relief de la façade en sera modifié :

- Soubassement en pierre de taille : pour des raisons architecturales et techniques, murs humides, cet isolant ne peut être en contact avec le sol. S'il n'y a pas de bandeau il faudra créer un soubassement en mortier de chaux hydraulique sur une hauteur d'environ 1 m de hauteur.
- Les nouveaux appuis des baies, en zinc ou pierre, doivent être traités de manière à ne pas provoquer de coulures de part et d'autre.

- Menuiseries extérieures : Il n'est pas possible de réaliser le retour d'isolation en tableau sans perte considérable de la surface vitrée. Les encadrements seront conservés dans leur totalité, le champ de l'isolant devant être protégé par un panneau minérale. L'emplacement de la menuiserie pourra être déplacé vers l'extérieur en créant une nouvelle feuillure. *Solution couteuse car changement de l'ensemble des menuiseries pour conserver l'unité de la façade.*
- Les avancées de toit doivent être rallongées pour respecter les dispositions d'origine et protéger la façade.



Sch 2

Solutions proposées suivant le positionnement de la menuiserie extérieure

2. Isolation par l'intérieur

a. **Avantage et contraintes :**

La mise en œuvre est individuelle, dans chaque logement.

Il faut vérifier que le bâti ancien accepte ce type d'isolation (risque de pathologie dans les murs en raison de la réduction brutale de la température après l'isolant).

Comme pour l'isolation extérieure, le choix de l'isolation par l'intérieur doit être étudié au cas par cas, suivant les situations plus ou moins adaptées à cette technique :

- Projet isolé qui apporte un gain individuel mais qui n'encourage pas à une pratique collective
- Contraintes architecturales : perte de surface, perte patrimoniale des éléments architecturaux particuliers (lambris, staffs), et transformation des parements avec le redressement des murs.
- Perte d'ensoleillement ou de clair de jour, du au rétrécissement des ouvertures à cause du retour d'isolation
- risque de détérioration des conditions de confort estival car elle réduit l'inertie intérieure des murs ce qui peut causer de pics de température en été et des périodes de surchauffes.

Quelque soit le choix, on favorisera les matériaux hygroscopiques. Les isolants à base de polystyrène sont exclus.

● **Isolant intérieur épais :**

Isolant panneau laine de bois 10 cm entre montant bois (+ lame d'air)

	Valeur retenue
	10 cm
Gains sur la consommation annuelle de chauffage (%)	46

Coût indicatif global de mise en œuvre (HT) 10 cm d'isolation = 39 à 43€/m²

Consommation annuelle avant amélioration = 105 kWh/m²/an EF

Consommation annuelle après amélioration = 60 kWh/m²/an EF

Gain annuel (TTC/an) pour un appartement de 100 m² = autour de 250 à 420 €

Isolant briques minérales

Les gains avec 10 cm ou 16 cm de **laine de verre** ou 10 cm de **plaques minérales** sont sensiblement du même ordre, seul la technique de mise en œuvre diffère et ce sont plutôt les contraintes et les transferts hygrométriques qui doivent influencer le choix de l'isolant intérieur.

Coût de mise en œuvre (HT) 10 cm d'isolation = 70 à 75 €/m²

Idem isolant laine de bois pour les gains et les consommations annuelles

b. Prescription de mise en œuvre

Les problèmes d'humidité doivent être résolus, ce qui implique que les façades extérieures soient traitées avec un enduit favorisant les échanges gazeux (étanche à l'eau et perméable à l'évaporation). Voir § II x

Sur rez-de-chaussée :

- **Enduit chaux naturelle hydraulique ou doublage avec inertie en panneau minéral compatible en milieu humide.**

Une isolation végétale par panneau est possible si elle laisse une ventilation entre la maçonnerie et l'isolant d'environ 30mm. Cela implique une perte de surface d'environ 0.15m sur la longueur du mur à isoler. Dans ce cas les retours en tableau sont difficiles à traiter ainsi que le traitement particulier des menuiseries extérieures, et réduit les passages (entrées ou baies commerciales).

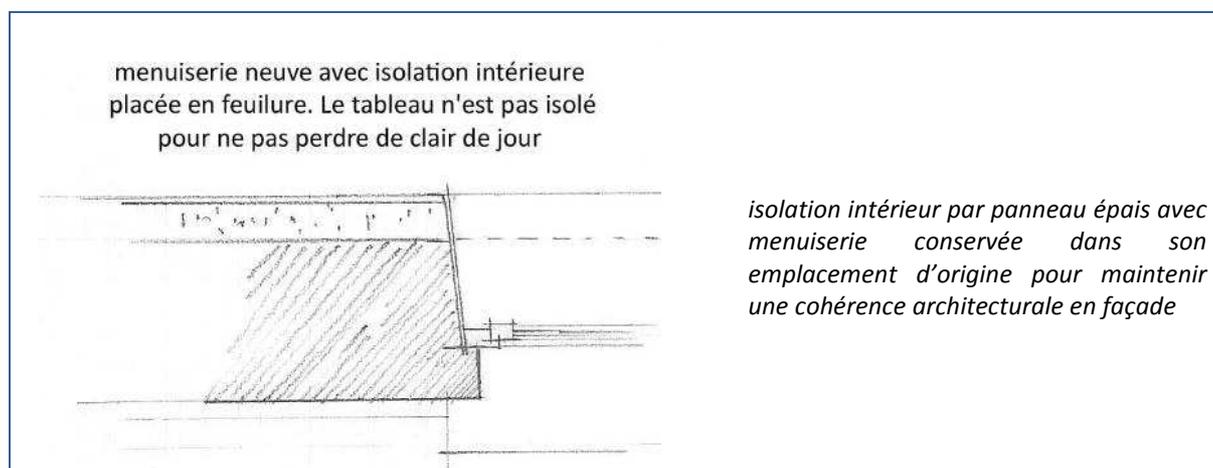
A partir du premier étage :

- **Isolant intérieur épais :**

Complexe plaques minérales (10 cm épaisseur) + enduit chaux, ou par panneaux épais semi rigides ou rigide laine de bois, + enduit de finition au plâtre.

Pour les appartements sans aucune ornementation sur murs périphériques

- Les risques de condensation à l'interface mur/isolant ne sont pas écartés sur les façades froides. Pour un isolant végétal il sera prévu une lame d'air entre la maçonnerie et l'isolant. La capillarité sera maintenue dans le cas de plaques minérales.
- L'épaisseur de l'isolant est prévue au maximum à 10 cm, pour des raisons de surface et d'efficacité, car le gain est réduit au dessus de cette épaisseur.
- Prescription particulière : ce dispositif est difficile à mettre en œuvre au droit des ouvertures (encadrements et appuis des baies). Il crée un rétrécissement des ouvertures à cause du retour d'isolation (environ -10% de la largeur pour une épaisseur de 5 cm de chaque côté.)
- Isolation des appuis des baies : permet de récupérer une surface horizontale tout en isolant correctement le mur. L'épaisseur de l'isolant peut être augmentée.



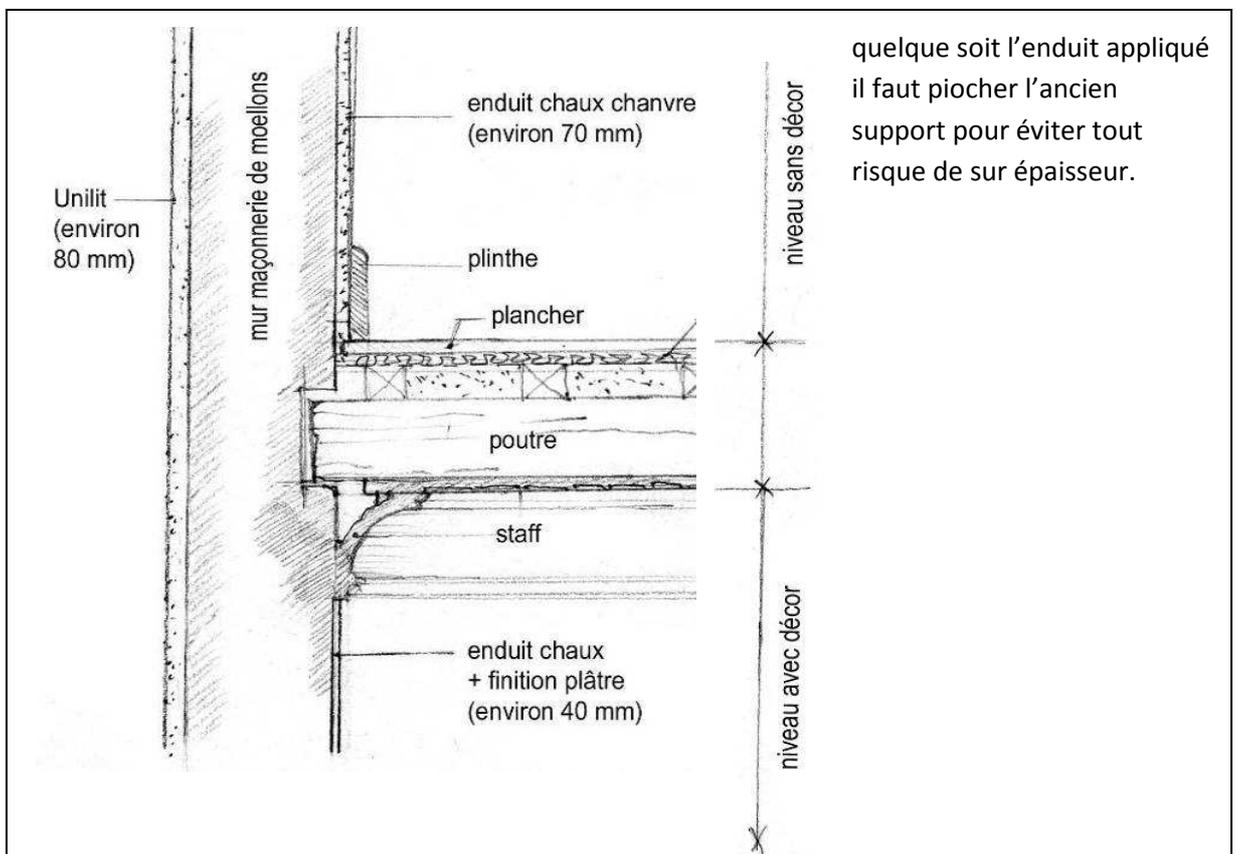
Sch 3

Cette technique est acceptable uniquement dans les appartements qui ne comportent aucune décoration intérieure : staff en plafond, lambris muraux, parquets :

 <p>Lambris bois</p>	<p>Dans ces trois cas l'isolation intérieure par panneau épais n'est pas possible</p>
 <p>staff</p>	 <p>parquet remarquable : le dessin des chevrons doit être maintenu apparent dans sa totalité</p>

- **Isolation par enduit: chaux-chanvre ou enduit à caractère isolant , épaisseur variable, entre 4 et 6cm d'épaisseur.**

En faible épaisseur, cette technique est compatible avec tous les intérieurs, à l'exception des pièces avec lambris. Elle ne peut être appliquée en sur épaisseur lorsqu'il y a des moulures en plafond ou des lambris, où la couche de finition doit être conservée à l'identique (au plâtre). Le traitement des encadrements des baies doit être traité avec soin.



Sch 4



•
*Mur en moellons de pierre avec
« correction du rayonnement froid »
par un enduit intérieur chaux chanvre
(épaisseur maximum pour les
immeubles concernés : 2 couches soit
6 cm ici 9cm)*

Document «Terre Vivante »

Coût de mise en œuvre (HT) 4/5 cm d'enduit = 70 à 90€/m ²
--

III. Isolation des planchers

Les planchers se distinguent entre plancher du rez de chaussée sur cave et plancher des niveaux supérieurs en bois.

1. Isolation des planchers sur caves

Les problèmes d'humidité devront être traités en priorité (voir § I)

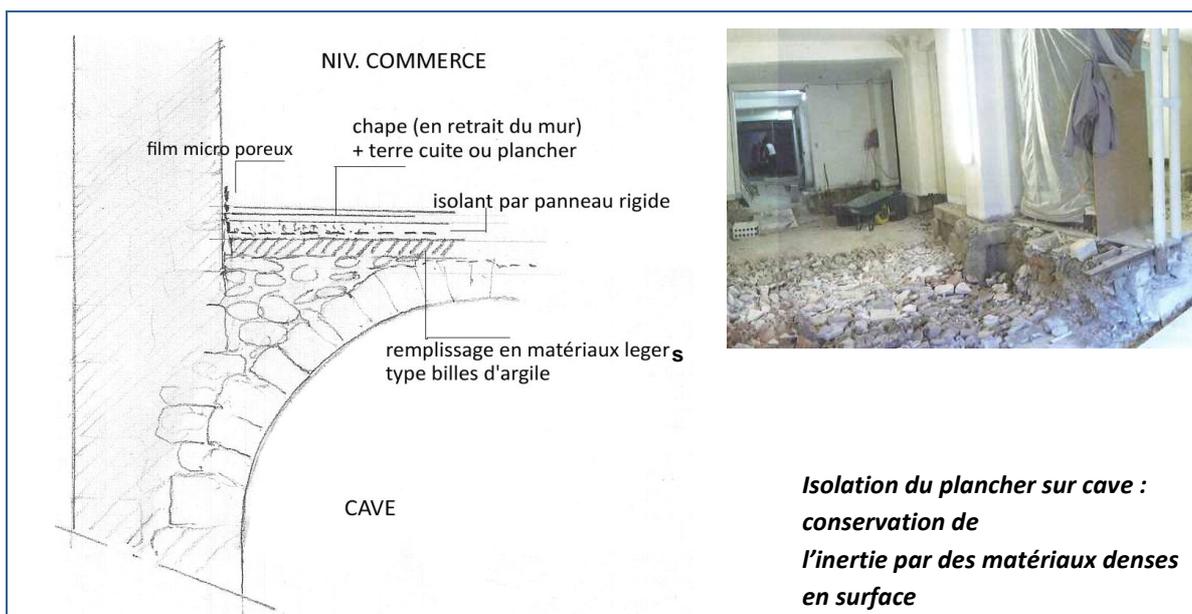
a. Avantages et contraintes :

Travaux nécessitant la dépose complète des sols.

