



INSTITUT  
TECHNOLOGIQUE

**EFFINOV BOIS**  
**SYSTEMES CONSTRUCTIFS BOIS POUR LA REHABILITATION DES**  
**ENVELOPPES – EFFICACITE ENERGETIQUE, COMPORTEMENT**  
**HYGROTHERMIQUE ET INDUSTRIALISATION**

**TIMBER BASED ELEMENT FOR BUILDING ENVELOPE RENOVATION –**  
**ENERGY EFFICIENCY, HYDROTHERMAL BEHAVIOUR AND**  
**INDUSTRIALISATION**

Effinov' Bois

RAPPORT FINAL

Mars 2014  
Sylvain Boulet  
05 56 43 64 27  
[sylvain.boulet@fcba.fr](mailto:sylvain.boulet@fcba.fr)

Avec le soutien de :

Agence Nationale de la Recherche  
ANR

CODIFAB  
comité professionnel de développement  
des industries françaises de l'ameublement et du bois

En partenariat avec :



---

# SOMMAIRE

Introduction générale	p3
1. Etat des lieux de la rénovation en France et en Europe et cahiers des charges du projet	p4
1.1. Cahier des charges techniques	p4
1.2. Etude bibliographique et base de données matériaux et systèmes	p4
2. Conception et choix des solutions	p7
2.1. Cahier des prescriptions architecturales – Enveloppes habitables « 3D »	p7
2.2. Simulations des parois réhabilitées – Seconde peau « 2D »	p9
2.2.1. Impact de la rénovation sur le confort visuel	p9
2.2.2. Calculs de transmission thermique surfacique et de pont thermique	p10
2.2.3. Comportement hygrothermique des parois réhabilitées	p11
3. Evaluation expérimentale des performances des systèmes constructifs réhabilités	p14
3.1. Essais INES	p14
3.2. Essais FCBA	p21
3.2.1. Essais hygrothermiques	p21
3.2.2. Essais acoustiques	p23
3.2.3. Essais de perméabilité à l'air	p24
4. Evaluation énergétique et environnementale de la rénovation à l'échelle du bâtiment	p24
4.1. Evaluation environnementale	p24
4.2. Evaluation énergétique	p27
5. Intégration industrielle et transferts aux professionnels	p29
5.1. Guide de conception	p29
5.2. Intégration industrielle – Recueil d'expériences	p30
Conclusion	p31

# Introduction générale

Le présent rapport correspond à la restitution finale de l'étude « Effinov'Bois : Systèmes constructifs Bois pour la réhabilitation des enveloppes – Efficacité énergétique, comportement hygrothermique et industrialisation ». Nous évoquerons les actions accomplies, les décisions prises et la méthodologie de travail pour chaque étape importante.

L'objectif du programme Effinov'Bois est d'étudier la mise au point d'un ensemble de systèmes constructifs bois pour la rénovation des enveloppes. Seuls les éléments verticaux ont été étudiés dans le projet. Nous proposons d'apporter des réponses techniques et scientifiques vis à vis des gains énergétiques, des comportements hygrothermiques des systèmes conçus en vue d'une industrialisation et également sur le confort intérieur apporté par ces éléments. De plus, ont été intégrés, les critères acoustiques, environnementaux, économiques, sociétaux et architecturaux qui doivent être nécessairement pris en compte dans le cadre d'un projet global de réhabilitation.

Du point de vue scientifique, cette étude nous permettra d'améliorer significativement la performance énergétique d'un bâtiment, d'évaluer les nouveaux besoins énergétiques du bâti modifié, d'approfondir la compréhension des phénomènes de transferts hygrothermiques dans les parois réhabilitées, d'évaluer le potentiel de l'offre bois comme solution environnementale, d'approfondir et valider de nouveaux modèles sur le comportement hygrothermique des parois bois et leur apport en terme de performance énergie/confort à l'échelle du bâtiment. Pour mener à bien ces différents objectifs, nous nous appuyons sur un consortium riche et hétérogène : l'institut technologique FCBA coordinateur du projet, le CSTB, ADYAL, experte de la gestion en immobilier tertiaire, le laboratoire Li2a spécialisé dans l'informatique appliquée à l'architecture, la Fédération de l'Industrie Bois-Construction FIBC, le département TREFLE de l'I2M (Institut de mécanique et ingénierie de Bordeaux), l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) du CEA et l'entreprise OSSABOIS, fabricant de bâtiments à ossature bois.

Les travaux réalisés sur chacune des tâches du projet sont présentés dans ce rapport.

Le premier chapitre présente les éléments qui ont servi de base à notre travail : un cahier des charges technique et réglementaire permettant d'identifier les exigences à respecter en terme de rénovation par l'extérieur à base de bois ainsi qu'un rapport bibliographique sur les solutions bois pour la rénovation à travers des exemples de projets européens et un tour d'horizon du marché français dans ce domaine.

La deuxième partie de ce rapport se focalise sur la conception, le choix des solutions ainsi que le domaine d'emploi que nous avons retenus pour la suite de l'étude, ce travail s'appuie sur la réalisation de simulations à l'échelle paroi ainsi que sur l'évaluation multicritère menée par les différents experts du CSTB.

Nous décrivons ensuite les différents essais à l'échelle 1 qui ont été menés sur les sites de l'INES et de FCBA et qui nous ont permis d'évaluer les performances des typologies de parois retenues au début de l'étude.

Le quatrième chapitre fait référence aux simulations à l'échelle bâtiment : une évaluation environnementale permettant de quantifier l'impact du bâtiment sur l'environnement avant et après rénovation et une évaluation des gains énergétiques comparés de certains bâtiments existants et de leurs solutions rénovées.

Enfin, la cinquième partie sera dédiée à la synthèse de notre étude et au transfert aux industriels de la filière bois, à travers la présentation du guide de conception et du rapport traitant de l'intégration industrielle du projet par OSSABOIS.

# 1. Etat des lieux de la rénovation en France et en Europe et cahiers des charges du projet

Que ce soit en France ou en Europe, le marché de la réhabilitation thermique connaît aujourd'hui un fort développement. Dans cette optique, les entreprises, laboratoires et instituts technologiques travaillent ensemble pour apporter des solutions performantes sur le plan technique et économique, avec pour objectif la conception et la mise en œuvre de systèmes performants et multifonctionnels pour différents types de bâtiments existants. La première tâche du projet, que coordonne l'institut technologique FCBA, nous permet de poser les bases d'Effinov'Bois à travers deux rapports.

La première partie de ce chapitre présente le cahier des charges du projet qui aborde les différentes exigences à respecter d'une opération de rénovation par l'extérieur à l'aide d'une solution bois.

Dans un deuxième temps, nous présenterons un rapide état des lieux des systèmes de rénovation par l'extérieur à ossature bois dans les projets européens mais aussi sur le marché des produits français, en mettant notamment l'accent sur le contexte actuel : politique, économique, engagement environnemental et les aides financières pour favoriser le sujet.

## 1.1. Cahier des charges techniques

Un premier document a été rédigé afin d'étudier les possibilités d'emploi du bois en réhabilitation. Nous avons alors considéré les contextes normatif et réglementaire pour les matériaux, la conception et la mise en œuvre. L'objectif est d'identifier les exigences à respecter en explorant les différentes normes, code de l'urbanisme, code du travail, textes réglementaires, guides pratiques...

Ce cahier des charges répond techniquement et réglementairement à 8 domaines :

1. Stabilité mécanique
2. Durabilité des façades rapportées en bois
3. Etanchéité à l'eau
4. Réglementation incendie
5. Réglementation thermique
6. Etanchéité à l'air
7. Réglementation acoustique
8. Confort visuel

*Référence : Livrable T1.1\_Cahiers des charges.*

## 1.2. Etude bibliographique et base de données matériaux et systèmes

Parallèlement à la rédaction du cahier de charges, un état de l'art de la rénovation par l'extérieur en bois a été réalisé, l'objectif est de faire un tour d'horizon du contexte actuel : politique, économique, engagement environnemental ainsi que les différentes aides financières.

La première partie de cette étude s'est focalisé sur l'état actuel du parc en France (résidentiel et non résidentiel) et par conséquent sur l'identification de la potentialité du marché de la rénovation. La structure et l'évolution de ce marché sont ensuite traitées :

	2007	2008	2009	2010	2011
RÉHABILITATION	51 – 52%	52 – 53 %	56 – 57%	57 – 58%	57 – 58%
Logement	< 31 %	31 – 32%	34%	< 35%	< 35%
Bâtiment non résidentiels	20 – 21%	21%	22 – 23%	22 – 23%	22 – 23%

Source : INSEE

**Tableau 1 : Structure du marché de la réhabilitation sur la période 2007-2011**

	2007	2008	2009	2010	2011
RÉHABILITATION	+2,2%	+0,6%	- 2,5%	-1 à -2%	+1%
Logement	+3,3%	+0,7%	-2%	-1%	+1 à +2%
Bâtiment non résidentiels	+0,7%	+0,4%	-3%	-2%	

Source : INSEE

**Tableau 2 : Evolution du marché de la réhabilitation sur la période 2007-2011**

L'aspect économique est abordé à travers la structuration du marché par région ainsi que par les différentes aides financières mises à disposition, que ce soit au niveau européen (Fonds Européens de Développement Régional), national (Eco PTZ, Eco-prêt logement social, aides de l'ANAH...) et régional.

A travers la présentation des projets REHA du PUCA, nous faisons une transition entre les aides incitatives et la partie purement bibliographique de notre rapport. En effet, ce programme a pour objectif de créer des groupements collectifs comprenant à la fois la maîtrise d'œuvre, les bureaux d'études et les entreprises afin de se positionner sur des projets de rénovation de bâtiments économes. Sur les 17 travaux de groupe qui ont été labellisés PUCA-REHA en 2010, la réhabilitation par l'utilisation d'enveloppe à ossature bois est fortement présente. 8 de ces projets ont adopté la technique de l'ossature bois. Ci-dessous, l'exemple du programme « ECORCE » :

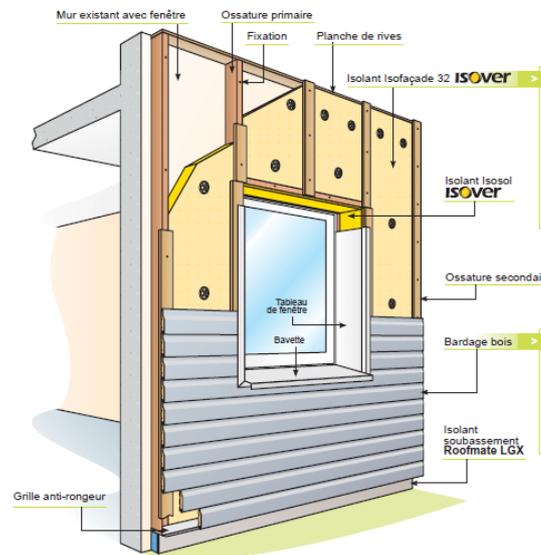
Le partenariat est constitué de : Jourda Architectes Paris, ARBONIS Construction, VINCI Construction France, ERIBOIS, INEX.

Le principe d'ECORCE se distingue par la création d'un "manteau", solution unique qui, tout en optimisant la gestion énergétique, tire partie d'une large réflexion sur l'ensemble des conditions de vie. Le projet propose une remise à niveau qualitative des surfaces, une extension permettant de passer de 944 à 2 380m<sup>2</sup> et une résidentialisation des espaces extérieurs. Une boîte à outils est mise à disposition du Maître d'Ouvrage lui permettant, en fonction de son budget, d'adapter son projet. Les revêtements sont issus du modèle « ARBONIS Façade ».

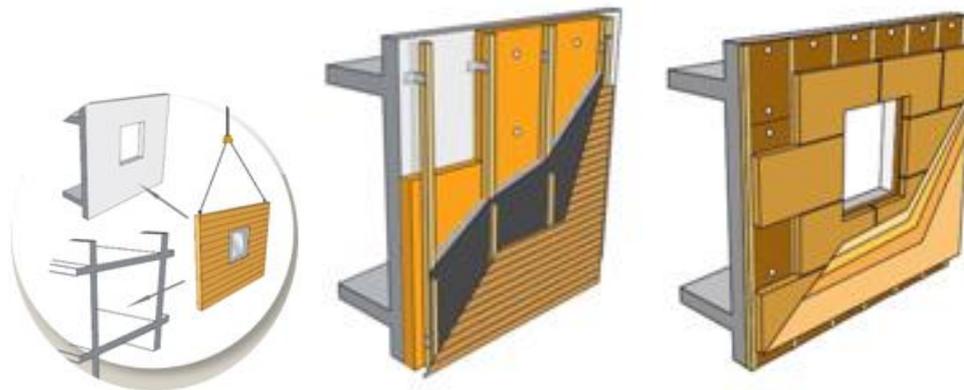


**Figure 1 : Bâtiment conçu par l'équipe Jourda architectes Paris**

Quelques exemples de solutions européennes et françaises sont ensuite mis en avant, parmi celles-ci nous pouvons citer les systèmes K'ITE de ISOVER- SAINT GOBAIN/Gascogne et WOOD'ITE d'ABIBOIS/ATLANBOIS/ESB.



