

Une toolbox pour la rénovation intelligente et multifonctionnelle de l'enveloppe des bâtiments, basée sur les énergies renouvelables et les technologies propres.

REINTEREST

Numéro de convention : 16500356 et 16500357

WP3 - Architecture

Rapport scientifique final

UCLouvain

période du 08/01/2017 au 08/01/2018

Auteurs :

Arch Morgane Bos (morgane.bos@uclouvain.be)

Dr. ir. arch Geoffrey van Moeseke (geoffrey.vanmoeseke@uclouvain.be)

Architecture et Climat - Bâtiment Vinci, Place du Levant 1, bte L5.05.04

B-1348 Louvain-La-Neuve / + 32 (0)10 47 21 42

www.uclouvain.be/architecture-climat

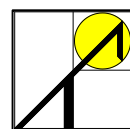


Wallonie



Service public
de Wallonie

Université catholique de Louvain
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme
Architecture et Climat



UCL
Université
catholique
de Louvain

AVANT PROPOS	4
CONTEXTE DU RAPPORT	4
ETAT D'AVANCEMENT	6
ETAT DE L'ART	8
CONTEXTE GENERAL DU PROJET	8
CONTEXTE WALLON	9
PROJETS DE RECHERCHE EUROPEENS - RENOVATION DES ENVELOPPES	12
AIM-ES (ARCHITECTURAL INDUSTRIALIZED MULTIFUNCTIONAL ENVELOPE SYSTEMS)	12
TES ENERGY FAÇADE (2008-2010) ET SMARTTES (2010-2013)	15
RENNOVATES	16
MEEFS (MULTIFUNCTIONAL ENERGY EFFICIENT FAÇADE SYSTEM FOR BUILDING RETROFITTING)	17
RETROKIT	19
E2REBUILD (INDUSTRIALISED ENERGY EFFICIENT RETROFITTING OF RESIDENT BUILDINGS IN COLD CLIMATES)	21
ENSEIGNEMENTS POUR REINTEREST	22
PROJETS DE RECHERCHE EUROPEENS - BIPV	23
PVME	24
BFIRST	24
FACE INTEC	25
ENSEIGNEMENTS POUR REINTEREST	27
APPLICATION DU SYSTEME REINTEREST	28
BATIMENTS DE LOGEMENT UNIFAMILIAL	30
TYPE 1 - 4 FAÇADES VERNACULAIRE	30
TYPE 2 - MAISON OUVRIERE AVEC PASSAGE LATERAL	31
TYPE 3 - MAISON OUVRIERE MITOYENNE	32
TYPE 4 - MAISON VILLAGEOISE ENTRE 2 GUERRES MITOYENNE	33
TYPE 5 - MAISON URBAINE MITOYENNE	34
TYPE 6 - VILLA DES PREMIERES EXTENSIONS URBAINES	35
TYPE 7 - VILLA DE PLAIN-PIED, EN PERIPHERIE DE LA VILLE	36
TYPE 8 - MAISON DE TYPE BEL-ETAGE, 2 FAÇADES	37
TYPE 9 - VILLA 4 FAÇADES, DE TYPE LOTISSEMENT	38
TYPE 10 - MAISON «SOCIALE», BARRE DE LOGEMENTS	39
BATIMENTS DE LOGEMENTS COLLECTIFS	40
TYPE 1 - IMMEUBLE A APPARTEMENTS AVANT 1919	40
TYPE 2 - MAISON 2 FAÇADES D'AVANT 1919 DIVISEE EN APPARTEMENTS	41
TYPE 3 - MAISON 2 FAÇADES D'AVANT 1919 DIVISEE EN APPARTEMENTS + SERVICE AU REZ-DE-CHAUSSEE	42
TYPE 4 - MAISON ENTRE 1919 ET 1945 DIVISEE EN APPARTEMENTS	43
TYPE 5 - IMMEUBLE A APPARTEMENTS URBAINS ENTRE 1946 ET 1970	44
TYPE 6 - IMMEUBLE A APPARTEMENTS ISOLEES ENTRE 1946 ET 1990	45
TYPE 7 - MAISON ENTRE 1946 ET 1970 DIVISEE EN APPARTEMENTS	46
CONCLUSION - LIMITES D'APPLICATION	47
DEVELOPPEMENT DU SYSTEME REINTEREST	49
CAHIER DES CHARGES	49
CHOIX PREALABLES LIES AUX CRITERES EXTERNES	50
CRITERES DE SELECTION DES MATERIAUX	57
CONCEPTION GENERALE	61
FICHES TECHNIQUES DESCRIPTIVES	74

METHODE	74
HYPOTHESES GENERALES	77
FICHE DESCRIPTIVE N°1 : TES FERME	78
FICHE DESCRIPTIVE N°2 : TES OUVERT	83
FICHE DESCRIPTIVE N°3 : SYSTEME DIT DE 'CADRE'	88
FICHE DESCRIPTIVE N°4 : SYSTEME DIT 'SUR RAILS'	94
FICHE DESCRIPTIVE N°5 : SYSTEME MONOLITHIQUE	98
ANNEXES	102
▪ POTENTIEL DE VALORISATION – TABLEAUX D’EVALUATION DES 5 SYSTEMES	102
DEFINITION DU PRE-PROTOTYPE	103
OBJECTIFS ET METHODE D’EVALUATION	103
DEFINITION DES 3 PROTOTYPES	104
PRE-PROTO N°1	104
PRE-PROTO N°2	106
PRE-PROTO N°3	108
CHOIX DES MATERIAUX	111
LA CELLULOSE	112
LES BILLES D’AEROGEL	112
LES PANNEAUX D’ISOLATION SOUS VIDE	113
TABLEAU COMPARATIF	114
COMMANDE DE MATERIAUX	117
ANNEXES	118
MONITORING	120
PRÉ-PROTO N°1	120
PRE-PROTO N°2	120
PRE-PROTO N°3	121
MATERIEL DE MESURE	121
ANNEXES	123
▪ PLANS D’EXECUTION	123

Avant propos

Contexte du rapport

Le présent document constitue le rapport scientifique final de l'UCLouvain. Il est rédigé après 12 mois de recherche et reprend le contenu des livrables partiels "D 3.1.1. Les compositions types possibles de façade répondant aux attentes du projet" et "D 3.1.2. Les propriétés physiques de ces façades, pour intégration dans les outils d'optimisation" annoncés dans la fiche projet. Ces rapports compilent les développements des phases 1 et 2 du WP3 du projet REINTEREST.

Suite à l'abandon du financement du projet par l'administration wallonne, la phase 3 du WP3 ne sera pas réalisée, et les livrables D3.2 et D3.3 non produits.

Nous reprenons ci-dessous la description du WP3 telle que reprise dans la convention REINTEREST:

	Année 1				Année 2			
Trimestre	1	2	3	4	5	6	7	8
Coordination du WP								
Phase 1 : composition								
Phase 2 : caractérisation								
Phase 3 : usages								
Delivrables	Rapport descriptif				Rapport « usages »			

N° du work package	3	Nom du work package	Architecture	Durée du WP (en mois)	24
Objectif	Déterminer et caractériser les solutions techniques de support des peaux solaires étudiées dans le projet				
Description détaillée des phases de travail proposées	- Phase 1 : Détermination de compositions types : sur base des propriétés physiques des éléments de production et stockage d'énergie visés par la recherche (masses, encombrement, modulation – déterminés dans le WP2), proposer des compositions types de composants de façades. Ces éléments intègrent les composants nécessaires au support des éléments producteurs d'énergie et les couches d'isolation et d'étanchéité à l'air, l'eau et la vapeur adéquates. A priori, trois familles de compositions sont visées : · 1/des systèmes d'ossature (bois, métal ou autre) pour ancrage dans les parois existantes avec remplissage isolant et bardage par les éléments producteurs d'énergie, selon le principe des façades rideaux · 2/des systèmes de caissons insufflés autoportants avec bardage par les éléments producteurs d'énergie, selon le principe des façades rapportées · 3/ des systèmes de panneaux isolants supports de revêtements légers producteurs d'énergie (membranes PV), selon le principe des façades portantes isolées par l'extérieur. - Phase 2 : Caractérisation des compositions types. L'objectif est de fournir la documentation des propriétés énergétiques et environnementales des compositions proposées en phase 1, ainsi que des commentaires sur leurs propriétés constructives (résistances aux feux, propriétés mécaniques, etc) et leurs propriétés d'assemblages (détails types). Ces données sont nécessaires à la définition d'un outil d'optimisation des façades actives. Cette documentation inclut la résistance thermique (y inclut l'évaluation des ponts thermiques) et au flux de vapeur ainsi qu'un bilan environnemental plus large et un commentaire sur le caractère recyclable de la paroi. Cette documentation prendra la forme de fiches descriptives des parois proposées. - Phase 3 : Identification des usages préférentiels. La post-isolation de parois existantes peut présenter des risques pour la durabilité des murs existants (condensation superficielle et/ou perte de capacité de séchage). Bien que théoriquement limités dans les cas des isolations par l'extérieur visés dans le projet, ces risques ne sont cependant pas tout à fait absents, en particulier au niveau des nœuds constructifs. Des simulations de la modification du comportement hygrothermique de différentes parois type représentatives des pratiques constructives wallonnes en cas d'ajout des façades actives développées dans le projet seront réalisées pour objectiver ce risque, et identifier d'éventuelles incompatibilités constructives. Les détails techniques proposés pour les nœuds constructifs seront également dégradés par simulation pour caractériser leur sensibilité à des erreurs de pose ou à des situations particulières, et formuler des bonnes pratiques de pose et manutention des éléments de façades développés dans le projet. - Un commentaire sur la validité de la proposition finale par rapport aux différentes typologies (cf. études COZEB et COZEB-extension) sera proposé.				

Répartition du travail entre les partenaires	Nom du partenaire	H/mois	Travail pris en charge par le partenaire
	UCL-A&C	21	Coordination du WP Co-détermination des détails types Caractérisation des parois types Identification des usages préférentiels
	BESIX	1	Co-détermination des compositions de parois et détails types Relecture critique
Description du(es) livrable(s)	D 3.1. Le WP produit après 12 mois un rapport descriptif intermédiaire documentant : - D 3.1.1. Les compositions types possibles de façade répondant aux attentes du projet - D 3.1.2. Les propriétés physiques de ces façades, pour intégration dans les outils d'optimisation D 3.2. Après 18 mois, ce rapport est finalisé et complété des éventuelles limites d'utilisation de ces parois (rapport « usages »). D 3.3. Sur les 6 derniers mois du WP, seule une veille est maintenue, destinée à assurer la bonne transmission et interprétation du livrable dans les autres WP.		
Risques encourus et solutions envisagées pour limiter ces risques et y répondre	Les contraintes constructives générées par les éléments de production d'énergie solaire thermique et photovoltaïque (poids, modularité) ne sont pas très différentes des contraintes propres à d'autres types de revêtements de façade. Il n'est donc pas attendu de difficulté particulière dans la mise au point de détails types. Les outils de simulation visés (nœuds constructif, hygrothermie des parois) sont bien établis dans la recherche en physique du bâtiment et aucune difficulté particulière n'est anticipée dans leur utilisation.		

Etat d'avancement

Au moment de rédiger ce rapport, les éléments suivants ont été réalisés :

- Phase 1 :
 - Une identification de l'état de l'art en matière de rénovation à grande échelle par éléments préfabriqués a été réalisée.
 - 5 compositions type d'éléments de façade ont été proposés et décrits, relevant des trois familles de compositions envisagées. Ces propositions constituent des systèmes pouvant être constitués de différents matériaux (voir plus loin). Une liste de critère de pertinence de ces compositions a été établie, permettant d'identifier les pistes à privilégier pour le projet.
 - Trois prototypes, représentatifs des deux compositions types jugées les plus prometteurs, ont été décrits. Une documentation graphique a été produite

permettant aux partenaires de réaliser le montage. Un plan d'observation a été établi pour les aspects relevant de la physique du bâtiment

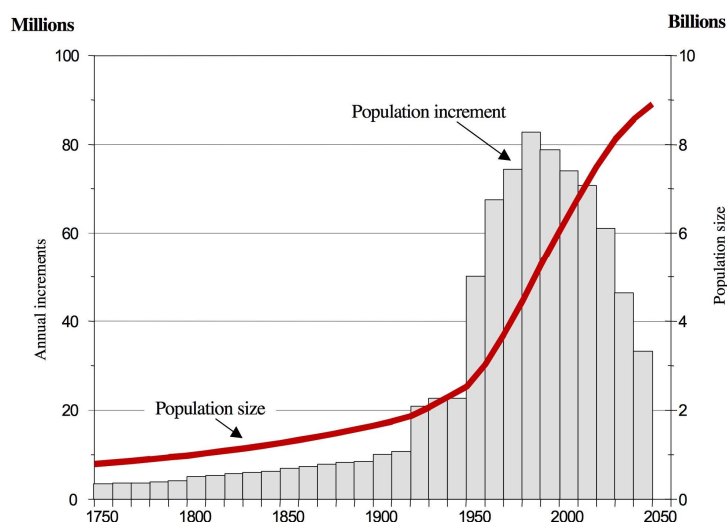
- Support à la réalisation pratique des prototypes
- Phase 2 :
 - L'identification des paramètres et critères de sélection des matériaux pour les différents systèmes est réalisée
 - La collecte des données de différents matériaux, en particulier les propriétés environnementales de matériaux isolants et PV est en cours.
 - Consolidation de l'évaluation des propriétés physiques et environnementales des compositions proposées.
 - Réalisation de fiches descriptives des systèmes retenus.
- Un commentaire sur la validité de la proposition finale par rapport aux différentes typologies (cf. études COZEB et COZEB-extension) a été proposé.

Etat de l'art

Contexte général du projet

Depuis le XVII^e siècle, la démographie mondiale ne cesse de croître. De 500 millions en 1750, la population qui peuple notre planète est passée à 3,6 milliards en 1970, et s'élève aujourd'hui à 7,5 milliards d'habitants, soit plus du double qu'il y a 47 ans.

Figure 1. Long-term world population growth, 1750 to 2050



Rapport The World at Six Billion, World Population, Year 0 to near stabilization - United Nations Population Division

Depuis la révolution industrielle, la croissance économique mondiale ne fait qu'augmenter à une vitesse encore plus rapide! On estime à 7% la croissance industrielle par an.

Evidemment cette croissance n'est pas équitablement répartie entre les différents continents et se concentre davantage dans les pays les plus développés.

Conscient des dérèglements que cet essor risque de provoquer, le Club de Rome commande en 1972 au Massachusetts Institute of Technology (MIT) un rapport sur les limites de la croissance (The Limits To Growth) plus connu sous le nom: rapport de Meadows.

Ce rapport tire la sonnette d'alarme et fait état des risques liés à cette croissance incontrôlée: limitation des ressources alimentaires et en eau, épuisement des ressources énergétiques tel que le pétrole ou le gaz, accroissement de la pollution qui non seulement diminue les rendements agricoles mais bouleverse tout l'équilibre planétaire, ...

Ce rapport est à l'origine d'une prise de conscience collective et progressive de la finitude écologique de la Terre et de la nécessité de retrouver un équilibre entre le progrès et l'environnement.

Les deux mises à jour de ce rapport, réalisées quelques années plus tard afin de confronter les prévisions à la réalité, ont montré que les tendances annoncées 20 et 30 ans plus tôt, tendaient à se confirmer.

En juin 1992, la signature du traité de Rio représente une étape importante dans les négociations internationales sur le Climat. Lors de ce 3^{ème} sommet de la terre (Earth Summit), les états signataires reconnaissent officiellement l'existence du dérèglement climatique, la responsabilité humaine dans ce phénomène et s'entendent sur un cadre d'action de lutte contre le réchauffement climatique: la CCNUCC

(Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques). Par la signature du traité, les pays s'engagent à une stabilisation des concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.

Depuis lors, un sommet COP a lieu chaque année dans l'un des pays des Nations Unies.

Mais malgré des progrès notables, les objectifs sont loin d'être atteints: cette année encore, le 2 août 2017, l'humanité a consommé la totalité des ressources que la planète peut renouveler en un an. Elle vivra donc "à crédit" jusqu'au 31 décembre¹.

A l'échelle européenne, on considère que l'action de la Communauté européenne dans le domaine de l'environnement a émergé au début des années 70, en même temps que la prise de conscience collective mondiale. La politique environnementale européenne remonte au Conseil européen de Paris de 1972, au cours duquel les chefs d'État ou de gouvernement (au lendemain de la première conférence des Nations unies sur l'environnement) ont déclaré la nécessité d'une politique environnementale communautaire accompagnant l'expansion économique et préconisé un programme d'action.² La communauté européenne adopte alors le 1er Programme d'action pour l'environnement. Notons encore qu'il faudra attendre 2010 pour assister à la création d'un poste de Commissaire à l'Action pour le climat, en plus du Commissaire à l'Environnement, et parallèlement d'une Direction Générale "Action pour le Climat" à la Commission européenne.³

Contexte wallon

Article 4 de la directive 2012/27/UE: « Les États membres établissent une stratégie à long terme pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, tant public que privé. »⁴

Face à l'émergence de ces nouvelles préoccupations liées à l'épuisement des ressources et au réchauffement climatique, L'Europe et les états se sont engagés à entreprendre des efforts significatifs pour réduire la consommation énergétique et les émissions de GES.

Parmi les différents engagements, le financement de nombreux projets visant à stimuler les initiatives de rénovation énergétique du parc immobilier existant et à développer les connaissances et les performances techniques en la matière.

En effet, chez nous, de récentes études exposées par la Région Wallonne dans sa nouvelle stratégie de rénovation à horizon 2050⁵, ont montré que le secteur résidentiel était responsable, dans notre pays, de 23% de la consommation énergétique et de 13% des émissions de gaz à effet de serre.

Il est à supposer qu'il en va de même pour les autres pays membres.

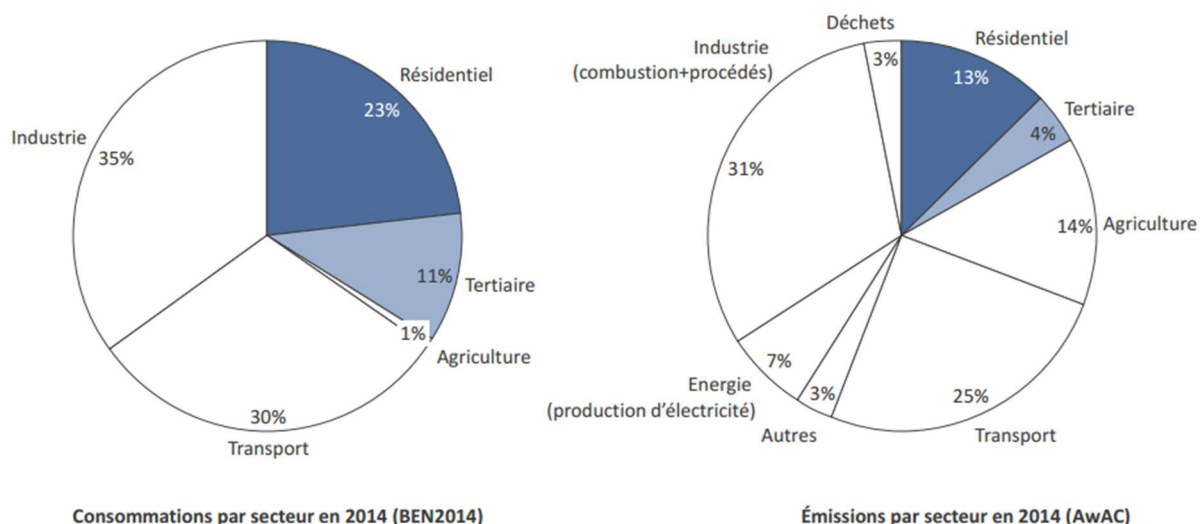
¹ ONG Global Footprint Network

² <http://www.europarl.europa.eu/>

³ <https://ue.delegfrance.org/les-politiques-environnementale-et>

⁴ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027>

⁵ Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme des bâtiments – Présentation publique du 10/05/2017 - Climact sa



Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre *In Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme des bâtiments – Présentation publique du 10/05/2017 - Climact sa.*

Du côté de la Wallonie, la nouvelle stratégie de rénovation est jalonnée par une série d'objectifs aux niveaux européen, belge et wallon.

Parmi ces objectifs, il y a ceux du décret Climat qui prévoit de réduire les émissions de GES de 30% d'équivalents CO₂ d'ici 2020 et de 80 à 95% d'ici 2050.

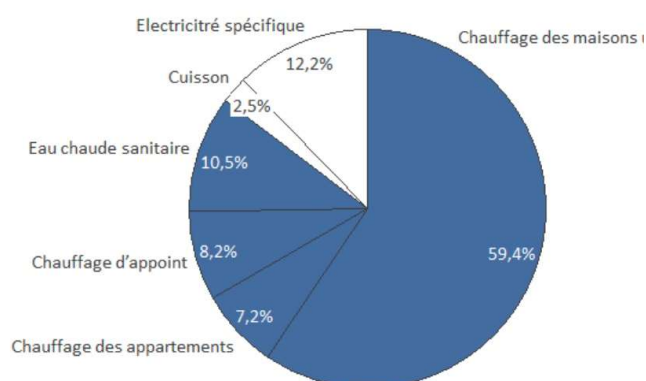
Il ne fait donc nul doute que l'amélioration du parc de bâtiments existants est fondamentale pour la transition bas carbone.

En pratique, la stratégie de rénovation s'articule suivant des axes, des objectifs, des mesures et des actions concrètes pour y parvenir à court terme (avant 2020) ou moyen terme (après 2020).

Pour ce qui est de la performance énergétique des bâtiments, elle vise le label PEB A en moyenne pour l'ensemble des logements. Pour y arriver, elle entend se donner les moyens nécessaires pour stimuler la rénovation de certaines cibles prioritaires et encadrer tous les projets de rénovation. Ainsi, en Wallonie, les logements présentant un label PEB F ou G (ce qui représente 45% du stock de logement) doivent, en priorité, faire l'objet d'une amélioration de l'intégralité de leur enveloppe.

Au final, l'ambition de la stratégie est de tendre vers une réduction par 4 de la consommation d'énergie pour le chauffage, l'eau chaude, le refroidissement et l'éclairage des bâtiments. ⁶

⁶ Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme des bâtiments – Présentation publique du 10/05/2017 - Climact sa



Répartition de la consommation d'énergie par usage dans les logements (Source : Bilan Energétique 2013) In Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme des bâtiments

Notons encore que ces mesures d'efficacité énergétique engendrent également de nombreux co-bénéfices sociaux, économiques et environnementaux.

Le projet REINTEREST s'insère dans cette perspective de recherche de solutions afin de réduire l'impact de nos comportements sur l'environnement tout en tenant compte de l'installation durable de certaines habitudes dans nos modes de vie.

Il ne s'agit donc pas de réduire le confort auquel l'être humain est particulièrement attaché, mais au contraire, de l'améliorer, en mettant à profit, ce que la terre nous offre de meilleur en ressources propres et renouvelables.

L'objectif du projet est de tirer profit du parc immobilier existant et de l'une des ressources les plus inépuisables que la Terre nous fournit: le soleil.

Bien avant REINTEREST, d'autres projets financés par l'Europe et les Etats ont, cherché des solutions pour diminuer l'empreinte énergétique des bâtiments au travers de concepts novateurs. La variété des projets fait état de nombreuses possibilités, du plus simple au plus élaboré, permettant de réduire la consommation énergétique et les émissions de GES, tout en améliorant le confort et le cadre de vie des occupants.

Cette partie du rapport fait l'état de l'art des différents projets et initiatives qui fleurissent en Europe dans ce domaine.

Projets de recherche européens - rénovation des enveloppes

Les projets retenus ici sont ceux, en cours ou récemment achevés, visant à développer des systèmes de rénovation à grande échelle et par l'extérieur de façades existantes. La sélection est donc orientée vers les projets à vocation industrielle poussée, et en excluant les recherches spécifiquement orientées vers les questions de patrimoine. Ces projets n'incluent pas nécessairement de volet photovoltaïque.

AIM-ES⁷ (Architectural Industrialized Multifunctional Envelope Systems)

Le premier projet qui retient l'attention est mené par le CSTC (Centre scientifique et technique de la construction belge).

Il part de la conclusion que l'évolution des processus industriels et des machines présente une opportunité de développer des techniques innovantes pour la rénovation des enveloppes. Les modules de façade préfabriqués peuvent aujourd'hui être assemblés en atelier et attachés à la structure d'un bâtiment, accélérant considérablement la phase d'intervention sur chantier, optimisant la qualité et multipliant les possibilités architecturales.

L'objectif du projet AIM-ES est donc le développement d'une technique de rénovation par l'application d'une seconde enveloppe faite d'éléments préfabriqués sur des murs existants.

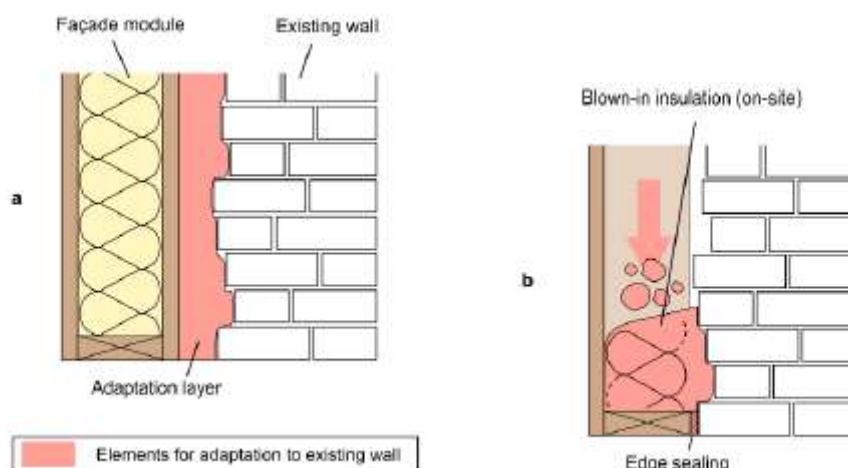
Le CSTC a élaboré un manuel (guidelines) pour aider à mettre en œuvre le système AIM-ES. Il propose des 'lignes directrices' pour la conception et la réalisation basée sur le retour d'expériences suite aux différents projets suivis, visant différents acteurs, et pour une application de systèmes 'types'.

Ce manuel fait usage généralisé du cadre en bois tel qu'il a été développé par le système TES EnergyFacade (développé au point suivant)

Il en extrait deux systèmes principaux :

- a) Le système « ouvert » dont le corps principal est une structure bois qui n'est pas fermée sur l'une des faces. L'isolant est insufflé in situ, via des percements réalisés en atelier, et comble les irrégularités du mur existant. Il existe une alternative qui permettrait l'insufflation sur chantier : la pose d'une membrane pare-vapeur sur la face intérieure qui épouserait les irrégularités du mur une fois l'isolant insufflé.
- b) Le système « fermé » consiste en un caisson réalisé entièrement en atelier sous forme d'une structure bois isolée et fermée des deux côtés par un panneau rigide. Une couche d'adaptation est alors nécessaire pour remplir le vide entre le panneau et le mur existant.

⁷ <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=projects&proj=2> - Consulté le 09/02/2017



Systèmes TES avec structure bois (a) Système TES « fermé » avec couche d'adaptation et (b) Système TES « ouvert » avec insufflation in-situ, in BBRI-CSTC-WTCB, Retrofitting with AIM-ES, Research report, 23/06/2016.

Chaque couche joue un rôle ou plusieurs : structurel, isolation thermique, sécurité au feu , pare-vapeur, esthétique ...

Ces systèmes ont l'avantage de permettre de nombreuses combinaisons de matériaux, ce qui les rend assez flexibles.

Dans les deux cas, les systèmes pourraient être décomposés comme suit⁸:

- Le corps est l'élément qui contient l'isolant et la structure. Il peut intégrer certaines technologies ou techniques du bâtiment (HVAC, technologie solaire, brise-soleil...)
 - De nombreux produits isolants sont possibles mais sont conditionnés par le choix d'ouverture du système: le système « ouvert » implique nécessairement l'usage d'un isolant en vrac, alors que le système « fermé » permet également d'opter pour un isolant rigide. L'usage d'un super-isolant utilisé ponctuellement pourrait permettre de compenser une faible épaisseur, notamment derrière un montant.
 - Le panneau de revêtement joue un rôle structurel ainsi qu'un rôle de contenant. Il intervient dans le comportement physique du module et donc sur sa performance globale.
- La couche d'adaptation doit combler les espaces vides entre le mur de façade existant et la face intérieure du panneau qui, dans le cas du système fermé, est parfaitement lisse. En effet, tous les vides laissés présentent des risques de dégradation, d'affaiblissement des performances. Dans le système fermé, cette couche d'adaptation nommée « full-span layer » consiste en l'application d'un panneau isolant compressible contre le panneau arrière. L'épaisseur de ce panneau dépendra du niveau d'irrégularité du mur. Il est également possible de travailler avec une sous-structure qui simplifiera la mise à niveau des éléments et offrira des points d'accroche clairs. Dans ce cas, le vide entre les lattes sera comblé par de l'isolant, soit compressible, soit en vrac, insufflé après le montage. Dans le système « ouvert » en revanche, il n'y a pas de couche d'adaptation proprement définie car

⁸ BBRI-CSTC-WTCB, Retrofitting with AIM-ES, Research report, 23/06/2016

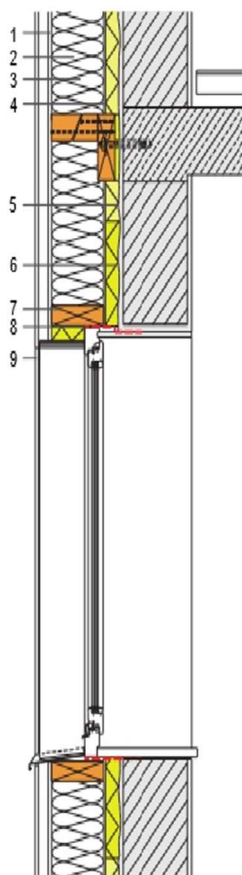
c'est l'isolant insufflé qui épousera les irrégularités du mur en investissant le vide. Cependant, il est absolument nécessaire de prévoir une étanchéité adéquate pour contenir l'isolant d'un module à l'autre et garantir l'étanchéité à l'air. L'application d'une compriband sur la face arrière des éléments en bois est une option pertinente.

- La couche extérieure (revêtement) est la partie exposée aux risques de vandalisme et aux possibles dégradations climatiques.
Le système permet beaucoup de possibilités qui sont sélectionnées en fonction des critères architecturaux, esthétiques et des performances attendues.

Le choix du matériau isolant dépendra surtout de l'épaisseur qu'on souhaite (ou qu'il est acceptable de) conférer au système.

Le système de structure, ainsi que le choix du type de panneau de revêtement seront choisis en fonction de leur capacité structurelle et de leur combinaison.

Notons encore que le système AIM-ES se concentre sur une applicabilité à des bâtiments peu performants montrant une certaine répétabilité.



Coupe verticale dans le système AIM-ES avec cadre en bois type TES façade - 1. Plaque de plâtre; 2. Flocons de cellulose insufflés; 3. Stud; 4. OSB; 5. Couche d'adaptation; 6. Laine minérale; 7. Linteau; 8. Mastic; 9. Revêtement in BBRI-CSTC-WTCB, Retrofitting with AIM-ES, Research report, 23/06/2016.

TES Energy façade (2008-2010) et SmartTES (2010-2013)

Ce projet regroupe plusieurs partenaires universitaires et industriels issus d'Allemagne, de Finlande et de Norvège.

Il part du postulat que l'amélioration de la performance énergétique des enveloppes de bâtiments construits entre 1950 et 1980 présente un potentiel d'économie d'énergie important et une contribution vitale à la réduction des émissions de CO₂ des ménages.

L'objectif du projet est de développer une méthode de rénovation des façades à grande échelle sur base d'éléments de structure en bois.

La méthode TES se focalise en premier lieu sur l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et avec pour conséquence la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutes les activités en construction étant responsable de la consommation de ressources additionnelles sous la forme de matières premières ou d'énergie et causant, par conséquent, des émissions de GES.

TES Energy façade veut adopter une méthode de rénovation durable et écologique basée préférentiellement sur des matériaux biogéniques (produits par des organismes vivants). Et puisque le bois de construction offre un potentiel de stockage de CO₂ comme nul autre matériau, la méthode TES définit des principes génériques basés sur l'utilisation de grands éléments structurels en bois ⁹

La méthode TES qui résulte de la recherche aboutit à un processus de modernisation systématisé englobant à la fois les sondages, le planning de mise en œuvre, la production en atelier mais aussi et surtout, l'assemblage sur site.

Le tout suit une structure cohérente grâce à une plateforme numérique qui fournit les données essentielles pour l'intégration globale du projet.

Le projet a fait l'objet d'une phase 2 nommée SmartTES, regroupant les mêmes partenaires et dont l'objectif est d'offrir des solutions pour la conception ainsi que réponses aux aspects techniques et écologiques sur base des résultats obtenus et des retours d'expériences. Ce projet se concentre sur les stratégies de protection au feu, l'intégration de certains équipements, comme la ventilation, au système préfabriqué, la stabilité ainsi que toutes les applications diverses et variées du système TES.

⁹ TES Energy façade, Final report, WoodWisdom-Net Research Programme 2006-11

REnnovates

Ce projet s'est fixé l'objectif d'explorer le Zero Energy Housing, c'est à dire tendre vers un équilibre entre génération et consommation d'énergie. Pour ce faire, il cherche à développer le contrôle intelligent à l'échelle du bâtiment, mais également à l'échelle élargie du quartier.

Pour y parvenir, le projet a listé 5 types principaux de bâti résidentiel. Chaque type est classé selon ses systèmes énergétiques (installation de ventilation, de chauffage et d'ECS, besoins nets en énergie de chauffage, pertes de chaleur liées à une isolation insuffisante, consommation d'ECS, consommation électrique, ...) et ses caractéristiques constructives (type d'enveloppe, type de fondations, existence d'un vide ventilé, processus constructif, connexions,...)

Sur base de l'analyse des types, pour chaque démonstrateur, un croisement s'opère entre l'amélioration substantielle du bâtiment et le relevé des mesures des systèmes. Cette simulation permet d'évaluer l'effet de l'amélioration de l'enveloppe sur la demande en énergie de chauffage et ensuite de mettre en lumière la solution la plus techniquement avantageuse et financièrement optimale.