Permet l'incorporation des réseaux et un chauffage par le sol à forte inertie.

b. Prescription de mise en œuvre

- L'isolation sera réalisée à l'aide de matériaux perméables, l'humidité restant dans les murs doit toujours pouvoir être évacuée par évaporation. S'il elle reste bloquée elle provoquera des désordres au droit des murs et des revêtements de sol.
- L'isolation est possible par le dessus. L'isolation en sous face (voute en pierre ou voutain brique) n'est pas conseillée pour des raisons techniques de mise en œuvre et de modification des volumes. Seul un enduit chaux-chanvre (moins performant qu'une isolation par le dessus), pourrait être préconisé.
- Après dépose des sols, conservation si le revêtement est intéressant tels que des carreaux de ciment, décapage des anciennes chapes et dalles béton, (attention, la dépose des charges peut provoquer des décompressions, elle sera réalisée suivant une méthode adaptée) puis réalisation d'une isolation en retrait des murs de périphérie pour éviter tout risque de blocage d'humidité dans les murs et d'absorption dans les plancher.
- Réalisation d'un dallage pouvant incorporer des réseaux et repose d'un revêtement. Il est conseillé d'adopter des terres cuites ou carrelages pour conserver l'inertie du sol.



Sch 5

Coût de mise en œuvre : ces travaux ne peuvent être estimés forfaitairement sans la connaissance précise des hauteurs disponibles et du type de revêtement de surface choisi.

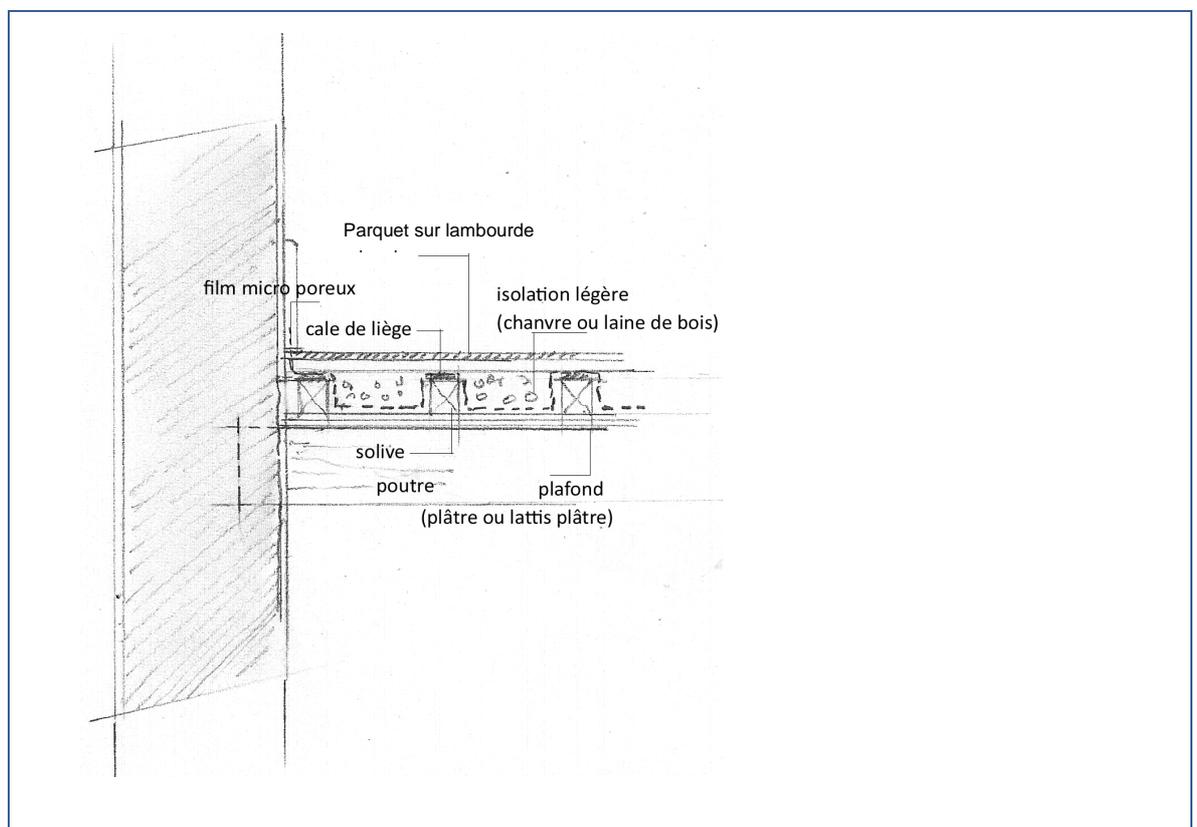
2. Isolation des planchers supérieurs en bois entre niveaux

a. **Avantage et contraintes :**

Les planchers sont perméables au bruit *et* à l'air. En cas d'une rénovation lourde, dépose repose du plancher, ou du parquet, il sera aisé de mettre en place une isolation légère, phonique et thermique, en bille d'argile ou vermiculite, chènevotte en granule, ou en plaque suivant son implantation.

b. **Prescription de mise en œuvre**

Les parquets en bois existants seront déposés avec soins pour être récupérés et reposés après travaux.



Sch 6

Coût de mise en œuvre (HT) = 60 à 70 €/m³ (hors dépose repose du plancher)

Gain = 10 kWh/m² de plancher/an sur local non chauffé ou à T° extérieure avec 3 cm d'isolant type chènevotte

IV. Isolation des combles

1. Combles non aménagés

Pour des combles non aménagés l'isolation sera réalisée au niveau du plancher. Les précautions particulières sont celles du matériau utilisé : laine minérale ou laine de bois, chenevotte.

Aucun immeuble ne dispose de combles non aménagés à l'exception de quelques m² rue Philis de la Charce. (Rappelons que l'espace tampon du grenier est le meilleur isolant été /hiver).

Coût de mise en œuvre (HT) = 20€/m ² pour 20 cm posé en laine de roche

2. Combles aménagés : Isolation par l'intérieur

a. Avantage et contraintes :

L'isolation sera réalisée en sous face. : il n'y aura pas de changement d'aspect de la toiture.

Pour des combles habités ou des communs : travaux ne nécessitant pas la réfection complète de la toiture. L'épaisseur de l'isolation abaisse le niveau des rampants et donc la surface habitable.

b. Prescription de mise en œuvre

Choix du matériau : laine minérale, panneau semi rigides ou rigide fibre de bois

Dans tous les cas il faudra conserver une lame d'air entre le matériau de toiture et l'isolant pour éviter les surchauffes et assurer le confort d'été

Coût de mise en œuvre (HT) = 42 à 60€/m ² non compris dépose repose doublage de finition

3. Combles aménagés : Isolation par l'extérieur:

a. Avantage et contraintes :

Travaux de rénovation lourde comprenant la dépose complète de la couverture, (à prendre en compte pour des surfaces habitées). Ces travaux sont à prévoir lors de réfection complète du toit. L'épaisseur de l'isolation est reportée au dessus de la charpente ce qui modifie le profil de la couverture et épaissit les rives et les égouts. Le projet sera adapté à chaque situation.

b. Prescription de mise en œuvre

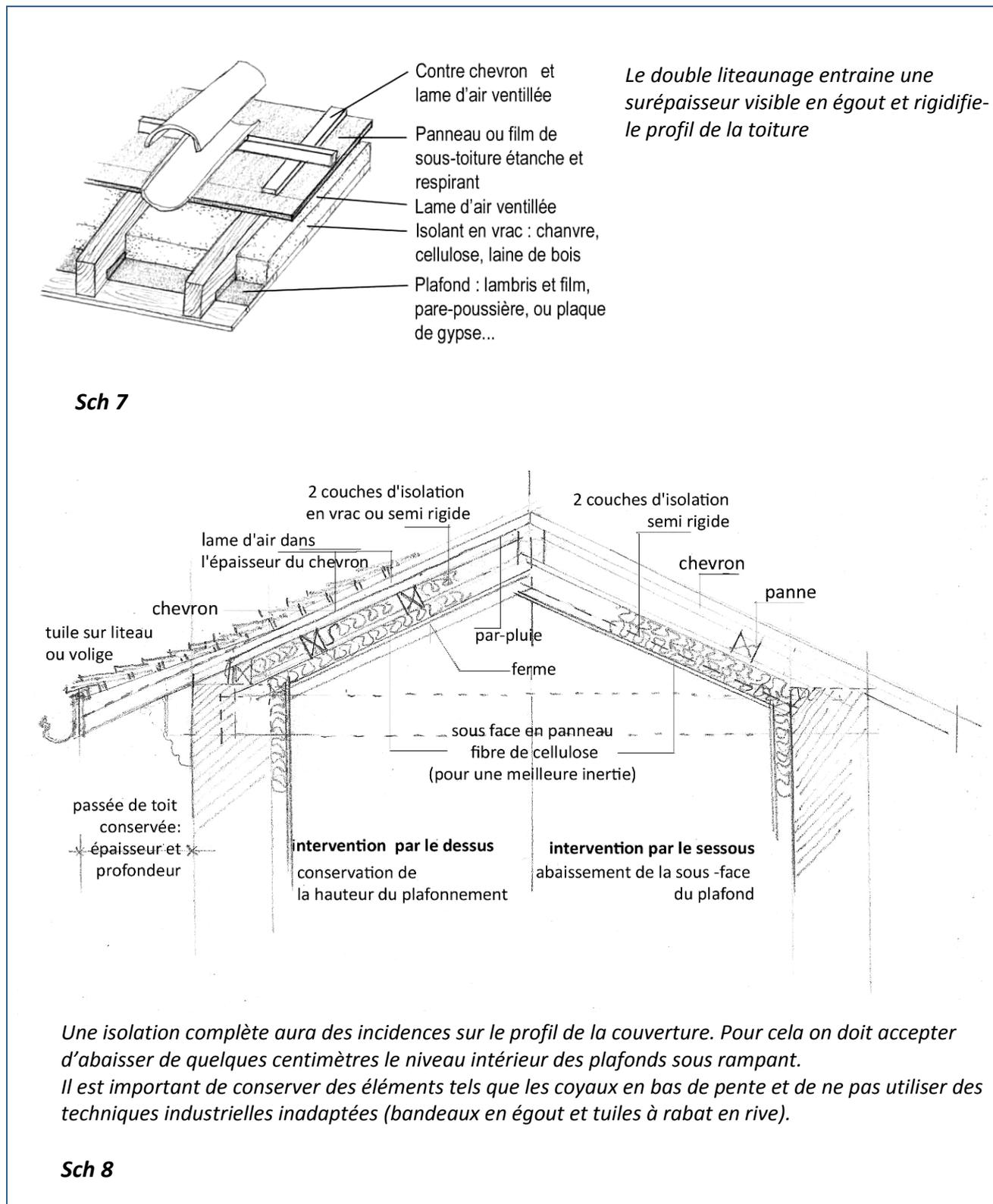
Une isolation par l'extérieur ne doit pas créer de sur épaisseur visible en rive ou en égout. Pour cela les maçonneries seront remontées selon la hauteur nécessaire pour faire dépasser uniquement l'épaisseur des chevrons de la passée de toit.

Les matériaux utilisés doivent être installés en respectant un espace ventilé entre l'isolant et le matériau de couverture.

Coût de mise en œuvre :

ces travaux ne peuvent être estimés forfaitairement sans la connaissance précise du type de toit : pente, charpente et matériaux de couverture.
--

Schéma pour une isolation par l'extérieur et par l'intérieur:



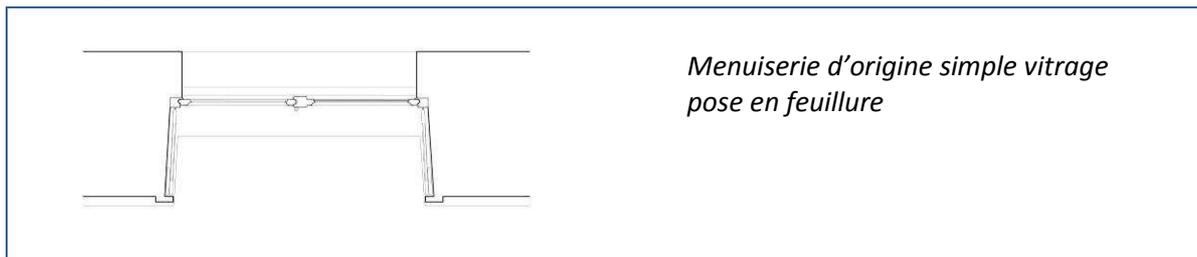
Gain : 50% sur la consommation si la toiture était totalement non-isolé (cas très rare)
 Gain : 12 à 15% sur la consommation pour une isolation de 30 cm au lieu de 10 cm d'isolant

V. Les menuiseries extérieures

Les menuiseries anciennes participent fortement au caractère architectural des façades étudiées. Pour cette raison on favorisera leur conservation ou leur remplacement en respectant le style de l'immeuble et en favorisant une unité de traitement.