**Figure 2 : Système de façade K'ITE**



**Figure 3 : Systèmes de façade Wood'ITE**

*Référence : Livrable T1.2\_Etude bibliographique et base de données matériaux et systèmes.*

Au travers cette première tâche dédiée à l'étude technico-économique et à la faisabilité industrielle des systèmes de doublages, nous avons constitué un état du marché de rénovation par l'utilisation de l'enveloppe à ossature bois en France. Ce rapport n'est pas exhaustif, il existe nombreux projets traitant du sujet et produits sur le marché. Cependant, il englobe les résultats les plus connus y compris les produits innovants qui nous permettent de justifier la richesse des idées et des conceptions déjà abordées en France.

Dans la première partie, une observation de l'état du marché actuel de la construction a été entreprise, notamment d'un point de vue économique. Nous avons constaté que la France présente une grande ouverture sur la réhabilitation et rénovation du bâtiment. En effet, les décisions politiques et les engagements environnementaux ont permis la mobilisation de fonds et d'aides financières, appuyés par les agences et associations afin de faire avancer les techniques par des programmes de recherches incitatives ainsi que des actions d'expérimentations.

Plusieurs organismes (publics et privés), ont été identifiés comme porteurs de programmes favorisant la rénovation des bâtiments ainsi que la construction durable et écologique. Par conséquent, nous pouvons constater que depuis 2010 il existe des réalisations exemplaires sur le sujet et un changement des mentalités conduisant vers la conception de bâtiment sous une optique de l'environnement. Nous avons présenté quelques résultats de ces initiatives à travers les concepts de bâtiment de quelques projets de réhabilitation.

## 2. Conception et choix des solutions

Ce chapitre regroupe les résultats obtenus dans les tâches 2 et 3 du projet : « Définition technique et architecturale des principes constructifs » et « Simulation des parois réhabilités ». Nous présenterons, d'une part, une synthèse du cahier de prescription architecturale rédigée par le laboratoire Li2a et, d'autre part, les principaux résultats obtenus par simulations numériques à l'échelle paroi.

### 2.1. Cahier des prescriptions architecturales – Enveloppes habitables « 3D »

Le travail présenté dans cette partie traite de l'étude et de l'évaluation de solutions techniques polyfonctionnelles et susceptibles notamment d'offrir des surfaces d'enveloppement accessibles voire habitables. Ces dispositifs sont désignés ici par l'expression « Enveloppes Habitables ». La tâche 2 met l'accent sur l'intérêt de réaliser des solutions de rénovation habitables à travers des notions de perceptions, d'usages et de mise en œuvre. Dans cette optique, le système constructif à ossature bois présente plusieurs avantages :

- L'ossature bois offre des possibilités structurelles qui demeurent inexploitées dans une approche d'enveloppe thermique simple de l'existant (carénage étanches, coques, couvertures etc.). Les systèmes à ossature bois peuvent être exploités pour leurs capacités portantes, ils offrent la possibilité structurelle d'ajouter des éléments d'architecture à l'existant.
- Les technologies bois sont très bien accueillies dans le public. Le bois possède une image positive liée aux notions d'habitat, de confort, d'écologie et de respect de l'environnement. Cette bonne réception du matériau bois doit permettre de déboucher sur des innovations techniques acceptées et comprises par les usagers des bâtiments.

Dans le cadre de Effinov'Bois, des travaux effectués par les élèves en Architecture ont produits des propositions esthétiques et pratiques pour l'occupant.

Leurs travaux sont basés sur l'appréciation et la perception des occupants (sur la vue vers l'extérieur, les masques, les vis-à-vis, l'éclairage perçu, le style de vie, la société, l'utilisation des locaux ...) et les solutions de rénovations apportées sont issues des attentes des occupants pour leurs propriétés.

L'accent est mis sur la valorisation du bâtiment sans mettre l'accent sur le gain énergétique, notamment par la création d'enveloppes habitables, par la place donnée à l'usager sur les modulations de l'enveloppe ou encore par la végétalisation.

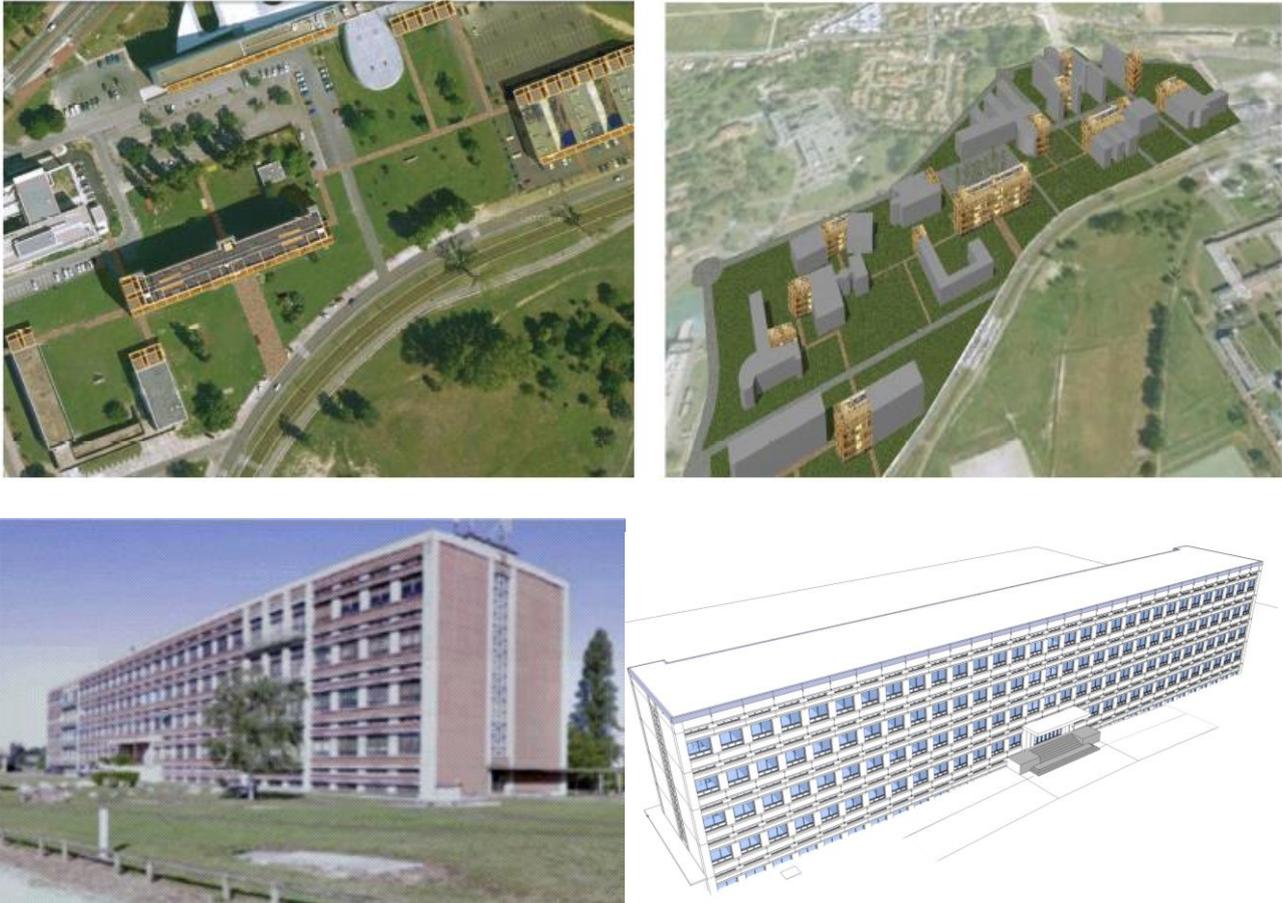
Le bâtiment B18 de l'université de Bordeaux sert ici de base au travail architecturale, le relevé de l'existant se fait en deux temps :

- Récolte d'informations avant d'aller sur le site (plans, facture...)
- Récolte d'informations sur place (état du bâtiment, comptage de luminaires et d'ordinateurs, accessibilité pour la dépose et la pose, système de chauffage, température de consigne...) ainsi que la prise de photos.

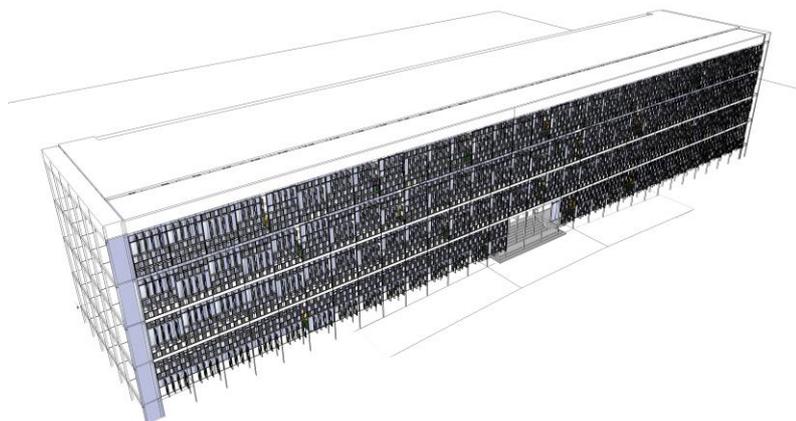
Le bâtiment proposé se trouve au sein du parc de l'université de Bordeaux I. Ce bâtiment nommé B18 est composé de bureaux, salles de réunions, laboratoires et autre espaces communs. C'est un bâtiment collectif de 5 étages ayant une superficie de 6607 m<sup>2</sup><sub>SHON</sub>.

Il a été construit en 1966 et son enveloppe n'a subi aucune modification majeure depuis sa construction. Basé sur une structure béton typique poteau poutre le bâtiment B18 répond bien aux critères fixés par le projet EFFINOV Bois.

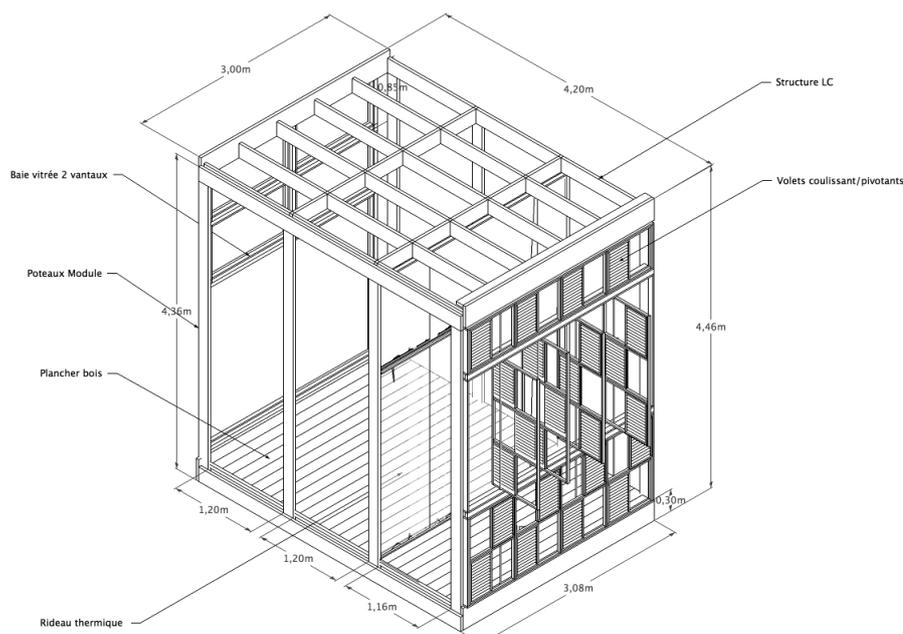
De plus de nombreuses enquêtes ont déjà été effectuées dans le cadre d'un programme de réhabilitation du campus. Ces enquêtes donnent de nombreuses informations concernant l'enveloppe, le fonctionnement, le système de chauffage, la ventilation...etc. de manière relativement détaillée.



**Figure 4 : Photographies et vue 3D du bâtiment B18 avant rénovation**



**Figure 5 : Vue 3D du bâtiment B18 après rénovation avec enveloppes habitables**



**Figure 6 : Module d'enveloppe habitable**

Référence : Livrable T2\_Cahiers de prescriptions architecturales et esquisses.