Le projet innove dans la mise au point de 3 concepts:

1. La rénovation consiste en l'application par l'extérieur d'une façade/ toiture préfabriquée qui vise l'amélioration de l'isolation avec un minimum d'inconvénient pour l'habitant. Les éléments préfabriqués intègrent également les cadres de fenêtre et la finition qui peut être variée: briques collées, crépis, vitrage ou encore couche d'étanchéité EPDM avec fixations pour l'application de panneaux photovoltaïques 'clipsés' (ce système n'est évoqué que pour la toiture). Le système de façade envisagé est le cadre en bois isolé, comparable au TES Energy Façade.
2. Le "Energy Module" est une plate-forme qui regroupe tous les appareils lié au chauffage/refroidissement et à la production d'ECS (pompe à chaleur air/eau), à la ventilation (avec récupérateur de chaleur), mais aussi les appareils responsables du monitoring et du contrôle (appareils permettant de mesurer à la fois les performances énergétiques du bâtiments et mesurer la consommation d'énergie et la performance des panneaux photovoltaïques) et l'onduleur, qui permet de convertir le courant DC depuis les panneaux photovoltaïques en courant AC, consommable par la plupart des appareils ménagers.
- 3.



Démonstrateur du concept REnnovates à Heerhugowaard aux Pays-Bas , façade avant, arrière et "energy module" In REnnovates, Standardized Guidelines, D1.1 Standardized Guidelines Version 1.0

4. L'utilisation du BIM pour développer les détails et dimensions des différents composants du bâtiment. La géométrie du bâtiment existant doit être élaborée en détail sur le logiciel Revit

d'après un scan 3D afin de servir de base pour le nouveau système.

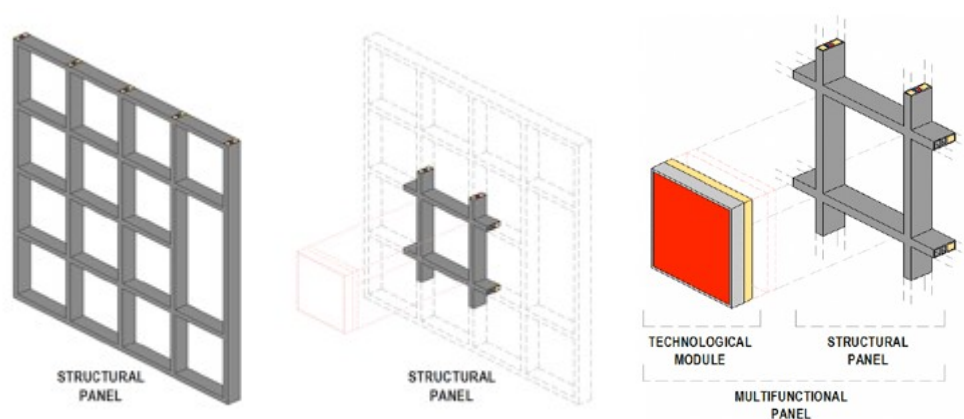
MEEFS¹⁰ (Multifunctional Energy Efficient Façade System for Building Retrofitting)

Le Projet MEEFS est mené par un grand consortium européen représenté par Acciona Infraestructura (ES). Il développe une solution constructive alternative intéressante.

Son objectif est d'apporter une solution à la fois flexible (adaptée à différentes configurations et typologies) et modulable (qui combine différentes solutions technologiques) au développement d'un module de façade standardisé pour la rénovation orienté vers le secteur de bâtiments résidentiels. Le consortium part du principe que système préfabriqué commun ne peut être appliqué de façon identique à chaque situation, chaque climat indépendamment de son implantation géographique¹¹.

Le système est composé d'un cadre complété de panneaux multifonctionnels à économie d'énergie et différents modules techniques.

Le cadre est l'élément structurel. Il est fixé ponctuellement à la façade existante au moyen d'ancrages. Le consortium a développé un produit composite thermoplastique creux. Ce polymère renforcé de fibres présente une bonne résistance mécanique permettant de supporter le poids important des modules. En outre, il présente de bonnes propriétés d'isolation thermique et n'est pas sensible à la corrosion et aux intempéries. Le consortium le dit durable et facile à recycler (impact environnemental 2,5x plus faible que les matériaux traditionnels comme l'aluminium)¹².



Cadre de structure + module technologique = panneau multifonctionnel, in <http://www.meeefs-retrofitting.eu/> Dernière visite :

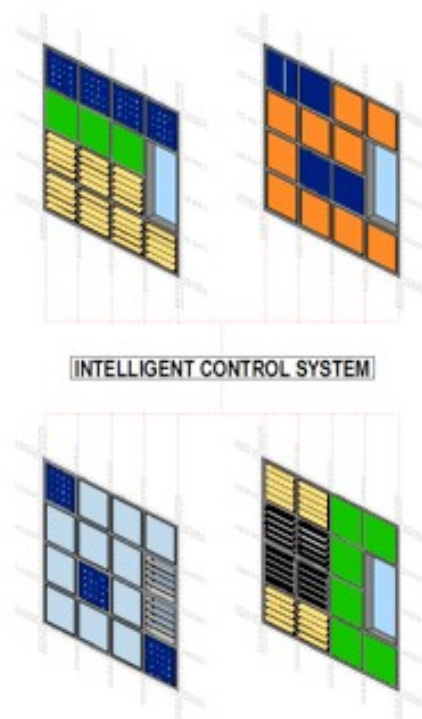
¹⁰ <http://www.meeefs-retrofitting.eu/> - Consulté le 06/03/2017

¹¹ I.G. Capeluto, C.E. Ochoa, On the determination of climate strategies for a multifunctional energy retrofit façade system, présenté à la Conférence internationale CISBAT 2013 "Cleantech for Smart Cities and Buildings, from Nano to Urban scale" 4-6 septembre 2013, EPFL Lausanne, Suisse

¹² Commission européenne: Cordis: Service Projets et résultats: Une façade de bâtiment éco-énergétique pour des travaux de rénovation in http://cordis.europa.eu/result/rcn/147436_fr.html - Consultation : 13/02/2017

22/05/2017.

Le remplissage peut être de plusieurs types suivant les besoins identifiés localement et la composition globale de la façade. Il y a 7 unités techniques envisageable: 1/isolation, 2/façade verte, 3/façade ventilée, 4/protection solaire, 5/vitrage, 6/photovoltaïque BIPV, 7/collecteurs thermiques solaires. 2 unités complémentaires permettent de combiner les systèmes et d'obtenir d'autres résultats: 8/une unité automatique passive d'absorption d'énergie et de protection solaire, 9/un module passif de capteur solaire et ventilation. La mise au point de ces unités est déterminée par une stratégie de conception climatique détaillée dans l'article 'On the determination of climate strategies for a multifunctional energy retrofit façade system', présenté à la Conférence internationale CISBAT 2013.



Différentes configurations de MEEFS, in <http://www.meefs-retrofitting.eu/> Dernière visite : 22/05/2017.



Système MEEFS appliqué sur un bâtiment démonstrateur à Merida, Espagne, in MEEFS : 2nd Reporting Period Publishable Summary on Progress, 27-02-15

RETROKIT¹³

Dans ses livrables, le projet RetroKit mené par un grand consortium européen représenté par D'Appolonia (IT) a notamment développé un système intégrant des technologies photovoltaïques/thermique (PVT). Celui-ci consiste en un système de sous-structure mis au point par Sto (profils fixés préalablement sur la façade) sur lequel les panneaux sont destinés à se 'clipser'.

Le vide est comblé d'isolant de type et de qualité au choix suivant la réglementation, les conditions climatiques et la performances techniques attendues (de préférence rigide ou semi-rigide)

Les modules sont 'clipsés' sur les profils Sto. Ceux-ci se composent d'un panneau de support, d'une couche de silicone, d'une couche de thin film PV CIGS (alliage de Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium) déroulé sur un plat en aluminium, les tubes capillaires étant soit incorporés dans le panneau de support soit incorporés dans la colle silicone.

¹³ <http://www.retrokitproject.eu/> - Consulté le 23/06/2017

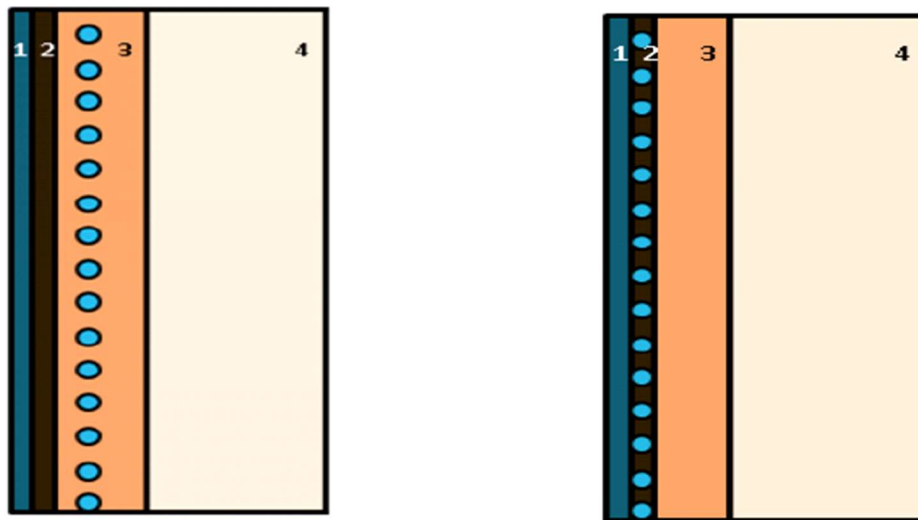


Figure 1: Left-hand side: Configuration 1 with (1) PV module, (2) silicone glue, (3) carrier plate with capillary tubes, (4) insulation layer. Right-hand side: Configuration 2 with (1) PV module, (2) capillary tubes in silicone, (3) carrier plate, (4) insulation layer.

Comparaison de 2 systèmes de conception PVT à bas coût In A. Katsifaraki, B. Bueno, T. E. Kuhn, C. Maurer, Assessment of a photovoltaic thermal (PVT) prefabricated façade, Fraunhofer ISE, Conference paper, Mai 2014

Dans les 2 configurations, le module de captage est identique. Il s'agit d'un film fin de CIGS affichant une performance de 8%.

Seule la position des tubes capillaires change. Les tubes capillaires en polypropylène présentent un diamètre de 4.5mm. Dans la première configuration, ils sont intégrés dans un panneau de support composé de plâtre et de granules de verre. Dans la seconde coupe, ils sont intégrés dans la couche de colle silicone. La première option permet de faibles coûts de fabrication. La seconde offre des gains thermiques notables grâce à la faible résistance thermique entre la surface de captage et le fluide.

Les deux configurations ont fait l'objet de simulations et de comparaisons par des chercheurs du Fraunhofer ISE afin de mieux comprendre et d'évaluer les collecteurs PVT ainsi que le système dans sa globalité.¹⁴ La recherche révèle que les gains annuels pour la configuration n°2 sont 30% plus élevés que ceux de la configuration n°1.

L'innovation du projet repose sur l'aspect customisable du système et le fait qu'il puisse être installé et entretenu facilement, systématisant et facilitant grandement le processus de rénovation. De plus, l'accessibilité économique de ses composants en font un système abordable pour les propriétaires résidentiels, ce qui représente une grande part du marché et donc un potentiel important.

Plus globalement, le projet Retrokit est à l'initiative d'une boîte à outils qui intègre des solutions préfabriquées flexibles avec des technologies d'efficacité énergétique. L'outil a pour objectif de développer des modules préfabriqués multifonctionnels, modulaires, peu coûteux et faciles à installer, qui sont flexibles et adaptables pour de nombreuses typologies de bâtiments en Europe.

¹⁴ A. Katsifaraki, B. Bueno, T. E. Kuhn, C. Maurer, Assessment of a photovoltaic thermal (PVT) prefabricated façade, Fraunhofer ISE, Conference paper, Mai 2014

Les systèmes développés par Retrokit sont combinés avec le systèmes ETICS, qui pour sa part, laisse lieu à des questionnements sur sa capacité à être démonté en fin de vie, et donc des lacunes environnementales évidentes.

E2Rebuild15 (Industrialised energy efficient retrofitting of resident buildings in cold climates)

La démarche globale de ce projet consiste à lister, comparer et tester les modes constructifs envisageables dans le cadre des rénovations énergétiques de bâtiments existants.

Selon le coordinateur de projet Dr Christina Claeson-Jonsson, responsable de R&D de NCC Construction en Suède, l'objectif est, en effet, de « regrouper les dernières méthodes de rénovation visant à aider les constructeurs, les organisations de logement et les architectes à apprécier que les processus industrialisés modernes peuvent permettre des économies d'argent tout en réduisant les coûts de construction et d'énergie »¹⁶

C'est donc en misant sur l'industrialisation de ces procédés de rénovation que le projet entend généraliser la pratique et en réduire le coût.

Le consortium a développé une plate-forme qui doit fournir un cadre sur la façon dont les rénovations énergétiques peuvent être accomplies. L'idée est d'intégrer plusieurs solutions en une plate-forme unique, et non de se concentrer sur un produit ou une méthode unique.

E2REBUILD était un effort collaboratif impliquant 20 partenaires provenant de huit pays européens. Ces derniers comptaient huit bureaux d'architectes, des sociétés de construction et des sociétés de logement ainsi que des universités et des instituts de recherche.¹⁷

¹⁵ <http://www.e2rebuild.eu/en/Sidor/default.aspx>

¹⁶ De nouvelles plateformes pour vous orienter dans l'univers de la rénovation écologique, European Commission - http://cordis.europa.eu/news/rcn/124432_fr.html - Consulté le 28/02/2017

¹⁷ idem

Enseignements pour REINTEREST

Les compositions de modules de façades proposées par TES Energy Façade et repris dans AIM-ES sont une source d'inspiration directe pour REINTEREST. Nous pouvons également retenir de ces expériences:

- la possibilité d'intégrer totalement ou partiellement certaines techniques du bâtiment, dans le module directement, sur sa surface extérieure, dans l'épaisseur de la couche d'adaptation...
- le principe d'intégration de nouvelles fenêtres directement dans le module de façade, ce qui suppose d'adapter la taille des ouvertures aux baies existantes ou d'adapter la taille de la baie selon le dessin des modules.

Le projet AIM-ES aborde aussi brièvement les différentes possibilités pour l'intégration de technologies solaires, les panneaux photovoltaïques ou les collecteurs thermiques s'attachant à la face extérieure du module de façade.

L'exemple du projet MEEFS valide l'hypothèse de l'usage de cadres thermoplastiques comme alternative au traditionnel cadre en bois. Les ponts thermiques sont réduits par l'application d'isolant dans les creux du profil. Les demandes de contacts avec les acteurs du projet MEEFS n'ont malheureusement à ce stade pas été fructueux.

Outre l'usage du cadre thermoplastique, le système MEEFS peut représenter une source d'inspiration pour le projet REINTEREST, principalement pour sa qualité modulable.

En effet, dans le cas de captage photovoltaïque, l'application de cellules sur toute la superficie de façade n'est pas forcément pertinente. Dans certaines configurations, une variété de zones sont soumises à un ombrage important, voir permanent. Dans d'autres cas, l'accessibilité des cellules sur certains rez-de-chaussée urbains peut représenter un risque de dégradation, voire de vols...

Il sera donc intéressant de proposer un système permettant un remplissage variable en fonction des besoins spécifiques.

En terme de mode constructif, les projets AIM-ES et MEEFS proposent des systèmes bien distincts : AIM-ES est basé sur des caissons fermés sur une ou deux faces, tandis que MEEFS part de l'hypothèse d'un cadre porteurs accueillant des éléments qui lui sont constructivement distincts.

Chaque système permet d'atteindre un niveau de préfabrication assez élevé. Dans chaque cas, un minimum de mise en œuvre est nécessaire sur chantier et l'essentiel des travaux s'opère par l'extérieur et permet donc de travailler en site occupé, avec pour conséquent, peu de désagrément pour les occupants.

Le développement photovoltaïque que ces projets proposent n'est pas abouti et peu convaincant, mais ceux-ci peuvent facilement être intégrés grâce aux systèmes classiques de modules photovoltaïques porté par des rails ancrés horizontalement sur la façade.

D'autres pistes se dégagent, notamment l'hypothèse d'éléments monolithiques tels que proposés par le projet RETROKIT, qui permet une préfabrication très élevée mais pose des questions sur le potentiel de démontage et de recyclabilité.

Enfin, le projet E2Rebuild insiste sur le besoin d'industrialisation des solutions de rénovation plus que sur le développement de techniques innovantes.

Le projet REINTEREST s'insère dans cette démarche d'intégration, d'optimisation et d'industrialisation (optimisation de performance isolante, optimisation de poids et d'épaisseur, optimisation du temps de

fabrication et de mise en œuvre) tout en apportant une dimension supplémentaire: l'utilité active au moyen du captage photovoltaïque.

Projets de recherche européens - BIPV

Cette section identifie des projets de recherche européens en cours ou récemment achevés dans le domaine du BIPV.

Le terme BIPV (Building-integrated photovoltaics) signifie "l'intégration au bâti d'une installation photovoltaïque". Ce concept est né dans les années 1980 et consiste à utiliser des modules photovoltaïques en lieu et place de matériaux de construction conventionnels, le principe d'"intégrer" s'opposant à celui d'"appliquer".

De nombreux systèmes d'intégration se développent sur le marché, transformant ainsi des éléments traditionnellement "passifs" en principe actif: tuiles, ardoises ou membranes souples photovoltaïques pour les applications en toiture, bardages, mur-rideaux, allèges pour les applications en façades, ou encore garde-corps et brise-soleil pour les application plus "accessoires".

La cellule bi-verre monocristalline est probablement l'application la plus fréquente et la plus connue du grand public.

Mais là aussi, plusieurs projets et/ou département R&D de grandes entreprises, cherchent à casser les codes et à développer de nouveaux produits, plus légers, plus fins, plus durable et respectueux de l'environnement.

Tout comme ces différents projets, REINTEREST cherche à pousser plus loin le principe du BIPV. Le BIPV est généralement réservé aux nouvelles constructions et bien qu'il soit théoriquement adapté à tous les type d'usage, il est souvent limité, dans les faits, au secteur industriel et tertiaire.

L'objectif du projet est de développer un système de modules photovoltaïques destiné exclusivement à la rénovation de bâtiments résidentiels.

L'idée étant l'application d'une seconde peau sur l'extérieur de l'enveloppe existante (façade et toiture) tout en visant la maximisation de la surface de captage et l'intégration visuelle des modules.

PVme

Porté par un consortium composé, entre autre, de AGC Glass, Hoesch baussysteme et Heliatek (leader dans les systèmes OPV), le projet PVme travaille à développer des éléments de façade producteurs d'énergie avec des films organiques (OPV). Toute l'originalité du projet réside donc dans le choix de la technologie photovoltaïque.

Leur objectif est de développer deux types de produits :

- Le premier, l'intégration d'un film OPV dans du verre, vise à combiner l'isolation thermique, la génération d'énergie et l'aspect esthétique. Il est développé par Heliatek et AGC.
- Le second, l'intégration d'un film OPV sur un support en acier léger, vise plutôt l'intégration d'un film OPV dans un mur rideau. Il est développé par Heliatek avec Hoesch Bausysteme.

¹⁸Le premier produit en développement a pu nous être exposé lors d'une visite chez AGC Glass en date du 27/03/2017. Le produit, qui se nomme Heliatek Heliaplan se décline en deux versions, l'une opaque (finition au choix: brun, orangé, bleu, noir, gris, verdâtre) et l'autre semi-transparente. Il faut savoir qu'Heliatek est détenteur du record mondial de production pour les films OPV en laboratoire avec un rendement supérieur à 13%. Néanmoins la version de production n'atteint actuellement pas ces performances: 80 Wp/m², soit 8% de rendement. Les partenaires annoncent une durée de vie supérieure à 25 ans. Il serait également possible d'intégrer le film Heliatek dans du verre courbé, ce qui représente une performance potentiellement intéressante.

BFirst

Mené par un consortium de partenaires européens, ce projet s'est fixé pour objectif le développement et la démonstration d'un ensemble de produits photovoltaïques multifonctionnels standardisés intégrables au bâtiment, basé sur le développement de cellules solaires intégrées dans un matériau novateur : un composite renforcé de fibres de verre. L'objectif ultime étant de dépasser les barrières techniques et non techniques liées au BIPV en mettant en place un haut degré de standardisation des éléments photovoltaïques.

BFirst a mis au point un portfolio de produits qui reprendrait presque toutes les possibilités en terme de BIPV. Le projet classe les composants BIPV en 5 catégories : les façades ventilées, les ardoises ou tuiles de toiture, les mur-rideaux, les skylight et les élément d'ombrage.

L'avantage d'incorporer les cellules dans ce matériau composite renforcé de fibres (dont la mise au point a pris 3 ans selon S. Pierret, représentant OPTIMAL COMPUTING et seul partenaire belge) réside en sa grande flexibilité en terme de design.

L'avantage principal du produit est la totale incorporation des cellules et de leurs connexions dans le matériau composite. Les produits qui en résultent sont dotés de caractéristiques avancées en terme de capacité structurelle, de transparence, adaptable à de nombreuses géométries et formes, et font l'objet d'une réduction des processus de fabrication.

¹⁸ Les propos qui suivent doivent être considérés comme confidentiels.

Cependant, la fusion physique totale entre les différents éléments posent également question en terme de démontabilité et recyclabilité du produit.

Face InTec

Il s'agit ici d'un produit commercial développé par la firme EDF ENR Solaire en collaboration avec Allouis SA. Son objectif est le développement d'un système de mur-rideau avec intégration de panneaux photovoltaïques.

En pratique, le module photovoltaïque et le système d'isolation ne forment qu'un seul élément, assurant également l'étanchéité. Ces éléments sont préfabriqués en usine et livrés pré-câblés sur chantier, ce qui rend le montage par emboîtement facile, rapide et peu coûteux.

Le système utilise des cellules photovoltaïques Micromorph[®] composées d'une couche inférieure microcristalline et d'une couche supérieure en silicium amorphe (a-Si)

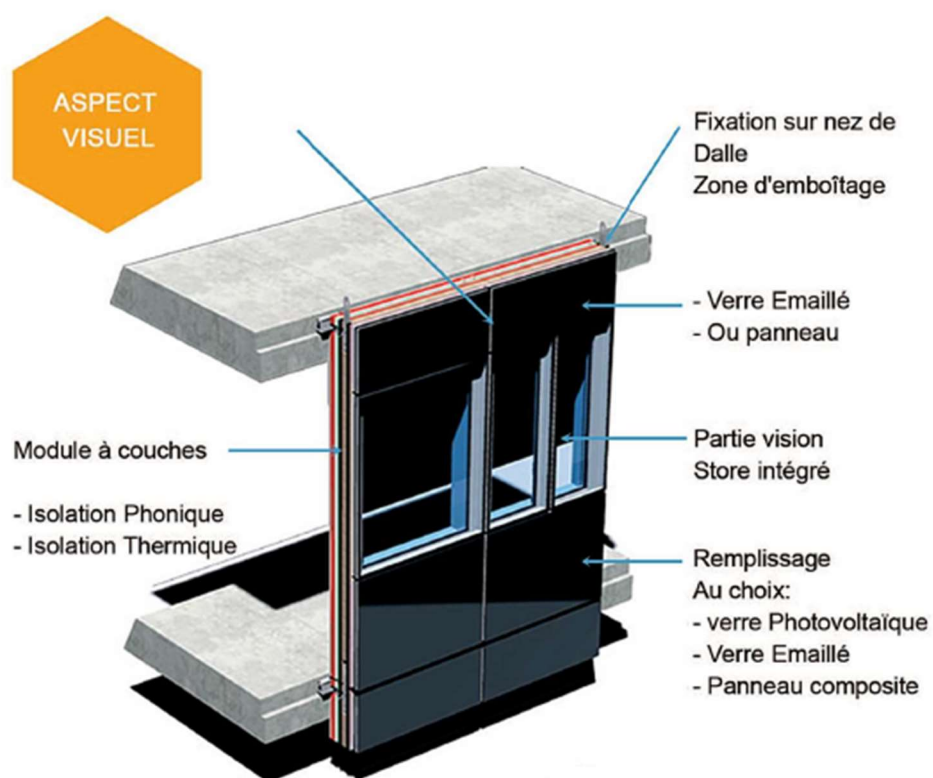
L'avantage du Silicium amorphe est qu'il n'a pas besoin de lumière directe pour produire de l'énergie car il capte davantage la luminosité diffuse. En revanche, son rendement global est plutôt mauvais.

Au vu du système de montage, l'application en nouvelle construction semble privilégiée. Mais l'utilisation d'une façade Face InTec en rénovation n'est pas à exclure, comme le montre l'illustration suivante. Les éléments se fixent à l'ossature horizontale du bâtiment existant (planchers).



Avant/Après - Extrait de Fiche technique Diamant noir Façade haute technologie Façade photovoltaïque, Allouis SA.

Si le système offre la possibilité d'opter pour un aspect des cellules blanc ou noir (Diamant blanc[®] ou Diamant noir[®]), il en ressort cependant un aspect très lisse et uniforme qui ne conviendra pas à de nombreuses applications urbaines.



Description du système - Extrait de Fiche technique Diamant noir Façade haute technologie Façade photovoltaïque, Allouis SA.

Enseignements pour REINTEREST

Bien que la sélection des technologies PV fasse partie du WP2 et non du WP3, il est intéressant ici de formuler certains commentaires relatifs aux technologies discutées ici.

L'usage des cellules PV organiques suggéré par PVme aurait pu s'avérer intéressant car il semblait offrir plus de flexibilité tant dimensionnelle que visuelle (possibilité de conférer au film plusieurs couleurs) en comparaison aux cellules cristallines « traditionnelles ».

Pourtant, il ressort que le produit développé par AGC semble peu adapté au système REINTEREST pour plusieurs raisons:

- Les films, d'une largeur fixe, ne sont pas découpables et ne peuvent, en aucun cas, se chevaucher. Cet aspect limite fortement la flexibilité dimensionnelle pour l'adaptation à des géométries existantes et compromet l'obtention d'un résultat homogène.
- Sur trente centimètres de large, vingt-deux seulement participent au captage photovoltaïque, ce qui, selon nous, représente une perte de surface considérable.
- Les contacts s'intègrent entre deux films et sont visibles à l'œil nu. Le résultat observé sur les démonstrateur d'AGC n'est pas satisfaisant et compromet aussi l'homogénéité de l'ensemble.
- Le poids important des modules verre qui exercent une contrainte importante sur le dessin du cadre porteur et contraint à l'usage d'éléments métalliques qui, d'une part, sont générateurs de faiblesses thermiques et d'autre part, soulèvent des questions de résistance au feu. AGC précise néanmoins qu'il est possible de réduire le verre jusqu'à 3mm d'épaisseur, ce qui engendre évidemment des élévations de coûts conséquents.

Ces différents arguments permettent de conclure que l'usage des films organiques, tels qu'ils sont produits par Heliatek, n'est pas opportun dans le cadre de REINTEREST.

Le projet BFirst, quant à lui, montre des développements du PV pour des applications bâtiments spécifiques et non orientées vers les bâtiments résidentiels.

La solution développée par le projet Face in Tec est proche de l'application visée par REINTEREST. Cette solution cible des bâtiments tertiaires neufs ou en rénovation par remplacement de façades rideaux. Elle subit donc des contraintes liées à l'accroche uniquement possible aux nez de dalles et à l'obligation de proposer une solution finie intérieure et extérieure, là où REINTEREST peut a priori se permettre des fixations plus régulières dans les parois et capitaliser sur la paroi existante.

Cette solution vise également la démonstration d'un concept là où REINTEREST se veut plus ouvert, notamment en termes des choix de matériaux.

Application du système REINTEREST

Le système de rénovation de façade REINTEREST se base sur une intervention par l'extérieur au moyen d'un système combinant isolation et production PV.

Une telle intervention n'est a priori pas pertinente dans l'ensemble des situations pouvant être rencontrées.

Dans cette section, nous commentons les différents types de bâti résidentiels wallon en regard de l'applicabilité a priori du système développé.

Cette analyse est faite en complément des développements du WP1 visant précisément à identifier, sur base de simulations d'impacts, les applications privilégiées du système.

Les types considérés sont repris initialement de l'étude COZEB¹⁹, qui elle-même se base sur une combinaison des typologies d'habitations reprises dans une étude de UCL sur les logements wallons²⁰ et dans l'Energy Consumption Survey²¹ qui détaille la proportion de logements construits par période. Seuls les types construits avant les premières réglementations énergétiques et donc non isolées, sont considérés, ce qui porte à 10 types de bâtis pour les logements unifamiliaux et à 12 types pour les immeubles à appartements. Pour des raisons de recoupement d'informations, le nombre de types étudiés pour les immeubles à appartements est ramené à 8.

Type COZEB	Période	Typologie	Logements	
1	4 façades	Avant 1945	Maison de type vernaculaire	113 197
2	3 façades	Avant 1945	Maison de type ouvrière, avec passage latéral	230 879
3	2 façades	Avant 1945	Maison de type ouvrière	262 091
4	4 façades	Avant 1945	Maison villageoise, entre deux guerres	29 613
5	2 façades	Avant 1945	Maison urbaine moyenne	81 171
6	4 façades	de 1946 à 1970	Villa des premières extensions urbaines	72 082
7	4 façades	de 1946 à 1970	Villa de plain-pied, en périphérie de la ville	91 614
8	2 façades	de 1946 à 1970	Maison de type bel-étage	64 654
9	4 façades	de 1971 à 1984	Villa 4 façades, de type lotissement	92 593
10	2 façades	de 1971 à 1984	Maison « sociale », barre de logements	24 352
11	4 façades	de 1985 à 1995	Villa 4 façades, de type lotissement, K70	68 779
12	3 façades	de 1985 à 1995	Maison 3 façades avec garage latéral, K70	11 352
13	2 façades	de 1985 à 1995	Maison type bel-étage, K70	8 289
14	4 façades	de 1996 à 2008	Villa 4 façades, de type lotissement, K55	110 085
15	2 façades	de 1996 à 2008	Maison ossature bois, type éco-quartier, K55	12 151

POTENTIEL D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

CONSTRUCTIONS RÉCENTES

Fig.: Types et nombre de bâtiments de logement unifamilial établis par l'étude COZEB

¹⁹ L'objectif de l'étude COZEB est de vérifier que les exigences actuelles en matière de performance énergétique qui sont fixées en Région Wallonne ne sont pas inférieures de plus de 15% au résultat du calcul de l'optimalité en fonction des coûts.

²⁰ C. Kints, La rénovation énergétique et durable des logements wallons - Analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires, UCL Architecture et Climat, 2008

²¹ Étude réalisée en 2012 par Le FPS Economy, l'ICEDD et VITO à la demande de Eurostat, Federal Public Service (FPS) Economy, SMEs, Self-Employed and Energy, VEA Flemish Energy Agency, SPW Service Public de Wallonie, IBGE-BIM Brussels Environment,

Type COZEB	Période	Typologie	Logements	
1	Appart	< 1919	Immeuble à appartements d'avant 1919	3 343
2	Appart	< 1919	Maison divisée en appartements d'avant 1919	2 540
3	Appart	< 1919	Maison divisée en appartements + service au rez-de-chaussée	2 540
4	Appart	1919-1945	Maison divisée en appartements de 1919-1945	1 397
11	Appart	1919-1945	Autre : Immeuble à appartements de 1919 à 1945	1 021
5	Appart	de 1946 à 1970	Immeuble à appartements de 1946-1970	2 773
6	Appart	de 1946 à 1970	Immeuble à appartements de 1946-1970	2 773
7	Appart	de 1946 à 1970	Maison divisée en appartements de 1946-1970	2 294
8	Appart	1971-1990	Immeuble à appartements de 1971-1990	3 094
8'	Appart	1971-1990	Immeuble à appartements de 1971-1990	1 547
12	Appart	1971-1990	Autre : dans maison ou sur commerce de 1971 à 1990	1 652
9	Appart	Après 1990	Immeuble à appartements d'après 1990	3 427
10	Appart	Après 1990	Immeuble à appartements d'après 1990	3 427
13	Appart	Après 1990	Autre : dans maison ou sur commerce de 1971 à 1990	1 544

POTENTIEL D'ÉCONOMIE
D' ÉNERGIE

CONSTRUCTIONS
RÉCENTES

Fig.: Types et nombre de bâtiments de logements collectifs établis par l'étude COZEB

L'analyse est basée sur l'a priori que les panneaux dotés de cellules photovoltaïques ne peuvent être accessibles, en raison des risques potentiels liés à l'électrocution, la dégradation ou encore le vol. Dès lors, l'application des cellules à un niveau accessible au public est déconseillée.

Le caractère applicable ou non est évalué de façon globale pour un type de logement. Un jugement de faible applicabilité n'exclut pas la possibilité que certaines situations couvertes par ce type soient malgré tout pertinentes. Cette étude a pour objectif d'identifier les cibles prioritaires, mais en aucun cas d'exclure l'un ou l'autre type de bâtiment définitivement.

Différents critères influençant le niveau d'applicabilité du système peuvent être directement observés sur base des types de bâtiments.

- ❖ La valeur patrimoniale (reconnue officiellement à l'inventaire du patrimoine, ou non)
- ❖ La contrainte urbanistique: intégration à un contexte urbain ou rural défini, alignement au front bâti,...
- ❖ L'adaptabilité constructive et/ou technique: caractéristiques des parois/supports existant(es), géométrie ou composition de façade complexe, présence d'extensions, présence d'ornementations, présence d'éléments saillants (balcon, loggia, seuil ...)
- ❖ La surface exploitable en façade (à l'exception des parties accessibles au grand public) : le type et la fréquence des surfaces vitrées, le nombre d'étages, ...