Suivant les cas, l'amélioration des performances des menuiseries sera réalisée selon plusieurs critères: qualité du vitrage, qualité de la menuiserie, modénature de la façade, façade sur rue ou sur cour intérieure, fenêtre de toit.

Schéma fenêtre « standard »:



1. Remplacement des vitrages

a. **Avantage et contraintes :**

- Solution la moins chère : le cadre complet ainsi que les ouvrants sont maintenus.
- Les profils intéressants sont conservés.
- Les problèmes de perméabilité à l'air ne sont pas résolus.

b. **Prescription de mise en œuvre**

Techniquement l'ensemble de la menuiserie doit être en très bon état pour que l'ensemble menuiserie + vitrage soit performant et que les infiltrations d'air par les dormants ne soient pas trop importantes. Suivant l'épaisseur de la feuillure du dormant qui reçoit le double vitrage, il sera peut-être nécessaire de rapporter des pièces métalliques de support.

En centre ancien les menuiseries extérieures sont XIX^e, début XX^e. Elles participent au décor des façades. La restitution de petits bois (collés sur des grands vitrages) doit se faire en extérieur, en respectant les assemblages ce qui évitera de faire du mauvais pastiche. Il vaut encore mieux un seul grand vitrage que deux vitres qui ne correspondent à aucun schéma de façade.

Coût de mise en œuvre (HT) = à étudier au cas par cas car méthode réservée aux menuiseries qui ont un profil intéressant (XIX^e ou début XX^e)

En remplacement des doubles vitrages Il existe des vitrages à « haute performance isolante »

constitué de 2 plaques espacées de 2 mm, fixé par un mastic spécial, (dont l'Ug est d'environ 1,3).

U réelle et permanente = 2,5 à 2,8W/m².K

Ce vitrage est fortement conseillé en cas de conservation des fenêtres (cadre et ouvrant) en remplacement du double vitrage plus lourd:

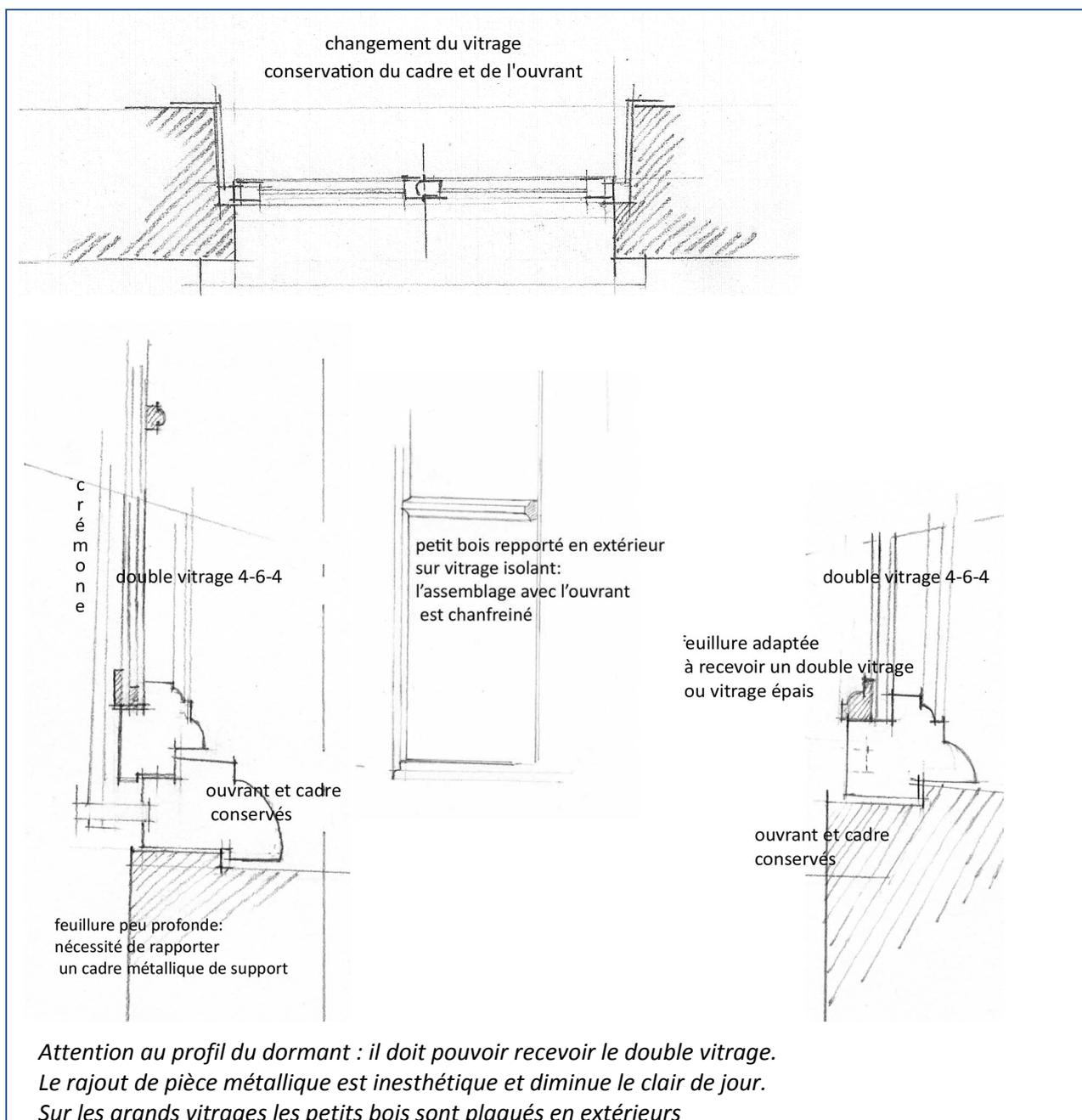
- Le verre très fin, est posé en bain de mastic (pas besoin de drainage) dans des feuillures peu profondes et permet des sections de bois aussi fin que l'original en cas de reconstruction. Pas de risque de condensation entre les deux vitrages
- Conservation des profils et des quincailleries

- Le verre à forte isolation est un vitrage fin, il a une durée de vie plus longue qu'un double vitrage (env.5-10ans).
- de bonne valeur acoustique 32-33dB (28-29dB pour un verre double standard).

Ce vitrage peu être proposé dans le cas des belles menuiseries conservées, avec une remise en jeu et un traitement des bois conservé (peinture), mais également sur des menuiseries anciennes à double vitrage non performant.

Coût de mise en œuvre (HT) =	environ 390€ par fenêtre (quai Mounier)
------------------------------	--

Schéma de remplacement du simple vitrage par du double vitrage.



Sch 9

2. Changement complet des menuiseries anciennes à simple ou double vitrage pose d'un ensemble cadre + ouvrant neuf :

Matériaux : bois résineux à peindre, les plus performants, ou chêne à peindre. Les bois exotiques sont + couteux et moins performants.

a. Avantage et contraintes :

- Solution couteuse
- Les ouvrants ne sont pas conservés, les profils sont plus épais provoquant une perte de clair de jour.
- Meilleure étanchéité à l'air.
- Nécessite des travaux de raccordement en peinture
- Cette solution permet d'obtenir des performances techniques élevées avec la pose d'un double vitrage phonique et/ou thermique ayant des caractéristiques élevées voir du triple vitrage sur les façades nord ou les façades sur cour.

	2,1 W/m ² /K	1,4 W/m ² /K
Gains sur la consommation annuelle de chauffage (%)	32	37

Mise en œuvre de vitrage $U_w=2,1$ W/m²/K et $U_w=1,4$ W/m²/K en remplacement de simple vitrage $U_w=5$ W/m²/K

Il a été noté que les infiltrations principales sont visibles entre le cadre et l'ouvrant, même sur des menuiseries récentes dont le vitrage est trop lourd par rapport au cadre conservé. Il est nécessaire de prévoir des bandes isolantes pour palier ces ventilations dans ces zones sensibles.

b. Prescription de mise en œuvre

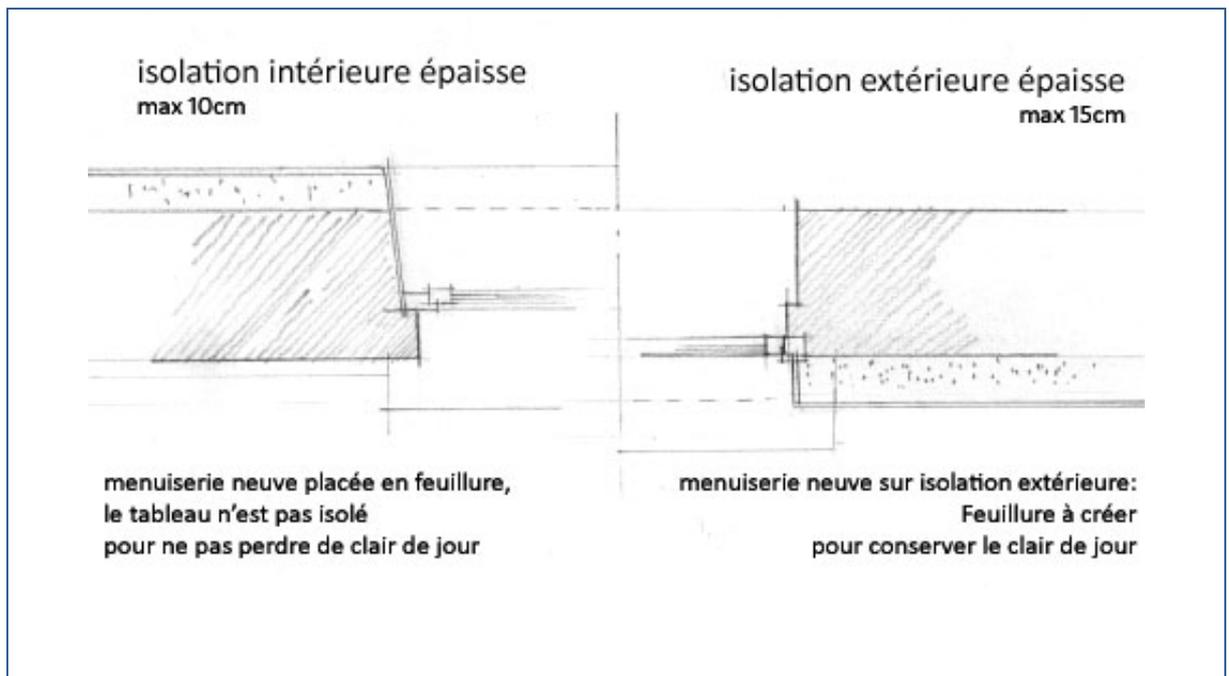
Dans ce cas le cadre doit être remplacé pour éviter les zones sources d'infiltration (dépose des anciens dormants).

Il faudra respecter les modèles stylistiques de l'immeuble et éviter les menuiseries prêtes à poser, inadaptées à la feuillure ou au profil de la baie.

Les grands vitrages, plus efficaces et plus économes que les petits vitrages, peuvent être recoupés par des petits bois avec chanfrein, collés en extérieur. Il existe de bons exemples qui restent dans des prix tout à fait honnête.

Le cadre doit être placé dans la feuillure afin de conserver la surface de clair de jour.

Architecturalement il est important de se placer en feuillure et de rechercher une finesse dans les nouveaux profils afin de ne pas diminuer le clair de jour et éviter la diminution des surfaces vitrées en façade.



Sch 10

Cette technique est plus chère que la 1^{ère} solution

Coût de mise en œuvre (HT) $U_w=1,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$

1200€ pour un vitrage $h \times L = 1 \times 2 \text{ m}$ à 1500€ pour une porte fenêtre

3. Conservation des menuiseries d'origine simple vitrage pose d'une double fenêtre coté intérieur du logement:

a. Avantage et contraintes :

- Solution couteuse
- Cette dernière solution permet de conserver l'état d'origine de la façade avec ses menuiseries anciennes.
- Perte de clair de jour
- Thermiquement, cette solution est équivalente à la précédente car elle permet d'avoir un vitrage performant coté intérieur. Cela peut aussi avoir un effet sur l'émission car il y a parfois des radiateurs sous les menuiseries et cela permet d'améliorer le rendement des émetteurs.