## 2.2. Simulations des parois réhabilitées – Seconde peau « 2D »

La tâche 3 du projet se concentre sur la réalisation de simulations à l'échelle paroi, elle se décompose en 3 parties :

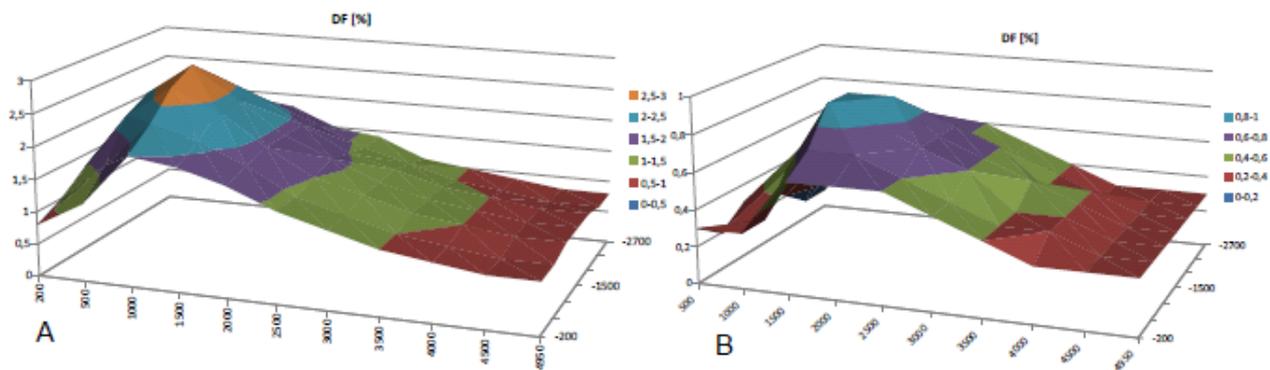
- Impact de la rénovation en termes de confort visuel à l'aide du logiciel EnergyPlus et DAYSIM/Radiance.
- Calculs de transmission thermique surfacique ( $U_p$ ) et de pont thermique au niveau des encadrements de baies ( $\Psi$ ) à l'aide du logiciel TRISCO.
- Comportement hygrothermique des parois réhabilitées et évaluation des risques de pathologies à l'aide du logiciel WUFI.

### 2.2.1. Impact de la rénovation sur le confort visuel

Le présent chapitre présente les simulations numériques effectuées relatives au confort visuel. Des études expérimentales et numériques ont été menées par l'INES. L'étude expérimentale a été réalisée sur deux cellules PASSYS orientées Nord-Ouest (orientation jugée la plus défavorable du point de vue de la structure bois en raison des précipitations reçues) sans et avec mise en œuvre de la solution de rénovation.

L'impact de la solution de rénovation par l'extérieur a pu être analysé par le calcul du Facteur de Lumière du Jour (FLJ) et le calcul d'éclairement annuel cumulé.

De nombreuses simulations de FLJ ont été réalisées sous DAYSIM : au sol et à hauteur du plan de travail ; pour les orientations Nord-est et Sud. Ces simulations confirment que l'orientation n'a pas d'impact sur les valeurs de FLJ. La position des capteurs a en revanche son importance sur les résultats obtenus : dans la cellule rénovée, le FLJ décroît de 12% de sa valeur entre la hauteur du plan de travail et le sol.



**Figure 7 : Facteur de Lumière du Jour au niveau du sol pour les cellules PASSYS**

**A : Non renovée – B : renovée**

Les simulations réalisées sur les cellules avant et après rénovation montrent un fort impact de la solution de rénovation Effinov'Bois sur le confort visuel dans l'espace intérieur. La valeur maximale de FLJ décroît de 3% à 1% avec la mise en œuvre de la solution de rénovation. Afin de pallier cette perte en éclairage naturel, des dispositifs tels que des étagères à lumière ou des réflecteurs pourront être mis en place ; pouvant même garantir des niveaux d'éclairage plus élevé qu'avant rénovation.

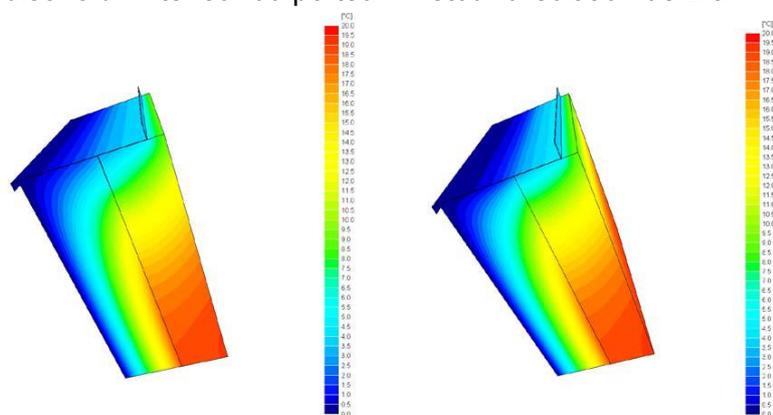
### 2.2.2. Calculs de transmission thermique surfacique et de pont thermique

Les calculs des coefficients de transmission thermique surfacique s'effectuent par simulation numérique aux différences finies en 3D à l'aide du logiciel TRISCO qui permet une modélisation très fine des échanges de chaleur au sein de la paroi. Cette approche permet de tenir compte des éventuels ponts thermiques intégrés présents dans les solutions développées.

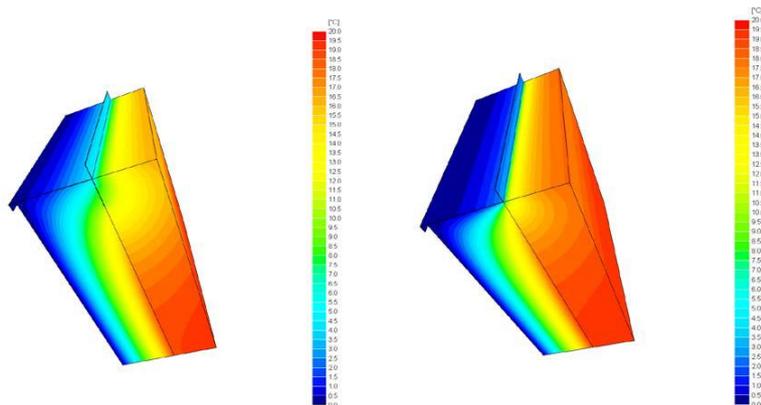
Les ponts thermiques de liaison sont également évalués par simulation numérique aux différences finies. Les principaux ponts thermiques de liaison se situent au niveau des liaisons entre les façades et les planchers, au niveau des encadrements de baie, au niveau des angles ou des jonctions des façades avec les refends. Le mode d'accrochage des solutions sur la paroi support pourra conditionner l'importance de la valeur des ponts thermiques de liaison.

En isolation par l'extérieur, un des enjeux est de traiter le pont thermique du a l'intégration des menuiseries, un des objectifs du programme est donc de réfléchir à une intégration des menuiseries qui minimiserait ce phénomène. Voici quelques résultats de simulation pour le calcul des ponts thermiques au niveau des encadrements de baie :

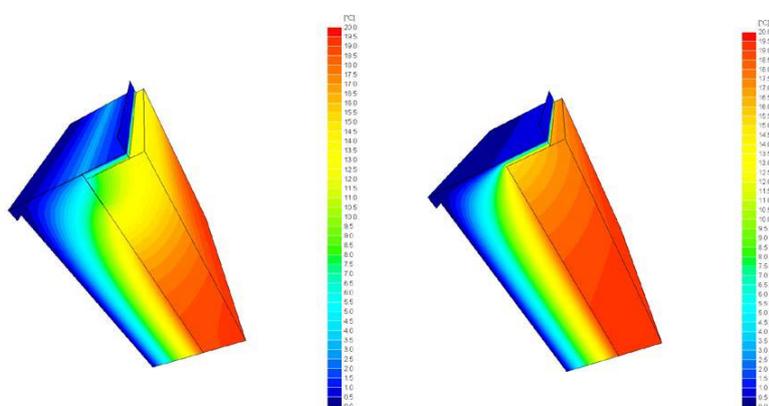
- Baie 1 – Menuiserie à l'intérieur du porteur.
- Baie 2 – Menuiserie à l'extérieur du porteur.
- Baie 3 – Menuiserie à l'intérieur du porteur + retour d'isolation de 2 cm.



**Figure 8 : Menuiserie à l'intérieur du porteur (avec et sans cadre métallique)**



**Figure 9 : Menuiserie à l'extérieur du porteur (avec et sans cadre métallique)**



**Figure 10 : Menuiserie à l'intérieur du porteur avec retour (avec et sans cadre métallique)**

	Baie 1		Baie 2		Baie 3	
	Avec cadre	Sans cadre	Avec cadre	Sans cadre	Avec cadre	Sans cadre
$\Psi$ (W/m.K)	1.21	1.14	0.87	0.45	0.76	0.60

### 2.2.3. Comportement hygrothermique des parois réhabilitées

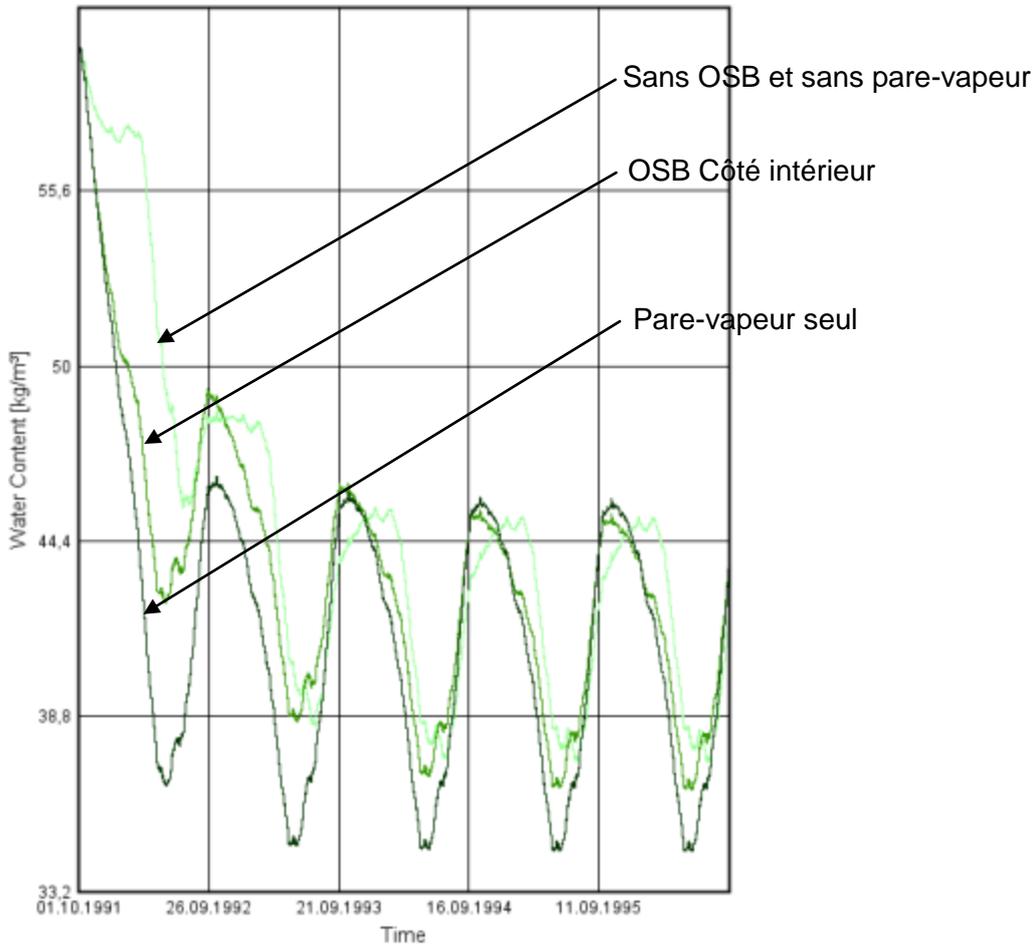
Le comportement hygrothermique de la paroi suite à sa réhabilitation peut alors être amélioré ou dégradé. Il s'agira donc d'évaluer ces risques pour différentes solutions envisagées, d'évaluer la pertinence du choix de tel ou tel matériau et de voir l'impact sur les performances thermiques de la présence d'eau dans les matériaux. A l'aide du logiciel WUFI, le laboratoire TREFLE va mener une étude préliminaire afin de tester l'influence de divers paramètres sur les risques liés à l'humidité :

- Présence ou non du pare-vapeur ;
- Présence de l'OSB cote intérieur ou extérieur ;
- Présence d'une lame d'air (non ventilée) entre la paroi « épave » et la solution rapportée ;
- Etude de 3 types d'isolant (laine de verre, laine de roche et fibre de bois).

Cette « pré-étude » va nous permettre de définir correctement la solution qui sera testée au niveau des cellules PASSYS sur le site de l'INES.