D'autres critères propre à chaque bâtiment peuvent également être déterminants pour valider l'applicabilité du système au cas par cas:

- ❖ Certaines questions juridiques
 - soit liées à la copropriété
 - soit liées à la conformité du bâtiment aux normes urbanistiques du lieu
- ❖ La localisation du bâtiment
 - pour permettre l'accessibilité du lieu à des camions

- pour permettre la manutention de grands éléments préfabriqués
- pour garantir un niveau d'ensoleillement suffisant (outil d'aide à la décision et/ou conception développé par le WP1)

Bâtiments de logement unifamilial

Type 1 - 4 façades vernaculaire



Système REINTEREST a priori peu applicable pour les raisons suivantes:

- La valeur patrimoniale forte des bâtiments exclut l'isolation par l'extérieur
- Des incompatibilités urbanistiques sont attendues, liées à l'intégration de façades "high tech" dans des contextes bâtis à valeur patrimoniale ou paysagère
- Des incompatibilités constructives sont attendues, liées notamment à la non planéité et à la forte rugosité des murs, complexifiant la pose d'éléments standardisés

Type 2 - maison ouvrière avec passage latéral



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

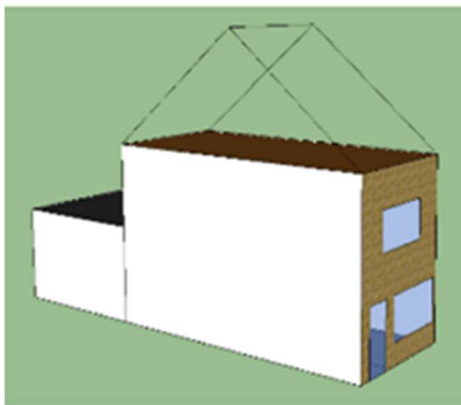
- La valeur patrimoniale des bâtiments est généralement faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés

Les points d'attention suivants sont néanmoins à soulever:

- Des risques d'incompatibilité urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti et l'alignement du front bâti
- La présence assez fréquente de nombreuses extensions à l'arrière du bâti limite la surface exploitable et multiplie les décrochements et pièces d'angles qui élèveront le coût global du système. Ces annexes doivent également souvent faire l'objet de régularisations urbanistiques.

La surface d'exploitation possible est jugée "moyenne", grâce à des grands pignons souvent aveugles mais fréquemment ombragés et un faible nombre de niveaux exploitables en façades principales (1 niveau).

Type 3 - maison ouvrière mitoyenne



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

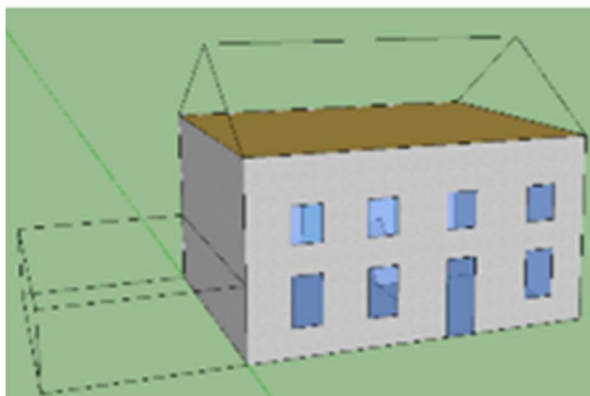
- La valeur patrimoniale des bâtiments est généralement faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés

Les points d'attention suivants sont néanmoins à soulever:

- Des risques d'incompatibilité urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti et l'alignement du front bâti
- La présence fréquente de nombreuses extensions à l'arrière du bâti limite la surface exploitable et multiplie les décrochements et pièces d'angles qui élèveront le coût global du système. Ces annexes doivent également souvent faire l'objet de régularisations urbanistiques.

La surface d'exploitation possible est jugée "faible", du fait du faible nombre de niveau exploitables en façades principales (1 étage).

Type 4 - maison villageoise entre 2 guerres mitoyenne



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

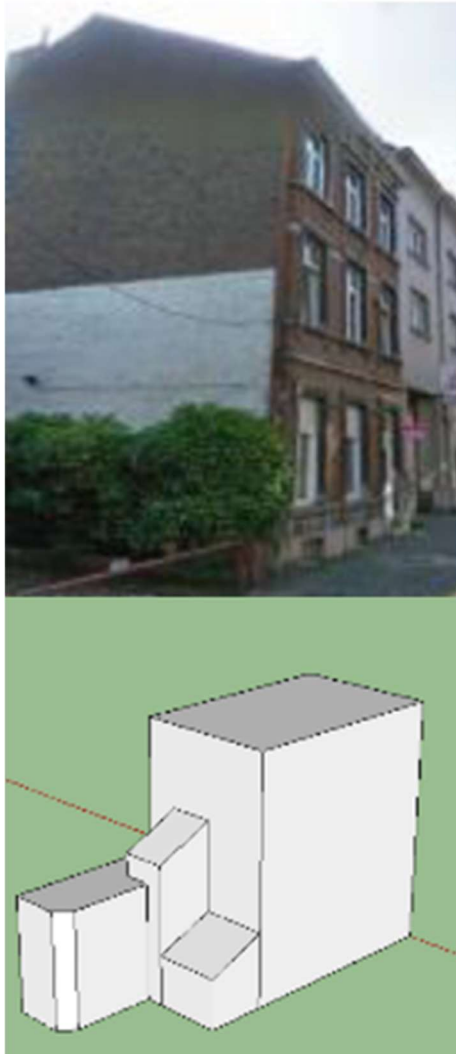
- La valeur patrimoniale des bâtiments eux-mêmes est généralement faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés
- La volumétrie est simple

Les points d'attention suivants sont néanmoins à soulever:

- Des risques d'incompatibilité urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti et paysager ou à une potentielle valeur patrimoniale.

La surface d'exploitation possible est jugée "élevée", du fait des pignons peu ouverts et peu ombragés, malgré la surface exploitable réduite en façades principales (1 étage).

Type 5 - maison urbaine mitoyenne



Système REINTEREST a priori peu applicable pour les raisons suivantes:

- Des risques d'incompatibilités urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti (ville) et l'alignement du front bâti, ou à une potentielle valeur patrimoniale.
- La présence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants qui complique l'application d'éléments de façade standardisés
- La présence de nombreuses extensions à l'arrière du bâti limite la surface exploitable et multiplie les décrochements et pièces d'angles qui élèveront le coût global du système. Ces annexes doivent également souvent faire l'objet de régularisations urbanistiques.

En revanche, il est à souligner que le nombre de niveaux souvent élevé (R+2 ou 3) permettrait une surface d'exploitation assez élevée (2-3 niveaux).

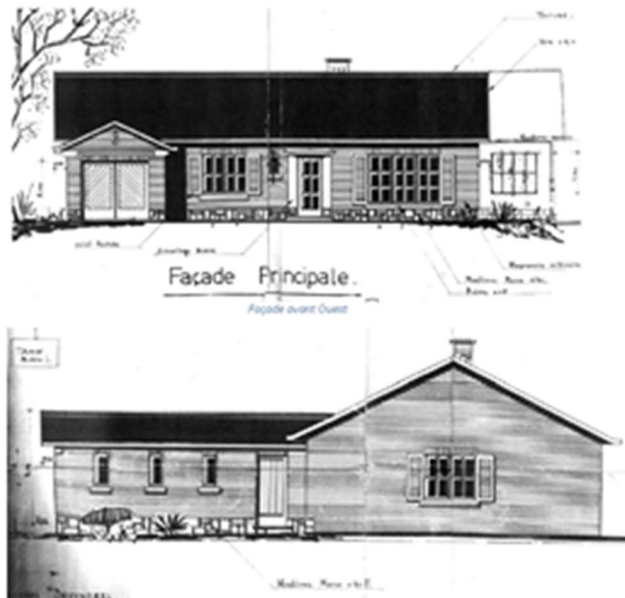
Type 6 - villa des premières extensions urbaines



Système REINTEREST a priori peu applicable pour les raisons suivantes:

- Des géométries complexes tant en façade avant qu'en façade arrière
- La présence fréquente de jeux de couleurs et matériaux qui complexifient l'acceptabilité urbanistique d'une intervention sur les façades.
- Des surfaces d'exploitation faibles liées à la construction de plain-peid

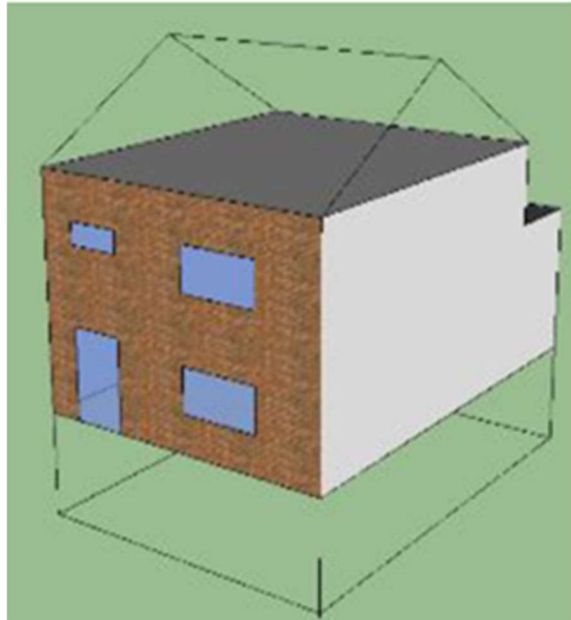
Type 7 - villa de plain-pied, en périphérie de la ville



Système REINTEREST a priori peu applicable pour les raisons suivantes:

- Des géométries complexes tant en face avant qu'en face arrière
- La présence fréquente de jeux de couleurs et matériaux qui complexifient l'acceptabilité urbanistique d'une intervention sur les façades.
- Des surfaces d'exploitation faibles liées à la construction de plain-pied et à la fréquence élevée de toits dépassants qui créent des ombres portées importantes sur la façade.

Type 8 - maison de type bel-étage, 2 façades



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

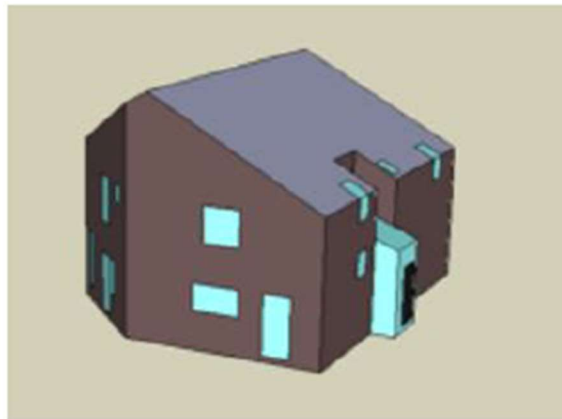
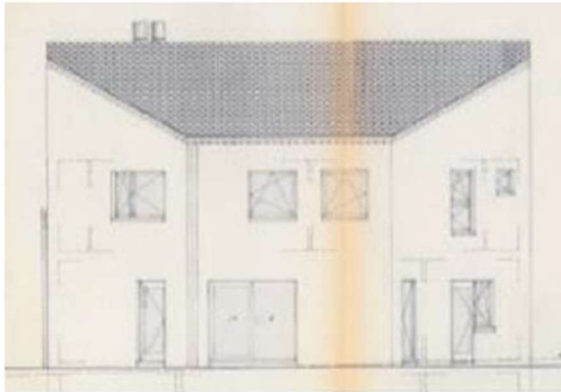
- La valeur patrimoniale des bâtiments est généralement faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés

Les points d'attention suivants sont néanmoins à soulever:

- Des risques d'incompatibilités urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti et paysager ou à une potentielle valeur patrimoniale.

La surface d'exploitation possible est jugée "limitée", du fait du faible nombre de niveaux exploitables (1 niveau).

Type 9 - Villa 4 façades, de type lotissement



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- La valeur patrimoniale des bâtiments est généralement faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés
- La volumétrie est généralement simple
- Ce type de bâtiment s'implante généralement en recul par rapport à la voirie, ce qui limite les contraintes urbanistiques.

Le point d'attention suivant est néanmoins à soulever:

- Malgré une surface vitrée assez limitée, la composition de façade peut potentiellement être complexe. Ceci nécessite une évaluation au cas par cas.

La surface d'exploitation possible est jugée relativement "élevée", du fait du nombre de niveaux exploitables (1 ou 2 niveaux) et de la surface vitrée assez réduite.

Type 10 - Maison «sociale», barre de logements



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- La valeur patrimoniale des bâtiments est généralement faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés
- La géométrie est simple et la composition de façade est rationnelle et répétitive.
- Les pignons de ces barres de logements sont aveugles et généralement peu ombragés, ce qui représente une surface d'exploitation intéressante.

La surface d'exploitation possible est jugée relativement "élevée", du fait du nombre de niveaux exploitables (2 niveaux).

Si le système REINTEREST est envisagé pour l'ensemble de la barre, ce qui semble le plus pertinent, l'opportunité que représente le pignon aveugle est une importante plus-value en terme de surface exploitable.

Bâtiments de logements collectifs

Type 1 - Immeuble à appartements avant 1919



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés
- La composition de façade est rationnelle et répétitive.
- La surface d'exploitation est favorisée par le nombre de niveaux non accessibles au public (>3niveaux)

Le point d'attention suivant est néanmoins à soulever:

- La valeur patrimoniale des bâtiments potentiellement importante
- Géométrie potentiellement complexe (décrochements de façade)

La surface d'exploitation possible est jugée "élevée", du fait du nombre de niveaux exploitables (>3niveaux).

Type 2 - Maison 2 façades d'avant 1919 divisée en appartements



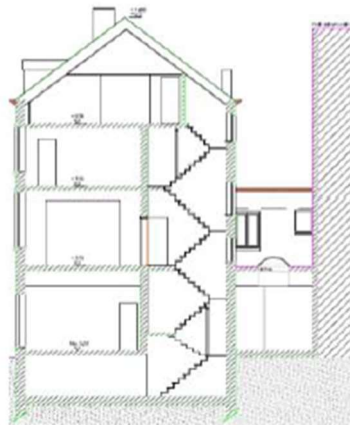
Système REINTEREST a priori peu applicable pour les raisons suivantes:

- Des risques d'incompatibilités urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti (ville) et l'alignement du front bâti, ou à une potentielle valeur patrimoniale.
- La présence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants qui complique l'application d'éléments de façade standardisés

En revanche, il est à souligner que le nombre de niveaux souvent élevé (R+2 ou 3) permettrait une surface d'exploitation assez élevée (2-3 niveaux).

Il est aussi à noter que dans les cas d'immeubles dépassants par rapport au bâti voisin, la rehausse des murs mitoyens (voir illustration ci-dessus) offre des opportunités de surface exploitable intéressantes.

Type 3 - Maison 2 façades d'avant 1919 divisée en appartements + service au rez-de-chaussée



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- La valeur patrimoniale des bâtiments est souvent faible (sauf dans le cas des devantures classées)
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés
- La composition de façade est rationnelle et répétitive.

Le point d'attention suivant est néanmoins à soulever:

- La présence assez fréquente d'une extension continue à l'arrière du bâti qui est nécessaire au commerce et limite la surface exploitable en façade arrière.
- Des risques d'incompatibilités urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti (ville) et l'alignement du front bâti.

La surface d'exploitation possible est jugée "moyenne", du fait du nombre de niveaux exploitables (2-3 niveaux).

Type 4 - Maison entre 1919 et 1945 divisée en appartements



Système REINTEREST a priori peu applicable pour les raisons suivantes:

- Des risques d'incompatibilités urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti (ville) et l'alignement du front bâti, ou à une potentielle valeur patrimoniale.
- La présence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou de dépassants qui complique l'application d'éléments de façade standardisés
- La surface vitrée est importante et réduit la surface d'exploitation

En revanche, il est à souligner que le nombre de niveaux souvent élevé (R+3 ou 4) permettrait une surface d'exploitation assez élevée (3-4 niveaux).

Il est aussi à noter que dans les cas d'immeubles dépassants par rapport au bâti voisin, la rehausse des murs mitoyens offre des opportunités de surface exploitable intéressantes.

Type 5 - Immeuble à appartements urbains entre 1946 et 1970

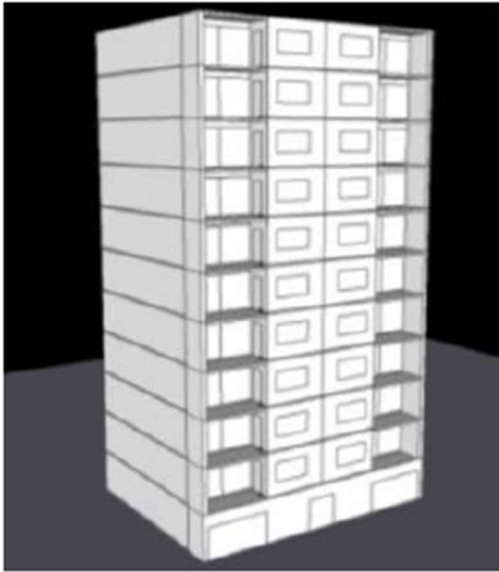


Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- La valeur patrimoniale des bâtiments est souvent faible
- Il existe une tolérance de décrochement par rapport au front bâti. L'application d'un élément en surépaisseur de la façade existante est acceptable.
- La composition de façade "en bandeaux" est rationnelle et répétitive. Si la façade avant est largement vitrée, elle offre tout de même des surfaces d'exploitation continues.
- La surface d'exploitation est favorisée par le nombre de niveaux non accessible au public.
- Dans les cas d'immeubles dépassants par rapport au bâti voisin (tel que l'illustration ci-dessus), la rehausse des murs mitoyens aveugles offre des opportunités de surface exploitable intéressantes.

La surface d'exploitation possible est jugée relativement "élevée", du fait du nombre de niveaux exploitables (>5 niveaux).

Type 6 - Immeuble à appartements isolés entre 1946 et 1990



De 1946 à 1970



De 1971 à 1990

Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- Du point de vue de l'adaptabilité urbanistique, ce type d'immeuble est généralement isolé et présente peu de relation avec les bâtiments voisins.
- La valeur patrimoniale des bâtiments est souvent faible
- Si deux des 4 façades (les plus longues) sont largement vitrées, les deux façades latérales sont généralement beaucoup plus fermées, voir aveugles, ce qui offre des surfaces d'exploitation continues intéressantes.
- Le caractère isolé de l'immeuble l'expose théoriquement au soleil. Seule la végétation environnante est susceptible de créer de l'ombrage, ce qui maximise les surfaces exploitables.
- La surface d'exploitation est favorisée par le nombre de niveaux non accessible au public (>7 niveaux).
- Dans une démarche de rénovation globale du bâtiment, il serait envisageable d'intégrer les balcons existants à l'enveloppe thermique, ce qui permettrait d'optimiser les surfaces d'exploitation sur les 2 longues façades.

La surface d'exploitation possible est jugée "élevée", du fait du nombre de niveaux exploitables (>7 niveaux).

Type 7 - Maison entre 1946 et 1970 divisée en appartements



Système REINTEREST a priori applicable pour les raisons suivantes:

- La valeur patrimoniale des bâtiments est souvent faible
- L'absence d'ornementations, d'éléments décoratifs ou dépassants facilite l'application d'éléments de façade standardisés
- La volumétrie est simple et la composition de façade est rationnelle et répétitive.

Le point d'attention suivant est néanmoins à soulever:

- Des risques d'incompatibilités urbanistique sont présents, liés à l'intégration dans le contexte bâti (ville) et l'alignement du front bâti.

La surface d'exploitation possible est jugée "moyenne", du fait du nombre de niveaux exploitables (2 niveaux).

Conclusion - limites d'application

Sur base de l'analyse ci-dessus, nous reprenons en un tableau les différents types de bâti, leur représentativité du stock bâti wallon (total de 1.555.013 bâtiments unifamiliaux + collectifs) et une conclusion relative à la pertinence du système REINTEREST.

En croisant le potentiel par logement avec le nombre de logements concernés, il ressort que les maisons ouvrières, si on les considère comme des ensembles, et les barres de logement sont des applications particulièrement pertinentes pour le système REINTEREST.

Type COZEB		Période	Type de logement unifamilial	#Logements	Evaluation	potentiel par bâtiment
1	4 façades	Avant 1945	Maison de type vernaculaire	113 197	peu applicable	-
2	3 façades	Avant 1945	Maison de type ouvrière, avec passage latéral	230 879	applicable	moyen
3	2 façades	Avant 1945	Maison de type ouvrière	262 091	applicable	limité
4	4 façades	Avant 1945	Maison villageoise, entre deux guerres	29 613	applicable	élevé
5	2 façades	Avant 1945	Maison urbaine moyenne	81 171	peu applicable	-
6	4 façades	de 1946 à 1970	Villa des premières extensions urbaines	72 082	peu applicable	-
7	4 façades	de 1946 à 1970	Villa de plain-pied, en périphérie de la ville	91 614	peu applicable	-
8	2 façades	de 1946 à 1970	Maison de type bel-étage	64 654	applicable	limité
9	4 façades	de 1971 à 1984	Villa 4 façades, de type lotissement	92 593	applicable	élevé
10	2 ou 3 façades	de 1971 à 1984	Maison «sociale», barre de logements	24 352	applicable	élevé

Type COZEB		Période	Type de logement collectif	#Logements	Evaluation	potentiel par bâtiment
1	2 à 4 façades	Avant 1919	Immeuble à appartements	3 343	applicable	élevé
2	2 façades	Avant 1919	Maison divisée en appartements	2540	peu applicable	-
3	2 façades	avant 1919	Maison divisée en appartements + services au rez-de-chaussée	2540	applicable	moyenne
4	2 (voir 3) façades	de 1919 à	Maison divisée en appartements	1397	peu	-

		1945			applicable	
5	2 (voir 3) façades	de 1946 à 1970	Immeuble à appartements urbain	5547	applicable	élevé_
6	4 façades	de 1946 à 1990	Immeuble à appartements isolé	4640	applicable	élevé
7	2-3 façades	de 1946 à 1970	Maison divisée en appartements	2294	applicable	moyenne

Développement du système REINTEREST

Cahier des charges

Au vu des objectifs du projet REINTEREST, le système à mettre en place doit remplir plusieurs rôles et satisfaire à plusieurs exigences.

Le rôle du système est de :

- Supporter des éléments producteurs d'énergie sélectionnés par le WP2
- Améliorer l'isolation thermique des parois. L'objectif étant d'atteindre soit l'exigence minimale PEB de $0,24\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, soit une exigence plus forte inspirée du standard maison passive $<0.15\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Le système doit par ailleurs répondre à des exigences techniques globales :

- Être stable tant une fois mis en œuvre que lors du montage
- Répondre aux prescriptions en matière de sécurité incendie des éléments de façade
- Le système étant destiné à être fixé à une paroi existante, il doit permettre l'adaptation à un support qui n'est pas nécessairement plan. Il est nécessaire que les panneaux épousent les irrégularités car tous les vides laissés en construction présentent des risques de dégradation ou d'affaiblissement de performances. Un niveau d'irrégularité supérieur à ce que peut absorber le système exclut l'applicabilité de celui-ci. Le projet AIMES par exemple prévoit la pose d'un isolant compressible sur la face intérieure du panneau qui se comprime sur le mur de support. Mais d'autres solutions sont envisageables si l'on souhaite pousser le niveau de préfabrication plus loin, par exemple recourir à un relevé 3D de la façade et la réalisation d'un isolant "creusé" sur mesure.
- Être en mesure de répondre à des contraintes de mise en œuvre diverses : accessibilité du lieu de mise en œuvre, géométries complexes, stabilité du bâtiment et/ou fondations insuffisantes, ... Toutes ces situations affectent la composition du système, le niveau de préfabrication et la taille des éléments.
- Être en mesure de répondre à des limitations urbanistiques: les normes urbanistiques sont parfois très strictes lorsqu'un changement d'aspect esthétique ou formel se profile... Dans le cas du système REINTEREST, l'application des éléments par l'extérieur de l'enveloppe existante implique, non seulement un changement d'aspect, mais aussi une déportation systématique de la limite extérieure de la façade. Dans le cas d'un front bâti aligné aux constructions voisines, un décrochement de façade est difficilement évitable. Il conviendra, dans certaines situations, d'opter pour des matériaux ultrafins et peut-être ultra performants (ex: super-isolants), afin de réduire l'épaisseur et donc l'impact visuel du décrochement.
L'application de cellules photovoltaïques en façade implique aussi un changement d'aspect. Le choix de la technologie photovoltaïque et de son mode d'encapsulation permet dans certains cas d'envisager des variantes de teinte, de réflexion (effet miroir) et de texture, voire de la sérigraphie. Mais s'il est possible de reproduire des impressions, il va de soi qu'une contrainte urbanistique imposant des matériaux précis (briques, crépis, bois...) ne pourra être respectée... Il conviendra d'engager une discussion avec les autorités concernées et de justifier l'intérêt et la pertinence d'une façade active suivant chaque situation.
- Anticiper des risques de dégradation ou de vol

Chaque système peut en outre être décrit par des performances globales relevant :

- Du niveau de préfabrication liée à la maîtrise des coûts, des nuisances sur chantier, à la facilité de mise en œuvre et garantie de qualité du système

- De la viabilité économique
- Du bilan environnemental, ce qui impacte la nature des matériaux mis en œuvre, mais également la capacité de désassemblage du système et sa recyclabilité potentielle
- De la capacité à être adaptable à des types de matériaux variés selon les besoins spécifiques à chaque projet.

Chacun des éléments du système doit par ailleurs répondre à des exigences techniques performantielles qui lui sont propre, décrites ci-dessous, parmi lesquelles:

- La résistance thermique
- L'étanchéité à l'air ou du moins attention portée à celle-ci afin de prévenir les risques de condensation
- L'impact esthétique répondant au contexte et aux attentes
- La résistance aux intempéries, étanchéité à la pluie

Le développement du système se nourrit de la littérature et des projets existants, ayant déjà prouvé leur efficacité. Néanmoins, avant d'établir une composition de façade active qui soit cohérente, il faut procéder à des choix non directement lié à la question de la composition de façade et établir des priorités.

Le choix du mode constructif est, en effet, conditionné par plusieurs critères externes :

- Le choix des technologies photovoltaïques
- Le mode d'encapsulation des cellules photovoltaïques
- La présence ou non d'une coulisse d'air
- La présence ou non d'un système de stockage de l'énergie excédentaire
- L'intégration d'un système de monitoring et de régulation intelligent
- Le niveau de préfabrication souhaité

Ces points sont abordés dans la première sous-section ci-dessous.

Nous développerons ensuite les critères de sélection des différents matériaux.

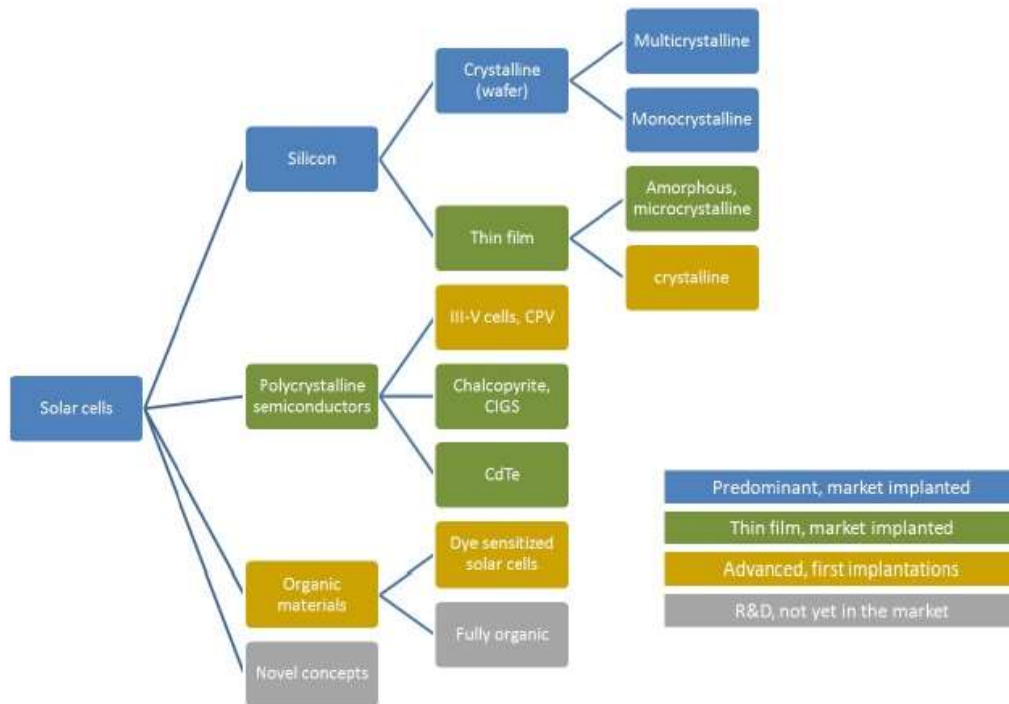
Pour terminer, nous aborderons la conception générale des variantes du système REINTEREST afin de développer dans les prochains mois, une analyse fine de chaque composant.

Choix préalables liés aux critères externes

Le choix des technologies photovoltaïques

Différentes technologies photovoltaïques sont envisageables pour le système développé ici. Leur inventaire et les choix à privilégier font partie du WP2. Il convient donc de se rapporter aux livrables de ce WP pour la description et justification des choix relatifs à ces technologies.

A ce stade de développement du projet, ces choix ne sont pas "définitifs".



Technologies photovoltaïques et distribution sur le marché, in Integrating PV into a Textile Architecture to Power Façade Lighting, ETFE-MFM project

Encapsulation des technologies photovoltaïques

L'encapsulation joue un rôle important. Son influence sur la fiabilité et la performance des cellules photovoltaïques qu'elle intègre est significative²².

Le mode d'encapsulation aura surtout une influence considérable sur le poids des éléments. Le dimensionnement de la structure du caisson (qui doit également supporter le poids des modules PV) en sera forcément affecté. C'est donc un critère déterminant.

Le caractère démontable et réemployable des différents éléments qui compose le module PV est aussi un critère de choix dont on ne peut se détourner dans une démarche de réduction de l'impact environnemental de nos modes de fonctionnement.

En pratique, l'encapsulation ne se limite pas à une mise en sandwich des cellules entre deux films: elle *"consiste à regrouper des cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs tels que l'humidité, la pluie, la neige, les poussières, la corrosion, les chocs mécaniques, etc."*²³

Selon le Professeur E. Matagne de l'UCL²⁴, les matériaux utilisés pour l'encapsulation doivent avoir une

²² Husam M. Walwil, A. Mukhaimer, F.A. Al-Sulaiman, Syed A.M. Said, Comparative studies of encapsulation and glass surface modification impacts on PV performance in a desert climate, Rev. Solar Energy 142 (2017) 288–298

²³ A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous, Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre, Rev. Energ. Ren. Vol. 9 (2006) 37 - 42

²⁴ Cours sur l'énergie solaire photovoltaïque du Prof. E. Matagne consulté sur le site

durée de vie élevée malgré la température, les variations de température et l'exposition aux rayons UV. Les modules doivent aussi résister aux efforts mécaniques (transport, montage, efforts éoliens) et aux averses de grêle. Ils doivent pouvoir se fixer facilement sur une structure.

En plus de ces critères, d'autres comme le coût, la transparence, une bonne conductivité thermique peuvent être des paramètres importants dans le cas de certaines applications.

Le Professeur Matagne distingue 2 méthodes opposées :

- soit insérer les cellules dans un espace vide compris entre deux vitres
- soit immerger complètement les cellules dans un polymère, ce qui correspond à l'encapsulation.

Dans le premier cas, les risques de pénétration d'humidité sont plus grands, mais des traces d'humidité pourront plus facilement être évacuées. Dans le second cas, l'étanchéité est meilleure, mais toute entrée d'humidité est catastrophique.

Traditionnellement, les cellules cristallines s'insèrent entre deux feuilles de verre (module bi-verre) ou entre une feuille de verre et une backsheet faite de couches minces de polymère et d'aluminium (module mono-verre).

Actuellement, le matériau encapsulant qui domine le marché est l'EVA (Ethylene-Vinyl Acetate)²⁵. Plusieurs caractéristiques font de l'EVA un matériau de choix pour l'encapsulation²⁶ :

- Une résistivité électrique très élevée le classe comme un bon isolant électrique
- Ses températures de fusion et de polymérisation relativement faibles
- Son taux d'absorption d'eau très faible
- Sa bonne transmission optique
- Son coût, relativement faible

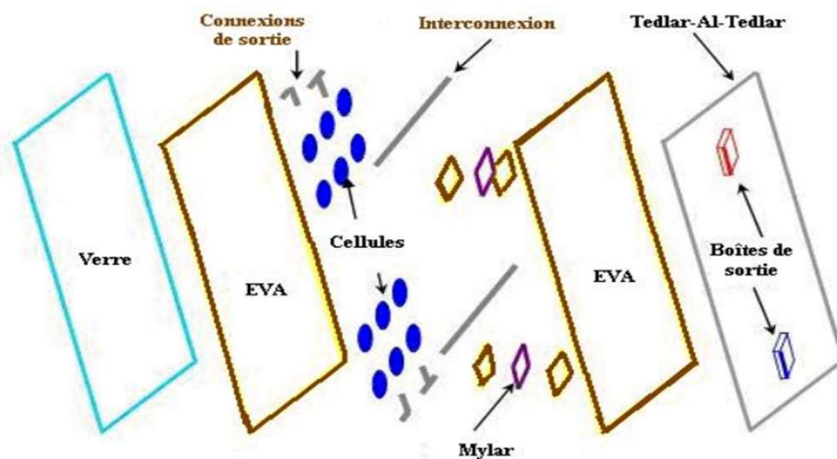


Schéma éclaté d'un module de type mono-verre In A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous, Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre, Rev. Energ. Ren. Vol. 9 (2006) 37 - 42

<https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/INDEX.HTM> - Dernière consultation le 27/06/2017.

²⁵ S. Sala, M. Campaniello, et al., 2009. Experimental study of polymers as encapsulating materials for photovoltaic modules. Microelectronics and Packaging Conference, 2009. EMPC 2009. IEEE, European.

²⁶ A. El Amrani, A. Mahrane, F.Y. Moussa et Y. Boukennous, Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre, Rev. Energ. Ren. Vol. 9 (2006) 37 - 42

D'autres polymères apparaissent aujourd'hui comme des alternatives plausibles: le polydiméthylsiloxane (PDMS), le polyvinyl butyral (PVB), le thermoplastique polyuréthane (TPU) ou encore le Ionomer, ont gagné de l'intérêt.²⁷

Si les modules composés de verre sont actuellement les plus répandus sur le marché, ils présentent néanmoins plusieurs inconvénients majeurs dont le plus important est probablement le poids élevé.

En réponse aux récentes applications du photovoltaïque générant des besoins différents (notamment le BIPV) et à l'apparition de générations de modules photovoltaïques, de nombreuses recherches sont aujourd'hui menées pour développer de nouveaux procédés d'encapsulation.

Le projet ETFE MFM nous a, quant à lui, permis d'explorer la piste de l'ETFE (éthylène tétrafluorethylène) comme une alternative d'encapsulation pertinente et complète remplaçant totalement l'usage du verre. En effet, dans ce cadre d'application, l'ETFE remplace à la fois le verre et les films encapsulants de type EVA.

Les propriétés de l'ETFE sont intéressantes: flexibilité, réduction du poids et de l'épaisseur par rapport au verre, transmission de lumière supérieure au verre, facilité de manutention et de mise en œuvre, autonettoyant, durée de vie présumée supérieure à 50 ans, excellente résistance aux intempéries, aux UV et aux agents chimiques, bonne résistance au feu, isolation thermique relativement élevée.