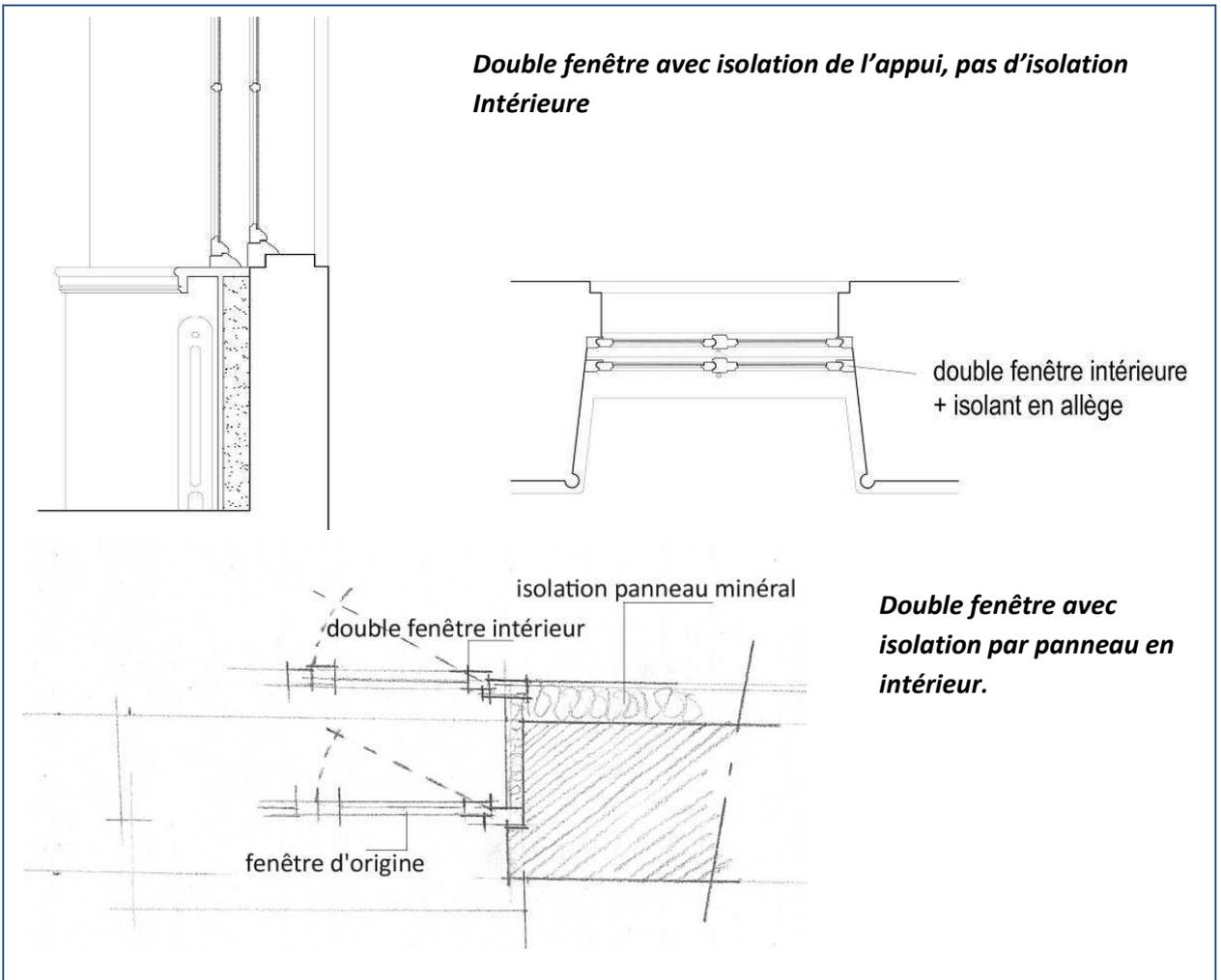
b. Prescription de mise en œuvre

Les quelques menuiseries simple vitrage qui subsistent doivent être conservées dans leur ensemble : bois+ serrurerie.

Techniquement cette solution est possible grâce à l'épaisseur des murs. La difficulté sera de coordonner les deux menuiseries entre elles et de ne pas diminuer le clair de jour.

La mise en œuvre dépendra de la présence d'un doublage intérieur ou non et s'il s'agit d'une fenêtre ou d'une porte fenêtre.

Coût de mise en œuvre (HT) $U_w=1,4 \text{ W/m}^2/\text{K} =$ 1500€ (1200€ sv) pour un vitrage 1 x 2 m et 1700€ pour une porte fenêtre



Sch 11

Exemples de double fenêtre placée.



VI. Occultation et protection

Les occultations diminuent les déperditions des menuiseries et améliorent le confort d'été lorsqu'elles sont posées en extérieur.

- **Les stores à lame extérieures inclinables (store dauphinois)**

Un système qui perdure sur la majorité des façades du centre ancien. Les stores existants et leurs lambrequins doivent être conservés et servir de modèle pour l'ensemble des fenêtres de la façade.

Des systèmes contemporains de stores à lames horizontales plus perfectionnés et électrifiés peuvent remplacer les anciens stores en bois et ficelle à condition que le lambrequin soit conservé.

Ces stores sont encore présents au 97 rue Saint Laurent et au 1 Place Saint André.

- **Les volets persiennés :**

Les volets métalliques sont repliables. Sur ces immeubles ils n'étaient pas prévus, (leur apparition est plus tardive), et ont été rajoutés récemment. (XX°).

Les volets persiennés en bois se rabattent en façade et participent à la composition générale de celle-ci. Leur disparition appauvrit la façade. Ils nécessitent la présence d'une feuillure pour leur assurer une bonne fermeture.

Ces deux types de volet améliorent le confort d'été.

- **Volet roulant :**

L'installation de coffre en applique extérieure est interdite. Elle sera admise en rez de chaussée pour des raisons de sécurité, le coffret sera caché par un lambrequin et les rails seront placés en retrait du nu extérieur de la façade.



Sch 12

Schéma d'occultations traditionnelles à conserver

Coût de mise en œuvre (HT) stores à lame environ = 370€ (selon dimension)



Quai Mounier



Lambrequins et sores à lames bois : immeuble rue Saint Laurent



Store extérieur en toile (occultation peu performante)



Persiennes métalliques et volets persiennés bois rue Philis de la Charce

Occultations traditionnelles, plus ou moins efficaces

Store à lame aluminium teinté avec lambrequin



Grenoble



Lyon

Store bâche avec lambrequin



Grenoble

Occultation contemporaines selon des modèles traditionnels

VII. La fermeture des parties communes

La fermeture des parties communes est l'une des solutions pour réduire les déperditions des espaces donnant sur les parties communes. 2 types d'interventions sont possibles :

- Fermeture des espaces communs par des vitrages comme c'est déjà le cas rue Philis de la Charce et place St André (cage d'escaliers)
- Fermeture de la cour entière par un toit vitré. Ce type d'intervention a été réalisé rue du temple à Grenoble, dans le périmètre de la ZPPAUP.



Dans le 2 cas, cela peut être intéressant quand l'immeuble n'a pas de contraintes architecturales. Dans les cas étudiés, seul l'immeuble rue St Laurent à une possibilité de fermeture des parties communes mais la cour possède des éléments architecturaux remarquables et la fermeture des espaces communs n'est pas recommandée, sauf accès au 5^{ème} étage. On pourrait par contre prévoir la fermeture de la cour commune au 97 et 95 rue St Laurent.



1. Fermeture des espaces communs par des fenêtres (montée d'escaliers)

• Avantages et inconvénients

Le principal avantage de cette mesure est de réduire significativement la température des communs et donc de réduire les déperditions de locaux chauffés vers ces locaux en créant un espace tampon. Le gain estimé est de X kWh/an/m² soit une réduction de X% des consommations. La réduction des consommations annuelles n'est pas très grande car il y a peu de surface vers les locaux non chauffés (essentiellement porte d'entrée) et donc les investissements consentis sont difficilement rentables pour les copropriétés.

L'inconvénient est la réduction du jour et de la lumière naturelle sur les cages d'escaliers. Cela demande aussi un entretien intérieur plus grand.

Ce type d'intervention est réalisé rue Philis de la Charce. Architecturalement les immeubles de Rue Saint Laurent et de la place St André ne se prêtent pas à ce type de solution.

• Mise en œuvre

Il faut que la réalisation soit soignée car au 6 rue Philis de la Charce les espaces communs sont fermés mais la toiture est dégradée ce qui crée des courants d'air importants en hiver et réduit l'effet de la fermeture. Réglementairement il faut intégrer les contraintes des normes de sécurité incendie : désenfumage (par installation d'un châssis manuel de 1 m² en partie haute), qualité des vitrages. La lumière naturelle étant réduite les surfaces vitrées seront prévues au maximum des possibilités des ouvertures.

Le coût de cette solution ne peut être chiffré forfaitairement
--

2. Fermeture des espaces communs par création d'une verrière

a. Avantages et inconvénients

L'avantage de cette solution est d'offrir à un volume plus grand un apport solaire important en hiver et de réduire considérablement les déperditions des zones donnant sur la cour en créant un espace tampon. Cela permet aussi de garder les détails architecturaux des façades et des ouvertures. Cette espace peut devenir un jardin d'hiver et augmenter le confort de l'immeuble

L'inconvénient est qu'en période estivale une surchauffe de cette zone est possible et qu'il faut impérativement prévoir des ouvertures afin de déstocker l'énergie accumulée par l'air, par effet de thermosiphon.

Comme dans le cas précédent, les vitrages doivent laisser passer le jour. Un système de protection intérieur type store électrique horizontaux pourra être mis en place pour réduire les apports solaires estivaux.

Ce type d'intervention est réalisable facilement pour l'immeuble du 1 place Saint André.

Le coût de cette solution ne peut être chiffré forfaitairement.

VIII. Remplacement des systèmes de chauffage – chauffage au gaz

Le remplacement des moyens de production est une mesure de grande efficacité dans la cadre de la rénovation énergétique des bâtiments anciens. Cette mesure permet d'avoir un gain quasi proportionnel avec l'amélioration du rendement du mode de production. En effet, la phase relevée a montré que le parc des chaudières gaz est souvent ancien avec des chaudières qui ont au moins 15 à 20 ans en moyenne avec peu ou pas de régulation. La mise en place d'une chaudière à condensation avec rendement élevé (jusqu'à 107% sur PCI) au lieu de 82% sur PCI voir moins permet un gain important. Cela permettra aussi de mettre une sonde d'ambiance et une sonde extérieure pour avoir une régulation plus efficace et une remontée en température plus efficace quand il y a un réchauffement. Le principe des chaudières à condensation est qu'elles permettent de récupérer une partie de la chaleur latente des fumées de combustion et donc d'avoir un préchauffage en amont de la chaudière ce qui augmente le rendement. Cela permet notamment en début de saison, fin de saison ou des jours avec beaucoup d'apport solaire d'avoir une récupération optimale de l'énergie et donc une dépense moindre en gaz.

Les contraintes techniques sont faibles : il s'agit de remplacer la chaudière existante par une chaudière murale à la même place. La mise en place d'une ventouse permet aussi de s'affranchir de la prise d'air dans la pièce où est la chaudière – **les ventouses coté rue sont interdites**. Dans le cas des chaudières au sol pour les grandes puissances, les nouvelles technologies de chaudière permettront aussi l'installation d'une chaudière murale car on peut avoir des chaudières de 36 KW murale en condensation.

	Chauffage individuel
Rendement chaudière	1.07
Emetteurs	0.97
Réseau	0.95
Régulation	0.97
Global	0.95
Gains sur la consommation annuelle de chauffage (%) (rendement = 0,8)	18%



Cette mesure de remplacement de chaudière doit nécessairement être couplée à une mesure sur les émetteurs à savoir : le remplacement des têtes manuelles par des têtes thermostatiques ayant un temps de réponse court pour que la prise en compte des apports solaires soit la plus rapide possible.



Coût de remplacement d'une chaudière y compris main d'œuvre et ventouse : 3500 à 5000€
Coût de remplacement des émetteurs y compris tête thermostatique : 500€ / radiateur
Coût d'un réseau hydraulique (cuivre, vannes, accessoires) : 3500€

Si cette mesure de remplacement est également accompagnée de mesure supplémentaires comme l'ajout d'enduit extérieur, le remplacement de menuiseries ou la mise en place d'une isolation intérieure, il faudra envisager un équilibrage du réseau afin d'avoir un maximum de bénéfice sur l'installation car la puissance des émetteurs en place sera trop importante par rapport aux besoins réels même si le régime d'eau change pour avoir moins de puissance dissipée. Au passage cela permet aussi d'avoir un rendement moyen annuel plus élevé car la technique de la condensation sera plus efficace.

Préconisation de mise en œuvre

- Remplacement de chaudière ancienne par une chaudière à condensation récente avec régulation sur sonde d'ambiance et sonde extérieure
- Mise en place de tête thermostatique sur les émetteurs
- Mise en place de la programmation adaptée à partir de la nouvelle chaudière

Ces trois mesures aboutissent généralement à un gain qui sera au moins de l'ordre de 20% de réduction des consommations annuelles de chauffage. Cela permettra d'avoir un confort plus grand.

La sortie de la ventouse fera l'objet d'une demande préalable auprès de la copropriété, et d'une déclaration de travaux. Aucune sortie de ventouse ne sera acceptée en façade principale. Sa position sera réfléchiée en fonction de réelles possibilités techniques et esthétiques, et non selon l'avis unique de l'installateur.

Il est également possible de garder les chaudières anciennes et d'adapter un système à radiofréquence mais le gain sera moindre car les chaudières en place ont des rendements assez dégradés et un rendement de chaudière à condensation permettra un gain plus important.