Ci-dessous un exemple de résultat obtenu dans cette sous-tâche, nous présentons ici la teneur en eau dans les montants en bois de la solution pour une configuration type « Bardage ventilé avec pare vapeur, OSB côté intérieur et sans vide technique »

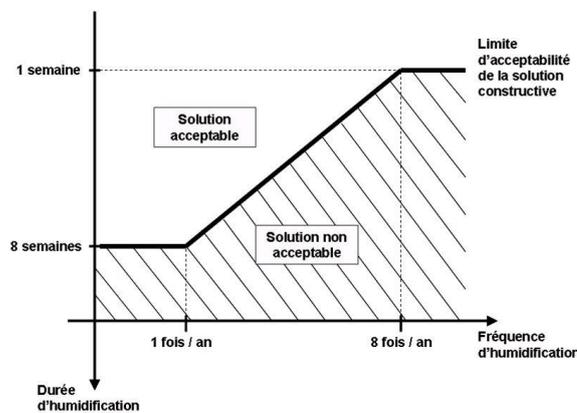
**Quantité d'eau montant bois**



**Figure 11 : Teneur en eau dans les montants**

L'interprétation des simulations sous WUFI se fera à l'aide d'un modèle crée lors de l'étude FCBA/CSTB, il consiste à vérifier le % d'humidité dans le bois, en nombre de jours/semaine d'exposition à une ambiance extrême. La paroi est ainsi jugée « recevable » ou « non recevable ».

Périodes d'humidification supérieures à 23%



**Figure 12 : Représentation schématique de l'acceptabilité de la paroi vis-à-vis de l'humidité**

Références : Livrables T3.1\_Simulation des parois réhabilitées et T3.2\_Impact sur le confort des solutions retenues.

Les résultats des différentes simulations, l'analyse économique réalisée par OSSABOIS ainsi que les divers échanges entre experts nous ont permis d'orienter le choix de la composition de notre première solution, nommée « HPT » (Haute Performance Thermique), celle-ci sera testée sur le site de l'INES sur une année entière.

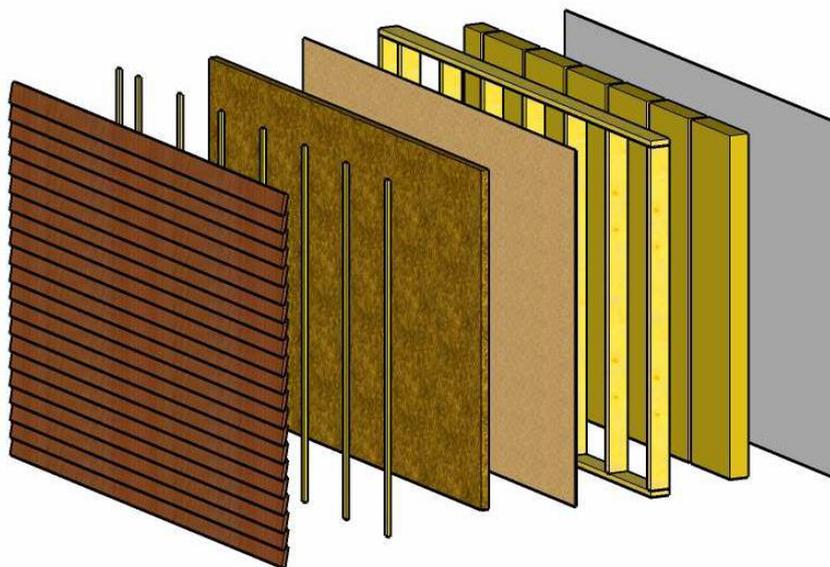


Figure 13 : Vue éclatée de la première solution retenue « HPT »

Composition :

- Bardage ventilé sur liteaux
- Pare-pluie rigide fibre de bois [ $0,034 \leq \lambda \leq 0,040$  W/(m.K)]
- Panneau à base de bois [ $Sd \leq 3m$ ]
- Ossature bois 145mm - Remplissage en laine minérale semi-rigide [ $0,030 \leq \lambda \leq 0,040$  W/(m.K)]
- Film pare-vapeur [ $Sd \geq 18m$ ]

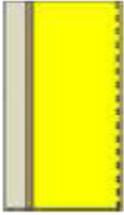
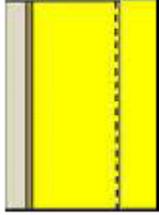
OU

- Bardage ventilé sur liteaux
- Film pare-pluie [ $Sd \leq 0,18m$ ]
- Contre-ossature bois - Remplissage en laine minérale semi-rigide [ $0,030 \leq \lambda \leq 0,040$  W/(m.K)]
- Panneau à base de bois [ $Sd \leq 3m$ ]
- Ossature bois 145mm - Remplissage en laine minérale semi-rigide [ $0,030 \leq \lambda \leq 0,040$  W/(m.K)]
- Film pare-vapeur [ $Sd \geq 18m$ ]

En se basant sur cette première solution, nous avons retenu 3 autres configurations présentant chacune un avantage :

- Solution « low-cost », diminution du coût de la paroi.
- Solution « THPT » (Très Haute Performance Thermique), présence de sur-isolation intérieure favorisant la reprise des possibles imperfections de la façade existante.
- Solution « tout bois », mise en valeur du matériau bois avec présence de fibre de bois à la place de la laine minérale entre les montants.

La performance thermique (Up) en partie courante ainsi que le coût par m<sup>2</sup> des exemples des 4 solutions présentées précédemment sont donnés dans le tableau ci-dessous :

	 <b>Low cost</b>	 <b>HPT</b>	 <b>THPT</b>	 <b>Tout bois</b>
	Bardage 18 mm posé sur liteaux 25*48 mm – Pare-pluie type film – OSB 12 mm - Ossature de 145 mm remplissage en laine de verre + pare-vapeur	Bardage 18 mm posé sur liteaux 25*48 mm + Sur isolation extérieure pare-pluie en fibre de bois 35 mm + OSB 12 mm + Ossature de 145 mm remplissage en laine de verre + pare-vapeur.	Bardage 18 mm posé sur liteaux 25*48 mm + Sur isolation extérieure pare-pluie en fibre de bois 35 mm + OSB 12 mm + Ossature de 145 mm remplissage en laine de verre + pare-vapeur + Sur isolation intérieure 80 mm	Bardage 18 mm posé sur liteaux 25*48 mm – Pare-pluie type film – Contre ossature de 60 mm remplissage en fibre de bois - OSB 12 mm - Ossature de 145 mm remplissage en fibre de bois + pare-vapeur
	Up W/(m.K)	Up W/(m.K)	Up W/(m.K)	Up W/(m.K)
-	0.243	0.176	0.131	0.186
+	0.262	0.215	0.151	0.215

### 3. Evaluation expérimentale des performances des systèmes constructifs réhabilités

L'objectif de la tâche 4 dans le cadre du projet Effinov'Bois est de valider les systèmes constructifs proposés à l'aide de dispositifs expérimentaux afin de consolider et de valider les résultats obtenus par modélisation et calculs. Le CEA INES est responsable de cette tâche, où les partenaires impliqués sont le FCBA pour les tests effectués sur le site de Bordeaux et OSSABOIS pour certaines maquettes construites. Les protocoles de mesures ainsi que certains résultats sont présentés dans ce chapitre.

#### 3.1. Essais INES

Cette partie traite des résultats des tests expérimentaux réalisés sur une façade de rénovation en ossature bois mise en place sur le site de l'INES au Bourget du Lac.

Les essais qui se sont déroulés à l'INES, ont été réalisés sur les cellules PASSYS 1 et 2 situées sur la plateforme d'expérimentation INCAS. Celles-ci permettent de tester une façade, en

contrôlant l'ambiance intérieure en température et hygrométrie, et en les exposants aux conditions climatiques du site. Ces cellules sont mobiles et autorisent de ce fait l'orientation de la façade de tests. Les cellules ont été orientées dans la quasi-totalité des essais au Nord/Nord-est qui représente au Bourget du Lac l'orientation la plus défavorable des points de vue exposition à la pluie et gains solaires.



**Figure 14 : Façade épave à gauche sur cellule PASSYS 1 et façades épave + rénovation à droite sur cellule PASSYS 2**

Selon les conditions climatiques nous avons distingué 3 périodes d'études :

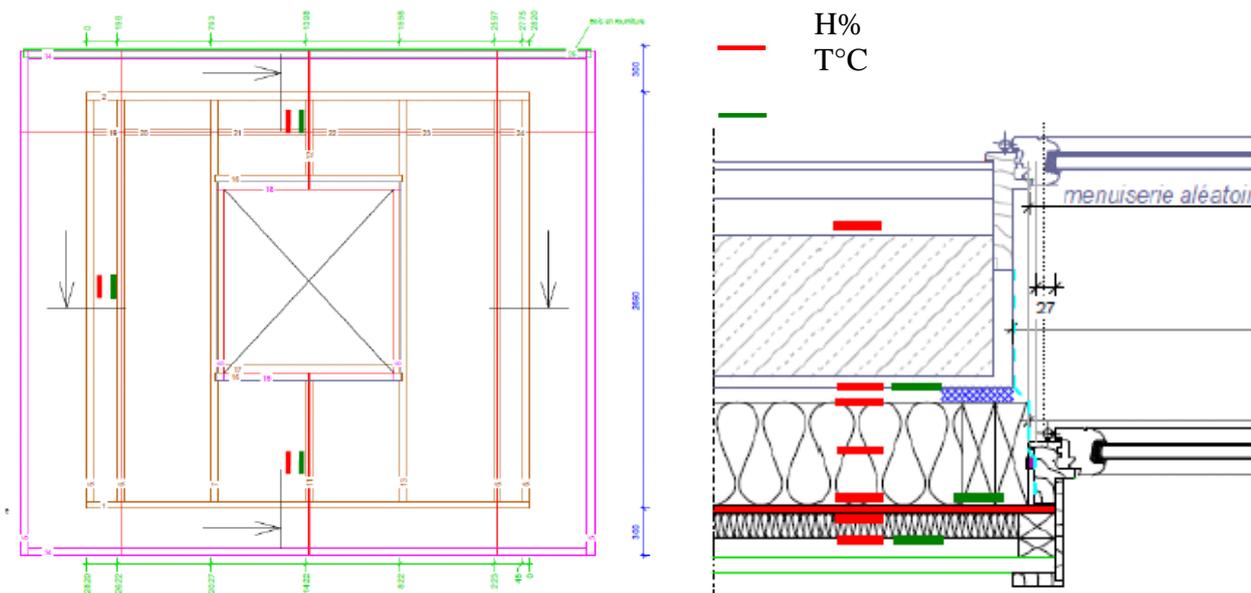
- mi saison
- hiver
- été.

Pour pouvoir étudier les mêmes caractéristiques lors de ces trois périodes, nous avons adapté différents scénarios en fonction des valeurs moyennes de la saison.

Différents capteurs et enregistreurs ont été installés aux différentes interfaces des parois (température, humidité...) ou au sein de l'ambiance intérieure (températures sèche, de rayonnement ou de surfaces, humidité, vitesse de l'air, consommation électrique...).



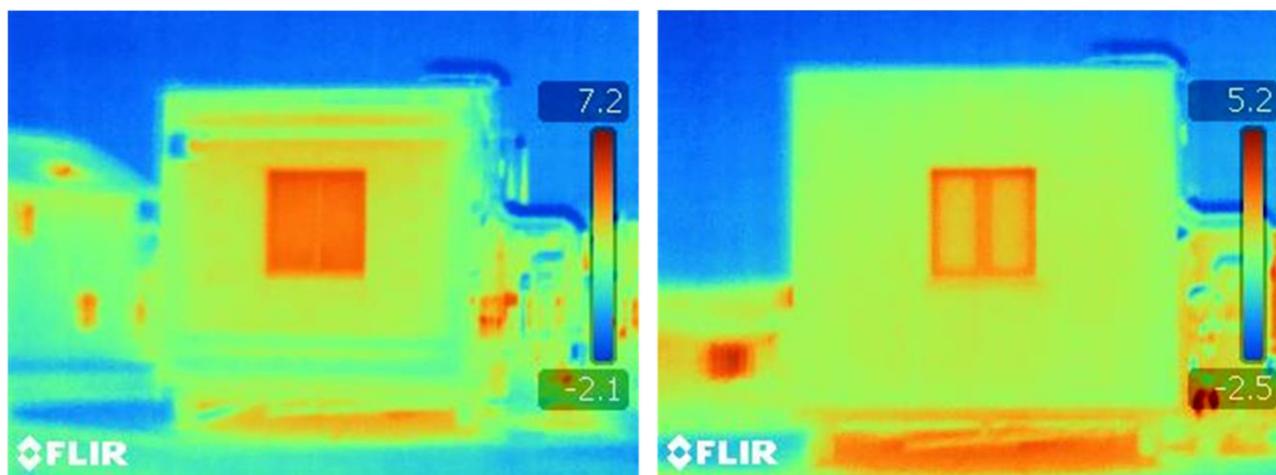
**Figure 15 : Instrumentation à l'intérieure des cellules PASSYS**



**Figure 16 : Emplacement de l'instrumentation dans la structure rénovée**

Etant donné la multitude de mesures réalisées, la durée ainsi que le nombre de scénarios retenus, nous présentons dans la suite de cette partie quelques résultats marquants de ces essais.