L'analyse du cycle de vie des produits ETFE montre également de meilleurs résultats et un impact environnemental plus faible que le verre, en particulier à l'étape du recyclage.

La technologie photovoltaïque privilégiée dans le projet ETFE MFM, le CIGS (alliage de Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium), a été sélectionnée pour des raisons de performance électrique, de flexibilité et de disponibilité sur le marché. Mais il est probable que le système soit compatible avec d'autres technologies en développement.



ETFE film application, AWM Carport, Munich, Germany

La combinaison de l'ETFE avec des technologies photovoltaïques est déjà présente sur le marché. La compagnie chinoise Sunman, par exemple, produit des panneaux photovoltaïques recouverts d'un film

²⁷ O. Hasan, A.F.M. Arif, Performance and life prediction model for photovoltaic modules: Effect of encapsulant constitutive behavior, *Solar Energy Materials & Solar cells* 122 (2014) 75-87

ETFE: le Nowoflon produit par la firme Nowofol ou le Fluon de AGC chemicals. On citera également Solbian qui réalise ainsi des panneaux photovoltaïques pour le yachting, ou encore DAS Energy.

L'ECTFE (Ethylene TriChloroFluoroEthylene) est également une alternative qui semble pertinente. On peut citer, à cet égard, le produit Halar® réalisé par Solvay Specialty Polymers.

L'alternative de l'ETFE ou de l'ECTFE comme mode d'encapsulation fera l'objet d'une étude plus complète au chapitre "choix des matériaux".

Le rôle de la coulisse d'air

Le choix d'encapsulation des cellules va engager la nécessité, ou non, de réaliser une coulisse d'air entre les panneaux et les cellules.

Une lame d'air a 3 rôles potentiels :

- Ventiler les cellules (quand cela est nécessaire)
- Stocker l'énergie calorifique produite par les rayons lumineux au travers du matériau d'encapsulation et ainsi diminuer le ΔT de part et d'autre de la paroi (voir projets plus bas)
- Contenir les batteries de stockage nécessaires si celles-ci ne trouvent pas place à l'intérieur du local.

La présence d'une lame d'air nécessiterait, de préférence, la possibilité d'y accéder ponctuellement (surtout si les batteries s'y entreposent !) et donc un certain niveau de démontabilité du système, ou d'une partie de celui-ci.

Plusieurs systèmes utilisent le vide et l'air immobile qu'il contient pour améliorer l'isolation thermiques (et acoustiques) du bâtiment.

C'est le cas du système GAP, développé par Gap Solutions GmbH (AT), dont l'objectif est d'atteindre une très haute isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment (tant en rénovation qu'en nouvelle construction) en stockant dans une structure alvéolaire en cellulose l'énergie émise par la lumière du soleil. Le produit qui en résulte est un panneau de construction préfabriqué et assemblé en usine, incorporant l'isolation, mais également, dans les cas les plus évolués, la ventilation (produit Gap :air) et l'ECS (produit GAP :water), garantissant des besoins en énergie de chauffage très faibles (<10kWh/m².an) et une réduction ECS de + de 50%.

Le système GAP :air est compatible avec l'insertion de cellules photovoltaïques dans le système qui alimentent directement en courant continu les chauffe-eaux électriques.

Le groupe Vector Foiltec développe quant à lui un système de coussins d'air en ETFE qui suit le même principe physique. Les coussins gonflables ETFE sont composées de deux, trois ou quatre couches de film qui retiennent un volume d'air immobile, conférant à la toiture sa rigidité et assurant à la couverture un bon pouvoir isolant. Les films utilisés sont produits par Nowofol (films Nowoflon).

Selon un groupe de chercheurs de l'Université Jiao Tong à Shanghai²⁸, les intérêts de l'usage des feuilles

²⁸ J. Hu, W. Chen, B. Zao, D. Yang, Building with ETFE foils : A review on materials properties, architectural performance and structural Behavior, Construction and building materials 131 (2017) 411-422

ETFE comme matériau de construction pour les bâtiments publics sont nombreux:

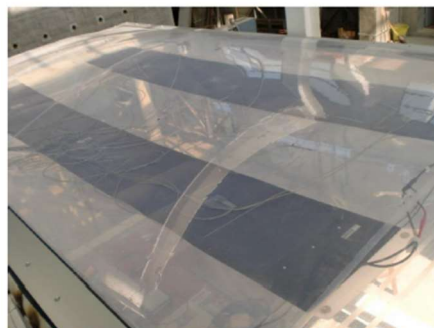
- Auto-nettoyant grâce à sa résistance aux agents chimiques, l'ETFE propose une apparence esthétique attractive et nécessite des coûts de maintenance peu élevés comparé à d'autres types de membranes.
- Très bonne transmission lumineuse: 94-97%, équivalente à celle du vitrage et meilleure que d'autres matériaux + transparence aux ultra-violets : 83-88%
- Résistance au feu: en cas d'incendie, le matériau s'auto-éteint grâce à la fluorine dans sa structure chimique et sa teneur faible en oxygène. Le matériau produit cependant des fumées toxiques lorsqu'il atteint des températures supérieures à 800°.
- Pas de risque de brisure par rapport au verre
- Faible conductivité thermique: de 2.94 à 1.18W/(m2.K) pour 2 à 5 couches/coussin de ETFE.
- L'énergie nécessaire à la fabrication, au transport et à la mise en œuvre est assez faible.
- LCA assez faible, capacité recyclable.
- Stabilité face au vent, à la neige, à des charges thermiques, ainsi qu'à leur combinaison éventuelle.

Il est possible d'introduire des variables au système de coussins d'air en jouant sur le nombre de couches, la pigmentation ou l'impression de motifs.

Par exemple, la pression d'air dans les coussins peut être variable en fonction des nécessités climatiques, ce qui rend l'enveloppe dynamique. Les coussins peuvent intégrer des motifs qui à la fois créent de l'ombre et produisent de l'énergie si on y intègre des cellules solaires.



(a) Experimental mock-up



(b) PV arrangement

Mock-up expérimental et intégration du PV in J. Hu, B. Zhao, W-J. Chen, Y. Qu, Structural behavior of the PV–ETFE cushion roof, Thin-Walled Structures · Avril 2016

Le développement d'une peau flexible photovoltaïque permet l'absorption d'une quantité importante d'énergie solaire indésirable (davantage que les cellules cristallines conventionnelles) et transforme ainsi une peau initialement inerte en une membrane productrice d'énergie.

L'intégration d'un système de monitoring et de régulation intelligent

Dans le cadre de REINTEREST, le développement et l'intégration du contrôle intelligent des éléments de façade active fait partie du WP4.

L'objectif serait d'évaluer les besoins propres des utilisateurs, de monitorer les performances de la façade active et de synchroniser le fonctionnement des éléments internes HVAC (chaudière, pompe à chaleur, ventilation, production d'électricité) en fonction de ces données.

L'intégration de certains éléments et/ou câblages est à prendre en compte dans la composition et la préfabrication des éléments de façade.

Niveau de préfabrication souhaité

Dans le projet REINTEREST, un niveau de préfabrication élevé est favorisé car:

- Les coûts globaux (relatifs à la main d'oeuvre, à la matière et au transport) sont logiquement réduits (et d'autant plus si le processus de préfabrication est répété)
- Le travail en atelier est plus agréable et moins influencé par les conditions climatiques
- Le contrôle de qualité est rendu plus aisé et affiné
- La durée d'intervention sur chantier est réduite, ce qui, en théorie, évite aux occupants le coûteux désagrément de devoir déménager pendant la durée des travaux (de simples carottages à quelques endroits clés dans les murs existants permettraient les raccordements électriques et électroniques)

Néanmoins, il nous semble important que la construction du système reste à la portée de tout professionnel du secteur. A ce stade, il n'est pas envisagé de développer un produit réservé à l'usage de l'une ou l'autre entreprise.

On privilégiera donc un mode de composition et des assemblages simple, limitant les opérations sur chantier mais également en atelier.

Il s'agira également de penser la composition de façade de façon rationnelle, en jouant avec les dimensions et les orientations, afin d'éviter au maximum les géométries contraignantes. La logique voudra que la composition de la nouvelle façade se calque sur la grille constructive du bâtiment existant (axes, hauteur d'étage etc...) qui, sauf exception, suit une organisation rationnelle.

Il en demeure que la préfabrication nécessite un travail d'étude, de prise de mesure et de relevé géométrique préalable très précis.

Un processus privilégiant la préfabrication nécessite une grande interaction et une communication claire entre les différents intervenants du projet en raison de la rapidité de la phase d'exécution et la faible marge d'erreur tolérable. Le planning détaillant les différentes séquences d'intervention doit être réaliste et précis.

Critères de sélection des matériaux

L'objectif du projet REINTEREST est de développer un système compatible avec la diversité des géométries et configurations qui caractérisent les bâtiments existants. La composition du panneau doit donc pouvoir s'adapter à des types de matériaux variés selon les besoins spécifiques à chaque projet.

Pour chaque couche des systèmes proposés, il est utile de lister de façon la plus exhaustive possible les facteurs pouvant influencer le choix de matériaux. Nous reprenons ici de façon extensive l'ensemble des facteurs impliqués.

Compatibilité technique

Cet aspect s'inscrit en amont de la prise de décision et constitue une sorte de prérequis indispensable à l'application du système.

Les panneaux étant destinés à une fixation à la façade existante, il est nécessaire de s'assurer:

- Que le bâtiment existant peut structurellement supporter de nouveaux éléments de façade sans exiger une restauration dure, un renforcement ou même de nouvelles fondations
- De la compatibilité structurelle des deux complexes
- D'étudier, en connaissance de cause, le mode de fixation des panneaux à la paroi existante

Ce critère concerne l'ensemble du système.

Stabilité

Le système doit à la fois supporter le poids des modules photovoltaïques, mais également son poids propre, pour ensuite ramener ces charges vers la façade existante. La stabilité d'ensemble dépendra principalement du poids des capteurs PV, de la nature et du dimensionnement des éléments porteurs, du type d'accroche et de la capacité portante de la paroi existante.

En outre, si un niveau de préfabrication est prévu, la stabilité globale de l'élément préfabriqué doit être assurée lors de la fabrication et de la mise en œuvre.

Ce critère concerne principalement le cadre porteur et les fixations à la paroi existante. En cas de préfabrication, des éléments de fermeture par panneau sont également concernés pour le contreventement.

Résistance thermique

Pour une application en Région Wallonne, le panneau doit répondre au minimum aux exigences de conductibilité thermique PEB ($U < 0.24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$).

Pour une application visant des objectifs de rénovation "passive", on se calera sur les valeurs assimilées 'maison passive' qui considère un $U < 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ pour atteindre les objectifs passifs.

Cependant, rappelons encore que le système REINTEREST vise une adaptation au plus grand nombre de situations (adaptation aux normes étrangères) et la possibilité d'une évolution dans le temps (évolution du cadre normatif).

Pour atteindre les objectifs de résistance thermique visés, il convient d'adapter l'épaisseur des matériaux à leur conductibilité thermique.

En première approche, on considérera que c'est le système REINTEREST seul qui doit assurer cette performance, indépendamment de la paroi non isolée existante, faute de connaissance de ses propriétés. Si les propriétés (composition, épaisseur, finitions intérieure et extérieure) du mur support sont connues, celles-ci seront prises en compte et permettront probablement d'objectiver l'épaisseur d'isolant réellement nécessaire pour atteindre la valeur U souhaitée.

Un lambda faible permet de réduire l'épaisseur de la couche d'isolant proprement dite.

Il convient aussi de garder à l'esprit l'influence des prescriptions urbanistiques, souvent très strictes en terme d'alignement urbain. Dans de nombreux contextes, et principalement en façade avant, la surépaisseur de la façade devra être réduite au maximum afin de minimiser les décrochements de façade par rapport au front bâti (voir à ce sujet le chapitre réservé à l'applicabilité du système).

Ce critère concerne toutes les couches du système, en particulier l'isolant et le cadre porteur qui interrompt l'isolant.

Le choix des matériaux isolants est particulièrement sensible pour l'impact environnemental global du système. Pointons l'existence de matériaux isolants naturels, définis comme des matériaux constitués à concurrence de 85% minimum de fibres végétales ou animales ou de cellulose et avec une masse volumique qui ne peut pas excéder 150 kg/m³ (Arrêté Ministériel du 18 février 2011 relatif à l'octroi des primes énergie en RW).

Le mode de pose et d'assemblage

Le mode de pose, d'assemblage, les facilités ou difficultés liées à la manutention, sont autant de critères qui influencent le choix des matériaux.

En fonction du système REINTEREST retenu (système ouvert ou fermé > voir chapitre 'conception générale'), le choix de l'isolant devra se porter soit sur un isolant rigide ou semi-rigide, de type matelas, dans le cas d'une mise en œuvre en atelier, soit sur un isolant de type "vrac" dans le cas d'une insufflation sur chantier.

Pour le choix des isolants encore, une attention particulière doit être portée à la nécessité ou non de procéder à des découpes sur chantier ou en atelier, génératrices de déchets.

Ce critère concerne exclusivement le choix de l'isolant.

Pour des questions de réemploi ou de recyclage en fin de vie, on favorisera des assemblages dits "réversibles" entre les différentes couches et matériaux.

Ainsi, les matériaux nécessitant une pose collée ou l'usage de mousses (polyuréthane, ou autre...) sont préférablement écartés. De même, les fixations mécaniques sont de préférence vissées plutôt que clouées.

Ce critère concerne l'ensemble du système.

Poids

Le poids des éléments conditionne la conception des éléments porteurs et la capacité d'accroche à la

façade existante. Le poids du matériau est un critère qui peut aussi influencer la mise en œuvre. Un matériau lourd (ou très léger) aura une influence sur la taille maximale des éléments et sur la méthode de fixation.

Ce critère concerne principalement les éléments producteurs PV.

Perméabilité à la vapeur d'eau

Les parois sont le lieu de transferts de valeur, principalement en hiver de l'intérieur vers l'extérieur. Ces migrations de vapeur peuvent occasionner des condensations et des dégâts si elles ne sont pas adéquatement gérées.

Ne pouvant présumer de la résistance à la vapeur des parois existantes, la gestion de ce risque implique de prévoir une membrane pour freiner le transfert de vapeur en amont du système REINTEREST. Dans certains cas, il sera utile d'opter pour un freine-vapeur hygrovariable intelligent, qui adaptera sa perméabilité au niveau d'humidité relative. Ce type de membrane est pensé pour être relativement fermé à la vapeur quand l'humidité relative est faible et pour s'ouvrir au passage de la vapeur quand l'humidité relative est plus élevée.

Dans le cas où l'application d'une membrane pare-vapeur s'avère impossible, on optera en fonction des caractéristiques du mur support, soit pour l'application d'un bitume freine-vapeur sur le mur existant avant l'application des éléments REINTEREST, soit pour l'intégration au système d'un panneau de type osb qui freine naturellement la diffusion de vapeur d'eau.

Il est cependant important que le système adopte une perméabilité aux molécules de vapeur d'eau adaptée aux caractéristiques du mur existant préalablement identifiées (niveau de perméabilité du mur).

Outre le freine-vapeur, la perméabilité à la vapeur d'eau doit être considérée pour chaque matériaux, avec comme contrainte que les matériaux les plus perméable soient toujours en aval du flux de vapeur.

Ce critère concerne principalement les isolants et les éléments englobant les isolants (panneaux, membranes). En l'absence de coulisse ventilée au dos des capteurs PV et batteries, il concerne également ces éléments.

Comportement à l'eau

La présence d'eau dans un matériau peut altérer, parfois gravement et de façon irréversible, ses performances (les dégâts les plus fréquents étant la perte de stabilité et l'affaiblissement de la performance isolante). Il est donc important de considérer le contexte dans lequel ce matériau s'insère (niveau d'humidité et d'étanchéité des matériaux contigus...) et son comportement propre à la molécule d'eau (hydrophobie).

Ce critère concerne principalement les matériaux directement soumis aux intempéries, à savoir les capteurs PV et probablement les matériaux qu'ils recouvrent directement, à savoir les éventuelles batteries et les éventuels éléments de protection des isolants thermiques et des pièces structurales, ou ces éléments eux-mêmes.

Comportement au feu

L'application du système recouvrant l'ensemble d'une façade par l'extérieur, il ne s'insère pas dans un système compartimenté. L'usage d'un matériau inflammable, s'il ne fait pas l'objet d'un compartimentage, représenterait un risque de propagation du feu très important et potentiellement très rapide, annulant tous les effets du compartimentage intérieur éventuel. Il est donc important de bien connaître le comportement au feu de chaque matériau pour l'intégrer dans un système adapté.

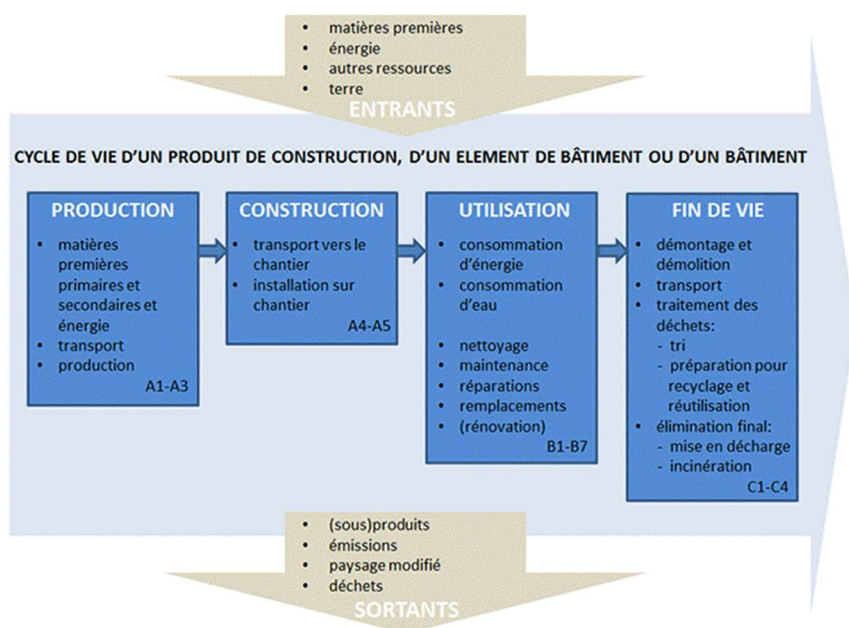
A cet égard, et dans le cadre d'une application de REINTEREST en Belgique, on se référera aux normes belges en matière de protection contre l'incendie dans les bâtiments à savoir la NBN S 21-202 ou 203 selon s'il s'agit d'un bâtiment bas, moyen ou élevé. Il s'agira de définir pour chaque matériau la classe de combustibilité à laquelle il doit répondre.

Ce critère s'applique à l'ensemble des éléments.

Performances environnementales

Dans le souci de poursuivre la recherche vers la mise au point d'un système éco-responsable, il est important de pouvoir quantifier l'impact environnemental d'un produit, d'un élément, d'une paroi ou d'un bâtiment complet pendant tout son cycle de vie, c.-à-d. depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie. Le LCA (Life-cycle analysis) ou en français, ACV (Analyse du cycle de vie) consiste en l'identification, la quantification et l'évaluation de l'impact environnemental de quatre phases de cycle de vie successives : la phase de production/fabrication, (en ce compris extraction, traitement, transport des matières premières et quantité d'énergie nécessaires à la production), la phase de mise en œuvre (en ce compris le transport des matériaux de l'usine vers le chantier), la phase d'utilisation (en ce compris la maintenance, les réparations éventuelles et les remplacements) et la phase de fin de vie (en ce compris le démontage, la démolition, le tri éventuel, le transport du chantier vers le traitement final et le traitement final des déchets (mise en décharge, incinération, réutilisation et/ou recyclage)).

Ces données apparaissent dans la déclaration environnementale du produit lorsque celle-ci est disponible (il convient de vérifier si celle-ci est approuvée par une organisme agréé).



Récapitulatif du cycle de vie d'un produit de construction, d'un élément de bâtiment ou d'un bâtiment avec les différentes phases du cycle de vie et leurs processus et activités considérés, ainsi que les différents flux entrants et sortants. Les effets

environnementaux de chacun de ces flux sont déterminés afin de définir ainsi l'impact environnemental du produit pendant tout son cycle de vie (selon NBN EN 15804 et NBN EN 15978) – Source : CSTC

Ce critère concerne l'ensemble des éléments du système et même plutôt le système dans son ensemble.

D'une part, il est utile de comparer l'impact environnemental de 2 matériaux de même fonction, mais il sera d'autant plus pertinent de pousser la comparaison plus loin en analysant la différence d'impact des systèmes entre eux.

Prix

Si le prix ne se veut pas limitatif dans le cadre de la recherche, il faut cependant le garder à l'esprit. Afin d'être accessible à un plus grand nombre, il serait opportun de prévoir des variantes au système en présentant une série de matériaux compatibles à des coûts divers.

Agrément technique

Si à son tour, ce critère ne doit pas être limitatif, il convient de rappeler qu'il est préférable d'opter pour des matériaux reconnus par un agrément technique belge ou européen.

Ces agréments techniques sont connus en tant que déclarations de qualité sous la marque 'ATG' pour la Belgique et 'ETA' (European Technical Approval, à partir du 1er juillet 2013 European Technical Assessments) pour les spécifications techniques européennes harmonisées. Le label ATG signifie que le produit ou le système de construction bénéficie d'une appréciation favorable confirmée dans le texte d'agrément technique correspondant. Ce dernier est délivré par l'UBAtc (Union belge pour l'agrément technique dans la construction). ²⁹

Précisons encore qu'il est possible de demander un agrément technique pour une combinaison de matériaux qui n'en aurait pas encore fait l'objet.

Conception générale

Sur base des différentes lectures et de la compilation d'informations, plusieurs systèmes se sont dégagés d'eux même.

Ces systèmes se décomposent en 4 familles:

- a) Un système de caissons préfabriqués insufflés ancrés ponctuellement à la façade existante et recouverts d'éléments producteurs d'énergie (préfabrication quasi totale), inspiré notamment du projet AIM-ES
- b) Un système d'ossature (cadre) ancrée ponctuellement dans la façade dont le remplissage se compose de caissons insufflés recouverts d'éléments producteurs d'énergie (préfabrication limitée), inspiré notamment du projet MEEFS
- c) Un système de rails ancrés de façon linéaire dans la façade, porteur des éléments producteurs

²⁹ www.cstc.be

- d'énergie et dont le remplissage se compose de panneaux isolants libres fixés ponctuellement dans la façade. (aucune préfabrication)
- d) Un système monolithique multicouche composés de matériaux légers collés les uns aux autres et porteurs des éléments producteurs d'énergie (préfabrication totale), inspiré notamment du projet Retrokit

Chaque système doit répondre aux exigences globales indiquées plus haut relatives à la stabilité et à la résistance au feu. Les exigences de préfabrication et d'impact environnemental ne constituent pas des seuils à atteindre mais des points de comparaison entre système. De façon plus fine, chaque système se caractérise donc par :

- Un certain niveau de préfabrication, impactant les conditions de mise en œuvre, la fiabilité du système et sa viabilité économique
- Un certain mode de fixation, lié au poids du système et impactant l'applicabilité du système et sa démontabilité pour recyclage.
- Un niveau d'universalité, représentant la capacité du système à répondre à une grande variété de situation d'application
- Une superposition de différentes couches ou éléments. Chaque couche étant liée à une fonction à remplir et non à un matériau précis. Pour chaque système, il existe donc plusieurs options de matériaux, qui seront sélectionnés ou éliminés en fonction de critères propres à la couche.

Pour tous les systèmes, le choix des matériaux et la taille des éléments sont donc variables en fonction des situations de mise en œuvre et des besoins propres à chaque bâtiment.

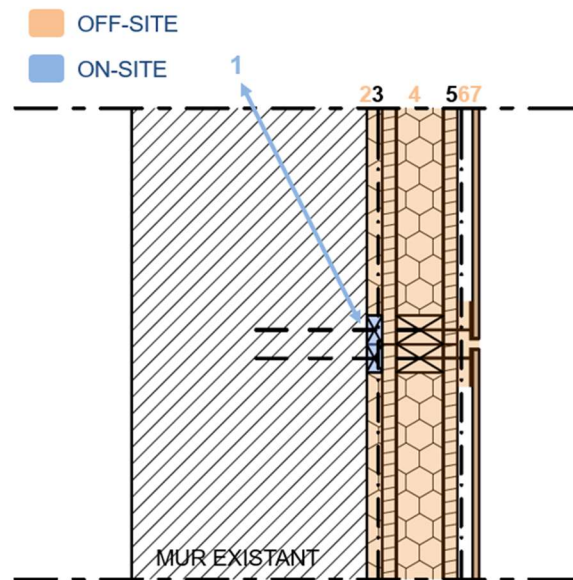
Les aspects économiques ne sont pas quantifiés dans cette étude.

Système de caissons "TES fermé"

Ce système est inspiré des projets TES Energy façade et AIM-ES. Il se compose des couches suivantes :

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Plots de mise à niveau fixés dans la paroi existante	
2	Couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités) sous forme d'un isolant collé au freine-vapeur.	performance environnementale résistance thermique
3	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.	perméabilité à la vapeur d'eau
4	Caisson : face intérieure: un panneau.	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau
	Caisson : isolant	résistance thermique performance environnementale
	Caisson : montants et traverses fixés à la paroi existante	poids stabilité résistance thermique
	Caisson : face extérieure: un panneau	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
5	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	comportement à l'eau
6	Espace ventilé selon la nécessité	

7	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2 fixés à un cadre, lui-même fixé dans les montants et traverses du caisson.	
---	---	--



Détermination de compositions-types système TES fermé, projet REINTEREST

Les avantages et inconvénients de ce système sont :

- Stabilité lors de la mise en œuvre et lors du montage: en fonction du dimensionnement
- Réponse aux prescriptions incendie: en fonction des choix de matériaux
- Adaptation aux supports : bonne gestion des irrégularités de la façade existante (quelques centimètres) grâce à la couche d'adaptation, ce qui rend le système applicable à de nombreuses configurations
- Contraintes de mise en œuvre :
 - Niveau de préfabrication quasi-total permettant une diminution de la durée de mise en œuvre sur chantier, mais impliquant un haut degré de précision dans la préfabrication pour garantir un assemblage correct
 - Poids des modules potentiellement important en fonction du choix des matériaux, ce qui implique une manipulation difficile, une augmentation du coût du transport et de la livraison et une limitation éventuelle de la taille des modules
- Limitations urbanistiques: en fonction du choix des technologies photovoltaïques
- Autres :
 - Système étanche: qualité de contrôle sur les caissons isolés en atelier

Les performances de ce système sont :

- Niveau de préfabrication : très élevé
- Viabilité économique : non évalué ici
- Bilan environnemental : en fonction du choix du matériau isolant, possibilité de désassemblage en fin de vie permettant un recyclage des matériaux.

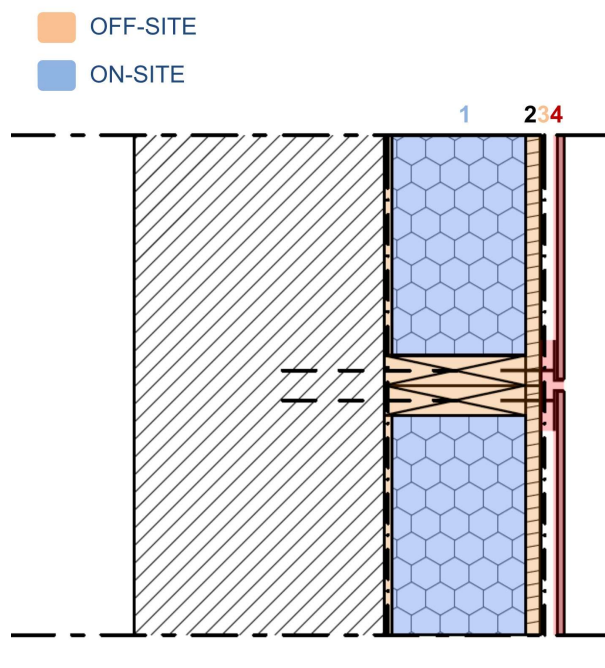
- La performance du système est liée exclusivement aux choix de matériaux.
- Adaptation à différents matériaux : forte

Système de caissons "TES ouvert" ou "TES hybride"

Ce système est inspiré des projets TES Energy façade et AIM-ES. Il se compose des couches suivantes :

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson. Il doit être fixé avec suffisamment de jeux pour permettre d'épouser les irrégularités du mur, au fur et à mesure de l'insufflation.	perméabilité à la vapeur d'eau
	Caisson : isolant nécessairement en vrac. Il est insufflé sur chantier par des percements préalablement réalisés en atelier.	résistance thermique performance environnementale
	Caisson : montants et traverses fixés à la paroi existante	poids stabilité résistance thermique
	Caisson : face extérieure: un panneau préalablement percé pour insufflation de l'isolant.	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
2	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	comportement à l'eau
3	Espace ventilé selon la nécessité	
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2 fixés à un cadre, lui-même fixé dans les montants et traverses du caisson. Les modules PV sont nécessairement clipsés sur chantier après insufflation de l'isolant.	

VARIANTE HYBRIDE: le caisson peut être rempli d'un isolant compressible en atelier et épouser les irrégularités du mur existant une fois placé



Détermination de compositions-types système TES ouvert, projet REINTEREST

Les avantages et inconvénients de ce système sont :

- Stabilité lors de la mise en œuvre et lors du montage: en fonction du dimensionnement
- Réponse aux prescriptions incendie: en fonction des choix de matériaux
- Adaptation aux supports : Possible gestion des irrégularités de la façade existante grâce à la souplesse laissée au freine-vapeur
- Contraintes de mise en œuvre :
 - Niveau de préfabrication quasi-total permettant une diminution de la durée de mise en œuvre sur chantier, mais impliquant un haut degré de précision dans la préfabrication pour garantir un assemblage correct
 - Réduction du poids des éléments par rapport au "TES fermé", ce qui permet une augmentation des dimensions des panneaux, une réduction du nombre d'assemblages sur chantier, une réduction des risques de ponts thermiques ou de points faibles et une réduction de la durée d'exécution
 - Simplification du processus de mise à niveau des caissons préfabriqués sur le mur existant.
 - Nécessaire isolation sur chantier, ce qui implique l'obligation d'opter pour une isolation en vrac (sauf si variante hybride), le contrôle de qualité approximatif (risques liés au tassement, à l'humidité, au déchirement du freine-vapeur), nécessité d'une thermographie pour s'assurer de la bonne répartition de l'isolant dans le caisson et de gérer les difficultés liées à l'insufflation par l'extérieur
- Limitations urbanistiques: en fonction du choix des technologies photovoltaïques

Les performances de ce système sont :

- Niveau de préfabrication : limité par l'isolation sur chantier

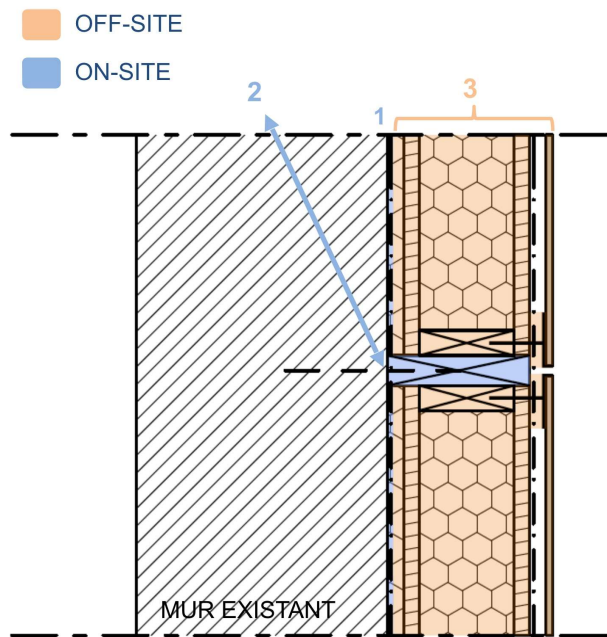
- Viabilité économique : non évalué ici
- Bilan environnemental : possibilité de désassemblage en fin de vie permettant un recyclage des matériaux. La performance du système est donc liée uniquement aux choix de matériaux.
- Adaptation à différents matériaux : forte

Système de cadre

Ce système est inspiré du projet MEEFS. Il se compose des couches suivantes :

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.	perméabilité à la vapeur d'eau
2	Cadre principal fixé mécaniquement à la façade	poids stabilité résistance thermique
3	Des caissons secondaires entièrement préfabriqués venant s'insérer dans le cadre principal et composés de:	
	Une couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités) sous forme d'un isolant collé au freine-vapeur.	performance environnementale résistance thermique
	Un panneau intérieur	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau
	Un isolant	résistance thermique performance environnementale
	Un panneau extérieur	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
	Un pare-pluie collé sur la face extérieure du	comportement à l'eau

	caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	
4	Espace ventilé selon la nécessité	
5	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2 fixés à un cadre, eux-mêmes fixés dans les montants et traverses du caisson secondaire.	



Détermination de compositions-types système cadre à remplir, projet REINTEREST

Les avantages et inconvénients de ce système sont :

- Stabilité lors de la mise en œuvre et lors du montage : facilité par la décomposition en caissons de taille limitée.
- Réponse aux prescriptions incendie : en fonction des choix de matériaux
- Adaptation aux supports : Possible gestion des irrégularités de la façade existante grâce à la couche d'adaptation, ce qui élargit le panel d'application.
- Contraintes de mise en œuvre :
 - Nécessite un haut degré de précision dans la préfabrication et dans la mise en œuvre pour garantir un assemblage parfait in situ des caissons préfabriqués dans le cadre réalisé sur chantier
 - Poids des caissons potentiellement important en fonction des matériaux choisis, ce qui implique une manipulation difficile, une augmentation du coût du transport et de la livraison et une limitation éventuelle de la taille des caissons
- Limitations urbanistiques: système modulable offrant une variété de remplissages différents et

personnalisés en tenant compte des besoins spécifiques, mais aussi des facteurs comme l'orientation et les conditions climatiques locales.