VI. Chauffage électrique

Les émetteurs type convecteur électrique installé dans la plus part des logements visités sont anciens et leurs performances sont parfois très dégradées. Ils fonctionnent essentiellement en mode convectif c.-à-d. qu'ils chauffent l'air de la pièce.

Il existe aujourd'hui des radiateurs électriques qui fonctionnent sur des modes différents comme les radiateurs à panneaux rayonnants ou à fluide caloporteur.

Pour rappel, la température de confort (dite aussi température opérative est celle ressentie par l'occupant) est une moyenne entre la température des parois intérieures du bâtiment et celle de l'air intérieur (recueillie par le thermostat). Chaque degré épargné sur la saison de chauffe entraîne une diminution de 8 % (minimum) de la facture chauffage du bâtiment. Un transfert en mode radiatif plutôt qu'en mode convectif permet d'avoir une température d'air demandée moins importante qu'en mode convectif ce qui permet de réduire la température de consigne.

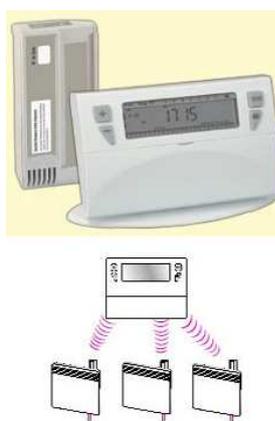
Recommandations

Les installations de chauffage électrique peuvent être modifiées ainsi :

- Installation de radiateurs rayonnants ou à chaleur douce (Noirot par exemple)



- Installation d'une régulation par fil pilote, radio fréquence ou courant porteur. La radio fréquence sera facile à installer en rénovation car il n'y a pas d'alimentation à tirer dans l'appartement. Ce genre de programmateur peut aussi gérer jusqu'à 3 zones différentes ce qui peut permettre d'avoir des scénarios différents en fonction des orientations des appartements.



Estimation du coût : 2500 à 3500€ pour 4 radiateurs

Gain : suivant utilisation 5 à 10%

VII. Amélioration de la ventilation

La ventilation est l'un des points clefs dans la rénovation des bâtiments anciens.

Pour mémoire, aujourd'hui il n'y a pas ou très peu d'installation VMC mécanique dans les immeubles visités et la ventilation des appartements est assurée par les infiltrations au niveau des murs et des menuiseries. Si des mesures d'amélioration comme le remplacement des menuiseries ou la mise en place d'une isolation sont réalisées, il faudra prévoir la mise en place d'une VMC mécanique ou naturelle hybride. Dans de nombreuses réhabilitations thermiques d'enveloppes, la qualité du renouvellement d'air est négligé ce qui conduit à la dégradation de la qualité d'air intérieur mais aussi à des désordres pour le bâtiment.

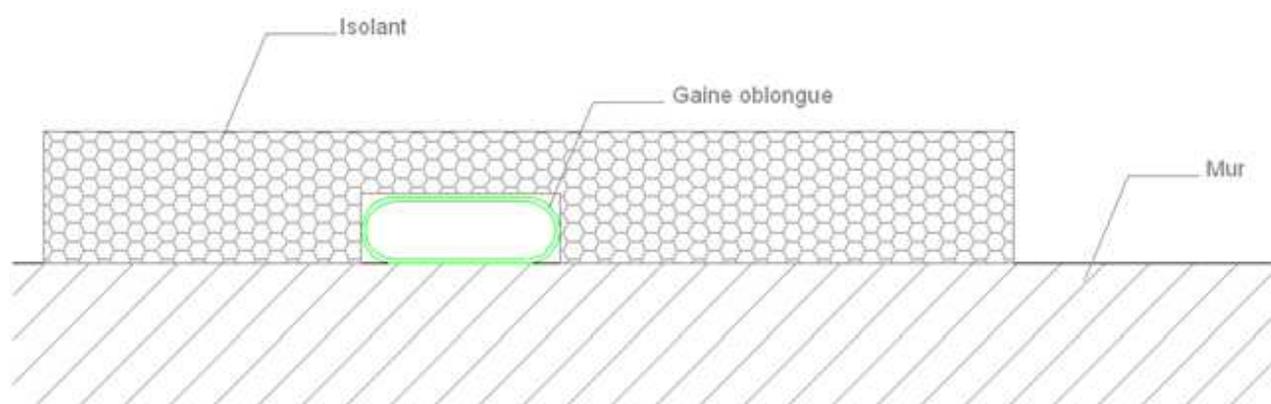
Il faut noter que les risques liés à l'humidité sont à lier très fortement au type de ventilation de la zone. En effet, une des raisons fréquentes de dommages liés à l'humidité est lorsque l'humidité intérieure n'est pas évacuée. L'homme par son métabolisme produit de la vapeur d'eau, mais aussi les machines qu'il utilise, ou les éléments de distribution d'eau dans les cuisines, et les salles d'eau particulièrement. Il peut donc y avoir de fortes teneurs en eau dans l'air, et s'il n'y a pas évacuation par ventilation, le mur se met à l'équilibre avec la teneur d'eau ambiante. Il peut ainsi y avoir avec de grandes quantités présentes sur la surface intérieure du mur menant à des dégradations. Assurer une bonne ventilation est donc primordiale.

D'autre part la maîtrise des débits par la mise en place de système spécifique peut permettre de réduire les besoins de chauffage tout en améliorant la qualité de l'air.

L'ADEME estime que l'on peut gagner d'un facteur 2 à 10 sur les déperditions par renouvellement d'air sur un immeuble qui n'avait pas de ventilation spécifique et dont le renouvellement d'air était assuré par les infiltrations et ouverture des ouvrants.

Mise en œuvre d'une ventilation double flux

La mise en place d'une ventilation double flux à récupération de chaleur paraît plus difficile à mettre en place car il y a deux fois plus de réseau à installer : soufflage et reprise. Cela va nécessiter l'installation de soffite dans les logements ce qui peut altérer les qualités architecturales des plafonds et nécessiter la mise en place de faux plafond.



Mise en œuvre d'une ventilation simple flux

Une étude complète sera nécessaire au préalable pour ce type d'installation. Il sera possible d'utiliser les conduits maçonnés existants mais il faudra vérifier la perméabilité de ceux-ci pour s'assurer que le taux de fuite n'est pas supérieur à 15%. Il faudra aussi s'assurer que les chaudières en place sont compatibles avec le système VMC : compatibilité assurée avec chaudière étanche type ventouse. Il faudra prévoir un local technique commun où mettre l'extracteur et veiller à respecter la réglementation en vigueur (alimentation extracteur commun câble CR1, etc...).

Les conduits de reprise pourront être posés dans les communs (rue Philis de la Charce par exemple) ou en façade coté cour si une isolation extérieure est réalisée avec un réseau de gaine oblongue sous isolation.

Il sera préféré une ventilation hygroréglable à une ventilation simple flux autoréglable et les débits respecteront les exigences en matière de réglementation.

Il sera parfois nécessaire d'avoir des soffites ou des faux plafonds.

Dans tous les cas il est préférable d'installer une ventilation double flux à une ventilation simple flux car la ventilation simple flux n'apporte aucun gain thermique.

Ventilation par ouverture naturelle

L'ouverture des fenêtres peut participer de manière active à la ventilation du logement. Il faut juste concilier cette pratique avec les conditions climatiques. En hiver il faut penser à couper le chauffage de la pièce. Le temps d'aération de 5 minutes suffit. Pour les pièces de services il faut ventiler avant ou après une activité. **Le tout est de ventiler en fonction de l'excès d'humidité de la pièce et des activités pratiquées.**

Entrée d'air

Dans tous les cas il sera porté une attention particulière au traitement des entrées d'air en cas de remplacement de vitrage ou de mise en place d'une ventilation simple flux (peu conseillé).

Dans le cas du remplacement des vitrages sans travaux sur la ventilation : il ne sera pas conseillé d'installer des entrées d'air car il y a encore d'importantes infiltrations naturelles et ces entrées amènent un courant d'air froid qui peut être désagréable.

Dans le cas de travaux d'isolation suivi de travaux de changement des vitrages : des entrées d'air pourront être installées en ventilation simple flux mais pas en ventilation double flux.

Pour les travaux liés au chauffage : il faut maintenir une aération basse et haute avec les chaudières anciennes. Seules les chaudières à ventouse fonctionnent en circuit étanche sans entrées d'air.

VIII. Utilisation des énergies renouvelables pour la production d'ECS

L'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude sanitaire est la première possibilité envisageable pour diminuer les consommations énergétiques des immeubles. Cette possibilité permet de réduire de manière réelle les consommations en énergie. Le principe est simple : on utilise un fluide caloporteur qui est exposé au soleil à travers des capteurs pour réchauffer ce fluide caloporteur et celui-ci est dirigé vers un réservoir bien isolé où l'énergie est restituée à l'eau du réservoir. Celle-ci est alors utilisée pour l'eau chaude sanitaire.

Application à la rénovation

L'utilisation des panneaux solaires pour la production d'eau chaude sanitaire nécessite d'avoir des installations qui prennent en compte les différents aspects suivants afin d'être mise en œuvre :

- L'immeuble doit disposer d'un petit local (3 à 4 m²) pour la mise en place de la régulation ou d'un local plus grand si il y a un stockage primaire
- L'immeuble doit disposer d'une cage d'escalier dans laquelle on peut faire une colonne de distribution depuis la régulation ou le stockage primaire ou disposer d'une colonne technique à l'intérieur des logements
- Les panneaux en toiture ne doivent pas être visibles depuis l'espace public. Ils doivent être intégrés dans l'épaisseur de celle-ci.

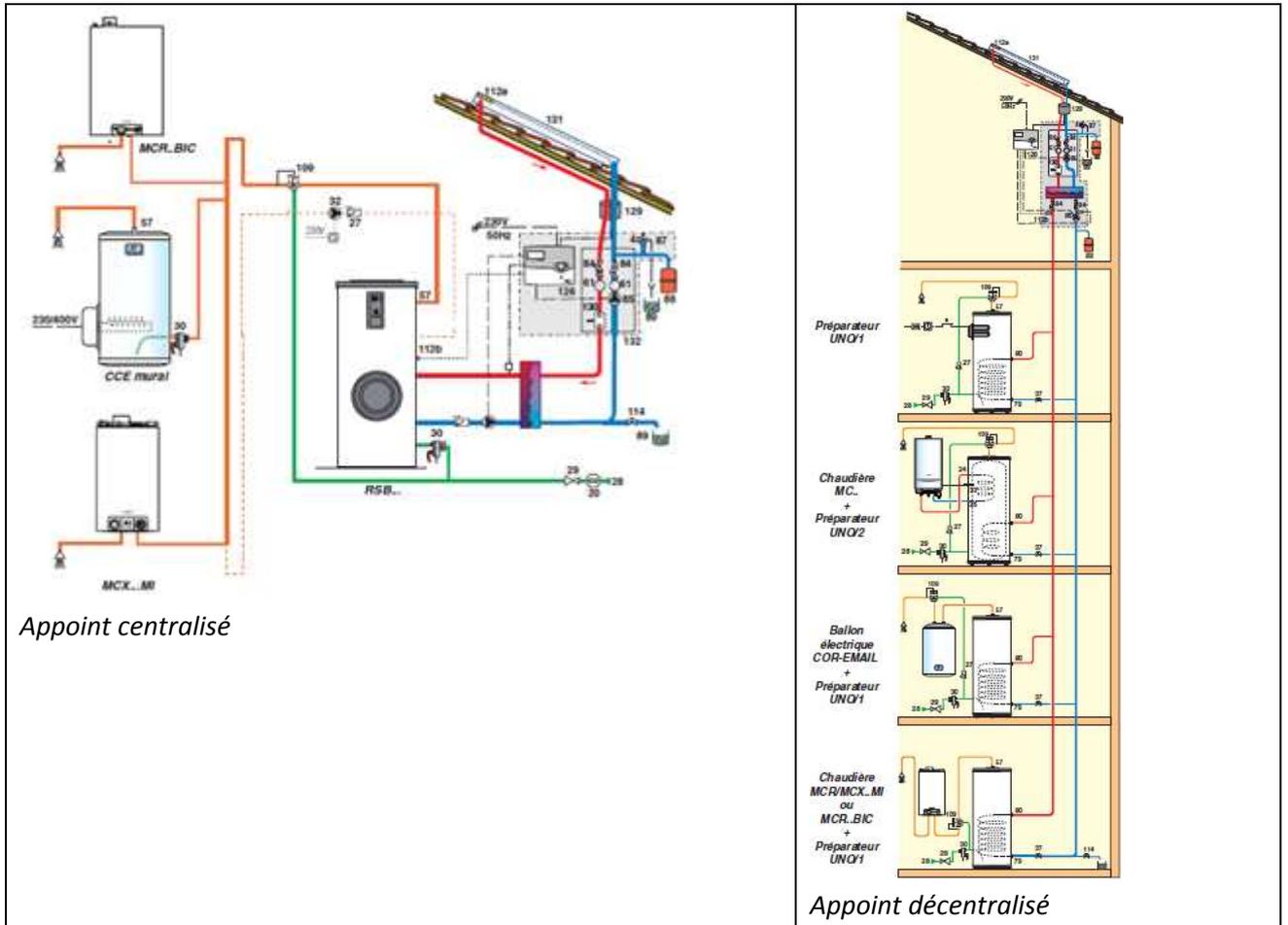
L'installation sera mixte avec des ballons électro-solaires pour remplacer les ballons d'eau chaude électriques et des ballons d'eau chaude à échangeur en amont des chaudières pour les logements avec chaudière

La description complète d'une installation de ce type n'est pas possible en l'état car chaque cas est un cas particulier. Cependant on peut dégager des schémas de principe de ce que pourra être une installation type en rénovation :

- Avec appoint décentralisé
- Avec appoint centralisé

Les fabricants possibles pour ce genre de travaux sont : Sonnenkraft, De Dietrich, Viessmann, etc...