- Mesure par thermographie infrarouge



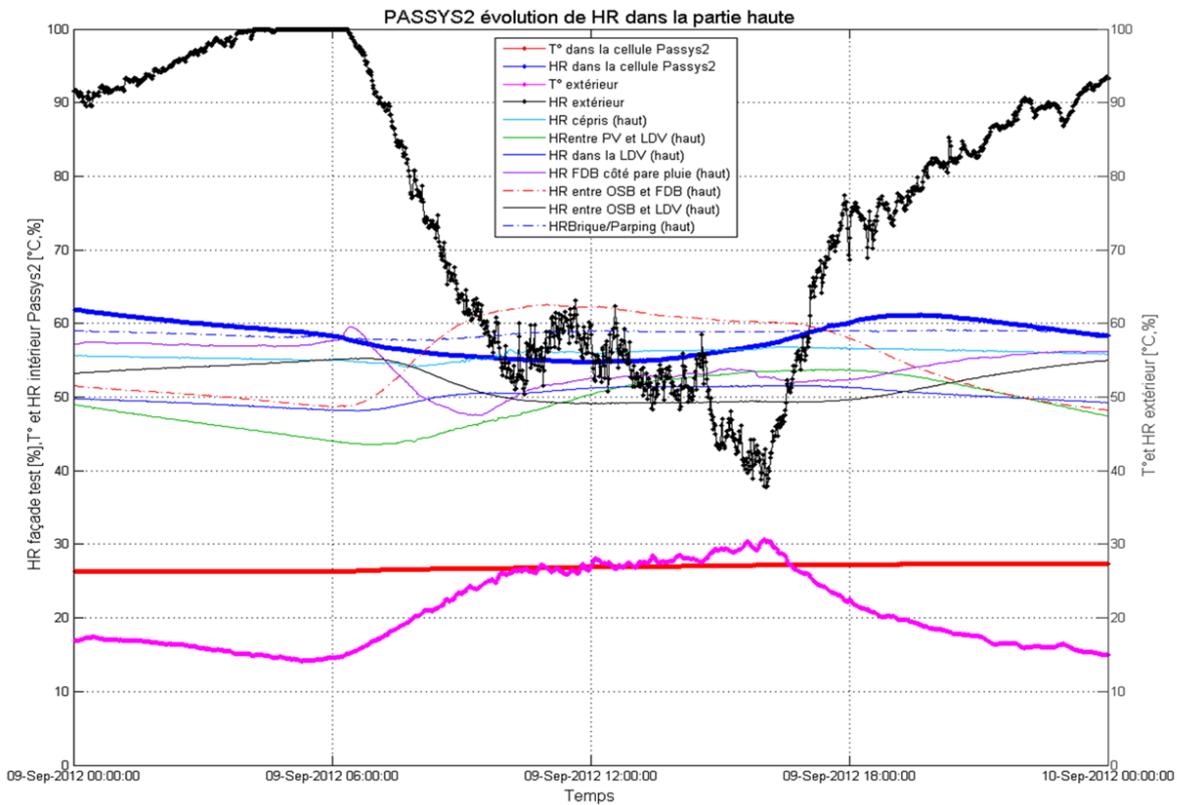
**Figure 17 : Résultats des mesures IR sur façade épave à gauche et façade rénovée à droite**

La caméra IR nous a permis de voir qu'il y a une vraie différence entre les deux cellules :

- Avant rénovation, la paroi représente une surface de déperdition conséquente ;
- Après la rénovation, il n'y a que la fenêtre où se localisent les déperditions, et même là celles-ci sont moins importantes que dans le cas de la façade épave, car le double vitrage est de meilleure qualité (faible émissivité avec gaz argon).

- Scénario en « évolution libre »

Ici aucune consigne de température, d'humidité et pas de ventilation mécanique à l'intérieur des cellules.

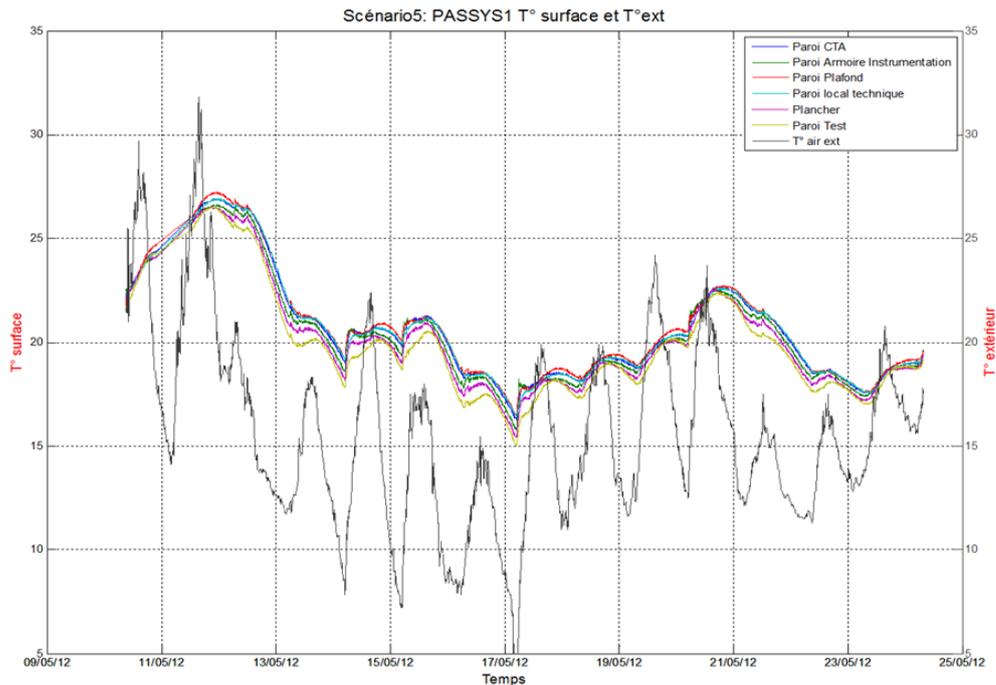


**Figure 18 : Evolution des températures et humidités au sein des parois – Scénario 9**

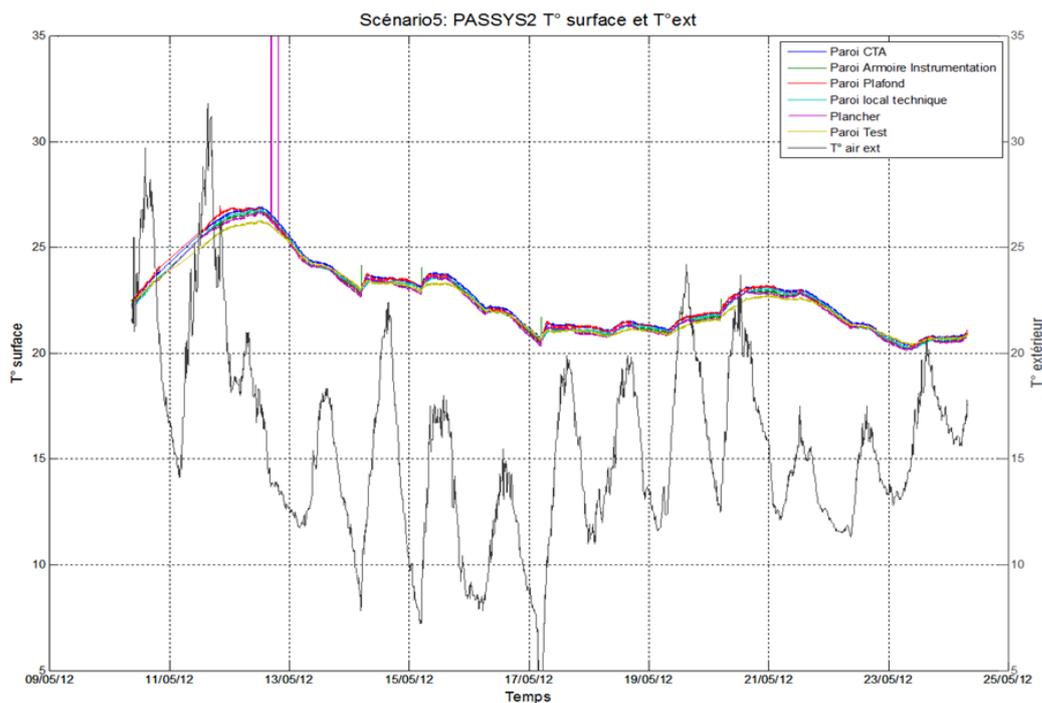
Nous faisons un focus sur une journée pour mieux observer le phénomène de déphasage de l'humidité relative de part et d'autre de l'OSB, montrant que ce dernier joue bien le rôle de frein vapeur. Ainsi l'humidité sur la surface de l'OSB côté fibre de bois (courbe noire) suit bien l'humidité extérieure (courbe noire épaisse), et l'humidité sur la surface de l'OSB côté laine de verre (courbe rouge pointillée), donc derrière l'OSB, suit la température extérieure (courbe rose) mais plus l'humidité, ce qui prouve que la vapeur d'eau ne passe plus.

- Scénario de mi-saison, avec ventilation forcée

Nous présentons ici les mesures réalisées durant le mois de mai 2012, en température et humidité libre et avec une ventilation mécanique avec un taux de renouvellement de 0,6 vol/h.



**Figure 19 : Graphe températures d'air et surfaces des parois intérieures cellule Passys 1**



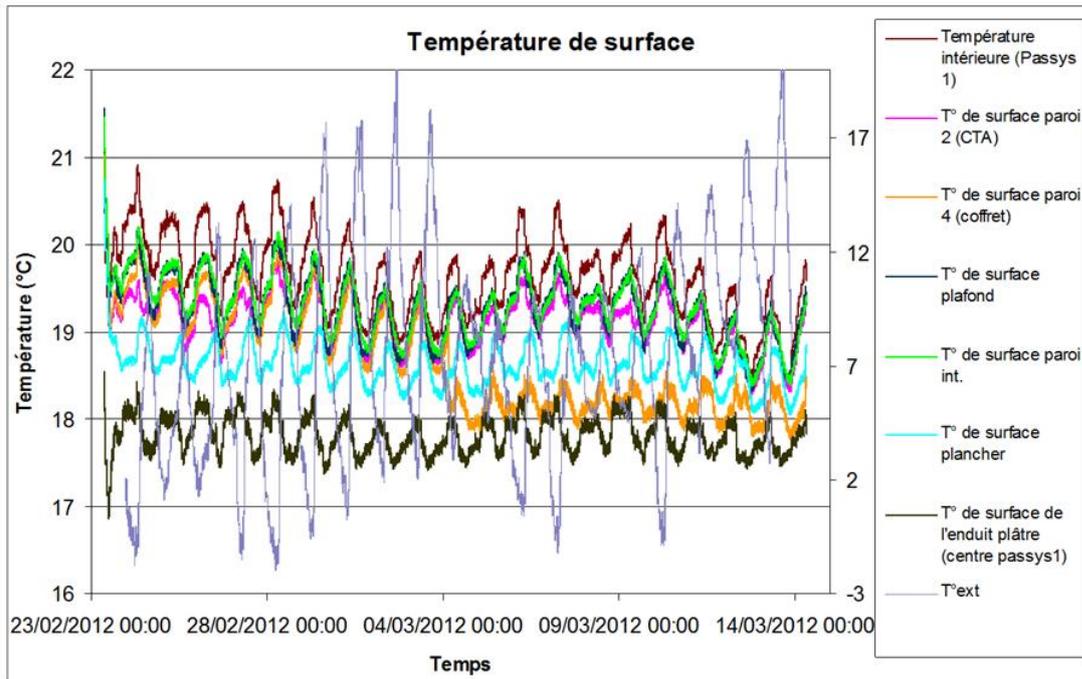
**Figure 20 : Graphe températures d'air et surfaces des parois intérieures cellule Passys 2**

Sur la figure 19 dans le cadre du scénario 5, nous observons un écart significatif des températures de surface de près de 2°C. La température minimum de la paroi épave est de 15°C, ce qui va renforcer la sensation de paroi froide par rayonnement.