Les performances de ce système sont :

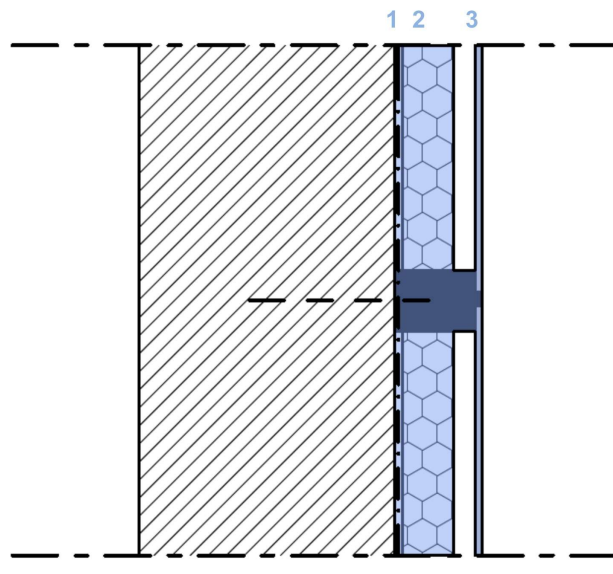
- Niveau de préfabrication : limité. Le pare-vapeur et le cadre doivent être réalisés sur chantier avant la pose des caissons, mais les caissons peuvent être préfabriqués.
- Viabilité économique : non évalué ici
- Bilan environnemental : possibilité de désassemblage en fin de vie permettant un recyclage des matériaux. La performance du système est donc liée uniquement aux choix de matériaux. Démontage facile également pour le remplacement d'un élément précis en cours de vie.
- Adaptation à différents matériaux : forte

Système sur rails porteurs

Ce système est inspiré de loin du projet Retrokit. Il se compose des couches suivantes :

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Freine vapeur appliqué sur la façade	perméabilité à la vapeur d'eau
2	Rails fixés dans la façade existante de façon linéaire et sur lesquels viendront se fixer directement les modules PV	stabilité résistance thermique
3	Isolant thermique comblant l'espace entre les rails et fixé mécaniquement et ponctuellement à la façade	résistance thermique performance environnementale
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2 fixés à un cadre qui vient lui-même se clipser sur les rails	

■ ON-SITE



Détermination de compositions-types système de rails, projet REINTEREST

Les avantages et inconvénients de ce système sont :

- Stabilité lors de la mise en oeuvre et lors du montage : assurée par les rails
- Réponse aux prescriptions incendie : en fonction des choix de matériaux
- Adaptation aux supports : Faible capacité de reprise d'irrégularités au niveau du rail
- Contraintes de mise en oeuvre :
 - Système simple à réaliser, accessible au plus grand nombre, sans formation particulière requise.
- Limitations urbanistiques: en fonction du choix des technologies photovoltaïques
- Autre :
 - Epaisseur d'isolation limitée par l'épaisseur maximale de rails disponible sur le marché
 - Pont thermique important lié au caractère métallique des rails

Les performances de ce système sont :

- Niveau de préfabrication : nul. La totalité du système est réalisé sur chantier, ce qui implique une durée de mise en oeuvre considérable
- Bilan environnemental : possibilité de désassemblage en fin de vie permettant un recyclage des matériaux. La performance du système est donc liée uniquement aux choix de matériaux. Démontage facile également pour le remplacement d'un élément précis en cours de vie.
- Adaptation à différents matériaux : limité (rail forcément métallique et isolant nécessairement synthétique pour assurer la durabilité à l'eau)

Système monolithique multicouches

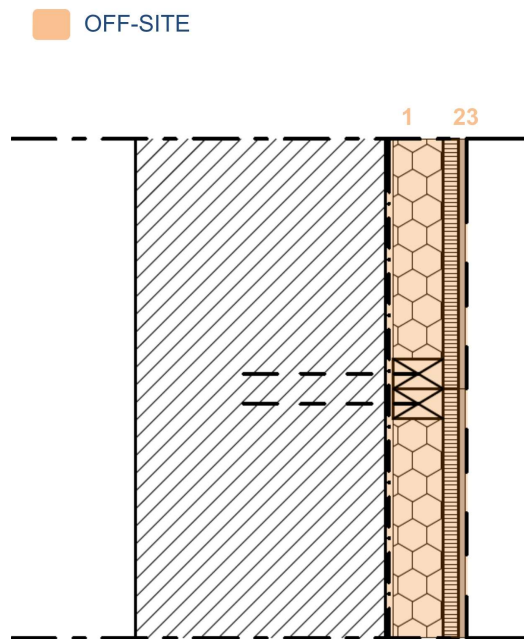
Ce système est inspiré des systèmes d'isolation par l'extérieur ETICS. Il se compose des couches suivantes :

Ce système est inspiré des projets TES Energy façade et AIM-ES. Il se compose des couches suivantes :

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson. Il doit être fixé avec suffisamment de jeux pour permettre d'épouser les irrégularités du murs, au fur et à mesure de l'insufflation.	perméabilité à la vapeur d'eau
	caisson : isolant	résistance thermique performance environnementale
	caisson : montants et traverses fixés à la paroi existante	poids stabilité résistance thermique
	caisson : face extérieure: un panneau étanche	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
2	Une colle ou silicone qui enrobe les câblages et qui permet de fixer les films photovoltaïques	comportement à l'eau
4	Modules photovoltaïques de type 'thin film' à déterminer dans le WP2.	

VARIANTE: Le recours à une caméra 3D permettrait d'établir un relevé très précis du relief de la façade. Il serait alors possible d'opter pour un isolant rigide (de type polystyrène) "creusé" sur base de relief réel de la façade. Dans ce cas de figure, le cadre n'est plus nécessaire: les différentes couches peuvent être collées entre elles et les éléments peuvent être assemblés par collage ou autre moyen de fixation.

Cependant, cette variante soulève des questions d'ordre environnemental et le recours à la colle rend le système irréversible et donc difficile à réemployer.



Détermination de compositions-types système monolithique, projet REINTEREST

Les avantages et inconvénients de ce système sont :

- Stabilité lors de la mise en œuvre et lors du montage: en fonction du dimensionnement
- Réponse aux prescriptions incendie: en fonction des choix de matériaux
- Possible gestion des irrégularités de la façade existante grâce à la souplesse laissée au freine-vapeur
- Contraintes de mise en œuvre :
 - Niveau de préfabrication quasi-total permettant une diminution de la durée de mise en œuvre sur chantier, mais impliquant un haut degré de précision dans la préfabrication pour garantir un assemblage correct
 - Poids des modules potentiellement important en fonction du choix des matériaux, ce qui implique une manipulation difficile, une augmentation du coût du transport et de la livraison et une limitation éventuelle de la taille des modules
- Limitations urbanistiques: en fonction du choix des technologies photovoltaïques de type 'thin film'
- Autres :
 - Système étanche: qualité de contrôle sur les caissons isolés en atelier
 - Les 'thin film' étant collé sur le panneau support, ces 2 couches sont irréversibles.
 - Le caractère monolithique complexifie l'intégration des accessoires de monitoring, câblages et stockage éventuel.

Les performances de ce système sont :

- Niveau de préfabrication : très élevé
- Viabilité économique : non évalué ici
- Bilan environnemental : en fonction du choix du matériau isolant, possibilité de désassemblage en fin de vie permettant un recyclage des matériaux.

En revanche, le panneau de support des 'thin film' et les technologies photovoltaïques étant collées, cette partie du système n'est pas démontable et donc réemployable en fin de vie.

- Adaptation à différents matériaux : limitée

Conclusion

A ce stade, les systèmes dérivés de TES Energy façade sont considérés comme les plus opportuns dans le cadre de la recherche REINTEREST.

Les autres systèmes développés ci-dessus ne sont pas écartés pour autant et pourront alimenter la suite de l'étude.

Fiches techniques descriptives

Conformément à la phase 2 de la convention, les systèmes de parois retenus font l'objet de fiches descriptives. Ces fiches ont pour objectif de documenter et synthétiser les propriétés énergétiques et environnementales des compositions proposées et de fournir un commentaire sur leurs propriétés constructives et leurs propriétés d'assemblage.

Méthode

La déclinaison des fiches s'organise sur base d'une décomposition du bâtiment suivant plusieurs échelles de perception et de conception :

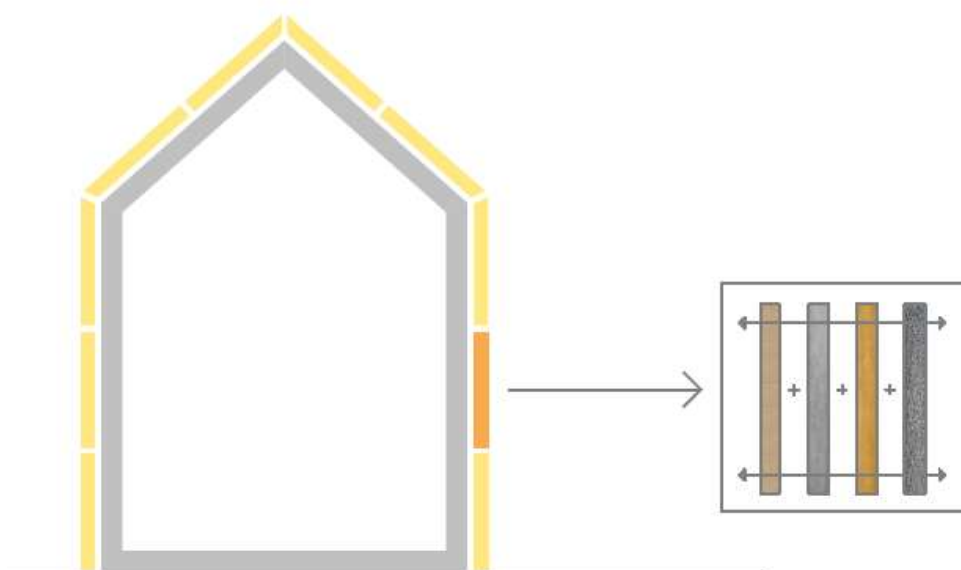


Figure inspirée des travaux de la Cellule ressources et matériaux – Architecture et Climat

0. Le bâtiment

Il se compose :

- de parois formant l'enveloppe extérieure ;
- de parois délimitant les espaces intérieurs.

S'agissant d'un processus de rénovation, le système REINTEREST n'intervient qu'en application (seconde peau) sur les parois d'enveloppe extérieure existantes.

Compte tenu du caractère particulier et intrinsèque de chaque application, l'impact des systèmes proposés dans le projet REINTEREST sur l'ensemble du bâtiment n'est pas évalué dans ces fiches.

1. La paroi

La paroi est un système c.-à-d. un dispositif constitué de plusieurs éléments, modules assemblés les uns aux autres pour former une peau continue fixée à un support existant.

Chaque paroi peut être considérée comme une superposition de couches ayant chacune une fonction

propre. Dans le cas des parois de l'enveloppe :

- La couche « extérieure » (Le) : couche protectrice soumise aux conditions extérieures
- La couche « structurelle » (Ls) : couche structurelle assurant la fonction portante de la paroi
- La couche « intérieure » (Li) : couche qui assure la finition intérieure

Dans le cas d'une paroi neuve traditionnelle, chaque couche est nécessaire à la composition. Mais dans le cas du projet REINTEREST, s'agissant d'un processus de rénovation, le module se fixe sur un support existant. Ce dernier continuera donc d'assurer les fonctions structurelles et de finition intérieure alors que l'élément REINTEREST à proprement dit assurera le rôle de « couche extérieure ».

Les aspects suivants seront étudiés dans la fiche technique descriptive :

- a. *Type d'assemblage inter-éléments module/mur support*
- b. *Performance thermique de la paroi calculée avec le logiciel PEB 8.5 (utilisé par les 3 régions)*
 - i. *Résistance thermique de la paroi*
 - ii. *Profil de température / ponts thermiques*

2. L'élément/ le module

Le module correspond au système REINTEREST à proprement dit. Il s'agit d'un élément multicouches destiné à être assemblé à d'autres éléments identiques et fixé à un support pour former une paroi.

Chaque module est donc constitué d'un ensemble de matériaux ou couches, assemblés au moyen d'éléments de fixations.

Les aspects suivants seront étudiés dans la fiche technique descriptive :

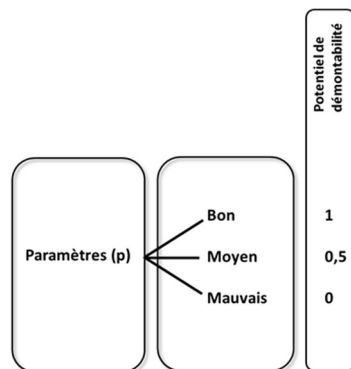
- a. *Composition et fonctionnalité de chaque couche*
- b. *Mode constructif / assemblage des couches*
- c. *Morphologie : forme, dimensions, poids*
- d. *Performance thermique calculée avec le logiciel PEB 8.5 (utilisé par les 3 régions)*
 - i. *Résistance thermique du module*
- e. *Bilan environnemental*

La cellule 'ressources et matériaux' d'architecture et Climat a mis au point une méthodologie d'évaluation environnementale.

Celle-ci est utilisée pour optimiser les choix de conception des modules REINTEREST.

Cette méthodologie se base sur des critères quantitatifs, principalement issus des ACV et représentables sous forme de graphiques, et s'y ajoutent des critères qualitatifs sous forme de données pour l'utilisation des ressources utilisées, la production de déchets et le potentiel de recyclage.

- i. *Analyse du cycle de vie (cradle to gate) : critères quantitatifs évalués au moyen d'un outil développé par Architecture et Climat sur la base de données ECOINVENT*
- ii. *Potentiel de valorisation : critères qualitatifs sur base d'un outil d'évaluation développé par E. GOBBO dans le cadre de sa thèse de doctorat. Cet outil se base sur une pondération accordant à chaque critère une note entre 0 et 1 sur base de ses caractéristiques. Il identifie 4 indicateurs : prévention, facilité de tri, réemploi et recyclage. Chaque système peut ainsi être comparé suivant sa note aux différents indicateurs.*



- f. *Réponse aux exigences spécifiques*
 - i. *Résistance au feu (à développer ultérieurement)*
 - ii. *Propriétés mécaniques (à développer ultérieurement)*

3. Les matériaux

Le matériau est ici considéré comme l'élément de base qui sera assemblé à d'autres matériaux pour former le module REINTEREST. Ces matériaux forment des couches.

La nature et les caractéristiques des matériaux repris dans chaque module dépend des exigences auxquelles les parois et les modules doivent répondre.

Les aspects suivants seront étudiés dans la fiche technique descriptive :

- a. *Critères de sélection des matériaux*

3'. Les assemblages et fixations

Les choix des méthodes d'assemblage et de fixations seront orientés de façon à favoriser l'adaptabilité des parois et le démontage aisé avec récupération des composants. Cette démarche permettra de passer d'une préfabrication « simple » à un assemblage dynamique qui permet l'évolutive, le remplacement (et ce, pas uniquement en fin de vie mais à différents stades du cycle de vie du bâtiment, lors de l'entretien ou d'un remplacement éventuel), le réemploi ou le recyclage de l'ensemble des matériaux, éléments ou composants des parois.

On veillera à distinguer :

- Les assemblages intra-composants c.-à-d. les fixations entre les différents matériaux en vue de former le module ;
- Les assemblages inter-modules c.-à-d. les fixations entre différents modules afin de former une seconde peau continue ;
- Les assemblages inter-éléments c.-à-d. les fixations entre la peau continue (éléments REINTEREST) et le mur-support.

Hypothèses générales

Les simulations thermiques et bilans environnementaux réalisés pour chaque système ont pour intérêt premier de permettre leur comparaison.

Pour garantir une comparaison neutre et objective entre les systèmes, certaines hypothèses ont été formulées pour l'ensemble des systèmes.

- le mur support considéré est une paroi générique constituée d'une épaisseur de 30 cm de briques pleines en terre cuite ($\lambda=0,81$) revêtu d'une fine couche de plafonnage intérieur ;
- les isolants utilisés sont des isolants génériques de type laine minérale ($\lambda=0,035$) ;
- les fixations sont considérées principalement métalliques et font l'objet d'un forfait calculé sur base d'autres éléments préfabriqués ;
- les compositions sont basées sur la vraisemblance constructive. Une épaisseur de 180mm pour la couche d'isolation principale est considérée, conformément aux pratiques constructives actuelles et dimensions disponibles de matériaux. Partant de cette épaisseur, les différences de composition entre les systèmes mènent à des résistances thermiques globales différentes. Il n'est donc pas valide de confronter les performances environnementales des systèmes telles qu'évaluées ici sans intégrer celles-ci dans un bilan énergétique complet de bâtiment, dans une optique « life cycle ». Cette intégration était précisément visée par le WP5 du projet. Les données transmises dans ce rapport sont suffisantes pour reprendre cette tâche dans un autre contexte.

Lorsque c'est nécessaire, d'autres hypothèses sont formulées indépendamment pour chaque système. Celles-ci sont précisées au début de chaque fiche. Ces hypothèses sont essentielles pour permettre la réalisation de simulations. Il convient donc de souligner que les résultats obtenus doivent être analysés avec énormément de précautions.

Fiche descriptive n°1 : TES fermé

Hypothèses spécifiques

Les simulations thermiques et environnementales sont réalisées sur base des hypothèses suivantes :

- une couche d'isolation générique de 25 mm comme adaptation aux irrégularités du mur support
- une couche d'isolation générique de 180 mm répartie entre montants d'ossature en CLS (38x184mm=section courante) à raison d'une fraction totale de 10% de bois ;
- matériau de type OSB 18mm pour le panneau en face intérieure du caisson ($\lambda=0,13$) ;
- matériau de type fibre de bois bitumineuse 18mm pour le panneau en face extérieure du caisson ($\lambda=0,48$)
- forfait fixations : 1,5 kg/m²

La paroi

a. Type d'assemblage inter-éléments module/mur support

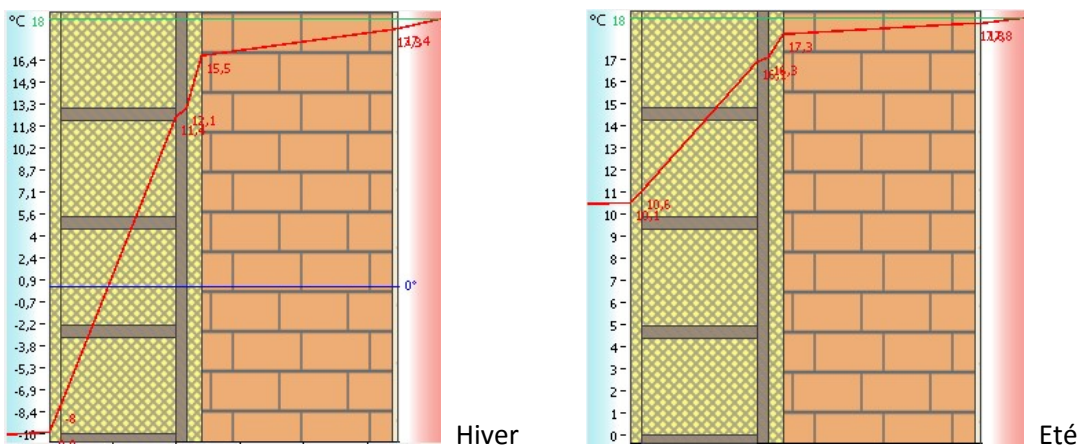
- Plots de mise à niveaux
- Assemblage sec avec élément intermédiaire autonome: cornières métalliques de support

b. Performance thermique de la paroi (logiciel PEB)

i. Résistance thermique de la paroi (mur porteur inclus)

$U_{\text{paroi}} = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$

ii. Profil de température / ponts thermiques



L'élément/ le module

a. Composition et fonctionnalité de chaque couche

couche	composition	fonctionnalité
1	Couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités)	Isolation thermique Adaptation au mur support
2	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau
3	Caisson : face intérieure: un panneau.	Contenance de l'isolant Etanchéité à l'air
	Caisson : isolant	Isolation thermique
	Caisson : montants et traverses	Structurel
	Caisson : face extérieure: un panneau	Contreventement Contenance de l'isolant
4	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	Protection intempéries
5	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV	Ventilation des cellules PV
6	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Production photovoltaïque Première barrière de protection intempéries

b. Mode constructif / assemblage intra-composants

couche	composition	Type d'assemblage			
1	Couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités)	Assemblage humide : colle			
2	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.		Assemblage humide : colle		
3	Caisson : face intérieure: un panneau.	Assemblage sec sans élément intermédiaire : pose libre			
	Caisson : isolant				
	Caisson : montants et traverses			Assemblage sec indépendant : vis	Assemblage sec indépendant : vis
	Caisson : face extérieure: un panneau		Assemblage humide : colle		
4	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)				
5	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV			Assemblage sec autonome : à préciser	
6	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2				

c. Morphologie : forme, dimensions, poids

- Panneaux standards :
 - Forme rectangulaire
 - Hauteur équivalente à un niveau d'étage du bâtiment concerné
 - Largeur comprise entre 80 et 120 cm
- Des éléments dits « de resserrage » sont réalisés sur mesure et destinés à absorber la diversité des géométries. Ces éléments sont revêtus d'un panneau de teinte identique aux cellules photovoltaïques mais non actif.

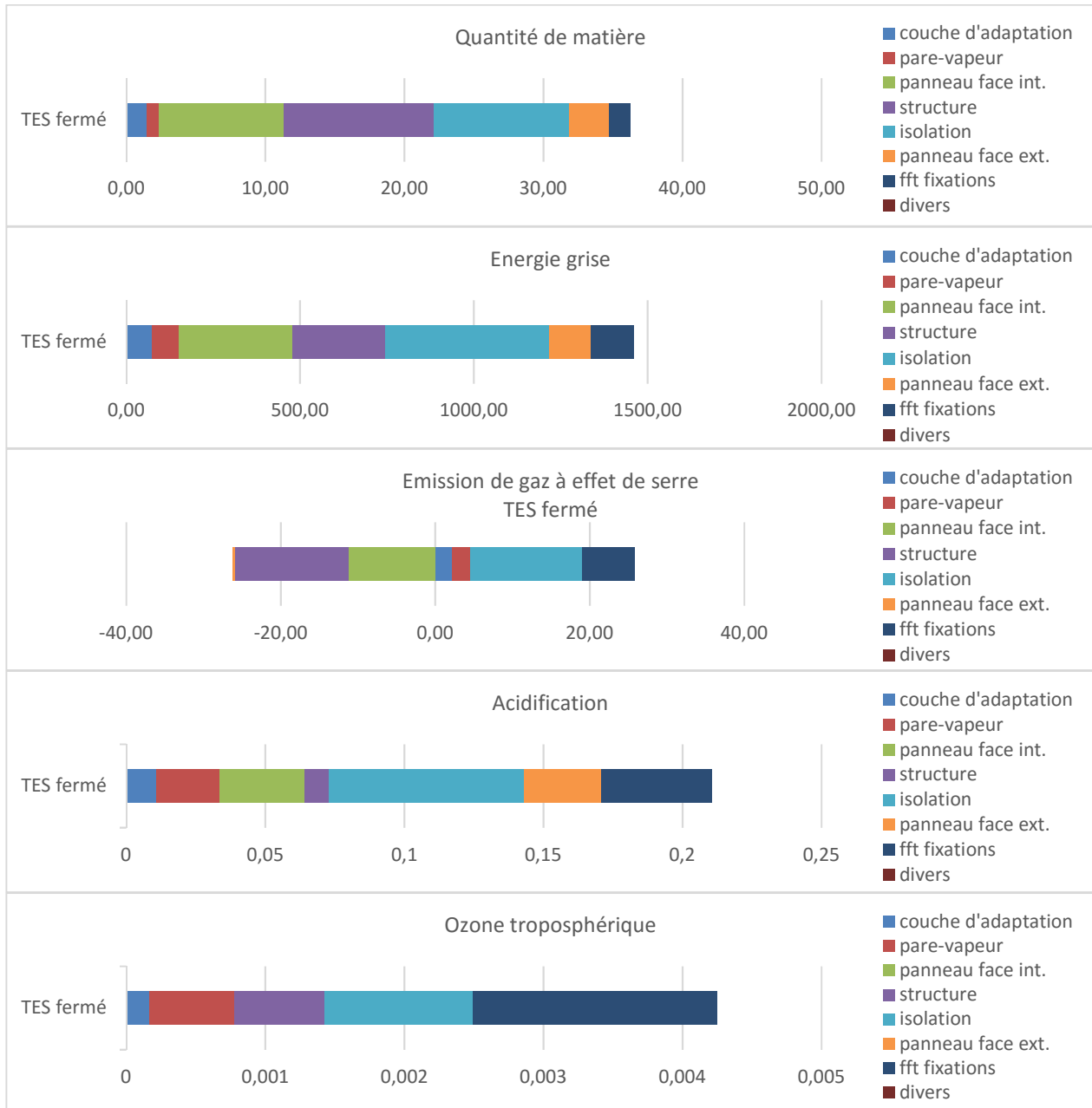
d. Performance thermique

i. Résistance thermique du module (mur porteur non inclus)

$$U_{\text{paroi}} = 0.18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

e. Bilan environnemental

i. Analyse du cycle de vie : critères quantitatifs



ii. Potentiel de valorisation : critères qualitatifs

Evaluation du système suivant méthodologie développée par E. Gobbo (voir détails d'évaluation en annexe) :

- Prévention : 43/70 → 61,4%
- Facilité de tri : 3,5/7 → 50%
- Réemploi : 26,25/42 → 62,5%
- Recyclage : 18/21 → 85,7%

Les matériaux

a. Critères de sélection des matériaux

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités)	performance environnementale résistance thermique
2	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.	perméabilité à la vapeur d'eau
3	Caisson : face intérieure: un panneau.	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau
	Caisson : isolant	résistance thermique performance environnementale
	Caisson : montants et traverses	poids stabilité résistance thermique
	Caisson : face extérieure: un panneau	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
4	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	comportement à l'eau
5	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV	Voir WP2
6	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Voir WP2

Fiche descriptive n°2 : TES ouvert

Hypothèses spécifiques

Les simulations thermiques et environnementales sont réalisées sur base des hypothèses suivantes :

- une couche d'isolation générique de 18 cm répartie entre montants d'ossature en CLS (38x184mm=section courante) à raison d'une fraction totale de 10% de bois ;
- matériau de type fibre de bois bitumineuse 18mm pour le panneau en face extérieure du caisson ($\lambda = 0,48$)
- forfait fixations : 1,5 kg/m²

La paroi

a. Type d'assemblage inter-éléments module/mur support

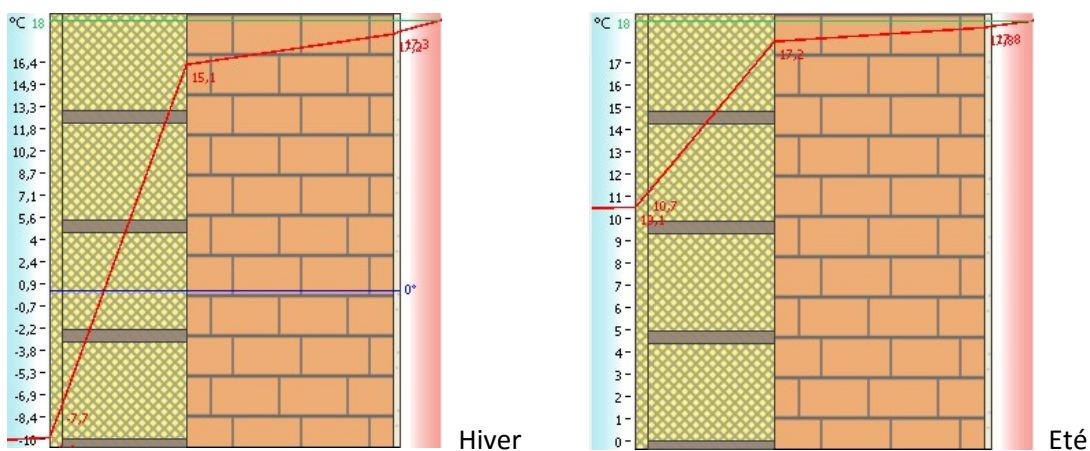
- Plots de mise à niveaux
- Assemblage sec avec élément intermédiaire autonome: cornières métallique de support

b. Performance thermique de la paroi (logiciel PEB)

i. Résistance thermique de la paroi (mur porteur inclus)

$U_{\text{paroi}} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$

ii. Profil de température / ponts thermiques



L'élément/ le module

a. Composition et fonctionnalité de chaque couche

couche	composition	fonctionnalité
1	Caisson : face intérieure: freine-vapeur	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau Adaptation au mur support Contenance de l'isolant
	Caisson : isolant	Isolation thermique
	Caisson : montants et traverses	Structure
	Caisson : face extérieure: un panneau	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau Contenance de l'isolant
2	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	Protection intempéries
3	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV	Ventilation des cellules PV
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Production photovoltaïque Première barrière de protection intempéries

b. Mode constructif / assemblage intra-composants

couche	composition	Type d'assemblage			
3	Caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson.	Assemblage sec sans élément intermédiaire : pose libre		Assemblage sec dépendant : agrafe	
	Caisson : isolant				
	Caisson : montants et traverses				Assemblage sec indépendant : vis
	Caisson : face extérieure: un panneau			Assemblage humide : colle	
4	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)				
5	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV			Assemblage sec autonome : à préciser	
6	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2				

c. Morphologie : forme, dimensions, poids

- Panneaux standards :
 - Forme rectangulaire
 - Hauteur équivalente à un niveau d'étage du bâtiment concerné
 - Largeur comprise entre 80 et 120 cm
- Des éléments dits « de resserrage » sont réalisés sur mesure et destinés à absorber la diversité des géométries. Ces éléments sont revêtus d'un panneau de teinte identique aux cellules photovoltaïques mais non actif.

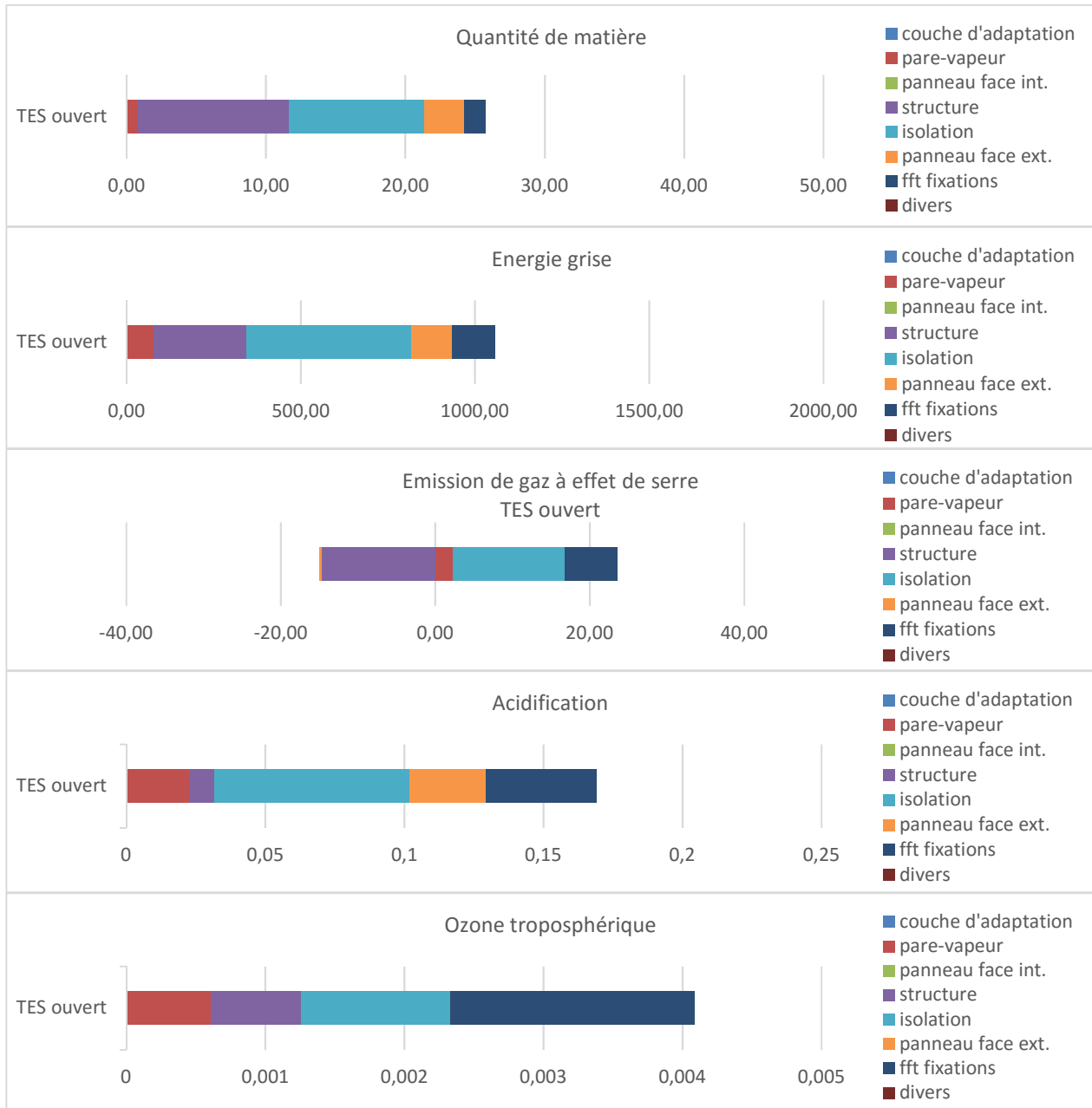
d. Performance thermique

i. Résistance thermique du module (mur porteur non inclus)

$$U_{paroi}=0.22W/m^2K$$

e. Bilan environnemental

i. Analyse du cycle de vie : critères quantitatifs



ii. Potentiel de valorisation : critères qualitatifs

Evaluation du système suivant méthodologie développée par E. Gobbo (voir détails d'évaluation en annexe) :

- Prévention : 29,25/50 → 58,5%
- Facilité de tri : 2,5/5 → 50%
- Réemploi : 19,25/30 → 64,2%
- Recyclage : 12/15 → 80,00%

Les matériaux

a. Critères de sélection des matériaux

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson.	perméabilité à la vapeur d'eau résistance au déchirement
	Caisson : isolant	résistance thermique performance environnementale conditionnement
	Caisson : montants et traverses	poids stabilité résistance thermique
	Caisson : face extérieure: un panneau	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
2	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	comportement à l'eau
3	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV	Voir WP2
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Voir WP2

Fiche descriptive n°3 : système dit de 'CADRE'

Hypothèses spécifiques

Les simulations thermiques et environnementales sont réalisées sur base des hypothèses suivantes :

- cadre principal en bois CLS (38x235 = section courante) à raison d'une fraction de 5% de bois (les 95% restant étant le caisson secondaire) ;
- la face arrière du caisson secondaire est recouverte d'une couche d'isolation générique de 25 mm pour adaptation aux irrégularités du mur support ;
- une couche d'isolation générique de 18 cm répartie entre montants d'ossature en CLS (38x184mm=section courante) à raison d'une fraction totale de 10% de bois ;
- matériau de type OSB 18mm pour le panneau en face intérieure du caisson secondaire ($\lambda=0,13$) ;
- matériau de type fibre de bois bitumineuse 18mm pour le panneau en face extérieure du caisson secondaire ($\lambda=0,48$) ;
- forfait fixations : 1,5 kg/m².