Schéma



Coût d'installation et gain énergétique

Le taux de couverture pour ce type d'installation sur la région de Grenoble tourne autour de 50% suivant les cas et les applications. Concrètement cela permettra de diminuer par 2 les consommations d'énergie pour les besoins ECS. Pour rappel, les besoins ECS sont donnés par :

$BECS \text{ (kWh/an)} = \text{Besoin annuel (litres/an)} \times \text{Ecart de température} \times \text{Capacité calorifique eau}$

Dans le cas des immeubles étudiés, les besoins et consommations ECS suivants ont été estimés :

Nombre d'occupants	Besoins eau chaude (litres/jour)	Besoins eau chaude été (litres/jour)	ECS électrique kWh EF	ECS gaz kWh EF
1	40	20	955	656
2	80	40	1545	1311
3	120	60	2135	1967
4	160	80	2725	2623

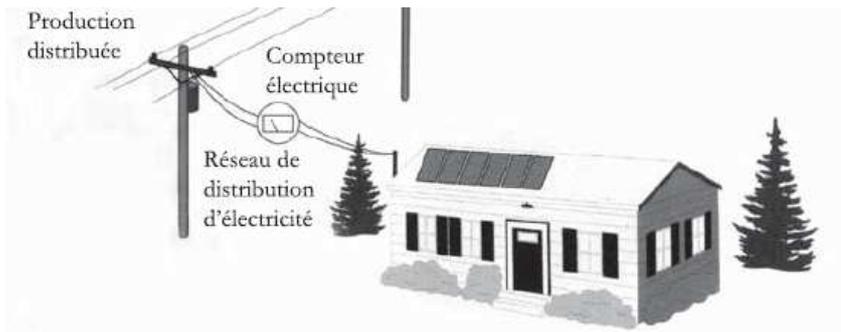
Dans le cas d'un immeuble de 8 appartements (occupés par 2 personnes) avec 4 appartements chauffés au gaz et 4 appartements chauffés électriquement, le gain sur la production d'eau chaude sanitaire serait de l'ordre de 5700 kWh/an soit 714 kWh/an en moyenne par appartement.

Coût de mise en œuvre (HT) = 2850€ / appartement Coût annuel avant amélioration = 142€ en électricité et 100€ en gaz Gain annuel (TTC/an) = 71€ en électricité et 50€ en gaz Coût entretien = entre 100 et 200€ / an pour la copropriété

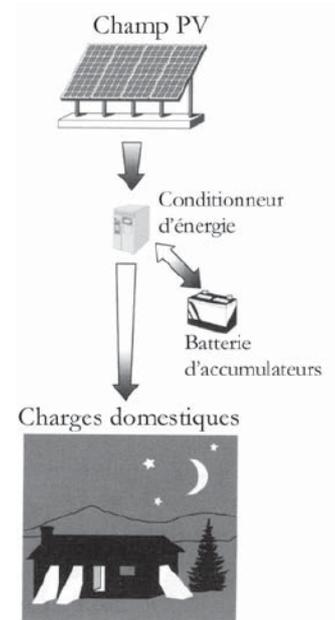
IX. Utilisation des énergies renouvelables pour la production d'électricité

La mise en place de panneaux photovoltaïques est l'une des autres possibilités d'utilisation de l'énergie solaire pour diminuer la consommation énergétique des copropriétés. Cette diminution n'est pas une diminution réelle de la consommation énergétique mais plutôt une compensation par production d'électricité à partir de panneaux qui permet de diminuer le bilan global énergétique. Il y a plusieurs types d'installations en photovoltaïque :

- Application en réseau ce qui signifie que l'électricité produite est réintroduite sur le réseau existant



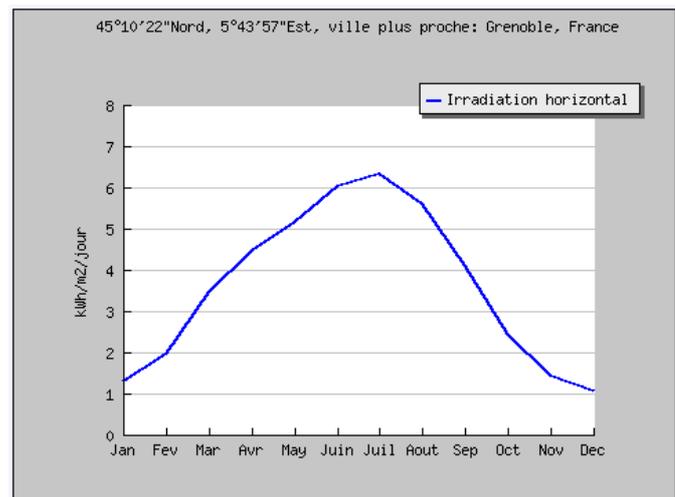
Application hors réseau ce qui veut dire que l'énergie est utilisée directement sur place. Cette configuration est peu répandue et se trouve plutôt adaptée pour les sites isolés.



On ne regardera ici que l'utilisation des panneaux photovoltaïques en réseau afin de bénéficier du tarif de rachat d'EDF de l'électricité produite qui est la seule application « rentable » pour une copropriété.

Données météorologiques à Grenoble

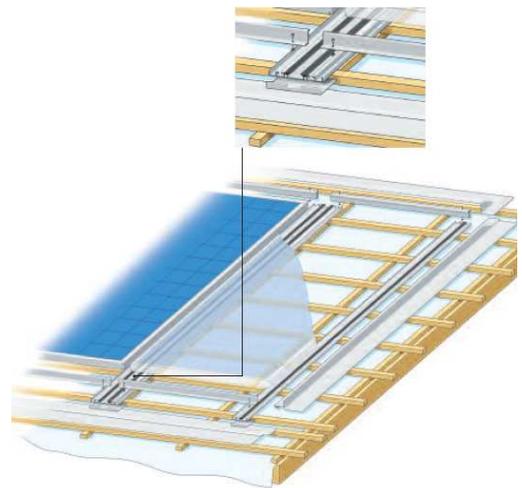
L'irradiation ou rayonnement est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en $J\ m^2$ (joule par mètre carré). D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré) bien que ce dernier ne doit pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI).



Implantation des modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques seront implantés en toiture et seront obligatoirement intégrés à la toiture.

Ils ne doivent pas être visibles depuis l'espace public ou être intégrés à la composition architecturale du versant sur lequel ils sont installés. Leur surface est limitée proportionnellement à celle de la toiture.



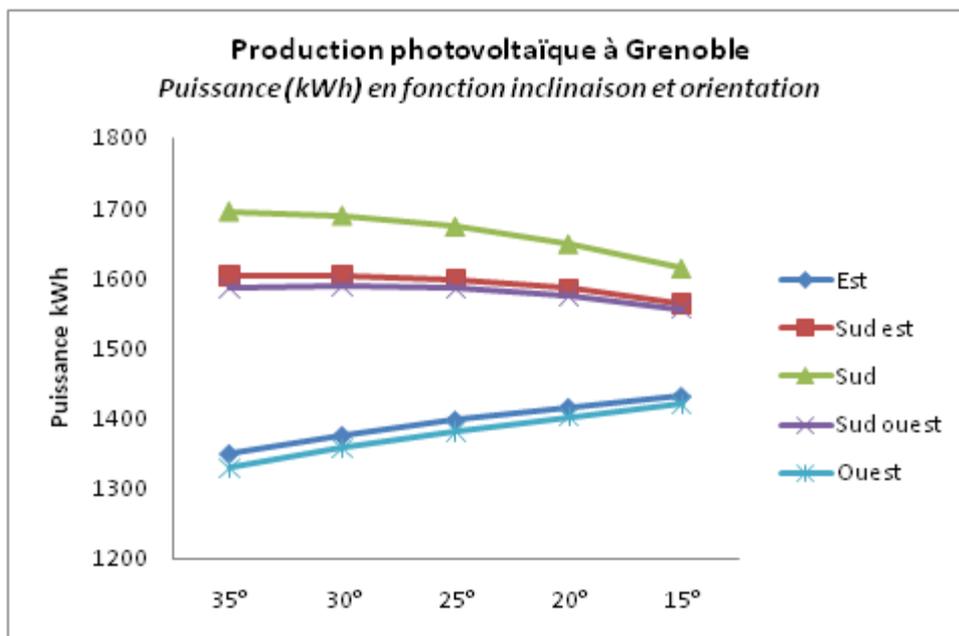
Scénario de production d'électricité

Le scénario suivant est utilisé pour les calculs de production d'électricité :

- 8 panneaux solaires de marque Schüco de type SP-4 de type polycristallin
- Dimensions des panneaux 1658 x 834 x 46 mm soit 11 m²

Le dimensionnement est réalisé à partir de l'application PVGIS disponible à l'adresse suivante : (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/pvest.php?lang=fr&map=europe>)

Etude paramétrique en fonction de l'orientation et de l'inclinaison



Les enseignements que l'on peut retirer du graphique précédent :

- c'est que la pose de panneaux solaires sur des orientations est ou ouest est très défavorable : perte qui va de 12 à 22% par rapport à l'orientation optimale plein sud.

Par contre les orientations sud-est et sud-ouest ne sont pas si défavorables que ça avec uniquement 5 à 6% de perte par rapport à une orientation sud.

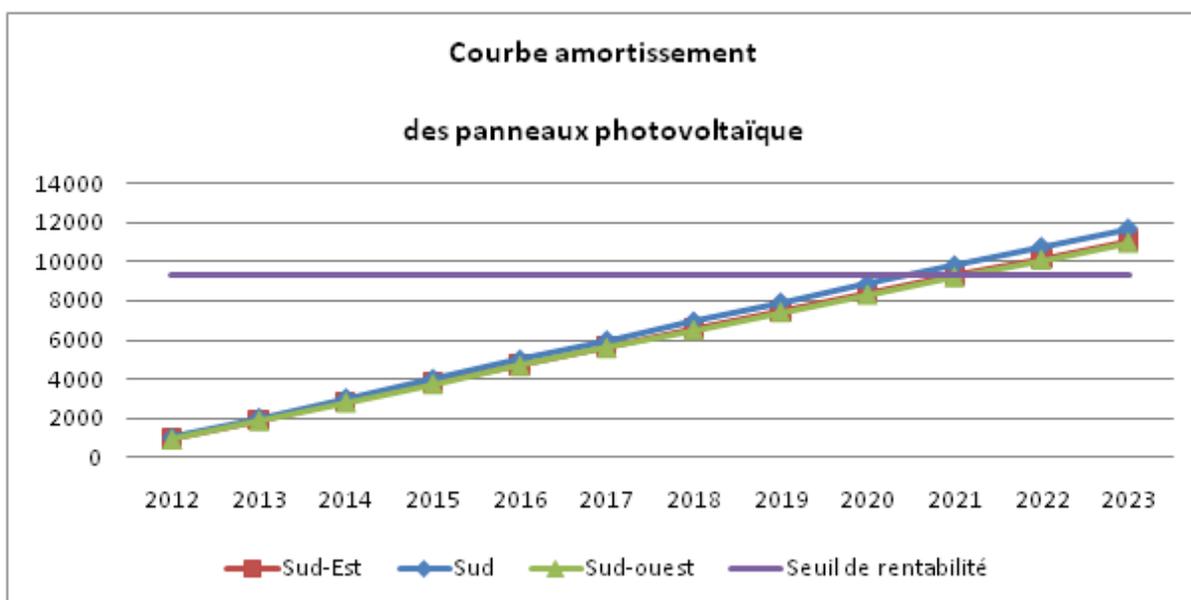
Gain énergétique

11 m² de panneaux photovoltaïque permettent en moyenne de produire 1600 kWh/an

Analyse de la rentabilité

Les hypothèses suivantes ont été utilisées pour les calculs du temps de retour sur amortissement :

- Tarif de rachat à 0,55 Cts d'euros en 2011
- Dégradation du rendement des capteurs de 1% par an durant les 12 premières années puis de 0,7% par la suite (données constructeurs)
- Inclinaison de 35° pour le plan d'irradiation
- Coût au m² de panneaux installés : 850€/m²



Avec ces hypothèses le temps de retour sur investissement tourne autour de 10 à 11 ans pour que l'installation des panneaux photovoltaïques soit rentable pour la copropriété (hors maintenance et entretien).