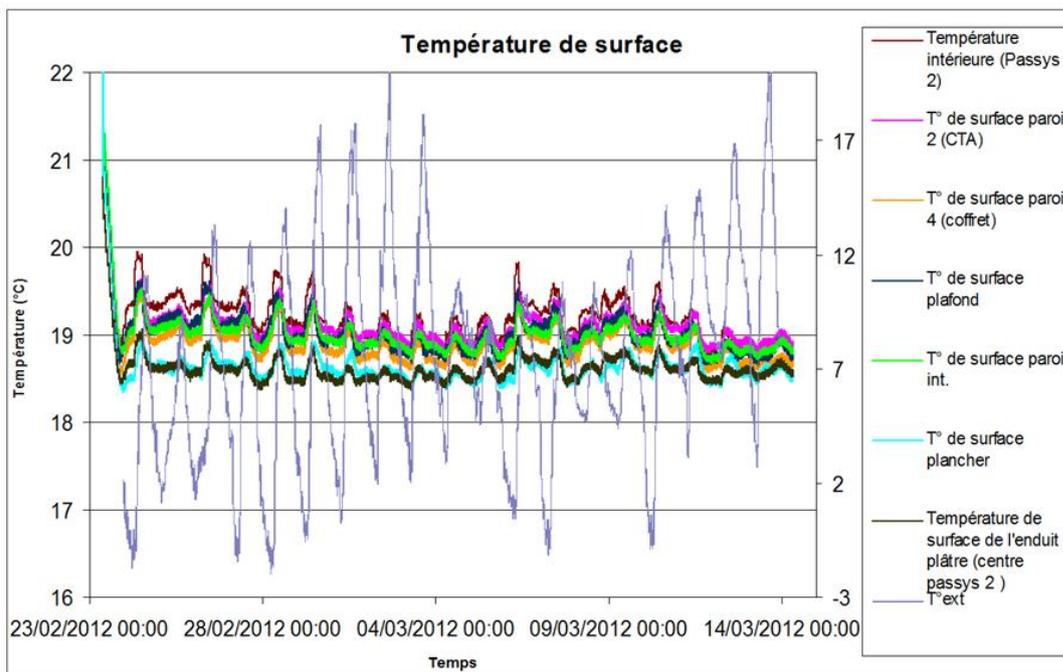
Sur la figure 20, les courbes sont beaucoup plus proches amenant forcément un meilleur confort thermique. La courbe de la paroi rénovée est plus douce, montrant le phénomène d'amortissement des températures par l'isolation. Une régulation très fine et homogène des températures intérieures contribue à l'obtention d'un meilleur confort.

- Scénario en saison hivernale, avec consigne de température et avec ventilation forcée

Nous présentons ici les mesures réalisées durant les mois de février et mars 2012, la température de consigne est fixée à 20°C, sans régulation d'humidité et avec une ventilation mécanique avec un taux de renouvellement de 0,6 vol/h.



**Figure 21 : Graphe températures d'air et de surfaces des parois intérieures cellule Passys 1**



**Figure 22 : Graphe températures d'air et de surfaces des parois intérieures cellule Passys 2**

Sur la figure 21 dans le cadre du scénario 2, nous observons un écart significatif des températures de surface caractéristique du phénomène de paroi froide. Sur la figure 22, les courbes présentent beaucoup moins d'amplitude.

L'isolation de la façade de rénovation avec sa nouvelle fenêtre plus performante thermiquement, amène un réel confort thermique tant en termes de températures que d'humidité. Ce confort se vérifie en hiver, en supprimant le phénomène de paroi froide.

- Mesure des consommations électriques

Résultat des deltas de consommation l'hiver entre les 2 cellules :

- Cellule 1/Cellule 2 : scénario 1 + 121,5 kWh soit 49% de plus sur une durée d'environ 5 semaines
- Cellule 1/Cellule 2 : scénario 3 + 175,4 kWh soit 42% de plus sur une durée d'environ 5 semaines

La façade rénovée avec la solution « HPT » amène une réelle économie de chauffage, tant en intersaison qu'en période hivernale. Les consommations peuvent rapidement être divisées au minimum par deux après rénovation, suivant les caractéristiques de la paroi existante.

D'un point de vue des mesures, les résultats nous montrent les tendances suivantes pour la façade « HPT » du projet Effinov'Bois :

- L'évolution des températures et de l'humidité est cohérente, en prenant en compte le fait que l'OSB fonctionne comme un frein vapeur. Nous constatons un amortissement régulier des températures et de l'humidité relative en partant de l'extérieur, au fur et à mesure que l'on s'approche de l'intérieur.
- L'isolation de la façade de rénovation avec sa nouvelle fenêtre plus performante thermiquement, amène un réel confort thermique tant en termes de températures que d'humidité. Ce confort se vérifie en hiver, en supprimant le phénomène de paroi froide. Et il se confirme également en été, où le couple température/humidité est meilleur que pour la façade épave.
- En été, il est impératif de protéger les ouvertures des façades par des protections solaires, que les rayonnements du soleil soient directs ou diffus (apportés par l'albédo ou/et par la réflexion environnante), car l'isolation de la façade stocke les calories à l'intérieur.
- La position de l'OSB, suivant les conditions intérieures prévisibles et le lieu de la rénovation, est à étudier vis-à-vis de son rôle de frein vapeur constaté lors des différents scénarios. Ainsi sa position peut amener un risque au niveau salubrité du bois, suivant les conditions internes (fortes hygrométrie pour certains locaux) et météorologiques du site. La capacité de sorption / désorption de l'OSB peut se voir à l'échelle des saisons, mais beaucoup plus difficilement à l'échelle hebdomadaire, et encore plus à l'échelle journalière.
- Le pare-vapeur est essentiel dans son rôle de limitation de la migration de l'humidité dans la paroi. Les différents taux d'humidité constatés aux différentes interfaces de la paroi rénovée (de 40 à 75% HR), restent tout à fait convenables pour un usage du bois en classe d'emploi 2, n'entraînant donc aucun risque au niveau salubrité.
- La façade rénovée amène une réelle économie de chauffage, tant en intersaison qu'en période hivernale. Les consommations peuvent rapidement être divisées au minimum par deux après rénovation, suivant les caractéristiques de la paroi existante.
- La façade « HPT » permet d'obtenir une régulation très fine et homogène des températures intérieures, contribuant de ce fait à un meilleur confort.
- Il est essentiel de bien vérifier la mise en œuvre de la ventilation de la lame d'air derrière le bardage, en particulier aux parties basse et haute, de manière à éviter les surchauffes de celle-ci en été et par conséquent une éventuelle dégradation du confort. Les mesures effectuées montrent que l'effet du rayonnement solaire direct et diffus est considérable sur la température de la lame d'air.

## 3.2. Essais FCBA

Nous présentons dans cette partie les différents essais réalisés dans le laboratoire physique de FCBA sur le site de Bordeaux.

### 3.2.1. Essais hygrothermiques

L'objectif de ces essais est de caractériser la performance hygrothermique de différentes typologies de parois. Ce type d'essai permet d'étudier le risque de pathologie due à l'ajout d'une structure sur l'existant ; et qui pourrait notamment dégrader la performance énergétique du bâtiment à réhabiliter.



**Figure 23 : Vue extérieure sur deux échantillons de mur**

Les essais sur site de FCBA viennent compléter les essais réalisés sur une année entière dans les cellules Passys du CEA-INES. Nous avons utilisé une plateforme expérimentale composée d'une double cellule climatique pour effectuer une étude comparative sur deux types de mur extérieur d'un bâtiment. Nous avons ici la possibilité de tester deux types de parois existantes avec les différentes solutions que nous avons retenues. La régulation des ambiances nous permet la mesure des propriétés de transmission thermique et hygroscopique en régime stationnaire, nous autorisant ainsi à tester multiples configurations. Un scénario d'ambiance dure 3 à 10 jours pour obtenir un régime stationnaire.

Nous présentons ci-dessous les résultats de mesure de résistance thermique pour différentes configurations de mur existant et solutions de rénovations.

*Low cost avec parpaing doublé en brique*

	Valeur mesurée	Valeur calculée
Flux au sein du mur « épave » [W/m <sup>2</sup> ]	17.84	15.78
R <sub>épave</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	0.95	1.08
Flux au sein du mur rénové [W/m <sup>2</sup> ]	2.28	2.6
R <sub>rénové</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	7.46	6.54

**Tableau 3 : Comparaison de flux et résistance thermique – Parpaing + « Low cost »**

« HPT » avec parpaing doublé en brique

	Valeur mesurée	Valeur calculée
Flux au sein du mur « épave » [W/m <sup>2</sup> ]	18.3	15.78
R <sub>épave</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	0.84	1.09
Flux au sein du mur rénové [W/m <sup>2</sup> ]	2.30	2.29
R <sub>rénové</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	8.33	7.84

**Tableau 4 : Comparaison de flux et résistance thermique - Parpaing + « HPT »**

Solution « tout bois » sur mur en béton

	Valeur mesurée	Valeur calculée
Flux au sein du mur « épave » [W/m <sup>2</sup> ]	19.32	19.88
R <sub>épave</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	1.12	1.24
Flux au sein du mur rénové [W/m <sup>2</sup> ]	2.34	2.39
R <sub>rénové</sub> [m <sup>2</sup> .K/W]	7.38	7.52

**Tableau 5 : Comparaison des flux et résistance thermique – Béton + « Tout bois »**

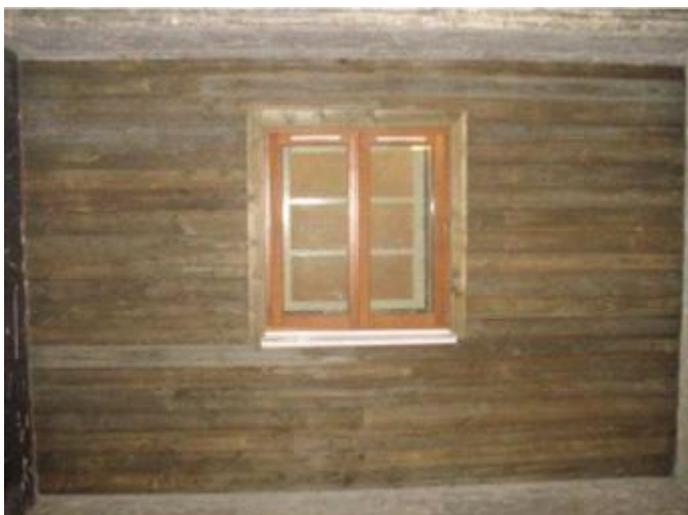
Si l'on compare les mesures avec les valeurs obtenues par calcul, nous observons des différences non négligeables. Cette différence peut s'expliquer par la présence d'humidité assez importante dans le parpaing et le crépi pour le mur rénové. Les valeurs théoriques ne prennent pas en compte les charges et décharges en humidité au sein des murs, cependant il existe un couplage entre transferts de chaleur et transferts de vapeur, l'impact de l'humidité sur le flux de chaleur est alors pris en compte lors des mesures mais pas dans le calcul.

En comparant les différents échantillons, nous avons une idée des gains en performance thermique que nous obtenons par ce type de rénovation. Ces essais nous permettent de conclure que l'on peut améliorer l'isolation en multipliant par 7 la résistance thermique du mur existant.

Nous avons pu tester trois types de rénovation : « low cost », « HPT » et « tout bois ». Nous avons des comportements assez proches entre les solutions « low cost » et « HPT ». Nous pourrions alors dire que « low cost » suffit pour atteindre les objectifs fixés en début de projet ( $U_p < 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ). La solution tout bois permet aussi d'atteindre cet objectif. La différence significative de cette solution est le comportement en été. Malgré l'inversion de flux, seule la partie en contact avec le pare-vapeur se retrouve impactée par l'humidité de la paroi. C'est un caractère indispensable à considérer pour éviter la dégradation des composants de la rénovation. Il est nécessaire de connaître plus finement le comportement des isolants vis-à-vis des échanges de vapeur. Ce qui conduit à étudier plus finement et avec une durée plus longue les différents matériaux, soit par expérimentation, soit en effectuant des simulations sur plusieurs années avec des courbes de sorptions des matériaux (paramètres indispensables dans les logiciels de simulation hygroscopique) qui doivent être les plus proches de la réalité.

### 3.2.2. Essais acoustiques

Nous avons réalisé plusieurs mesures d'indice d'affaiblissement sur des échantillons de 3m\*2,2m. Il a été décidé de se focaliser sur la menuiserie, en étudiant la dépose ou non de la fenêtre dans l'existant, la présence de deux fenêtres ou encore en jouant sur les débits des entrées d'air des menuiseries.



**Figure 24 : Vue extérieure de la façade rénoverée en laboratoire acoustique**

Ci-dessous, un récapitulatif des configurations testées avec les résultats obtenus :

Config 1 Mur épave + fenêtre simple vitrage	35 dB
Config 2 Mur épave + fenêtre simple vitrage + Solution Bois sans nouvelle fenêtre	36 dB
Config 3 Mur épave + fenêtre simple vitrage + Solution Bois + nouvelle fenêtre (pas d'entrée d'air)	55 dB
Config 4 Mur épave + fenêtre simple vitrage + Solution Bois + nouvelle fenêtre (entrée d'air 15m <sup>3</sup> /h)	53 dB
Config 5 Mur épave sans fenêtre simple vitrage + Solution Bois + nouvelle fenêtre (pas d'entrée d'air)	39 dB
Config 6 Mur épave sans fenêtre simple vitrage + Solution Bois + nouvelle fenêtre (entrée d'air 15m <sup>3</sup> /h)	33 dB

**Tableau 6 : Indices d'affaiblissement acoustiques mesurés pour différentes configurations testées**

Dans un premier temps, on constate que l'ajout du module bois permet un gain de 1 dB (config 1 et 2). Le fait de rapporter une seconde peau sans ajout de nouvelle fenêtre n'améliore pas notablement l'isolement acoustique de la paroi, on peut donc penser que la quasi-totalité du bruit passera par la menuiserie, véritable point faible de l'ensemble.