La paroi

a. Type d'assemblage inter-éléments module/mur support

- Fixation du cadre principal au mur support : assemblage sec avec élément intermédiaire indépendant : vis ou boulon

b. Performance thermique de la paroi (logiciel PEB)

i. Résistance thermique de la paroi (mur porteur inclus)

$$U_{\text{paroi}} = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$$

ii. Profil de température / ponts thermiques

Indisponible : modélisation trop approximative sur le logiciel PEB

L'élément/ le module

a. Composition et fonctionnalité de chaque couche

couche	composition	fonctionnalité
1	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau
2	Cadre principal	Structurel
3	Des caissons secondaires :	
	Caisson sec. : couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités) sous forme d'un isolant collé au freine-vapeur.	Isolation thermique Adaptation au mur support
	Caisson sec.: face intérieure: un panneau.	Contenance de l'isolant Etanchéité à l'air
	Caisson sec.: isolant	Isolation thermique
	Caisson sec.: montants et traverses	Structurel
	Caisson sec.: face extérieure: un panneau	Contreventement Contenance de l'isolant
	Un pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)	Protection intempéries
4	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV	Ventilation des cellules PV
5	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Production photovoltaïque Première barrière de protection intempéries

b. Mode constructif / assemblage intra-composants

couche	composition	Type d'assemblage			
1	Freine-vapeur collé le mur support.		Assemblage humide : colle		
2	Cadre principal			Assemblage sec indépendant : vis ou boulon	
3	Caisson sec. : couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités) sous forme d'un isolant collé au freine-vapeur.	Assemblage sec sans élément intermédiaire : pose libre	Assemblage humide : colle		
	Caisson sec.: face intérieure: un panneau.				
	Caisson : isolant				
	Caisson : montants et traverses				
	Caisson : face extérieure: un panneau		Assemblage humide : colle		
4	Pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case précédente)				
5	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV			Assemblage sec autonome : à préciser	
6	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2				

c. Morphologie : forme, dimensions, poids

- Cadre principal :
 - Ecartement entre montants et traverses à définir en fonction des reprises de charges à assumer suivant poids des caissons secondaires.
- Caissons secondaires :
 - Dimensions minimales et maximales à définir
 - Réalisation sur mesure pour adaptation à la géométrie du bâtiment existant

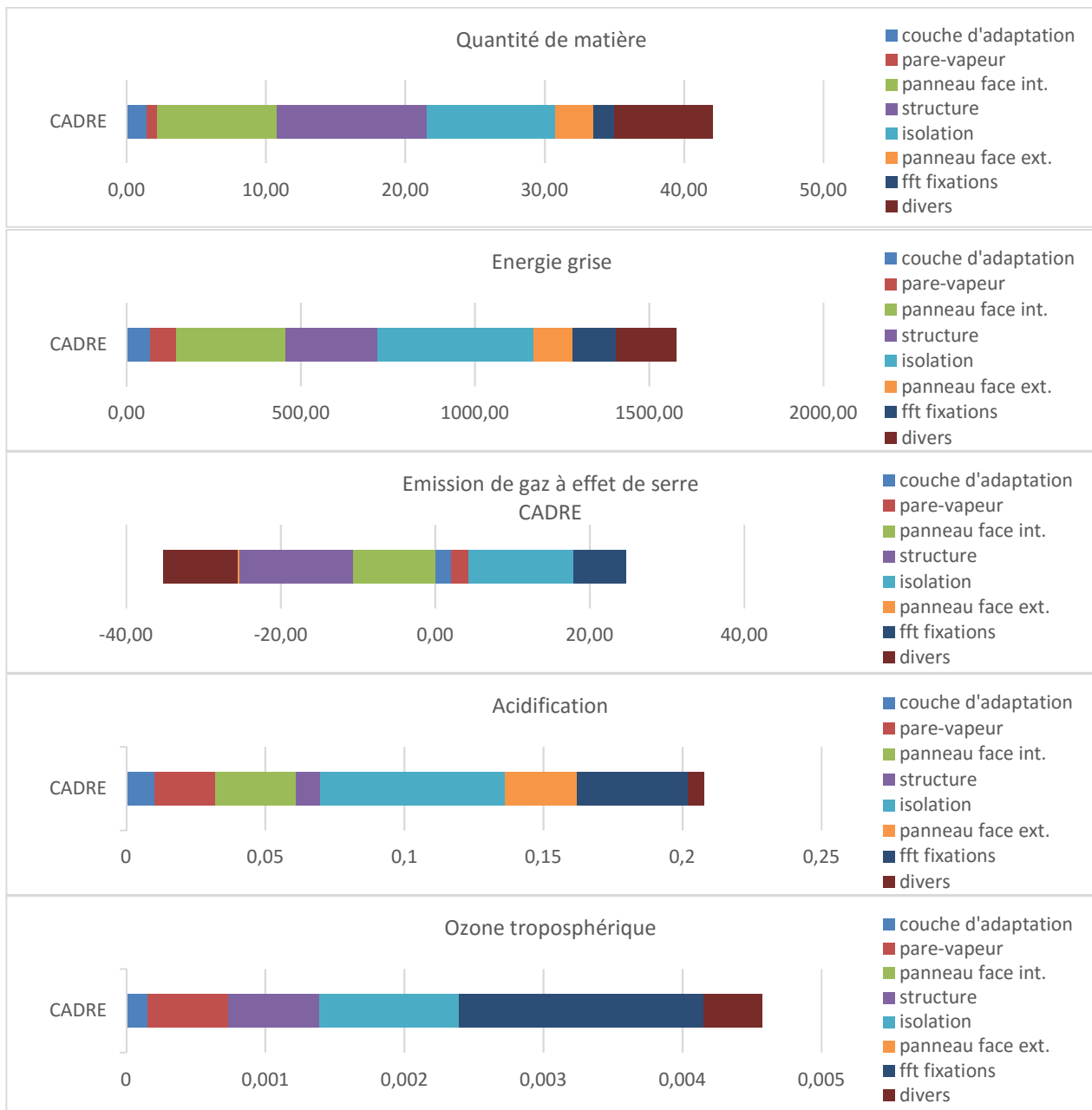
d. Performance thermique

i. Résistance thermique du module (mur porteur non inclus)

$U_{paroi}=0.18W/m^2K$

e. Bilan environnemental

i. Analyse du cycle de vie : critères quantitatifs



ii. Potentiel de valorisation : critères qualitatifs

Evaluation du système suivant méthodologie développée par E. Gobbo (voir détails d'évaluation en annexe) :

- Prévention : 49/80 → 61,3%
- Facilité de tri : 4/8 → 50%
- Réemploi : 31,25/48 → 65,1%
- Recyclage : 20/24 → 83,3%

Les matériaux

a. Critères de sélection des matériaux

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Freine-vapeur collé sur la face intérieure du caisson.	perméabilité à la vapeur d'eau
2	Cadre principal	poids stabilité résistance thermique
3	Des caissons secondaires :	
	Caisson sec. : couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités) sous forme d'un isolant collé au freine-vapeur.	performance environnementale résistance thermique
	Caisson sec.: face intérieure: un panneau.	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau
	Caisson sec.: isolant	résistance thermique performance environnementale
	Caisson sec.: montants et traverses	poids stabilité résistance thermique
	Caisson sec.: face extérieure: un panneau	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
	Un pare-pluie collé sur la face extérieure du caisson (ou panneau étanche à l'eau à la case	comportement à l'eau

	précédente)	
4	Espace ventilé + clips ou cadre fixation PV	Voir WP2
5	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Voir WP2

Fiche descriptive n°4 : système dit 'sur RAILS'

Hypothèses spécifiques

Les simulations thermiques et environnementales sont réalisées sur base des hypothèses suivantes :

- application d'un pare-vapeur sur l'ensemble de la façade avant pose des rails
- une couche d'isolation générique de 18 cm répartie entre rails métalliques à raison d'une fraction totale de 2% de matière métallique (tenant compte de la composition creuse des profilés) ;
- forfait fixations: 1,5 kg/m²

La paroi

a. Type d'assemblage inter-éléments module/mur support

- Fixation des rails au mur support avec éléments intermédiaires indépendants : vis ou boulons
- Fixation ponctuelle de l'isolant avec éléments intermédiaires indépendants : chevilles

b. Performance thermique de la paroi (logiciel PEB)

i. Résistance thermique de la paroi

La méthode simplifiée utilisée par le logiciel PEB pour calculer la résistance thermique des éléments de construction ne peut pas être appliquée lorsque la couche d'isolation est traversée par du métal. Pour évaluer la résistance thermique de ce système, il faut nécessairement recourir à un calcul numérique via un logiciel externe. Pour cela, les éléments métalliques doivent être définis à un certain niveau de précision, ce qui n'est pas acquis à ce stade de l'étude.

ii. Profil de température / ponts thermiques

Indisponible : voir point précédent.

Il convient d'attirer l'attention sur l'impact considérable que représentent les profils métalliques linéaires en matière de ponts thermiques.

L'élément/ le module

a. Composition et fonctionnalité de chaque couche

couche	composition	fonctionnalité
1	Freine vapeur collé sur le mur support	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau
2	Rails fixés dans la façade existante de façon linéaire et sur lesquels viendront se fixer directement les modules PV	Support des modules PV
3	Isolant thermique comblant l'espace entre les rails et fixé mécaniquement et ponctuellement à la façade	Isolation thermique
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Production photovoltaïque Barrière de protection intempéries

b. Mode constructif / assemblage intra-composants

couche	composition	Type d'assemblage
1	Freine vapeur collé sur le mur support	Assemblage humide : colle
2	Rails fixés dans la façade existante de façon linéaire et sur lesquels viendront se fixer directement les modules PV	Assemblage sec autonome : à préciser
3	Isolant thermique comblant l'espace entre les rails et fixé mécaniquement et ponctuellement à la façade	
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	

c. Morphologie : forme, dimensions, poids

Aucune préfabrication

L'écartement entre les rails à définir en fonction des choix des technologies photovoltaïques du WP2.

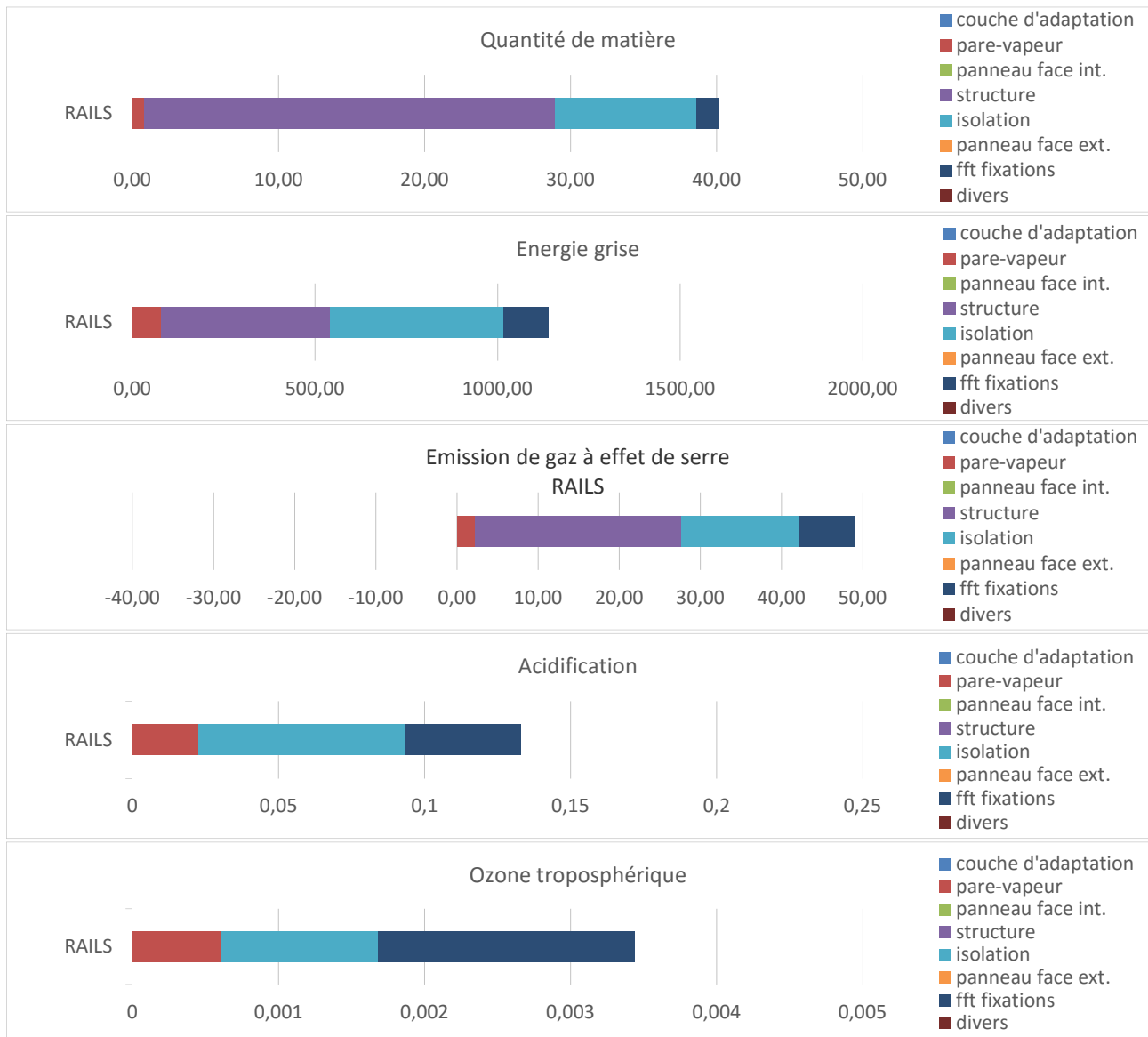
d. Performance thermique

i. Résistance thermique du module

Indisponible : voir point b.i.

e. Bilan environnemental

i. Analyse du cycle de vie : critères quantitatifs



ii. Potentiel de valorisation : critères qualitatifs

Evaluation du système suivant méthodologie développée par E. Gobbo (voir détails en annexe) :

- Prévention : 24,5/40 → 61,3%
- Facilité de tri : 2/4 → 50%
- Réemploi : 15,25/24 → 63,5%
- Recyclage : 10/12 → 83,3%

Les matériaux

a. Critères de sélection des matériaux

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	Freine vapeur collé sur le mur support	perméabilité à la vapeur d'eau
2	Rails fixés dans la façade existante de façon linéaire et sur lesquels viendront se fixer directement les modules PV	stabilité résistance thermique
3	Isolant thermique comblant l'espace entre les rails et fixé mécaniquement et ponctuellement à la façade	résistance thermique performance environnementale
4	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2	Voir WP2

Fiche descriptive n°5 : système MONOLITHIQUE

Hypothèses spécifiques

Les simulations thermiques et environnementales sont réalisées sur base des hypothèses suivantes :

- une couche d'isolation générique de 18 cm répartie entre montants d'ossature en CLS (38x184mm=section courante) à raison d'une fraction totale de 10% de bois ;
- matériau de type fibre de bois bitumineuse 18mm pour le panneau en face extérieure du caisson ($\lambda = 0,48$)
- une couche de 10mm de colle pour intégration des thin films et câblages nécessaires

La paroi

a. Type d'assemblage inter-éléments module/mur support

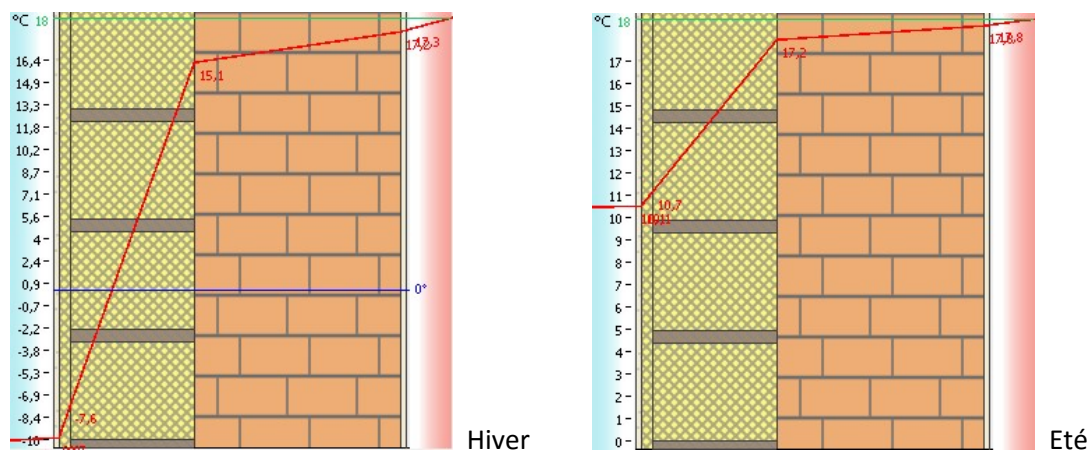
- Plots de mise à niveaux
- Assemblage sec avec élément intermédiaire autonome: cornières métallique de support

b. Performance thermique de la paroi (logiciel PEB)

i. Résistance thermique de la paroi (mur porteur inclus)

$$U_{\text{paroi}} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

ii. Profil de température / ponts thermiques



L'élément/ le module

a. Composition et fonctionnalité de chaque couche

couche	composition	fonctionnalité
1	caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson.	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau Adaptation au mur support Contenance de l'isolant
	caisson : isolant	Isolation thermique
	caisson : montants et traverses	Structure
	caisson : face extérieure: un panneau étanche	Etanchéité à l'air Etanchéité à la vapeur d'eau Contenance de l'isolant
2	Une colle ou silicone qui enrobe les câblages et qui permet de fixer les films photovoltaïques	Assemblage modules PV et panneau étanche de support
3	Modules photovoltaïques de type 'thin film' à déterminer dans le WP2.	Production photovoltaïque Barrière de protection intempéries

b. Mode constructif / assemblage intra-composants

couche	composition	Type d'assemblage			
1	caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson.			Assemblage sec dépendant : agrafe	
	caisson : isolant				
	caisson : montants et traverses				
	caisson : face extérieure: un panneau étanche	Assemblage sec autonome : pose libre	Assemblage humide : colle		Assemblage sec indépendant : vis ou boulons
2	colle ou silicone qui enrobe les				

	câblages et qui permet de fixer les films photovoltaïques				
3	Modules photovoltaïques de type 'thin films' à déterminer dans le WP2				

c. Morphologie : forme, dimensions, poids

- Panneaux standards :
 - Forme rectangulaires
 - Hauteur équivalente à un niveau d'étage du bâtiment concerné
 - Largeurs comprise entre 80 et 120 cm
- Des éléments dits « de resserrage » sont réalisés sur mesure et destinés à absorber la diversité des géométries.
- Les technologies photovoltaïques sous forme de 'thin films' sont, à priori, mise en œuvre (collées) sur chantier, ce qui permet le recouvrement avec des éléments 'actifs' de l'ensemble des caissons, standards ou sur-mesure.

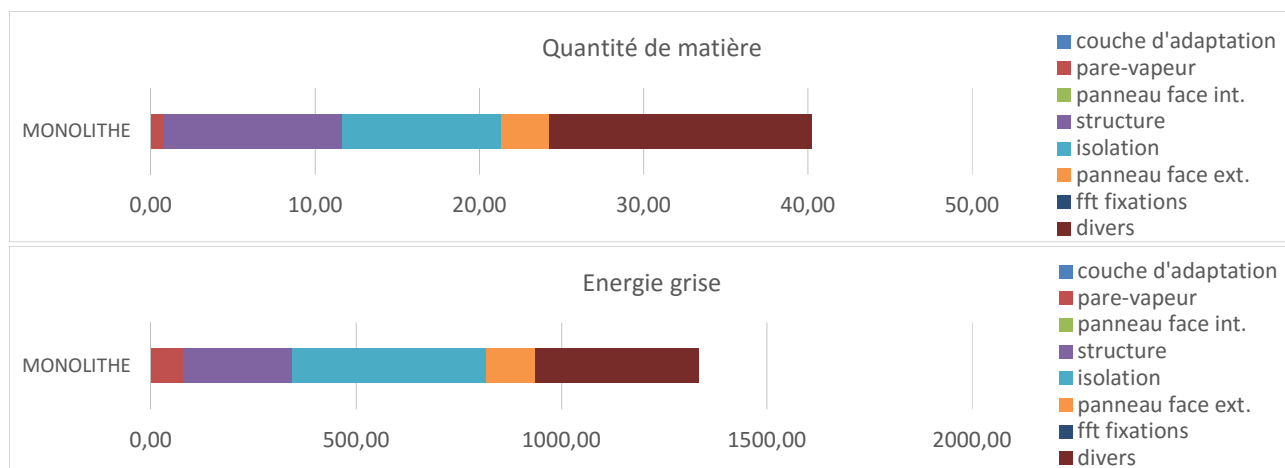
d. Performance thermique

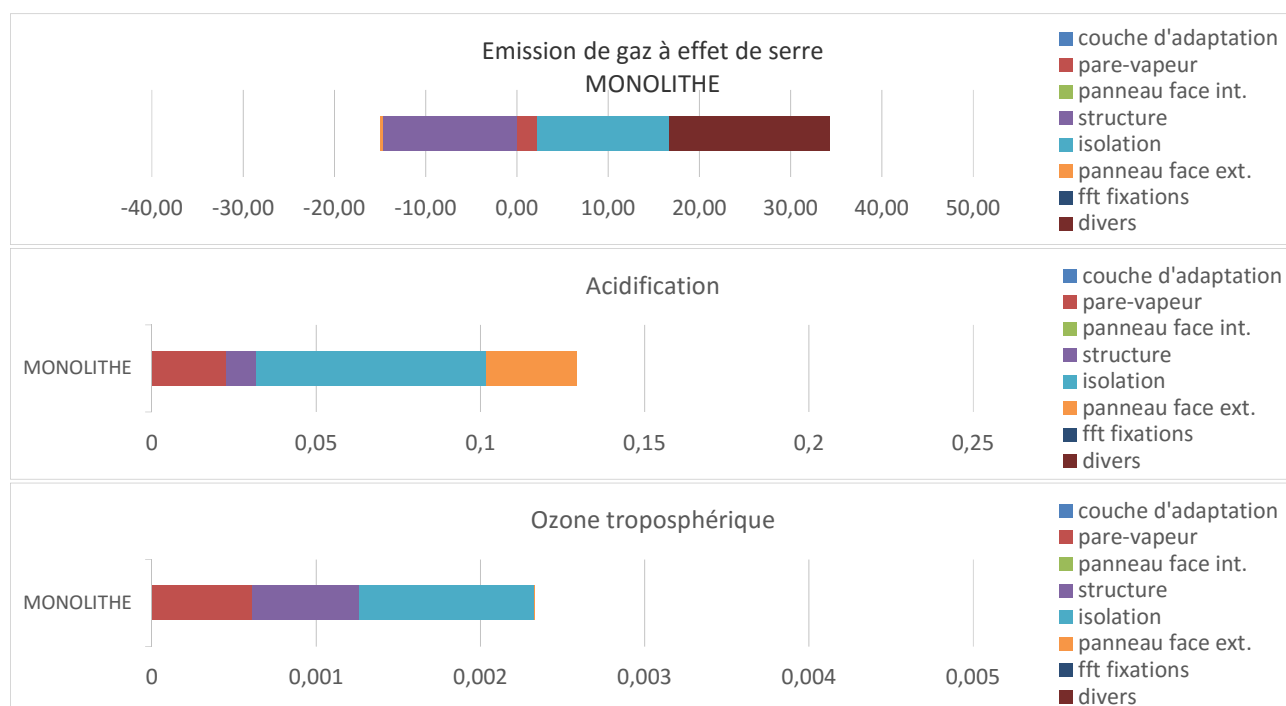
i. Résistance thermique du module (mur porteur non inclus)

$$U_{\text{paroi}} = 0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

e. Bilan environnemental

i. Analyse du cycle de vie : critères quantitatifs





ii. Potentiel de valorisation : critères qualitatifs

Evaluation du système suivant méthodologie développée par E. Gobbo (voir détails en annexe) :

- Prévention : 24,75/50 → 49,5%
- Facilité de tri : 2,5/5 → 50%
- Réemploi : 17,25/30 → 57,5%
- Recyclage : 10/15 → 66,7%

Les matériaux

a. Critères de sélection des matériaux

couche	composition	critère principal de sélection du matériau
1	caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson.	perméabilité à la vapeur d'eau
	caisson : isolant	résistance thermique performance environnementale
	caisson : montants et traverses	poids stabilité résistance thermique

	caisson : face extérieure: un panneau étanche	poids stabilité perméabilité à la vapeur d'eau comportement à l'eau
2	Une colle ou silicone qui enrobe les câblages et qui permet de fixer les films photovoltaïques	comportement à l'eau
3	Modules photovoltaïques de type 'thin film' à déterminer dans le WP2.	Voir WP2

Annexes

- ***Potentiel de valorisation – tableaux d'évaluation des 5 systèmes***

POTENTIEL DE VALORISATION
TES fermé

		Composants	Densité <i>ρ</i> kg/m³	Type de ressource	Contenu recyclé	Nature du matériau	Classe de déchet	Fraction de déchet	Facilité de manutention			Durée de vie	Besoin d'entretien	Résistance aux usages répétés	Adapté au réemploi	Adapté au recyclage	Résultats <i>potentiel de réemploi</i>	Existence de filières réemploi <i>selon Opalis</i>	Existence des filières recyclage
Couche d'adaptation	couche 1	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1				1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0	
					1	1				0,75	0,75	0,5	1	0	0	1		0	
Pare-vapeur	couche 2	film de polyéthylène PE	850	synthétique	?	homogène	classe 2	synthétique	importante	moyenne à grande largeur standardisée	film	courte	faible à nul	faible	non	?	6	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0					0	0,25	0,5	0,5	1	0	0		2,25 0,5 2,25 1	0	
						1				0,25	0,5	0,5	1	0	0			0	
Panneau face int.	couche 3	panneau OSB	500	végétale et recyclée	important	homogène	classe 2	bois et dérivés	moyen	petite à moyenne standardisée	panneau	moyenne	faible à nul	faible à moyen	oui	important taux impuretés faible	14,5	non existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,5	1				0,5	0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1	7 0,5 4 3	0	1
					1	1				0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1		0	1
Structure	couche 4	poutre bois massif résineux européen	600	végétale	aucun	homogène	classe 2	bois et dérivés	important	petite à grande standardisée	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux impuretés faible	13,5	existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0	0				0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	6 0,5 5 2	1	1
					0	1				0,5	0,5	1	1	1	1	1		1	1
Isolant	couche 5	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1				1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0	
					1	1				0,75	0,75	0,5	1	0	0	1		0	
Panneau face ext.	couche 6	panneau de fibres liées au bitume	300	végétale et recyclée	important	homogène	classe 2	bois et dérivés	moyen	petite à moyenne standardisée	panneau	moyenne	faible à nul	faible à moyen	moyennement	important taux impuretés faible	14	non existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,5	1				0	0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1	6,5 0,5 4 3	0	1
					1	1				0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1		0	1
FFT fixations	couche 7	profilés d'acier inoxydable	7850	minérale et recyclée (75%)	important	homogène	classe 2	métal ferreux	très important	petite à grande standardisée ou non	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux d'impuretés faible	16,25	non existante	filière bien installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1				0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	7,75 0,5 5 3	0	1
					1	1				0,5	0,5	1	1	1	1	1		0	1

		Résultat paroi 90,75	total max 140	score 64,8%
prévention déchet		43	70	61,4%
facilité de tri		3,5	7	50,0%
réemploi		26,25	42	62,5%
recyclage		18	21	85,7%

POTENTIEL DE VALORISATION
TES ouvert

		Composants	Densité ρ kg/m³	Type de ressource	Contenu recyclé	Nature du matériau	Classe de déchet	Fraction de déchet	masse volum.	Facilité de manutention dimension	conditionnement	Durée de vie	Besoin d'entretien	Résistance aux usages répétés	Adapté au réemploi	Adapté au recyclage	Résultats potentiel de réemploi	Existence de filières réemploi selon Opalis	Existence des filières recyclage
Paré-vapeur	couche 1	film de polyéthylène PE	850	synthétique	?	homogène	classe 2	synthétique	importante	moyenne à grande largeur standardisée	film	courte	faible à nul	faible	non	?	6	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0		1	0,5		0	0,25	0,5	0,5	1	0	0		2,25 0,5 2,25 1	0	
Structure	couche 2	poutre bois massif résineux européen	600	végétale	aucun	homogène	classe 2	bois et dérivés	important	petite à grande standardisée	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux impuretés faible	13,5	existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0	0		0,5		0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	6 0,5 5 2	1	1
Isolant	couche 3	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1		0,5		1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0	
Panneau face ext.	couche 4	panneau de fibres liées au bitume	300	végétale et recyclée	important	homogène	classe 2	bois et dérivés	moyen	petite à moyenne standardisée	panneau	moyenne	faible à nul	faible à moyen	moyennement	important taux impuretés faible	14	non existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,5	1		0,5		0	0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1	6,5 0,5 4 3	0	1
FFT fixations	couche 5	profilés d'acier inoxydable	7850	minérale et recyclée (75%)	important	homogène	classe 2	métal ferreux	très important	petite à grande standardisée ou non	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux d'impuretés faible	16,25	non existante	filière bien installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1		0,5		0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	7,75 0,5 5 3	0	1

	Résultat paroi	total max	score
	63	100	63,0%
prévention déchet	29,25	50	58,5%
facilité de tri	2,5	5	50,0%
réemploi	19,25	30	64,2%
recyclage	12	15	80,0%

POTENTIEL DE VALORISATION
Système CADRE

		Composants	Densité ρ kg/m³	Type de ressource	Contenu recyclé	Nature du matériau	Classe de déchet	Fraction de déchet	Facilité de manutention		Durée de vie	Besoin d'entretien	Résistance aux usages	Adapté au réemploi	Adapté au recyclage	Résultats potentiel de réemploi	Existence de filières réemploi selon Opalis	Existence des filières recyclage
									masse volum.	dimension	conditionnement							
Couche d'adaptation	couche 1	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1				1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0
					1	1				0,75	0,75	0,5	1	0	0	1		
Pare-vapour	couche 2	film de polyéthylène PE	850	synthétique	?	homogène	classe 2	synthétique	importante	moyenne à grande largeur standardisée	film	courte	faible à nul	faible	non	?	6	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0					0	0,25	0,5	0,5	1	0	0		2,25 0,5 2,25 1	0
						1				0,25	0,5	0,5	1	0	0			0
Panneau face int.	couche 3	panneau OSB	500	végétale et recyclée	important	homogène	classe 2	bois et dérivés	moyen	petite à moyenne standardisée	panneau	moyenne	faible à nul	faible à moyen	oui	important taux impuretés faible	14,5	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,5	1				0,5	0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1	7 0,5 4 3	0
					1	1				0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1		0
Structure secondaire (caisson)	couche 4	poutre bois massif résineux européen	600	végétale	aucun	homogène	classe 2	bois et dérivés	important	petite à grande standardisée	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux impuretés faible	13,5	existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0	0				0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	6 0,5 5 2	1
					0	1				0,5	0,5	1	1	1	1	1		1
Isolant	couche 5	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1				1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0
					1	1				0,75	0,75	0,5	1	0	0	1		0
Panneau face ext.	couche 6	panneau de fibres liées au bitume	300	végétale et recyclée	important	homogène	classe 2	bois et dérivés	moyen	petite à moyenne standardisée	panneau	moyenne	faible à nul	faible à moyen	moyennement	important taux impuretés faible	14	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,5	1				0	0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1	6,5 0,5 4 3	0
					1	1				0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1		0
FT fixations	couche 7	profilés d'acier inoxydable	7850	minérale et recyclée (75%)	important	homogène	classe 2	métal ferreux	très important	petite à grande standardisée ou non	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux d'impuretés faible	16,25	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1				0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	7,75 0,5 5 3	0
					1	1				0,5	0,5	1	1	1	1	1		0
Structure principale (cadre)	couche 8	poutre bois massif résineux européen	600	végétale	aucun	homogène	classe 2	bois et dérivés	important	petite à grande standardisée	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux impuretés faible	13,5	existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0	0				0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	6 0,5 5 2	1
					0	1				0,5	0,5	1	1	1	1	1		1

	Résultat paroi 104,25	total max 160	score 65,2%
prévention déchet	49	80	61,3%
facilité de tri	4	8	50,0%
réemploi	31,25	48	65,1%
recyclage	20	24	83,3%

POTENTIEL DE VALORISATION
Système RAILS

		Composants	Densité ρ kg/m³	Type de ressource	Contenu recyclé	Nature du matériau	Classe de déchet	Fraction de déchet	Facilité de manutention		Durée de vie	Besoin d'entretien	Résistance aux usages répétés	Adapté au réemploi	Adapté au recyclage	Résultats potentiel de réemploi	Existence de filières réemploi selon Opalis	Existence des filières recyclage
		<i>masse volum.</i>	<i>dimension</i>	<i>conditionnement</i>														
Pare-vapeur	couche 1	film de polyéthylène PE	850	synthétique	?	homogène	classe 2	synthétique	importante	moyenne à grande largeur standardisée	film	courte	faible à nul	faible	non	?	6	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage	0			1	0,5		0	0,25	0,5	0,5	1	0	0		2,25 0,5 2,25 1	0
Rails de structure	couche 2	profilés d'acier inoxydable	7850	minérale et recyclée (75%)	important	homogène	classe 2	métal ferreux	très important	petite à grande standardisée ou non	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux d'impuretés faible	16,25	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage	0,75		1		0,5		0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	7,75 0,5 5 3	0
Isolant	couche 3	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage	0,75		1		0,5		1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0
FFT fixations	couche 4	profilés d'acier inoxydable	7850	minérale et recyclée (75%)	important	homogène	classe 2	métal ferreux	très important	petite à grande standardisée ou non	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux d'impuretés faible	16,25	non existante
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage	0,75		1		0,5		0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	7,75 0,5 5 3	0

	Résultat paroi 51,75	total max 80	score 64,7%
prévention déchet	24,5	40	61,3%
facilité de tri	2	4	50,0%
réemploi	15,25	24	63,5%
recyclage	10	12	83,3%

POTENTIEL DE VALORISATION
MONOLITHIQUE

		Composants	Densité ρ kg/m³	Type de ressource	Contenu recyclé	Nature du matériau	Classe de déchet	Fraction de déchet	Facilité de manutention			Durée de vie	Besoin d'entretien	Résistance aux usages répétés	Adapté au réemploi	Adapté au recyclage	Résultats <i>potentiel de réemploi</i>	Existence de filières réemploi selon Opalis	Existence des filières recyclage
									masse volum.	dimension	conditionnement								
Pare-vapeur	couche 1	film de polyéthylène PE	850	synthétique	?	homogène	classe 2	synthétique	importante	moyenne à grande largeur standardisée	film	courte	faible à nul	faible	non	?	6	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0			0,5		0	0,25	0,5	0,5	1	0	0		2,25 0,5 2,25 1	0	
						1				0,25	0,5	0,5	1	0	0			0	
Structure	couche 2	poutre bois massif résineux européen	600	végétale	aucun	homogène	classe 2	bois et dérivés	important	petite à grande standardisée	élément	longue	faible à nul	important	oui	important taux impuretés faible	13,5	existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0	0		0,5		0	0,5	0,5	1	1	1	1	1	6 0,5 5 2	1	1
					0	1				0,5	0,5	1	1	1	1	1		1	1
Isolant	couche 3	laine de verre	[10 à 120] 60	minérale et recyclée	important	homogène	classe 2	Inorganique synthétique minéral	faible	petite à moyenne standardisée	vrac, matelas ou panneau	courte à moyenne	faible à nul	faible	non	important taux impuretés faible	13,25	non existante	
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,75	1		0,5		1	0,75	0,75	0,5	1	0	0	1	6,75 0,5 3 3	0	
					1	1				0,75	0,75	0,5	1	0	0	1		0	
Panneau support PV	couche 4	panneau de fibres liées au bitume	300	végétale et recyclée	important	homogène	classe 2	bois et dérivés	moyen	petite à moyenne standardisée	panneau	moyenne	faible à nul	faible à moyen	moyennement	important taux impuretés faible	14	non existante	filière installée locale
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,5	1		0,5		0	0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1	6,5 0,5 4 3	0	1
					1	1				0,75	0,5	0,5	1	0,25	1	1		0	1
Colle	couche 5	mortier colle	1600	minérale et synth.	/	homogène	classe 2	?	très important	/	en vrac	longue	faible à nul	faible à nul	non	non	7,75	non existante	?
	évaluation	prévention déchet facilité de tri réemploi recyclage		0,25			0,5		0		1	1	1	0	0	0	3,25 0,5 3 1	0	
						1					1	1	1	0	0	0		0	

	Résultat paroi 54,5	total max 100	score 54,5%
prévention déchet	24,75	50	49,5%
facilité de tri	2,5	5	50,0%
réemploi	17,25	30	57,5%
recyclage	10	15	66,7%

Définition du pré-prototype

Conformément à la convention, la construction d'un pré-prototype était programmé à l'automne 2017 sur base des principes suivants. Suite à la décision de NO-GO, cette réalisation a finalement été abandonnée.