Coût de mise en œuvre (HT) = 850€ /m² de panneau installé

Gain annuel (TTC/an) = 80€ / an / m² de panneau installé

Coût entretien = autour de 100€ par an pour la copropriété

Conclusion

Cette étude a permis de mettre en avant certains points qu'il est importants de considérer pour rénover efficacement les bâtiments anciens :

- L'équilibre hygrothermique et la ventilation sont deux points très liés et il est important de traiter la ventilation des logements si on commence à rénover thermiquement les appartements (isolation extérieure, remplacement des menuiseries par exemple) car sinon certains désordre liés à l'humidité pourraient apparaître
- L'isolation par l'extérieur est à préférer à l'isolation par l'intérieur car elle résulte d'une démarche collective et permet de préserver certains aspects comme l'inertie des logements ou la valeur patrimoniale intérieure des appartements. Elle reste cependant difficile à mettre en œuvre sur certaine façade mais peut par contre être appliquée sur les murs de pignon ou sur les murs coté cour sans problème particulier. Elle présente l'avantage de pouvoir intégrer des réseaux de ventilation par l'extérieur ce qui peut permettre de traiter aussi bien l'isolation que la ventilation
- La fermeture des espaces coté cour est particulièrement intéressante et certains exemples très intéressants existent à Grenoble (rue du temple par exemple). Cette solution permet de créer un jardin d'hiver et de réduire significativement les déperditions vers ces locaux tout en améliorant significativement le confort des occupants
- La rénovation des menuiseries est un point important si on considère purement l'aspect énergétique. La solution des double-fenêtres est particulièrement intéressante car elle permet de garder l'aspect extérieur des menuiseries d'origine tout en améliorant l'aspect thermique par le rajout d'un vitrage intérieur avec une allège qui peu être isolée. Cela permet d'avoir des émetteurs de chaleur plus efficaces dans ce cas
- L'ajout de solution énergie renouvelable comme le solaire thermique ou le solaire photovoltaïque peut se trouver intéressant à Grenoble mais les contraintes techniques sont plus nombreuses que dans des constructions neuves (colonnes techniques, cheminements intérieurs, etc...). D'autre part il faut que les panneaux ne soient pas visible de la rue ce qui rend leur usage limité à certains cas.

Faire la liste exhaustive de tous les points à mettre en œuvre est un travail difficile car la principale conclusion de ce travail est que la rénovation des bâtiments anciens doit être traitée au cas par cas et qu'il est difficile de généraliser une méthode ou des bouquets de solution. Dans ce contexte, cette étude a toute son utilité car elle donne les principales pistes de préconisation et les principes de mise en œuvre qui respectent le bâti ancien. Certaines actions pourront être réalisées en parallèle pour juger de l'efficacité de ces mesures et l'instrumentation d'immeubles rénovés sera très utile pour avoir un retour d'expérience et faciliter les choix futurs pour la rénovation du bâti ancien.

Bibliographie

- [1] Murphy C., "Considerations for design criteria to minimize moisture within walls" in RCI inc journal, 2002
- [2] "Transferts d'humidité à travers les parois, évaluer les risques de condensation ». Guide Technique CSTB, Septembre 2009.
- [3] Torres I., Peixoto de Freitas V., "The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings" in Construction and Building Materials. Mars 2010.
- [4] Kunzel H., "Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components", 1995.
- [5] WUFI passes benchmark test of EN 1502. Fraunhofer Institut Bauphysik.
- [6] Mahlknecht M., Exner D., Avesani S., Troi A., Sparber W., "Refurbishment and monitoring of an historic building : a case study" during 47 AICARR International Conference, Roma October 2009.
- [7] Rapport BATAN, « Connaissance des bâtiments anciens & économies d'énergie ». par DGUHC, CETE de l'est, DGCB-LASH, MPF
- [8] Rapport New4old. New energy for old buildings, 2007 – 2010, projet européen framework 7.
- [9] Présentation et Manuels pour l'utilisation du logiciel WUFI :
- [10] Page d'accueil du logiciel WUFI : <http://www.wufi-pro.com/>
- [11] Moisture Transport in Building Materials, Computation simulation with the WUFI Model. http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/grundl_grundl_e.html

Annexe 1 : Les matériaux

Voici la liste des matériaux que nous considérons dans l'étude. Ils sont classés par famille.

Revêtement :

- Enduit chaux
- Enduit chanvre
- Plaque de plâtre intérieure (BA13)

Isolants :

- Laine de verre
- Béton cellulaire
- Polystyrène
- Fibre de bois

Structurel :

- Calcaire dur
- Mortier avec une grande porosité

Pare vapeur :

- Pare vapeur $S_d=50$
- Freine vapeur intelligent

Le tableau qui suit donne les matériaux équivalents choisis dans la base de données de WUFI. Apparaissent les valeurs des paramètres donnés et utilisés par WUFI.

Après ce tableau, nous présentons les graphes donnant le facteur de résistance à la diffusion de vapeur des deux pare vapeurs considérés en fonction de l'humidité relative.

On voit que le pare-vapeur classique a un facteur constant alors que celui du pare vapeur hygro régulant ou intelligent dépend de l'humidité relative. Ainsi celui-ci est plus perméable à la diffusion de vapeur d'eau quand le milieu se sature en eau. Cette variation a pour but de permettre d'évacuer la vapeur d'eau quand il y en a trop, mais de fonctionner comme un pare vapeur quand la paroi est sèche.

On voit donc pourquoi on qualifie ces membranes d'« intelligentes. »

Nom français	Equivalent dans la base de données WUFI	Masse Volumique	Porosité	Capacité Thermique Massique	Conductivité Thermique	Résistance à la diffusion de vapeur	Source
		[kg/m ³]	[m ³ /m ³]	[J.kg/K]	[W/m.K]	[.]	
Revêtement							
Enduit chaux	Lime Plaster	1600	0,3	850	0,700	7	Fraunhofer
Enduit Chanvre	?	?	?	?	?	?	
Plâtre	Cement Plaster (stucco)	2000	0,3	850	1,2	25	Fraunhofer
Isolants							
Laine de verre	Mineral Wool*	115	0,95	850	0,043	3,4	Fraunhofer
Polystyrène expansé	EPS	14,8	0,99	1470	0,036	73,01	Ashrae 1018-RP
Béton cellulaire	Multipor Ytong	115	0,96	850	0,040	4,1	Fraunhofer
Fibre de bois	Wood Fibre Softboard	165	0,999	2000	0,04	2,5	Fraunhofer
Structurel							
Calcaire	Krensheimer Shelly Limestone	2440	0,13	850	2,250	140	Ashrae 1018-RP
Mortier avec une grande porosité	Bonding Mortar	1350	0,44	850	0,800	16,12	Université technologique de Vienne
Pare vapeur							
Pare vapeur	Vapour retarder Sd=50 m	130	0,001	2300	2,300	50000	Fraunhofer
Freine vapeur intelligent	Vario KM Duplex	83	0,11	1800	1,000	Voir graphe	St Gobain

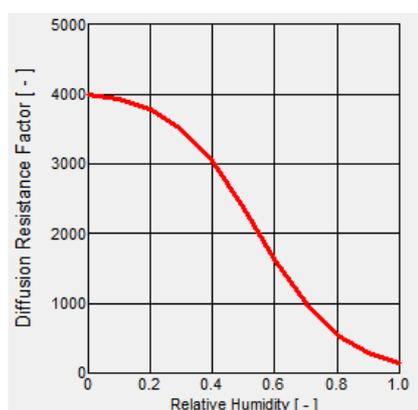


Figure 11 : Le μ en fonction de l'HR pour le Vario KM Duplex de St Gogain (pare vapeur « intelligent »).

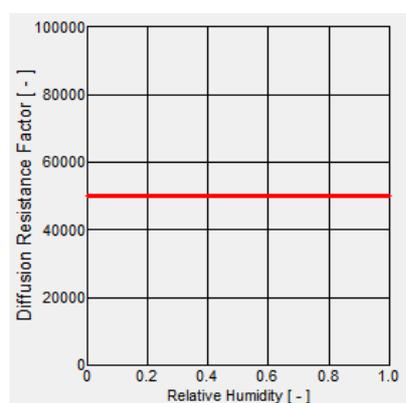


Figure 12 : Le μ en fonction de l'humidité relative pour un pare vapeur "classique" de Sd=50m

L'épaisseur doit être de 1mm, et ainsi la résistance à la diffusion de vapeur Sd est $\mu/1000$

L'épaisseur associé doit être de 1mm, ainsi on a $Sd = \mu/1000 = 50m$

Annexe 2 : calcul des conductivités thermiques en prenant en compte la teneur en eau

Nous présentons ici les calculs des paramètres hygrothermiques des matériaux en considérant leurs teneurs en eau.

Formules

Dans les formules suivantes, l'étoile, désigne la valeur pour $w = 0 \text{ kg/m}^3$, c'est-à-dire pour le matériau à sec.

Conductivité thermique :

La conductivité thermique dépend de la quantité d'eau dans le matériau. On se base sur les valeurs données par WUFI puis on extrapole pour la teneur en eau considérée.

WUFI considère que la conductivité thermique est une fonction linéaire de la teneur en eau du matériau. WUFI se base donc sur deux valeurs : conductivité thermique du matériau à sec et conductivité thermique du matériau gorgé d'eau. Notons que la teneur en eau maximale d'un matériau est donnée par sa porosité, on considère que l'ensemble du volume est rempli d'eau liquide.

Masse volumique en fonction de la teneur en eau :

Pour un matériau donné, c'est sa teneur en eau plus la masse volumique à sec.

$$\rho(w) = \rho_{mat}^* + w$$

Capacité thermique massique :

C'est la moyenne pondérée par la quantité de celle du matériau à sec et de l'eau en différenciant l'eau liquide et la vapeur d'eau car elles n'ont pas la même capacité thermique massique.

$$Cp(w) = Cp_{mat}^* \frac{\rho_{mat}^*}{\rho(w)} + Cp_{eau\ liquide} \frac{W_{liquide}}{\rho(w)} + Cp_{eau\ vapeur} \frac{W_{vapeur}}{\rho(w)}$$

Or WUFI ne fait pas strictement une différence entre la phase liquide et la phase vapeur de l'eau. Mais on peut considérer que l'eau est sous forme vapeur à moins d'être proche des conditions de saturation.

Applications

Présentons les différents matériaux pour lesquels nous avons réalisé ce calcul.

Plâtre:

WUFI donne :

W [kg/m ³]	Lambda [W/m.K]
0	1,2
300	3

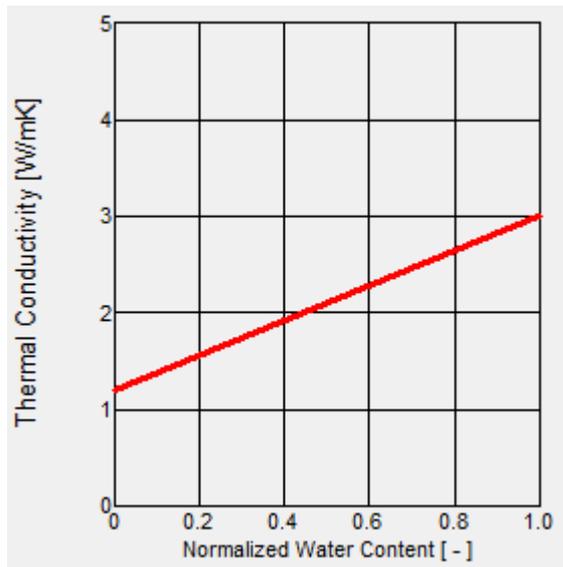


Figure 13 : conductivité thermique du plâtre en fonction de la teneur en eau

La simulation sur 15 ans nous a donné la teneur en eau moyenne sur une année en régime établi : $w_{eq} = 10\text{kg/m}^3$.

La porosité du plâtre est de 0,3 donc sa teneur en eau maximale 300kg/m^3 .

On a donc la teneur en eau normalisée :

$$w = 10/300 = 0,0333$$

Et ainsi :

$$\lambda = 1,2 + 0,0333 \cdot (3 - 1,2) = 1,26 \text{ W/m.K}$$

pour la masse volumique,

$$\rho = 2010\text{kg/m}^3$$

Et la capacité thermique massique

$$C_p = 850 \cdot 2000/2010 + 1850 \cdot 10/2010 = 855 \text{ J/kg.K}$$

On voit ici que l'actualisation est minime. On peut par la suite considérer que le C_p est constant.

Mortier :

Nous considérons que la valeur moyenne en régime établi de la teneur en eau du mortier est de $W=32\text{kg/m}^3$ (équivalent à HR = 65%).