L'ajout d'une nouvelle fenêtre va considérablement améliorer la performance acoustique de l'ensemble, on observe un gain de 19 dB sur l'indice global R(A)tr. En effet, avec la mise en place de la menuiserie dans le module bois, la configuration testée se rapproche alors d'une configuration type « double paroi », permettant d'obtenir d'excellentes performances acoustiques. Enfin, on observe un impact non négligeable de l'entrée d'air de la menuiserie sur la performance acoustique de l'ensemble (diminution de 5 dB sur la R(A)tr avec la présence d'une entrée d'air).

### 3.2.3. Essais de perméabilité à l'air

Le protocole mis en place dans le cadre du projet consiste à mener les essais dans un premier temps sur une paroi "épave" (élément de façade incluant une menuiserie extérieure) afin de créer une référence de base. Ensuite la façade rapportée sera mise en œuvre sur ce mur épave (avec une nouvelle menuiserie) et liaisonnée de façon représentative de la réalité de chantier.

	Valeur calculée à 4 Pa à partir de l'équation de débit [ $\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$ ]
Mur « épave » (pressions positives)	2.53
Mur « épave » (pressions négatives)	3.43
Mur rénové (pression positives)	0.35
Gain par rapport au mur « épave »	-86%
Mur rénové (pressions négatives)	0.28
Gain par rapport au mur « épave »	-92%

**Tableau 7 : Résultats des mesures de perméabilité à l'air**

L'amélioration de la perméabilité à l'air après rénovation est spectaculaire. Pour le mur rénové l'équation de débit déterminée suite aux essais permet de conclure sur la conformité à l'exigence de la RT2012 pour les bâtiments collectifs correspondant à  $1 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ . Ce gain est en partie dû à la pose d'une fenêtre qui incorpore des joints entre ouvrant et dormant contrairement à la première fenêtre, le doublage du mur participe également au gain mais il est impossible de déterminer la part correspondant au mur en partie courante ou à la fenêtre. On peut conclure que sur le plan de la perméabilité à l'air, la rénovation réalisée sur le corps d'épreuve testé permet d'atteindre les performances actuelles souhaitée.

*Références : Livrables T4.1\_Description des moyens d'essais et protocole de test, T4.2\_Rapport et résultats d'essai INES et T4.3\_Rapport et résultats d'essai FCBA*

## 4. Evaluation énergétique et environnementale de la rénovation à l'échelle du bâtiment

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse de la démarche et des résultats obtenus dans les tâches 5 et 6 du projet : « Evaluation environnementale » et « Evaluation et validation du gain énergétique par simulation sur cas concrets ». Pour rappel, l'objectif principal est de comparer les impacts liés au chantier de réhabilitation ainsi que les consommations d'énergie du bâtiment rénové par rapport à la consommation d'énergie du bâtiment non rénové.

La décision est prise de ne travailler que sur le bâtiment B18 de l'université de Bordeaux (voir chapitre 2) dans la phase simulation à l'échelle bâtiment. Cependant, une « modularité » pourra être entreprise sur le bâtiment B18 afin d'en modifier son usage (changer les scénarios d'occupation, transformer l'architecture interne, modifier les apports internes...) et ainsi d'étudier plusieurs types de bâtiment (collectif et bureau). Il est possible d'envisager jusqu'à 9 variantes.

### 4.1. Evaluation environnementale

La tâche 5 du projet EFFINOV'Bois consiste à réaliser l'évaluation environnementale des solutions développées afin de mesurer et démontrer les progrès environnementaux réalisés. Pour cela, les impacts liés au chantier de réhabilitation ainsi qu'aux consommations d'énergie de l'utilisation du bâtiment rénové sont comparés aux impacts de la consommation d'énergie de l'utilisation du

bâtiment non rénové. Cette évaluation a été menée de façon rigoureuse, quantitative, et globale par une approche de type Analyse de Cycle de Vie.

Afin de comparer les impacts des solutions de rénovation développées à ceux du bâtiment non rénové, 27 modélisations ont donc été réalisées :

B18 avant rénovation	ERP	Tertiaire	Logement
B18 après rénovation Accroche façade	ERP « low cost »	Tertiaire « low cost »	Logement « low cost »
	ERP « HPT »	Tertiaire « HPT »	Logement « HPT »
	ERP « THPT »	Tertiaire « THPT »	Logement « THPT »
	ERP « Tout bois »	Tertiaire « Tout bois »	Logement « Tout bois »
B18 après rénovation Accroche par appui au sol	ERP « low cost »	Tertiaire « low cost »	Logement « low cost »
	ERP « HPT »	Tertiaire « HPT »	Logement « HPT »
	ERP « THPT »	Tertiaire « THPT »	Logement « THPT »
	ERP « Tout bois »	Tertiaire « Tout bois »	Logement « Tout bois »

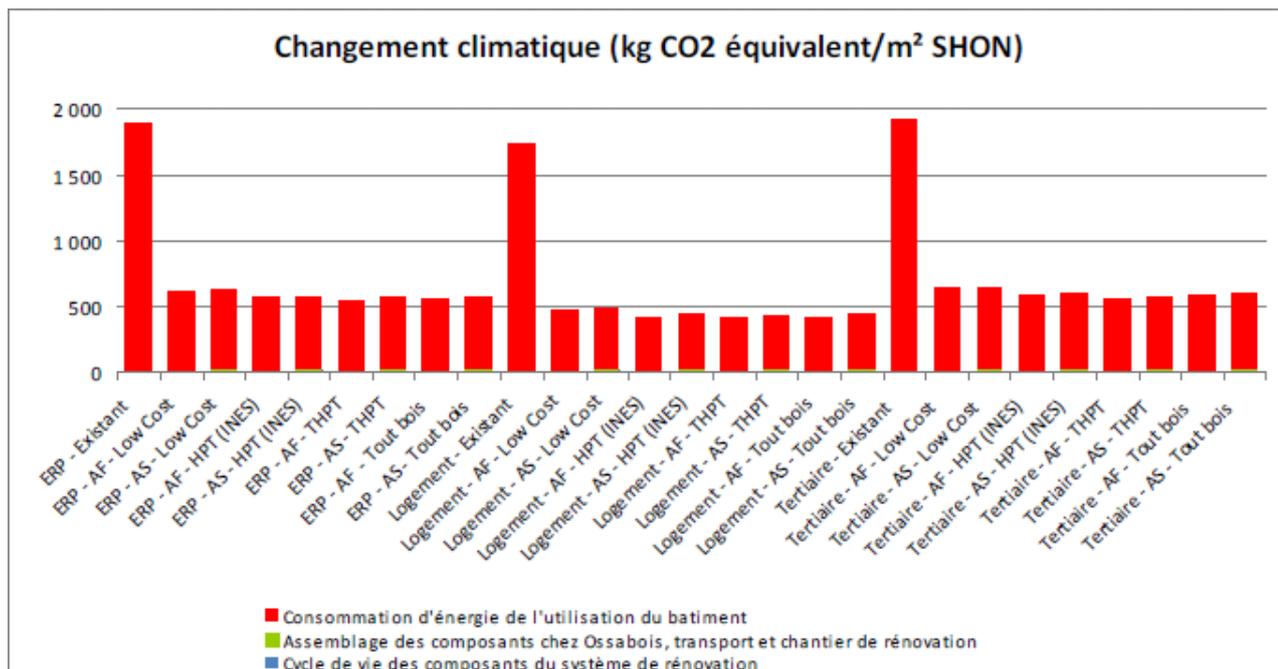
**Tableau 8 : Configurations de bâtiments modélisés**

Ces modélisations ont été réalisées sous le logiciel Elodie développé par le CSTB. Ce logiciel est relié à la base de données française sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des matériaux et des produits de construction INIES. La base INIES met à disposition des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction fournies par les syndicats professionnels ou les fabricants. Les informations environnementales renseignées sont basées sur la réalisation d'une ACV couvrant le cycle de vie complet du produit de construction, découpé en cinq étapes : sa production, son transport, sa mise en œuvre, sa vie en œuvre et sa fin de vie.

Les différentes données utilisées pour la modélisation ACV proviennent :

- De l'entreprise OSSABOIS pour la composition et le dimensionnement des murs manteaux, des jonctions entre murs, des jonctions murs sol (appui su sol), des menuiseries, l'assemblage des composants, le transport jusqu'au chantier et la consommation de la grue du chantier ;
- De Li2A pour la composition et le dimensionnement de l'isolation du plancher et de la toiture ;
- Du laboratoire TREFLE pour la consommation d'énergie de l'utilisation du bâtiment.

Dans le cadre d'Effinov'Bois, 4 thématiques clefs du Grenelle de l'Environnement ont été étudiées : l'énergie, l'eau, les déchets et le changement climatique. Nous présentons ici les résultats pour l'indicateur « changement climatique » :



**Figure 25 : Changement climatique**

Les résultats montrent que les solutions proposées permettent de réduire par 3 l'impact sur le changement climatique du système étudié. Cette réduction est obtenue grâce au faible bilan GES des matériaux utilisés dans les solutions et à une forte réduction des consommations d'énergie de l'utilisation du bâtiment engendrée par ces solutions de rénovation.

En parallèle, un autre des objectifs de cette tâche a été d'évaluer la contribution à l'atténuation du changement climatique due au stockage temporaire de carbone provenant des volumes de bois utilisés dans les solutions de rénovation.

Le tableau suivant présente la contribution du stockage temporaire à l'atténuation du changement climatique due au décalage des émissions, calculée à partir de la quantité de carbone biogénique stocké dans le bois utilisé dans les solutions de rénovation étudiées.

		Solution accroche façade				Solution appui au sol			
		Low cost	HPT	THPT	Tout bois	Low cost	HPT	THPT	Tout bois
Volume de bois utilisé	m <sup>3</sup> /solution	458	630	495	1330	384	514	421	1256
Masse anhydre de bois utilisé	Kg/solution	180284	224284	212954	247762	148929	174 728	181 600	216 407
Quantité de carbone biogénique stocké dans le bois utilisé	Kg CO <sub>2</sub> équiv./m <sup>2</sup> SHON	62	78	74	86	52	60	63	75
Contribution du stockage temporaire à l'atténuation du changement climatique	Kg CO <sub>2</sub> équiv./m <sup>2</sup> SHON	-5	-6	-6	-6	-4	-5	-5	-6

**Tableau 9 : Contribution du stockage temporaire à l'atténuation du changement climatique**

Les résultats montrent que dans le cadre de notre étude, le bénéfice du stockage temporaire de carbone biomasse a peu d'effet sur l'atténuation du changement climatique, de l'ordre de 5 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> évités/m<sup>2</sup> SHON. Cela est dû au fait que le calcul ne porte que sur une part très faible du contenu en carbone des volumes de bois utilisé (15%), correspondant à celle qui a été

dégradée en décharge, le reste étant définitivement stocké. Un autre scénario de fin de vie, tel que la valorisation énergétique, aurait démontré une atténuation du changement climatique due au stockage temporaire de carbone biomasse bien plus importante.

Par ailleurs, pour cet indicateur, il n'y a également pas de différences significatives entre les solutions développées.

L'évaluation environnementale réalisée dans le cadre du projet a montré que les solutions de rénovation envisagées diminuent considérablement l'impact du bâtiment pour la plupart des indicateurs considérés.

En effet, les solutions de rénovation développées réduisent la consommation d'énergie non renouvelable, la consommation d'énergie renouvelable, la consommation de l'eau, la quantité de déchets dangereux éliminés et la contribution au changement climatique du bâtiment. Toutefois, elles augmentent la quantité de déchets non dangereux et inertes éliminés, mais cette quantité de déchets générés par les systèmes de rénovation doit être relativisée par rapport à la quantité de déchets éliminés pour l'ensemble du bâtiment existant, non comptabilisée dans la présente étude. Les impacts du cycle de vie des matériaux ajoutés sont faibles au regard de la réduction des impacts due à la diminution de la consommation d'énergie de l'utilisation du bâtiment rénové.

Enfin, pour l'ensemble des indicateurs étudiés, il n'y a pas d'écart significatif entre les 4 solutions envisagées (low cost, haute performance thermique, très haute performance thermique et tout bois), ainsi qu'entre l'accroche de façade et l'appui au sol. En effet, le gain environnemental reste ici étroitement corrélé aux importantes économies d'énergies observées lors des simulations thermiques. Cette absence d'écart sur les indicateurs environnementaux est due aux faibles différences de composition et de performance thermique des solutions bois développées face au fort gain énergétique apporté par la rénovation du bâtiment.