- Trois variantes prévues
 - 2 systèmes de caisson: "TES ouvert" (2 variantes) et "TES fermé" (1 variante)
 - 3 modes d'encapsulation des technologies photovoltaïques distincts (déterminés dans le WP2)
 - 3 types d'isolants
 - Un isolant naturel en vrac
 - Un super-isolant à base de billes d'aérogel en vrac
 - Un super-isolant sous vide

Objectifs et méthode d'évaluation

Les objectifs visés par le WP3 à travers la réalisation d'un pré-prototype peuvent se résumer ainsi:

- Vérifier le fonctionnement global des systèmes, la compatibilité géométrique et technique entre les éléments des différents WP et soulever les éventuels points à résoudre
- Contrôler la compressibilité des isolants et leur capacité à épouser les irrégularités du mur
 - Soit à travers le freine-vapeur
 - Soit directement en couche d'adaptation→ cette évaluation pourra se faire à l'œil nu. Il s'agira simplement de vérifier que l'isolant adopte la forme demandée et comble les vides.
- Contrôler le tassement de l'isolant dans le caisson (uniquement dans le cas d'insufflation d'un isolant 'en vrac')
→ ce contrôle s'opère grâce à une caméra thermique, à plusieurs reprises, une fois les éléments positionnés sur le mur support.
- Contrôler le bon fonctionnement des matériaux freine-vapeur (membrane ou panneau osb)
→ ce contrôle s'effectue grâce au positionnement sur chaque face au droit de ces éléments freine-vapeur de sondes d'humidité dont l'extraction des données permettra une analyse fine.
- Vérifier la résistance thermique des matériaux isolants ainsi que l'échauffement de la coulisse d'air située à l'arrière des surfaces de captage photovoltaïque
→ ce contrôle s'effectue grâce au positionnement de sondes de température au droit des différentes couches de matériaux. L'extraction des données permettra de confirmer ou non la performance thermique présumée du matériau isolant et l'évaluer l'échauffement de la coulisse d'air en hauteur.
A terme, les résultats d'échauffement de la coulisse d'air pourraient permettre de reconsidérer les épaisseurs d'isolants (diminution éventuelle du Δt de part et d'autre de la paroi)

Définition des 3 prototypes

Les 3 pré-prototypes prendront place sur une façade mise à disposition par l'ULB.

A ce stade, les caractéristiques du mur-support ne sont pas connues.

Afin de procéder à la sélection des matériaux et à la définition des épaisseurs nécessaires pour atteindre les exigences réglementaires de performances énergétiques, nous avons pris l'option de considérer le mur support comme un mur générique en briques de terre cuite d'une épaisseur de 30 cm (λ très défavorable de 0,82) revêtu d'une plaque de plâtre en finition intérieure.

Pré-proto n°1

Composition générale : TES ouvert / Cadre en bois / Isolation flocons de cellulose / PV Alu/ETFE

Composition détaillée :

couche	composition	choix du matériau pour le proto 1	épaisseur (mm)
1	Caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson. Il doit être fixé avec suffisamment de jeux pour permettre d'épouser les irrégularités du mur, au fur et à mesure de l'insufflation.	frein-vapeur hygrovariable intelligent (exemple de produit: Proclimat intello +) Le freine-vapeur est agrafé au cadre et aux traverses du caisson en bois. Les agrafes à utiliser ont une longueur d'au moins 8 mm. Vu l'importance du freine-vapeur au niveau de la physique du bâtiment, il convient de le percer le moins possible. Des rubans adhésifs provenant du même fabricant sont utilisés pour assembler les membranes pare-vapeur entre elles et réparer les éventuels percements.	0,23
	Caisson : isolant nécessairement en vrac. Il est insufflé sur chantier par des percements préalablement réalisés en atelier.	Flocons de cellulose à insuffler sur chantier via des percements préalablement réalisés dans le panneau sur la face extérieure du caisson. Conductivité thermique: 0,038 W/(m.K) (exemple de produit: Cellulose i3 Isoproc) Les flocons seront insufflés au moyen d'une souffleuse adéquate, avec une densité au moins égale à celle prescrite par le fabricant jusqu'à ce que le compartiment soit complètement rempli, sans risque de tassement ni rognures.	285

	Caisson : montants et traverses fixés à la paroi existante	Bois de type CLS ou bois massif équivalent raboté. Dimension: 38x285 Les pièces de bois sont d'une seule pièce. Les assemblages d'angles se font par clouage et tire-fond conformément à l'Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1) (disposition et dimensionnement des fixations, préperçage ...)	285
	caisson : face extérieure: un panneau préalablement percé pour insufflation de l'isolant.	Panneau de fibre de bois bitumineux, assurant à la fois le contre-ventement et l'étanchéité à l'eau de pluie. (exemple de produit: Agepan DWD) Les panneaux sont fixés par clouage (pointes galvanisées ou inoxydables d'au moins 55 mm de longueur) au cadre et aux traverses en bois. Ces panneaux sont percés préalablement en atelier afin de permettre l'insufflation de l'isolant sur chantier. Les tampons sont coupés à l'aide d'une scie cloche , puis remis après insufflation de façon totalement hermétique à l'aide de patch (voir produit recommandé par le fabricant) pour assurer l'étanchéité à la pluie.	16
2	Espace ventilé + cadre porteur des modules actifs et non actifs	Rail préformé en aluminium compatible avec le profil de pincement adéquat (produit conseillé: Module-bearing Rail EcoLight ,Schletter) Dimensions 30x30mm Fixations suivant indications du fabricant.	30
3	Profils de pincement des modules photovoltaïques (4a) et des surfaces non actives (4b)	Profil ponctuel de pincement en aluminium compatible avec le rail adéquat (produits conseillés: Middle clamp Pro narrow 3–8 mm kit pour une application entre deux éléments, End clamp Pro narrow 3–8 mm kit pour un application en bout) Dimensions: 80x50 (Lxl) Fixations suivant indications du fabricant	+25

4a	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2 "pincés" dans des profils	Sandwich Soldaredge n°1: Aluminium + PV mono cristallin + Feron (ETFE)	2,5
4b	Surfaces non actives dites "resserrages"	ETFE teinté dans la masse ou recouvert d'un filtre opaque. Teinte identique à la finition des modules PV.	2,5

Pré-PROTO n°2

Composition générale : TES ouvert / Cadre bois / Isolation billes d'aérogel / PV verre/verre

Composition détaillée :

couche	composition	choix du matériau pour le proto 2	épaisseur (mm)
1	Caisson : face intérieure: freine-vapeur agrafé à la structure du caisson. Il doit être fixé avec suffisamment de jeux pour permettre d'épouser les irrégularités du murs, au fur et à mesure de l'insufflation.	frein-vapeur hygrovariable intelligent (exemple de produit: Proclimat intello +) Le freine-vapeur est agrafé au cadre et aux traverses du caisson en bois. Les agrafes à utiliser ont une longueur d'au moins 8 mm. Vu l'importance du freine-vapeur au niveau de la physique du bâtiment, il convient de le percer le moins possible. Des rubans adhésifs provenant du même fabricant sont utilisés pour assembler les membranes pare-vapeur entre elles et réparer les éventuels percements.	0,23
	Caisson : isolant nécessairement en vrac. Il est insufflé sur chantier par des percements préalablement réalisés en atelier.	Billes d'aérogel Conductivité thermique: 0,019 - 0,021 W/m.K (exemples de produits: Nanogel de Cabot ou Kwark d'Ennersens) Remplissage du caisson par gravité (à verser) à l'aide d'un entonnoir à fabriquer. Densité au moins égale à celle prescrite par le fabricant jusqu'à ce que le compartiment soit complètement rempli, sans risque de tassement ni rognures. (tassement attendu à terme: 10%)	89

	Caisson : montants et traverses fixés à la paroi existante	Bois de type CLS ou bois massif équivalent raboté. Dimension: 38x89 Les pièces de bois sont d'une seule pièce. Les assemblages d'angles se font par clouage et tire-fond conformément à l'Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1) (disposition et dimensionnement des fixations, préperçage ...)	89
	Caisson : face extérieure: un panneau préalablement percé pour insufflation de l'isolant.	Panneau de fibre de bois bitumineux, assurant à la fois le contre-ventement et l'étanchéité à l'eau de pluie. (exemple de produit: Agepan DWD) Les panneaux sont fixés par clouage (pointes galvanisées ou inoxydables d'au moins 55 mm de longueur) au cadre et aux traverses en bois. Ces panneaux sont percés préalablement en atelier afin de permettre l'insufflation de l'isolant sur chantier. Les tampons sont coupés à l'aide d'une scie cloche , puis remis après insufflation de façon totalement hermétique à l'aide de patch (voir produit recommandé par le fabricant) pour assurer l'étanchéité à la pluie.	16
2	Espace ventilé + cadre porteur des modules actifs et non actifs	Rail préformé en aluminium compatible avec le profil de pincement adéquat (produit conseillé: Module-bearing Rail EcoLight ,Schletter) Dimensions 30x30mm Fixations suivant indications du fabricant	30
3	Profils de pincement des modules photovoltaïques (4a) et des surfaces non actives (4b)	Profil ponctuel de pincement en aluminium compatible avec le rail adéquat (produits conseillés: Middle clamp Pro narrow 3–8 mm kit pour une application entre deux éléments, End clamp Pro narrow 3–8 mm kit pour un application en bout) Dimensions: 80x50 (Lxl) Fixations suivant indications du fabricant	+25

4a	Modules photovoltaïques à déterminer dans le WP2 "pincés" dans des profils	Sandwich Soldaredge n°2: Verre + PV mono cristallin + Verre	4
4b	Surfaces non actives dites "resserrages"	Verre 4mm teinté ou recouvert d'un filtre opaque. Teinte identique à la finition des modules PV.	4

Pré-PROTO n°3

Composition générale : TES fermé / Cadre bois / Isolation VIP + calage en mousse (à définir) / PV verre/ETFE

Composition détaillée :

couche	composition	choix du matériau pour le proto 3	épaisseur (mm)
1	Plots de mise à niveau fixés dans la paroi existante	à définir sur base du prototype	
2	Couche d'adaptation au mur existant (absorption des irrégularités) sous forme d'un isolant collé au freine-vapeur.	Matelas en laine minérale à lamelles verticales en laine minérale, collées sur une feuille d'aluminium renforcé. A fixer sur le panneau osb à l'aide de broches d'isolation et de rondelles.	25
3	Caisson : face intérieure: un panneau.	Panneau de particules OSB non poncé d'une épaisseur de 18 mm. Le panneau utilisé doit être de classe OSB/3 selon la norme EN 300: panneaux porteurs utilisés en milieu ambiant humide et être munis d'un agrément technique ATG. Masse volumique comprise entre 600 et 680kg/m ³ . Fixation au cadre bois par vissage (utilisation de vis à corps droit plutôt que de vis à bois conventionnelles)	18
	Caisson : isolant	Panneaux d'isolation sous vide. Conductivité thermique: 0,007 W/m.K (exemple de produit: panneaux Optim-R de	40+20

		Kingspan) Panneaux de dimensions standards superposés (sans colle) et assemblés suivant les plans d'exécution. Si un calage des panneaux dans le caisson est nécessaire, utilisation d'une mousse polyuréthane en quantité strictement limitée. Les panneaux sont placés dans le caisson en atelier.	
	Caisson : montants et traverses fixés à la paroi existante	Bois de type CLS ou bois massif équivalent raboté. Dimension: 38x63 Les pièces de bois sont d'une seule pièce. Les assemblages d'angles se font par clouage et tire-fond conformément à l'Eurocode 5 (NBN EN 1995-1-1) (disposition et dimensionnement des fixations, préperçage ...)	63
	Caisson : face extérieure: un panneau	Panneau de fibre de bois bitumineux, assurant à la fois le contreventement et l'étanchéité à l'eau de pluie. (exemple de produit: Agepan DWD) Les panneaux sont fixés par clouage (pointes galvanisées ou inoxydables d'au moins 55 mm de longueur) au cadre et aux traverses en bois.	16
4	Espace ventilé + cadre porteur des modules actifs et non actifs	Rail préformé en aluminium compatible avec le profil de pincement adéquat (produit conseillé: Module-bearing Rail EcoLight ,Schletter) Dimensions 30x30mm Fixations suivant indications du fabricant	30
5	Profils de pincement des modules photovoltaïques (6a) et des surfaces non actives (6b)	Profil ponctuel de pincement en aluminium compatible avec le rail adéquat (produits conseillés: Middle clamp Pro narrow 3–8 mm kit pour une application entre deux éléments, End clamp Pro narrow 3–8 mm kit pour un application en bout) Dimensions: 80x50 (Lxl) Fixations suivant indications du fabricant	+25
6a	Modules photovoltaïques	Sandwich Soldaredge n°3: Verre + PV mono	3

	à déterminer dans le WP2 “pincés” dans des profils	cristallin + Feron (ETFE)	
6b	Surfaces non actives dites “resserrages”	ETFE teinté dans la masse ou recouvert d’un filtre opaque. Teinte identique à la finition des modules PV.	3

Choix des matériaux

Pour permettre une comparaison fine entre les différentes variantes, nous avons opté pour une composition assez similaire. Les 3 pré-prototypes se distinguent essentiellement sur 3 points:

- Le système utilisé : TES ouvert et TES fermé
- Le choix du matériau isolant
- Le choix de mode d'encapsulation des cellules photovoltaïques monocristalline (WP2)

Le choix du matériau isolant influence grandement les propriétés du système, et en particulier son épaisseur, principalement en fonction de sa résistance thermique.

Mais pour être exhaustif, on peut considérer que le choix de l'isolant est guidé par plusieurs facteurs, plus ou moins déterminants³⁰:

- Propriétés thermiques : une conductivité thermique faible permet de réduire l'épaisseur de la couche d'isolant et donc l'épaisseur du système dans son ensemble.
- Propriétés techniques : principalement la rigidité du matériau (permet-il ou non de s'adapter aux irrégularités des parois limitrophes?), le comportement au feu (risques liés à la proximité des batteries), la perméabilité à la vapeur d'eau, le comportement à l'humidité (risques liés aux tassements et à l'affaiblissement des performances), le type de mise en œuvre (fixations, manutentions...), la stabilité dans le temps, l'isolation acoustique, etc.
- Propriétés environnementales: impact énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, maintenance, traitement en fin de vie (recyclage) etc. Ces propriétés sont identifiables par des données centralisées tels que les écobilans. Ces derniers mettent en avant les résultats d'analyse de différents impacts environnementaux relatifs aux produits de construction. L'analyse des impacts est transversale, elle intègre l'ensemble du cycle de vie des produits. Parmi les critères analysés nous retrouvons : les émissions de gaz à effet de serre ; la production de gaz acidifiants ; l'origine des ressources (renouvelable, non-renouvelable) ; l'économie des ressources ; la production de déchets ; toxicité pour l'eau et les êtres humains...
- Propriétés économiques : coût du matériau, de sa mise en œuvre et selon le cas de sa maintenance, en rapport avec le type d'utilisation et les performances à atteindre. Ce critère, s'il est gardé à l'esprit, n'est pas limitatif pour notre étude.

Dans le cadre de la réalisation de ce pré-prototype, nous avons choisi d'explorer l'usage de trois isolants très différents afin d'en analyser les avantages, inconvénients et les éventuelles limites d'exploitation:

- Un isolant naturel traditionnellement utilisé en construction passive et fréquemment associé à la construction bois
- Deux matériaux dits "super-isolants" pour la performance de résistance thermique exceptionnelle qu'ils permettent

³⁰ Ces facteurs sont repris de la version 2016 du Guide Bâtiment durable réalisé par l'IBGE et adaptés au projet.

La cellulose

L'ouate de cellulose, également appelé "flocons de cellulose" est un matériau d'origine végétal mais transformé industriellement, bien connu dans la construction à ossature bois. Elle est issue du recyclage du papier. Le papier étant d'abord broyé et défilé en flocons avant d'être stabilisé par l'incorporation de différents agents (sel de bore...) afin d'atteindre la résistance au feu et aux moisissures attendue.

Le matériau est peu sensible au feu (Euroclasse B-s2, d0 ou M1 au-delà de 100mm d'épaisseur³¹), mais reste néanmoins moins résistant que d'autres isolants, tels que la laine minérale. Ceci s'explique par la présence des sels de bore et d'encres d'imprimerie dans le composant. Le matériau ne participe pas à la propagation de flammes, ni de gaz toxique en cas d'incendie. Au contact des flammes, la cellulose se couvre de carbone, ce qui a pour effet de ralentir la propagation du feu et de la chaleur.

En revanche, le matériau est hydrophile: il peut retenir jusqu'à 30% de son poids en eau, ce qui lui donne de bonnes qualités hygroscopiques (elle limite le risque de condensation et moisissures à l'intérieur des murs) mais présente des risques d'affaiblissement de ses performances. Cette caractéristique n'est néanmoins pas à craindre dans le cas des systèmes REINTEREST où l'application dans un caisson étanche et protégé par un freine-vapeur du côté intérieur, écarte, à priori, tout risque d'infiltration d'eau (sauf malfaçons).

Son insufflation dans le système REINTEREST s'opère via des percements préalablement réalisés à la scie cloche dans le panneau extérieur et au moyen d'une souffleuse adéquate. La densité à atteindre par le matériau est au moins égale à celle prescrite par le fabricant jusqu'à ce que le compartiment soit complètement rempli, sans risque de tassement ni rognures.

Sa conductivité thermique s'échelonne autour de 0,038W/m.k, ce qui est correct, mais très en dessous des performances atteintes par les super-isolants.

Les billes d'aérogel

L'aérogel de silice est un matériau qui se présente sous la forme de granules légères et translucides d'une dimension comprise entre 1 et 3,5 mm, et composées à 95% d'air et à 5% de silice (un dérivé du sable). Ce matériau présente une conductivité thermique très faible, ce qui le rend très attrayant: les valeurs peuvent descendre, à l'échelle du grain, jusqu'à 0,012 W/m.K, soit la plus faible conductivité thermique pour un matériau solide.

Cette faible conductivité thermique est due à sa structure poreuse, un des éléments centraux de la technologie. En effet, ces petites structures emprisonnent les molécules présentes dans l'air afin de réduire fortement le mouvement de ces dernières au sein du matériau. La vibration des molécules présentes dans l'air et les cavités est alors restreinte, ce qui par conséquent limite fortement la transmission de chaleur.

Si on regarde à l'échelle d'un pore, tous les pores créés au sein de cette structure sont interconnectés, on dit qu'ils sont à structure ouverte. Ils permettent ainsi aux molécules de petite taille - comme la vapeur d'eau - de traverser le réseau, ce qui lui confère des propriétés d'isolation et de perméabilité à la vapeur d'eau. On dit que le matériau respire.

³¹ Environmental product declaration du produit ISOCELL

Pour profiter pleinement de ses capacités d'isolation, l'aérogel peut être incorporé dans de nombreux systèmes afin d'obtenir des systèmes à haute performance : lit de granules, remplissage de cavités, formulation de pâtes isolants, fabrication de panneaux, de matelassés, etc.³²

Sur le marché mondial actuel, le matelas d'aérogel est le matériau le plus fréquemment rencontré. Le produit Spaceloft d'Aspen, le Thermablock, le MultiTherm AERO d'Agitec ou encore le produit Skogar développé par Enersens, permettent d'obtenir des résultats d'une conductivité thermique autour de 0,015W/m.K.

Cependant, selon M. Philippe Koenig, représentant technique et commercial des produits Isolproducts, il semblerait que les matelas d'aérogel ne présentent pas le niveau de compressibilité nécessaire pour épouser les irrégularité d'un mur existant. L'essai normalisé EN 826, qui consiste à appliquer la charge nécessaire pour atteindre une compression de 10% de l'épaisseur initiale d'un isolant thermique, a démontré que pour Spaceloft® une charge de 80 kPa (8 tonnes/m²) a été nécessaire. Une simple pression sur la paroi ne suffisant donc pas à 'déformer' le matériau. ³³

En revanche, il est possible de recourir à l'aérogel sous forme de granules dans le cadre d'un TES ouvert. Jusque-là, l'usage de ce matériau concerne principalement l'isolation de cavités, comme des murs creux, l'isolation de vitrages (il permet d'obtenir une certaine transparence) mais il est le plus souvent mélangé à des formulations pour transformer des matériaux traditionnels en 'super' isolants (enduit isolant). L'utilisation des granules, ou billes d'aérogel dans un caisson bois serait probablement une première mais ne soulève pas de question de faisabilité. Selon M. Adrien Serrano, account manager de la société Enersens, le caractère poudreux des produits nécessite qu'ils soient confinés dans un système totalement hermétique. Des tests récemment réalisés ont démontré que chaque petit percement, trou ou défaut d'étanchéité est une réelle sanction.³⁴

L'intégration des billes d'aérogel dans le caisson bois se fait par gravité (versé), au moyen d'un entonnoir fabriqué et introduit dans le caisson via des percements réalisés en atelier ponctuellement dans le panneau extérieur. En outre, quand l'aérogel granulaire est introduit dans ce caisson, il est nécessaire de tasser les granules afin d'éviter qu'ils ne se tassent librement dans le temps. Négliger le tassement risquerait de laisser apparaître un vide sur la partie supérieure du caisson (à priori maximum 10%), ce qui réduirait fortement le pouvoir isolant du système.

Les produits actuellement envisagés pour cette variante du pré-prototype REINTEREST sont:

- le Kwark étudié par Enersens qui présente une conductivité thermique variant de 0,018 à 0,020W/m.k
- le Nanogel de Cabot dont l'ATec atteste une conductivité thermique de 0,021W/m.k
- l'Aerogel granulat de Agitec qui revendique une conductivité thermique de 0,019W/m.k

Les fiches techniques de ces produits sont jointes en fin du document.

Les panneaux d'isolation sous vide

Initialement conçus pour mieux isoler les réfrigérateurs sans leur faire perdre trop de volume utile, les

³² Définition de l'aérogel In L'isolation thermique du bâtiment, Enersens, Mai 2016

³³ Echange de mails avec M. Koenig en date du 26/04/2017

³⁴ Echange de mails avec M. Serrano en date du 31/03/2017

panneaux isolants sous vide (dits VIP) sont constitués d'une poudre compressée à base de silice, qui forme une structure solide avec des pores minuscules. Celle-ci est emballée dans une membrane étanche multicouches dans laquelle on a créé un vide poussé.

Les différents produits atteignent des valeurs de conductivité thermique exceptionnelle, impossibles à atteindre avec des matériaux solides, ce qui permet de réduire considérablement les épaisseurs d'isolants à résistance thermique égale.

Le caractère ininflammable et la légèreté du produit même sont des caractéristiques intéressantes mais à considérer au regard des matériaux qui y sont associés, dans le cas d'un panneau de type sandwich. En effet, un matériau VIP se présente souvent revêtu d'une couche d'un autre matériau sur ses deux faces (polystyrène extrudé, support acoustique...).

En revanche, le matériau présente de nombreuses limites d'application:

- L'enveloppe métallisée complexe des panneaux ne doit pas être endommagée (par exemple : perçage, découpe, fraisage, clouage). Si c'était le cas, le panneau retournerait en pression atmosphérique et perdrait en grande partie son excellente performance d'isolation thermique. Cet aspect exige une manutention et une mise en œuvre irréprochable et très délicate. L'intervention d'une main d'œuvre qualifiée, formée à ces exigences, semble indispensable.
- Les panneaux sont, dans la majorité des cas collés. Le recours à une colle comme mode d'assemblage, même si celle-ci est écologique, pose des questions de réversibilité: les matériaux ne peuvent être récupérés pour être réemployé, ou même recyclé.
- Réalisation sur mesure: il existe des panneaux standards de plusieurs dimensions mais pour s'adapter à une géométrie existante, leur usage ne peut pas être généralisé et le recours à des éléments "sur mesure" est inévitable (90% de modules "standards" et un minimum de 10% d'éléments "sur-mesure")
- Le bilan énergétique est, à priori, très mauvais, mais cette étude mérite d'être développée.
- Le prix est très élevé (à priori 10 à 20x plus cher que la laine de verre), ce qui n'est néanmoins pas limitatif au stade de la recherche.

Dans le cadre de REINTEREST, les panneaux sous-vide sont envisagés afin de mesurer l'importance de ces inconvénients au regard d'une mise en œuvre réelle et d'évaluer à quel point cela constitue une limite d'utilisation.

La pose de ces panneaux en caisson permet d'éviter l'usage d'une colle. En revanche, il est probable qu'il soit nécessaire d'avoir recours à une mousse de type polyuréthane sur le pourtour pour 'caler' les éléments dans le caisson et colmater les jeux de pose, ce qui représente une source de déchet supplémentaire. Le pré-prototype permettra de quantifier le recours à une mousse et d'en évaluer la nécessité réelle.

Tableau comparatif

Pour établir une comparaison pertinente, il convient de la baser sur des produits plutôt que sur un matériau générique, dont les valeurs sont souvent mal estimées.

Ces données et les résultats qui en découlent, en particulier, en ce qui concerne les données environnementales, sont à prendre avec un maximum de précaution. En effet, il s'agit là de l'analyse de produits singuliers qui ne sont pas représentatifs de l'ensemble des produits de même caractéristiques sur le marché. Les données sont issues des déclarations environnementales de produits (EPD). Les trois

déclarations ont été réalisées conformément à la norme ISO 14025. En revanche, si les EPD des produits Isocell et Vacupor ont été validées par un organisme externe, ce n'est pas le cas pour le Nanogel. Comme pour toute modélisation, il existe d'autant plus d'incertitude de la part du fabricant qu'il se base sur des hypothèses. Un maximum de prudence est donc de mise dans l'interprétation de ces résultats.

	Cellulose	Billes d'aérogel	Panneaux d'isolation sous vide
Produit étudié	ISOCELL	Nanogel, CABOT	Vacupor, Porextherm (les données analysées ci-après concernent le panneau d'isolant sous-vide de base, nu, c'est à dire sans protection de surface)
Propriétés thermiques	moyen	très bon	excellent
Conductivité thermique (en W/mK) (annexe 4.1.1)	0.038	0.021	0.007
Epaisseur d'isolant ³⁵ pour atteindre l'objectif "norme PEB" (0.24W/(m2.K)) (en cm)	15	10	7
Epaisseur d'isolant pour atteindre l'objectif "standard maison passive" (0.15W/(m2.K)) (en cm)	27	18	11
Propriétés techniques			
Densité (en kg/m3)	65	150	180
Type de mise en oeuvre / assemblage	en vrac (insufflé)	en vrac (versé)	posé en caisson 'calé' avec une mousse PUR en partie "sur-mesure"
Comportement au feu	Euroclasse B-s2, d0 (épaisseur >100mm)	ininflammable	ininflammable classement A1 selon la norme DIN EN ISO 13501-1.
Comportement à l'humidité	hydrophile	totalelement hydrophobe	totalelement hydrophobe

³⁵ Sur base d'un mur générique en briques de terre cuite d'une épaisseur de 30 cm ($\lambda = 0,82$) revêtu d'une plaque de plâtre de 10mm en finition intérieure

résistance à la diffusion de vapeur d'eau (coefficient μ)	1	2 à 3	
Propriétés environnementales (voir graphiques comparatifs en annexes)			
Quantité de matière en kg/m ² de paroi (à résistance thermique égale pour un Uparoi = 0.15W/(m ² .K)) (annexe 4.1.2)	9,75	15,00	12,60
Emissions de gaz à effet de serre en kg CO ₂ eq/kg (à résistance thermique égale pour un Uparoi = 0.15W/(m ² .K)) (annexe 4.1.3)	-12,16	141,00	118,16
Acidification en kg SO ₂ eq/kg (à résistance thermique égale pour un Uparoi = 0.15W/(m ² .K)) (annexe 4.1.4)	0,010725	0,465	0,40824
Type d'assemblage	insufflation	gravité	fixation mécanique + calage par mousse
Propriétés économiques	€	€€€€	€€€€

Notons aussi que différentes études cherchent actuellement à définir le maintien dans le temps des performances propres aux super-isolants.

Commande de matériaux

Pour la réalisation du pré-prototype, les commandes suivantes sont passées auprès de diverses entreprises (sur le budget de Cobelba) :

- Auprès de l'entreprise Carlier Bos, Avenue Albert 1er 255, 5000 NAMUR

Désignation	Quantité	Prix EUR	Total EUR HTVA
PROCLIMA INTELLO + (20 x 1.5m)	30,00 m2	2,175	65,25
PANNEAU TRESPA IZEON 8 MM	4,667 m2	59,810	279,13
STRATIFIE MASSIF BLANC 8MM - 305X130	3,965 m2	31,750	125,89
SLS 38 X 89	12,00 m	1,20	14,40
SLS 38 X 63	12,00 m	0,848	10,18
SLS 38 X 235 C24 /540/570/600	12,00 m	3,146	37,75
OSB 3 STERLING 18MM 244x122 (50 PX/PAL)	2,977 m2	5,114	15,22
AGEPAN DWD 16MM 2510 x 635 - 1.594 M ² /PA	3,188 m2	6,25	19,93
ROLLISOL PLUS 60mm x35 cm (4.2 m ²) R=1.5	4,20 m2	2,60	10,92
STYROCAR 20MM 35KG 16.5M2 125 X 60 R=0.6	0,75 m2	2,85	2,14
STYROCAR 40MM 35KG 13.50 M2 250 X 60 R=1	1,50 m2	5,225	7,84
ENERTHERM ALU TG 40MM 120X60-8.64M ² R1.8	8,64 m2	9,475	81,86
TOTAL base nette			670,51
Montant TVA			140,81
MONTANT TOTAL EUR			811,32

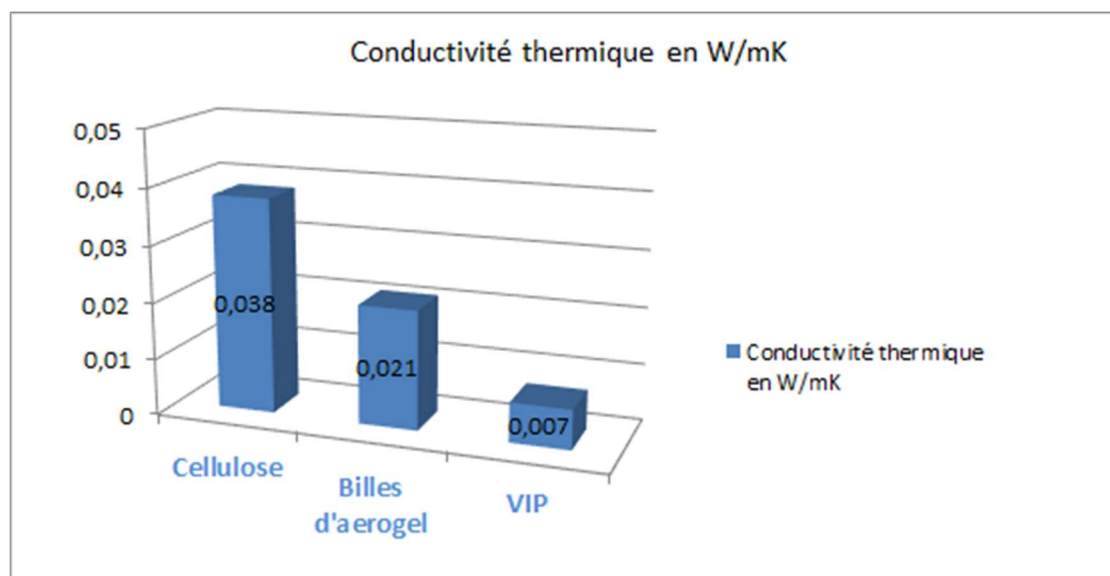
- Auprès de la SAS française ISOL Products, 112 RUE DE WOUSTVILLER, 57200 SARREGUEMINES

Désignation	Quantité	Prix EUR	Total EUR HTVA
Aérogel Granulaire KWARK	21 kg	60,00	1260,00
Transport et Emballage	1FF	113,00	113,00
TOTAL base nette			1373,00
MONTANT TOTAL EUR			1373,00

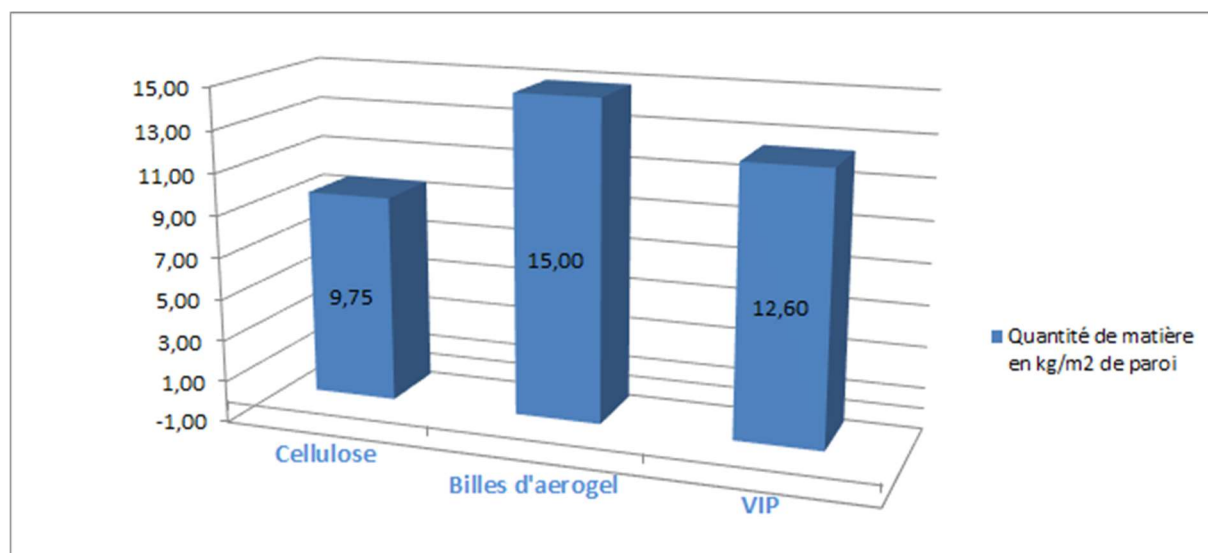
- Des contacts ont été pris avec la société belge ISOPROC, importateur et distributeur notamment de produits d'isolation naturelle, qui se montre très intéressée par le projet. La fourniture et l'insufflation de cellulose serait, dès lors, assurée par cette collaboration potentielle.