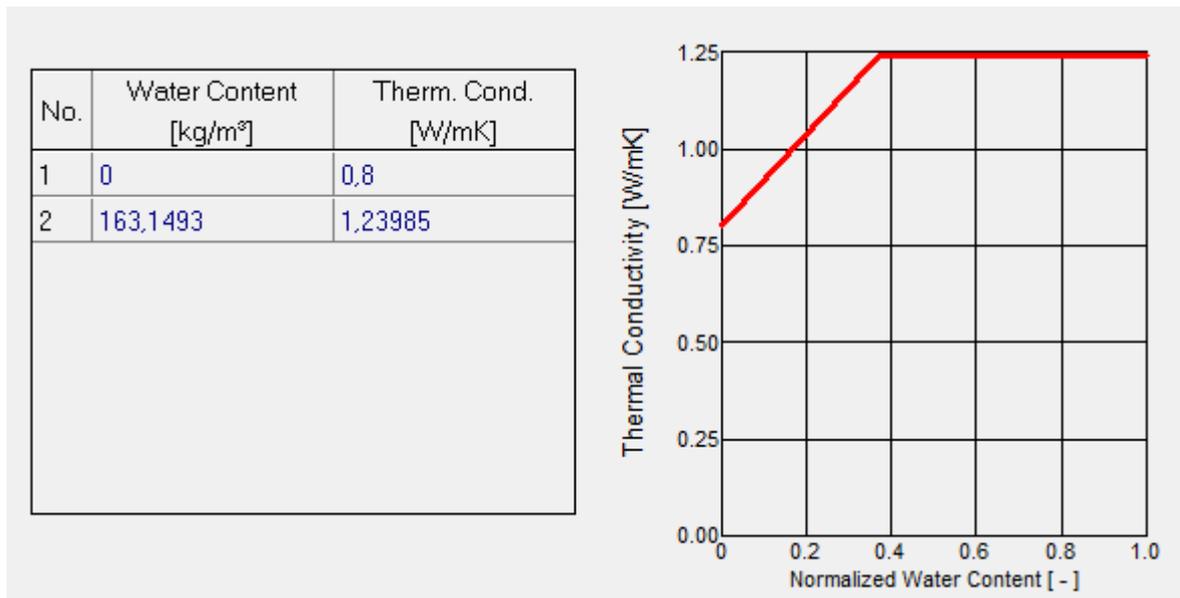


Figure 14 : conductivité thermique du mortier en fonction de la teneur en eau

La porosité du mortier est de 0,44, donc la teneur en eau maximale est 440kg/m^3

$$\lambda = 0,8 + (1,24-0,8) \cdot 32/163 = 0,88 \text{ W/m.K}$$

La majoration est ici de 10%.

Pour la masse volumique :

$$\rho = 1385 \text{ kg/m}^3$$

Polystyrène expansé

Sa porosité est de 0,95.

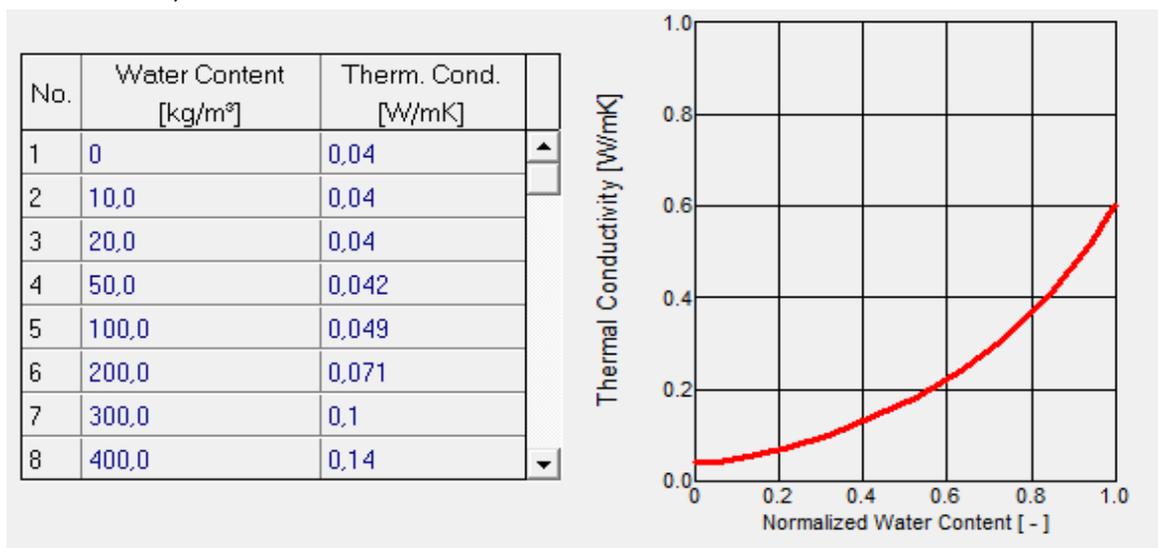


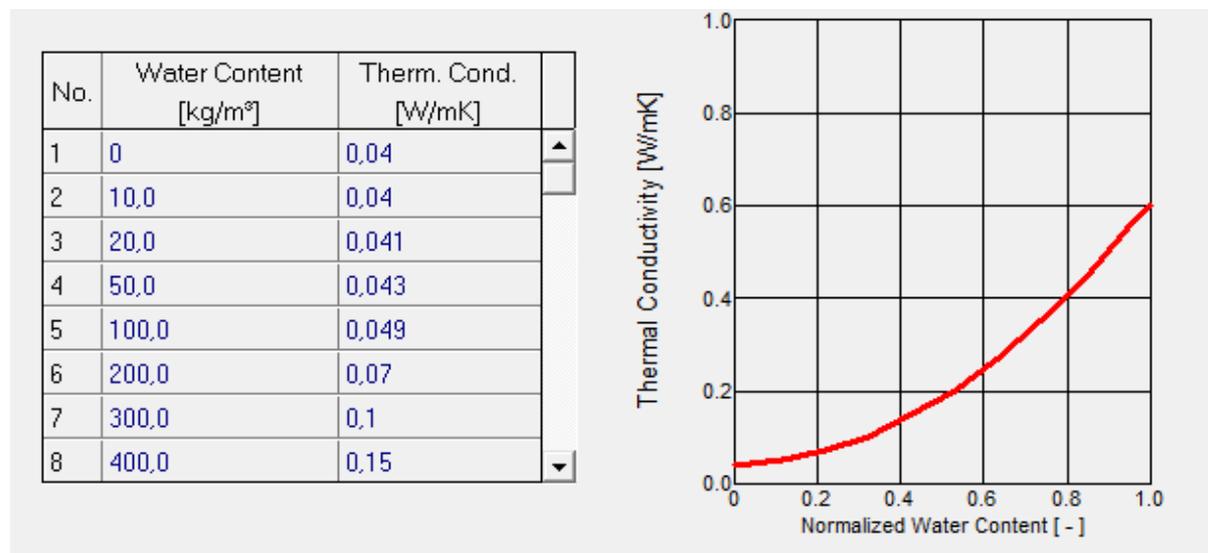
Figure 15 : Conductivité thermique de l'EPS en fonction de la teneur en eau

Dans le cas où il est situé côté intérieur :

La teneur en eau du polystyrène expansé oscille en régime établi entre $0,03$ et $0,07 \text{ kg/m}^3$ et sa valeur moyenne est de $0,05 \text{ kg/m}^3$.

Ici il est clair que nous pouvons considérer que sa conductivité thermique est inchangée.
Le polystyrène expansé n'a pas de tendance à stocker l'eau.

Laine de verre



Or nous avons une teneur en eau là aussi très faible. La conductivité thermique n'a pas à être ajustée.

Fibre de bois

Le même type de calcul pour de la fibre de bois nous donne une augmentation de 15% de la conductivité thermique pour le matériau mis dans une ambiance à 90% d'humidité relative.

Annexe 2 : les matériaux préconisés

Matériaux décrits au chapitre préconisation, liste non exhaustive.

Les marques sont citées à titre indicatif.

Les conductivités thermiques sont celles déclarées par le fabricant.

Assainissement :

- **Assèchement des murs** par système électromagnétique : Boitier Murtronic »
- **enduit spécifique d'interposition** : pour retarder l'apparition des sels présents dans les sols : Sanimur de St Astier

Plancher :

Chape isolante sur terre plein ou plancher

- **Chanvribat + Tradical PF70 de Tradical** (Straservil) : $\lambda = 0,11 \text{ W/m.k}$
- **Vermiculite de Efisol** $\lambda = 0,068 \text{ W/(m.K)}$

Doublage :

- **Fermacell** Doublage en plaque de plâtre + fibre de cellulose : Masse volumique: 1000 à 1250 kg/m³.

Enduit à caractère isolant intérieur et extérieur:

- **Unilit 20** : $\lambda = 0,066 \text{ W/m/K}$ distributeur Arte Constructo
- **Climatherm** $\lambda = 0,057 \text{ W/m/K}$, distributeur St Astier

Enduit à caractère isolant uniquement intérieur: enduit chaux-chanvre

De nombreuses marques :

- **Batichanvre** + isocania de St Astier $\lambda = 0,15 \text{ à } 0,17 \text{ W/m.k}$
- **Chanvribat** + Tradichanvre distributeur Tradical (Straservil) $\lambda = 0,12 \text{ à } 0,13 \text{ W/m.k}$

Isolant rigide en brique minérale

- **MULTIPOR** (Xella) + finition enduit **Isochaux** (CESA-St Astier)

Isolant semi rigides en laine

isolant panneaux laine de bois densité minimum 40 kg/m³, 10 cm ép. entre montants bois + lame d'air ou freine vapeur intelligent:

- **holzflex de chez Homatherm** $\lambda = 0,038 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
- **ISONAT + de chez Buitex**: laine de bois + chanvre densité minimum 45 kg/m³ $\lambda = 0,038$ + isolation phonique

Vitrage épais isolants :

- **Van Ruysdael** forte isolation : valeur U réelle et permanente de 3,2-3,4W/m².K + châssis bois = 2,5 à 2,8W/m².K

Annexe 3 : calcul dans les appartements

Enduit extérieur

	Consommation réelle initiale	Mise en œuvre de 1 cm d'isolant par l'extérieur type enduit unilit 20	Mise en œuvre de 2 cm d'isolant par l'extérieur type enduit unilit 20	Mise en œuvre de 3 cm d'isolant par l'extérieur type enduit unilit 20	Mise en œuvre de 4 cm d'isolant par l'extérieur type enduit unilit 20
Appart 1	36637	31079	12%	28730	19%
Appart 2	12647	10999	10%	9563	21%
Appart 3	16426	14588	8%	12941	18%
			10%		19%
					26%
					26%

Iso extérieure

	Consommation réelle initiale	Mise en œuvre de 10 cm d'isolant par l'extérieur type multipor	Mise en œuvre de 20 cm d'isolant par l'extérieur type multipor
Appart 1	36637	20364	34%
Appart 2	12647	4506	54%
Appart 3	16426	8116	41%
			43%
			50%

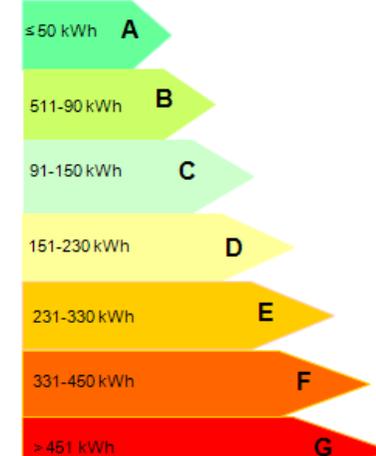
	Consommation réelle initiale	Mise en œuvre de 10 cm d'isolant par l'intérieur type laine de bois	Mise en œuvre de 16 cm d'isolant par l'intérieur type laine de bois
Appart 1	36637	21212	32%
Appart 2	12647	4244	56%
Appart 3	16426	6750	49%
			46%
			52%

	Consommation réelle initiale	Remplacement du SV en DV Uw=2,1	Remplacement du SV en DV Uw=1,4
Appart 1*	36637	24530	33%
Appart 4**	3650	2514	31%
			38%

* 15,6 m² de SV en DV

** 7,7 m² de SV en DV

Logement économe



Logement énergivore

Annexe 4 : impact des améliorations sur la classification DPE

Enduit extérieur

	Consommation réelle initiale	Mise en œuvre de 4 cm d'isolant par l'extérieur type enduit unilit 20		Classement étiquette énergie usage ECS inclus dans le calcul
Appart 1	36637	25703	26%	156 kWh/m ² /an soit classement D inchangé
Appart 2	12647	7770	35%	80 kWh/m ² /an soit passage en B au lieu de C initialement
Appart 3	16426	10765	31%	92 kWh/m ² /an soit classement C inchangé

Iso extérieure

	Consommation réelle initiale	Mise en œuvre de 10 cm d'isolant par l'extérieur type multipor		Classement étiquette énergie usage ECS inclus dans le calcul
Appart 1	36637	20364	34%	125 kWh/m ² /an soit classement C au lieu de D initialement
Appart 2	12647	4506	54%	65 kWh/m ² /an soit classement B au lieu de C initialement
Appart 3	16426	8116	41%	82 kWh/m ² /an soit classement B au lieu de C initialement

Vitrage

	Consommation réelle initiale	Remplacement du SV en DV Uw=2,1		Classement étiquette énergie usage ECS inclus dans le calcul
Appart 1	36637	24530	33%	151 kWh/m ² /an soit classement D inchangé
Appart 4	3650	2514	31%	66 kWh/m ² /an soit classement B inchangé

Un dernier calcul est fait avec un bouquet d'amélioration : isolation 4 cm par l'extérieur + remplacement des vitrages par double vitrage Uw=1,4 W/m²/K

Appart 1	36637	22640	40%	140 kWh/m ² /an soit classement C au lieu de D
Appart 2	12647	7220	43%	80 kWh/m ² /an soit classement B au lieu de C
Appart 3	16426	10690	35%	92 kWh/m ² /an soit classement C inchangé

- L'appart 2 et 3 étaient déjà équipés de DV