*Références : Livrable T5\_Evaluation environnementale*

## **4.2. Evaluation énergétique**

Dans un premier temps il s'agit d'étudier les performances thermiques du bâtiment de référence avant application de la solution Effinov'Bois. Dans un second temps la mise en place de chacune des solutions techniques envisagées a été simulé à l'aide de la suite de logiciel Pléiades +COMFIE. Pour chacun de ces cas une analyse en termes de consommation énergétique, de puissance installée et de confort a été réalisée.

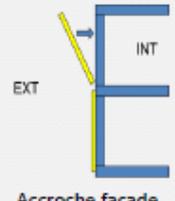
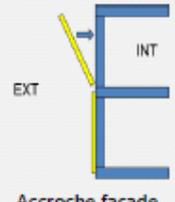
Différentes variantes sont testées pour les trois types de bâtiments (tertiaire, logement et ERP) et pour :

- Le type de mise en œuvre (accroche façade ou appui au sol) ;
- La rénovation de la toiture et du plancher ;
- Différentes valeurs de ponts thermiques (calcul précis ou valeurs par défaut de la RT).

On applique ensuite les simulations à 3 types de solutions de rénovation retenues pour l'étude : « low-cost », « Haute Performance Thermique » et la « Très Haute Performance Thermique ». La solution « tout bois » sera testée ultérieurement.

Au vu des éléments décrits ci-dessus, on obtient finalement un total de 40 simulations, nous présentons un exemple de tableau de résultats en termes de besoins de chauffage pour la version B18 tertiaire :

*Référence : Livrable T6\_Evaluation du gain énergétique*

B18 Tertiaire			BESOINS en kWh/m <sup>2</sup> <sub>shon,RT</sub> .an				
Ponts Th	Mise en œuvre	Réhab plancher toiture	Existant	Solution 1 « Lowcost »	Solution 2 « HPT »	Solution 3 « Tt bois »	Solution 4 « THPT »
Valeurs par défaut	 Accroche façade	✗	174,1	79,8 -54,2%	79,1 -54,6%	79,0 -54,6%	76,7 -56,0%
		✓	174,1	56,1 -67,8%	51,8 -70,3%	51,9 -70,2%	48,8 -72,0%
Th-BCE Th-Bât RT2012	 Accroche façade et appui au sol	✗	174,1	79,8 -54,2%	79,1 -54,6%	79,0 -54,6%	76,7 -56,0%
		✓	174,1	56,1 -67,8%	51,8 -70,3%	51,9 -70,2%	48,8 -72,0%
Calcul précis des ponts thermiques NF EN ISO 10211 	 Accroche façade	✗	171,4	81,9 -52,2%	80,4 -53,1%	80,3 -53,2%	77,9 -54,6%
		✓	171,4	58,0 -66,2%	52,9 -69,1%	52,7 -69,3%	49,6 -71,1%
	 Accroche façade et appui au sol	✗	171,4	81,5 -52,5%	80,0 -53,3%	79,9 -53,4%	77,5 -54,8%
		✓	171,4	57,7 -66,3%	52,6 -69,3%	52,5 -69,4%	49,3 -71,2%

**Tableau 10 : Besoin de chauffage pour le B18 version tertiaire**

L'analyse est la même pour chacune des 3 versions du bâtiment B18. L'amélioration par la mise en place de la solution « low cost » est très importante due à l'action sur 4 leviers :

- Amélioration de la résistance thermique  $R_{\text{paroi}}$
- Amélioration de la performance de la menuiserie  $U_w$
- Diminution de la surface vitrée  $S_v$  (pléniums + sous-sol)
- Diminution des ponts thermiques  $\Sigma\Psi$

Les gains obtenus par la suite avec les solutions « HPT », « THPT » et « tout bois » sont relativement faibles du fait qu'ils n'agissent plus que sur deux leviers ( $R_{\text{paroi}}$ ,  $\Sigma\Psi$ ) et dans des proportions plus faibles par rapport au gap entre existant et « low cost » ( $R_{\text{paroi}} \times 30$ ). Cependant les écarts sont plus marqués dans le cas où les planchers sont rénovés car dans le cas contraire la performance est court-circuitée par les déperditions thermiques importantes par les planchers et la toiture. On remarque également que dans ce cas d'étude, le choix des valeurs de ponts thermiques (défauts ou calculés) ne change que très peu le résultat. De même le type de mise en œuvre n'influe que très peu sur la performance du bâtiment réhabilité. D'une manière générale, les solutions mises en œuvre permettent des gains énergétiques très importants avec une diminution du besoin de chauffage allant jusqu'à 77,9 %.

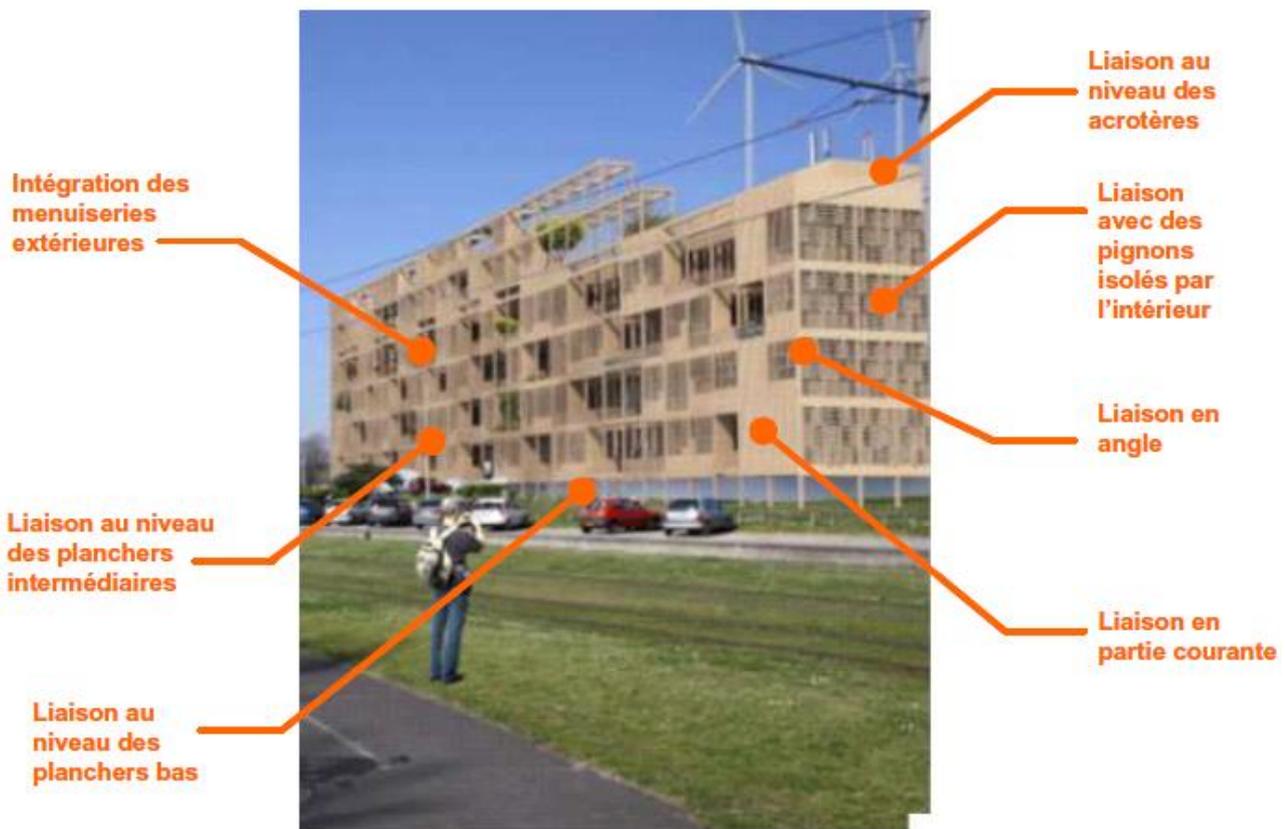
# 5. Intégration industrielle et transferts aux professionnels

Le dernier chapitre de ce rapport se focalise sur la septième et dernière tâche du projet : « Validation multicritères technico-économiques et sociétaux, transfert aux industriels de la filière ». La tâche 7 prévoit la rédaction d'un guide de conception rédigé par FCBA et le CSTB ainsi qu'un rapport sur l'intégration industrielle par OSSABOIS.

## 5.1. Guide de conception

Toutes les recommandations, les problèmes rencontrés et leurs solutions, identifiées tout au long du projet seront rassemblés dans le guide de conception. Un des objectifs final étant d'avoir un document transférable et vulgarisé à destination des professionnels. Ce dernier sera divisé comme tel :

- Le premier chapitre « Description des solutions » présente dans un premier temps les différents matériaux pouvant être utilisés par les solutions qui ont été proposées durant le projet (bois d'ossature, panneaux, isolants, matériaux d'étanchéité...) tout en affichant les différentes exigences à respecter sur ces matériaux fournis par les normes, réglementations ou autres documents techniques. Dans un deuxième temps, nous détaillons les 4 différentes configurations de solutions de rénovation à base de bois ont été retenues dans le cadre du projet Effinov'Bois.
- Le deuxième chapitre « Domaine d'emploi » détaille les caractéristiques des bâtiments pour lesquels a été jugée compatible l'application des solutions développées dans le cadre du projet EFFINOV'Bois compte tenu de l'état actuel des connaissances sur le sujet. On traite ici du type de parois, de la période de construction, de l'usage, du type constructif, de la morphologie de façade et de la localisation de l'existant. A titre d'exemple, on cite l'absence de mode de fixations validées permettant d'accrocher les panneaux en zones sismiques en dehors des supports en béton plein.
- Le troisième chapitre « Approche multicritère » liste les principales vérifications et analyses qui devront être réalisées afin de justifier de l'aptitude à l'emploi des solutions développées dans le cadre du projet. Il regroupe une bonne partie des enseignements et observations relevées au cours du projet. Le travail consiste à dérouler l'ensemble des exigences essentielles auxquelles doit satisfaire le bâtiment à travers une approche multicritères. Nous traitons entre autres des performances thermiques et acoustiques, de réaction et résistance au feu, de stabilité mécanique...
- Le quatrième chapitre « Points singuliers » traite des dispositions particulières qui doivent être prises au niveau des points singuliers afin de garantir une performance équivalente à celle atteinte en partie courante. Il est important de noter que les points singuliers devront être traités pour deux types de rénovation : Type façades rideaux (accroche aux extrémités des balcons ou de loggias) et type murs manteaux (seconde peau). Différentes coupes de détails sont fournies dans ce chapitre, les détails ci-dessous sont répertoriés :



**Figure 26 : Points singuliers traités dans le guide de conception**

## 5.2. Intégration industrielle – Recueil d’expériences

Ce guide comprend les phases principales pour la réalisation d’opérations de réhabilitation à l’aide de murs manteaux en ossature bois. Les différents points abordés dans le document cité sont le résultat de retours d’expériences sur différentes opérations. Voici les différentes étapes abordées dans le guide :

- Analyse de l’existant ;
- Définition d’une solution ;
- Fabrication ;
- Logistique ;
- Mise en œuvre.

*Références : Livrables T7\_Guide de conception et Intégration industrielle.*

# Conclusion

Grace au projet Effinov'Bois nous avons pu réunir un partenariat hétérogène et complémentaire avec pour objectif l'optimisation multicritère de solutions industrialisables à base de bois destinées à la réhabilitation de façades par l'extérieur.

A travers les différentes tâches du projet Effinov'Bois et afin de positionner au mieux le bois sur le marché émergent de la réhabilitation, il nous a fallu appréhender les différentes exigences liées à ce type de réhabilitation et combler certains manques dans le domaine.

Les résultats obtenus via les simulations (échelle paroi et bâtiment), les expérimentations à l'échelle 1 et les discussions entre experts nous ont permis de définir 4 configurations de solutions présentant chacune un intérêt particulier : « low-cost » ; « Haute Performance Thermique » ; « Très Haute Performance Thermique » et « Tout bois ». L'application de ces solutions sur des bâtiments types nous a permis de tirer des conclusions quant à leurs impacts environnementaux et gains énergétiques.

Des recommandations, des règles de mise en œuvre et une synthèse des performances obtenus tout au long du projet ont pu être compilées dans le « Guide de conception » qui sera dédiée à la diffusion des résultats d'Effinov'Bois au secteur professionnel concerné. De même, le « Recueil d'expériences » présente une synthèse des différentes étapes à mettre en place afin de mener à bien un projet de rénovation à base de solutions bois prenant en compte une industrialisation optimisée, de l'étude de l'existant jusqu'à la pose sur chantier.

Enfin, et afin de valoriser et d'assurer un transfert vers les professionnels, les différentes étapes et résultats obtenus tout au long du projet Effinov'Bois ont fait l'objet de nombreuses communications, que ce soit dans les commissions professionnels (SYMBOB : Syndicat National des Fabricants et Constructeurs de Maisons à Ossature Bois) ou dans diverses manifestations (Forum Bâtiment Durable, ECOBAT, Carrefour International du Bois...).