Annexes

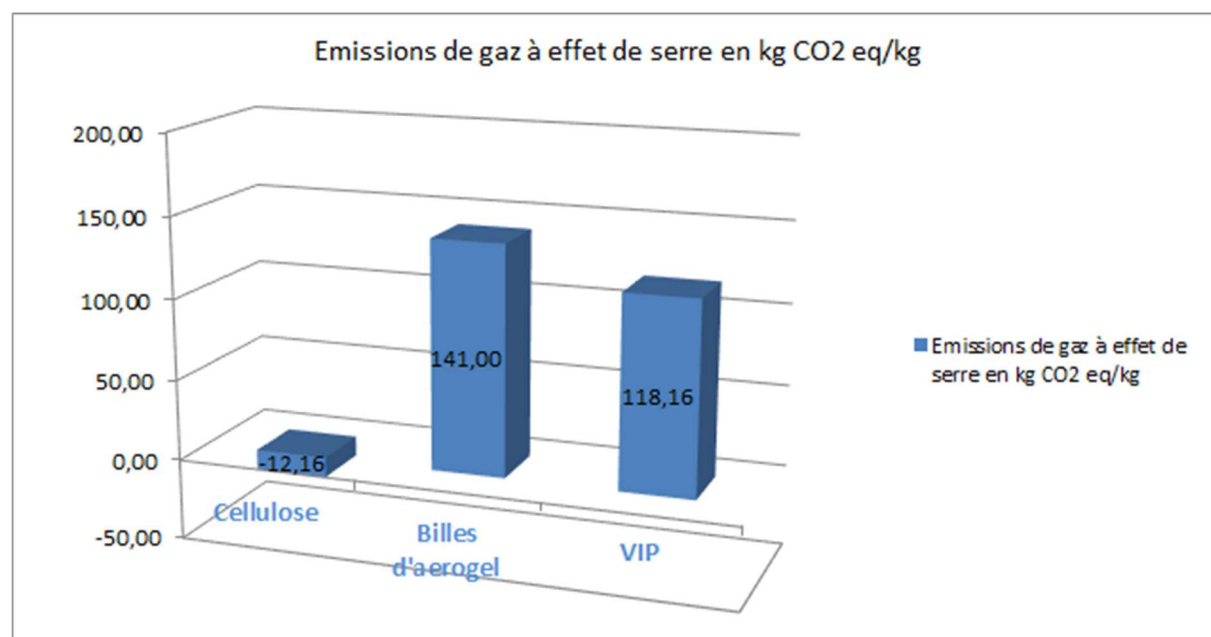
4.1.1 Comparatif conductivité thermique



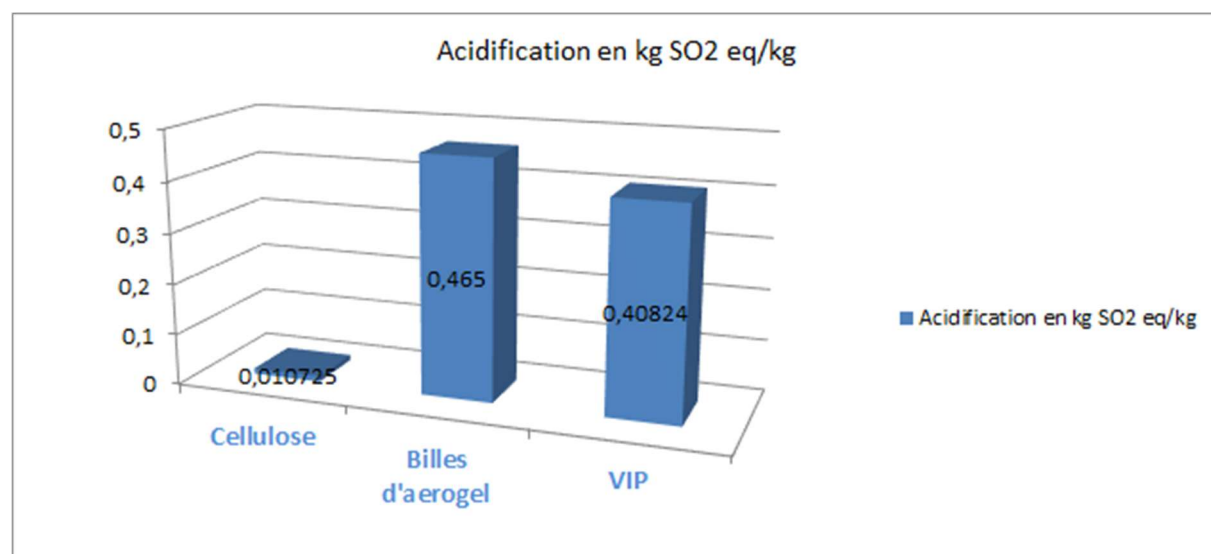
4.1.2 Comparatif quantité de matière



4.1.3 Comparatif émission de gaz à effet de serre



4.1.4 Comparatif acidification



Monitoring

Le positionnement de sondes de température et d'humidité au droit des différentes couches de matériaux doit permettre de vérifier globalement le bon fonctionnement du système et la bonne mise en œuvre des pré-protos. Plus spécifiquement, le monitoring doit permettre:

- De vérifier, qu'au fil des saisons, la migration de vapeur d'eau s'opère à travers les différentes couches, sans créer de risques de condensation.
- De valider la résistance thermique des matériaux mis en œuvre
- De contrôler que l'échauffement de la coulisse d'air suit une élévation "normale" et que la présence des équipements liés à l'intelligence du système n'influence pas les variations de températures
- D'éventuellement reconsidérer les épaisseurs d'isolants (diminution éventuelle du Δt de part et d'autre de la paroi) en fonction des résultats d'échauffement de la coulisse

Le matériel d'acquisition représentant un certain coût, le positionnement des sondes est étudié de façon à optimiser de la meilleure manière chaque élément.

Pré-PROTO n°1

Une seule sonde de température est placée entre le panneau extérieur et l'isolant.

Les données extraites de la sonde de température reliée au microcontrôleur seront utilisées pour reporter la température de la coulisse d'air.

Pour évaluer l'élévation de température de haut en bas dans cette coulisse, il est prévu de réinterpréter la courbe obtenue au pré-PROTO 2 sur base de la température révélée par la sonde.

Total : 1 sonde de température

Pré-PROTO n°2

Trois sondes sont réparties dans la coulisse sur toute la hauteur du module PV

- La sonde du bas est placée dans le joint entre panneau PV et élément de « resserrage » et permettra d'obtenir la t° d'entrée (à priori identique pour les 3 pré-protos). Il s'agit d'une sonde combinée qui indique également l'humidité.
- Les 2 sondes supérieures n'indiquent que la température.

Une sonde de température est placée entre le panneau extérieur et l'isolant.

Une sonde combinée est placée entre le freine-vapeur et l'isolant

Une sonde combinée est placée à l'intérieur du local chauffé, côté intérieur du mur support. Les données extraites de cette sonde sont valables pour les trois pré-protos.

Total : 3 sondes de température + 3 sondes combinées

Pré-PROTO n°3

Deux sondes combinées sont placées de chaque côté du panneau intérieur en osb.

Une sonde de température est placée entre le panneau extérieur et l'isolant.

Total : 1 sonde de température + 2 sondes combinées

Matériel de mesure

Pour mener ces prises de mesures à bien, un appel d'offre a été lancé pour l'achat de matériel d'instrumentation, d'acquisition et de traitement de données (ref UCL PA.2017.294).

Le matériel est décrit de la manière suivante :

1.1. 5 sondes de température d'air et humidité relative combinées

- plage de fonctionnement : 5 à 98% humidité relative et -20° à +60° Celsius
- précision minimale de $\pm 2\%$ HR dans la plage 10-90%, et $\pm 0.2^\circ\text{C}$ dans la plage 5-60°C.
- résolution 0,1 K
- pour fonctionnement à pression atmosphérique
- avec certificat de calibration
- avec câbles de connections de 10m
- avec capuchon de protection

1.2. 5 sondes de température d'air extérieur

- élément de mesure CTN ou PT100
- plage de fonctionnement -20° à +60° Celsius
- précision minimale de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ dans la plage 5-60°C.
- résolution 0,1 K
- cadence mesure 1 minute
- pour fonctionnement à pression atmosphérique
- avec certificat de calibration
- avec câbles de connections de 10m
- avec capuchon de protection

1.3. 1 datalogger

- Minimum 10 canaux de mesure compatibles avec les sondes décrites plus haut
- Vitesse de mesure minimale 2,5 mesures/s
- Connecteur pour carte mémoire micro SD ou flash
- Câble USB pour connexion PC
- Synchronisation sur horloge PC
- Batteries avec autonomie minimale de 100 h
- alimentation secteur compatible avec le réseau belge (230V-50Hz)

- Le logger, synchronisés sur l'horloge d'un PC, enregistre les données en provenance des points de mesures toutes les 10 min pendant une durée maximum de 6 mois. Le protocole interne au système d'acquisition transforme les signaux mesurés en format ASCII 8bits. Un logiciel délivre ces données mesurées sous format de fichier csv.
- La récupération des données ainsi qu'un backup devront être par connexion à un PC via un câble USB. En cas de panne de courant, l'enregistrement des données n'est pas interrompu puisque les loggers sont équipés de batteries.
- Le logger est équipé d'une carte mémoire micro SD ou FLASH capable d'enregistrer jusqu'à 1,5 million de valeurs de mesure.

•

1.4. 1 logiciel d'acquisition des données compatible avec l'équipement décrit ci-dessus

- Campagne de mesure de 6 mois
- 10 points de mesure
- Valeurs moyennes sur un intervalle d'acquisition de 10 min
- Mesures enregistrées récupérables sous format csv dans un PC

Cet appel d'offre a été envoyé le 19/10/2017 aux trois sociétés suivantes, spécialisées dans ce type d'équipement : NATIONAL INSTRUMENT (quote.belgium@ni.com), TESTO (info@testo.be) et AKRON (geert.dierckx@akron.be).

Nous avons reçu trois réponses, mais une seule offre de prix:

- 1) TESTO a répondu le 20/10/2017 : « Après analyse de votre appel d'offre, nous constatons que nous ne pouvons malheureusement pas y répondre car nos produits ne répondent pas aux critères de votre cahier des charges. »
- 2) NATIONAL INSTRUMENT a répondu le 24 octobre ne pas être en mesure de déposer une offre pour du matériel d'instrumentation, mais bien pour du matériel d'acquisition et traitement, et nous invitent à contacter une tierce société pour la partie instrumentation : « But unfortunately we do not supply any sensors, but usually direct our customers to companies like Honeywell that we can interface to on our data logger ».
- 3) AKRON a remis une offre correspondant aux prescriptions décrites dans l'appel, pour un montant de 9798,00 EUR HTVA, plus trois options de 603,00 EUR HTVA, 52,00 EUR HTVA et 94,00 EUR HTVA.

Compte tenu que suivre la recommandation de NATIONAL INSTRUMENT reviendrait à réémettre deux appels d'offre séparés, l'un pour l'instrumentation, l'autre pour l'acquisition et le traitement, et que cette démarche entraînerait un délai important qui ne peut être intégré dans le planning du projet REINTEREST, nous écartons cette piste. Nous regrettons que NATIONAL INSTRUMENT n'ait pas déposé une offre incluant le matériel d'instrumentation proposé par la tierce société en question.

Nous avons donc choisi d'accepter l'offre de AKRON sans ses options, pour un total de 9798 EUR HTVA. Suite à la décision de NO-GO, la procédure d'achat a finalement été avortée.

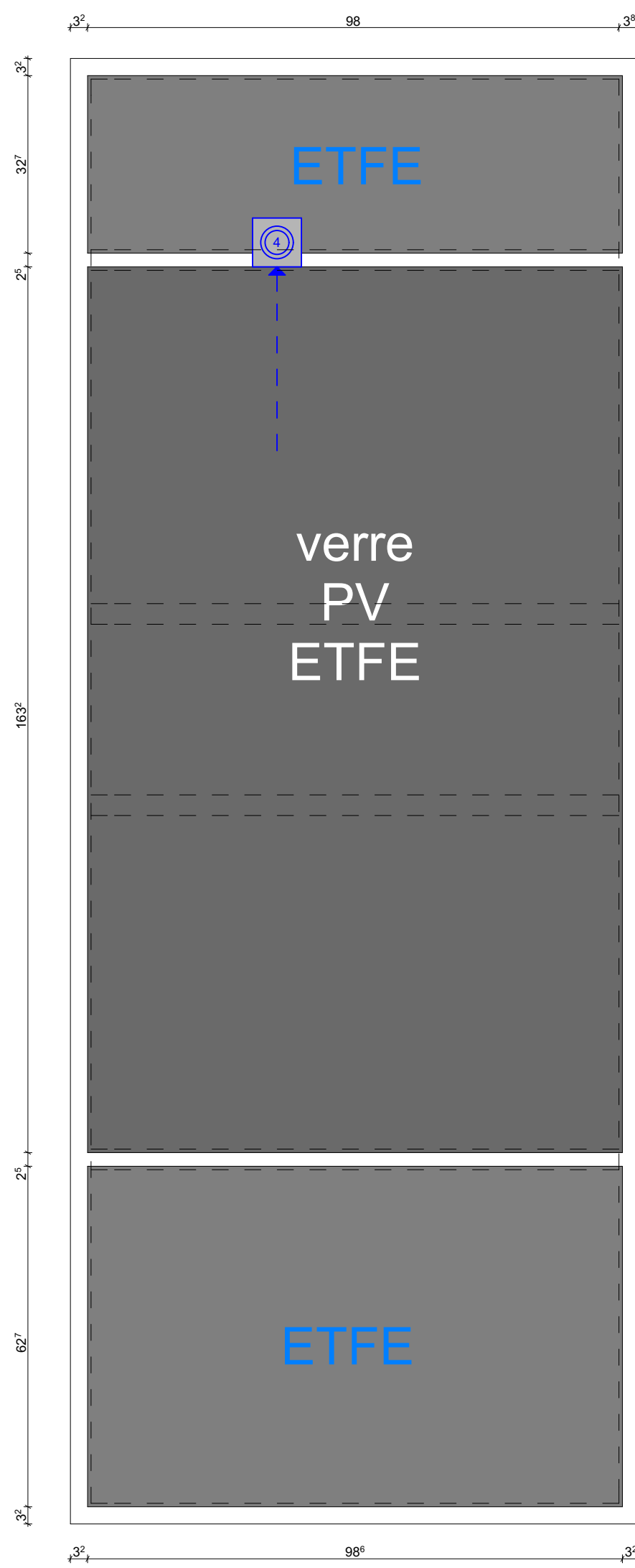
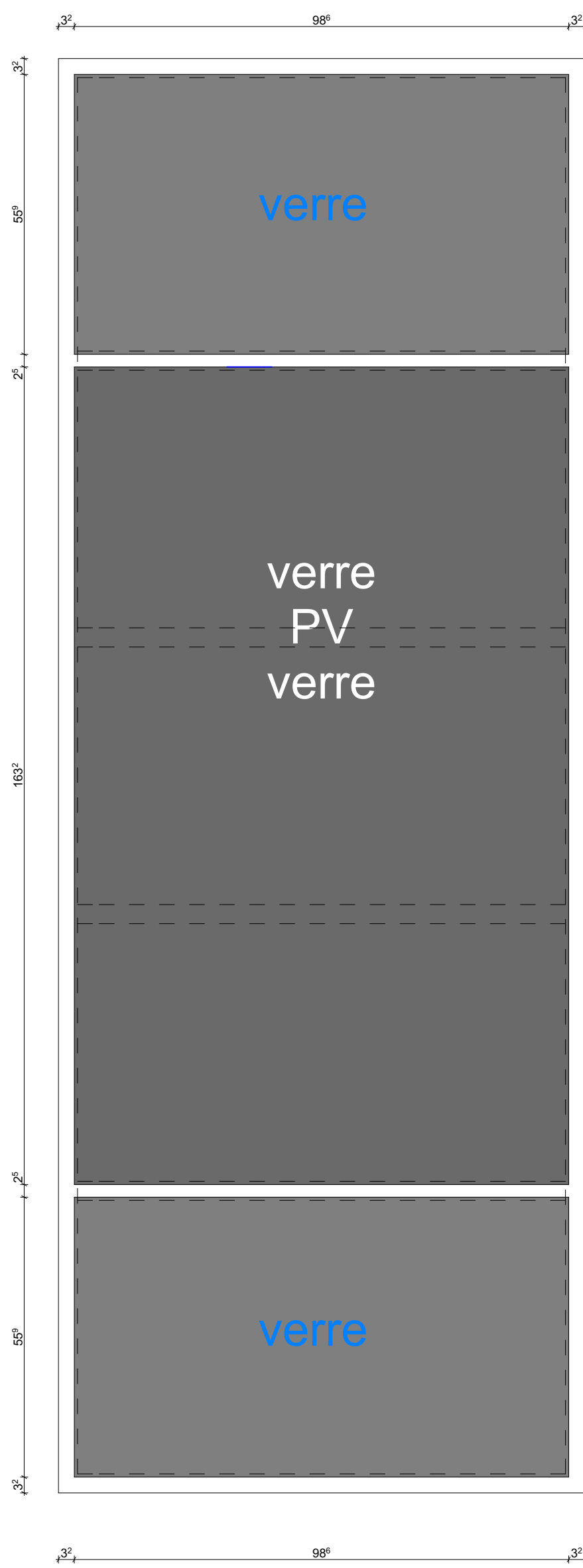
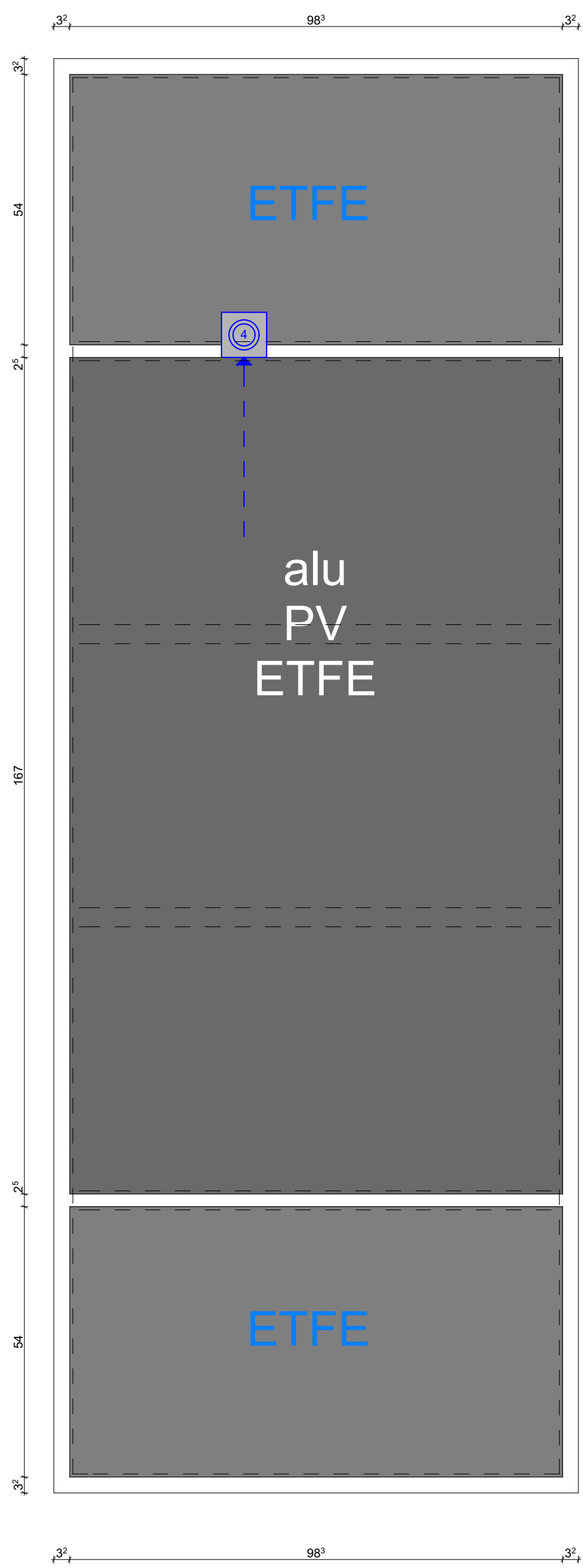
Annexes

- ***Plans d'exécution***

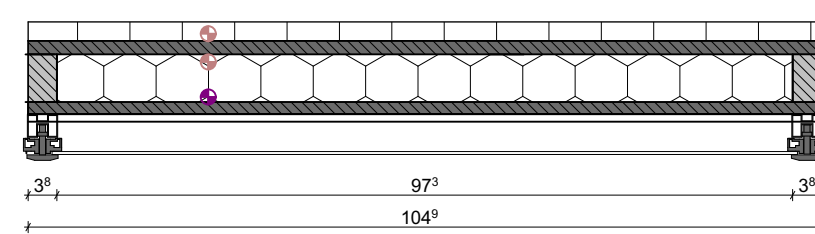
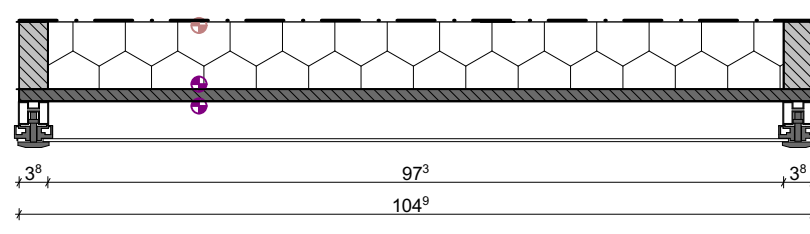
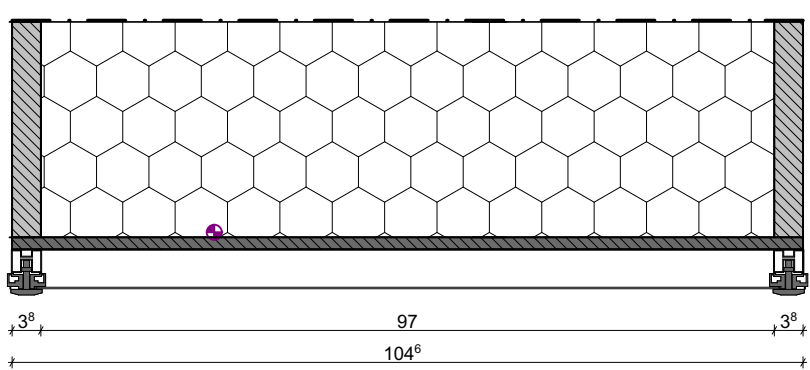
Pré-proto n°1

Pré-proto n°2

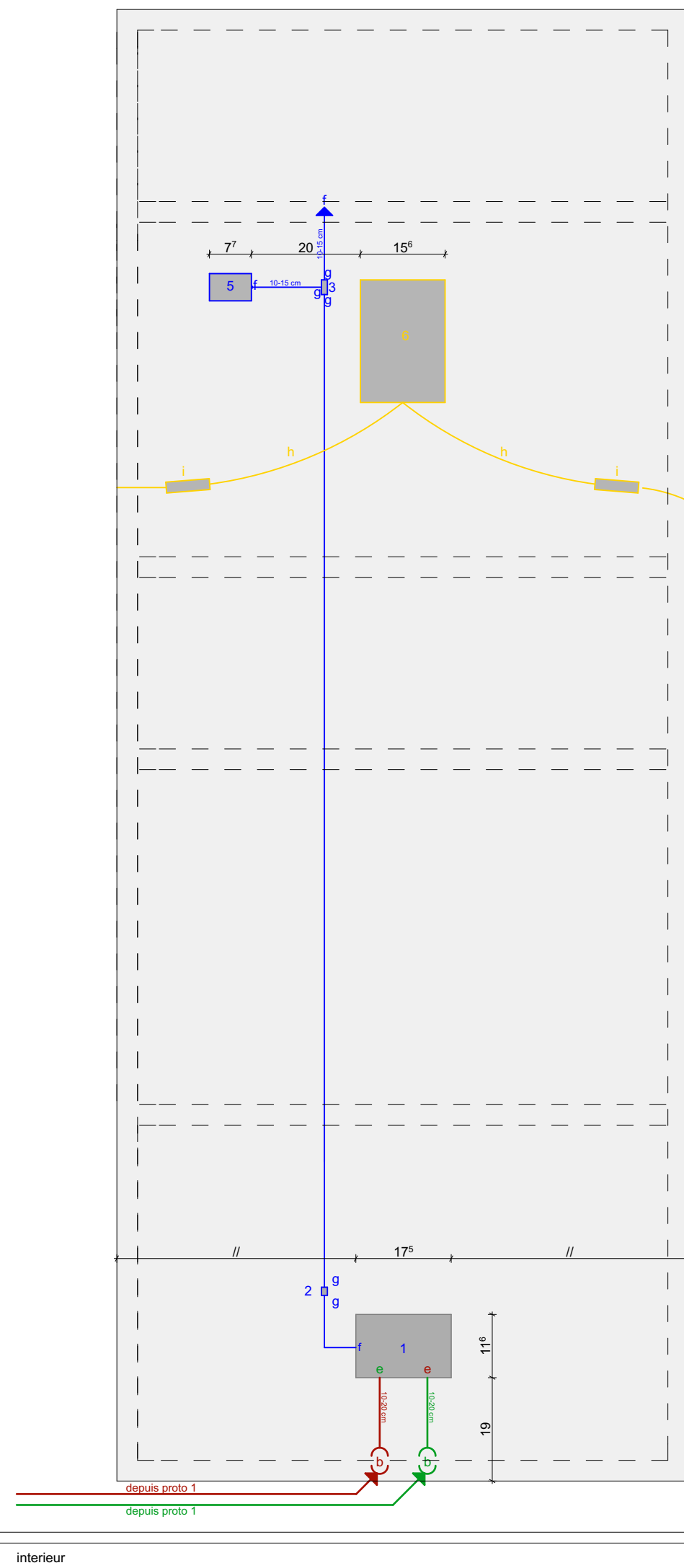
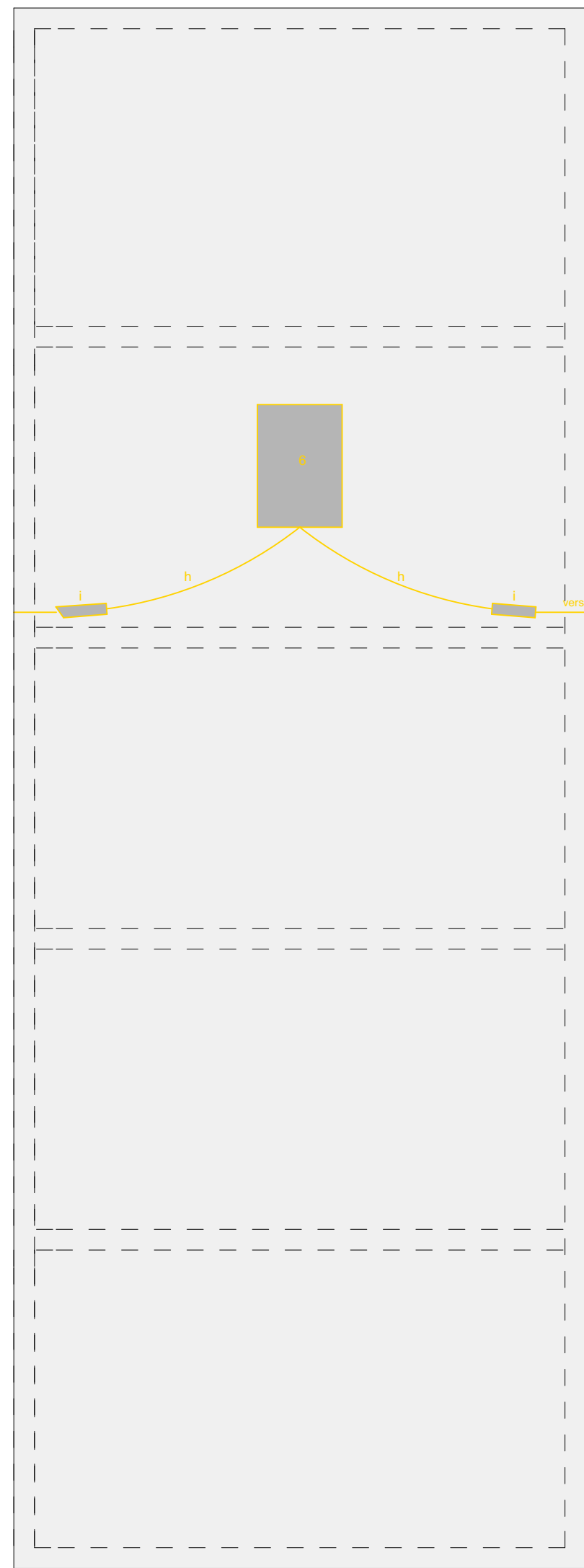
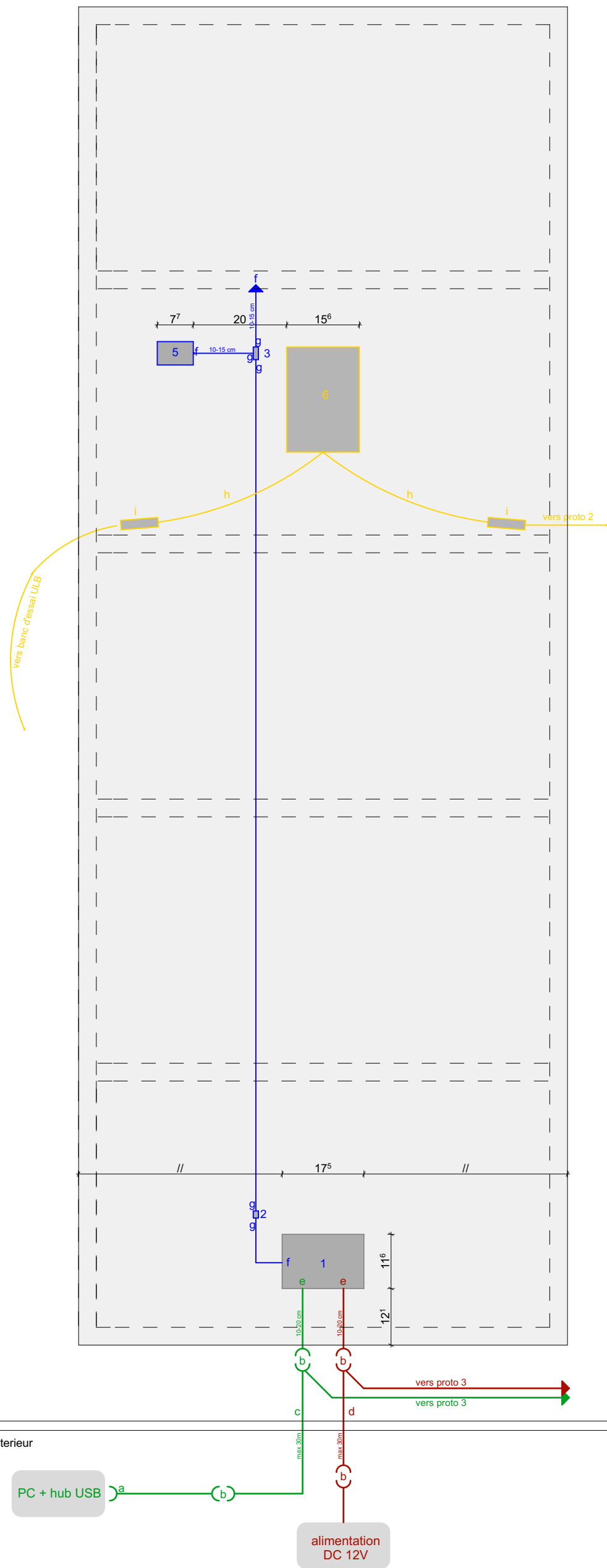
Pré-proto n°3



Elevations revêtement PV et surfaces non-actives



Vues en plan

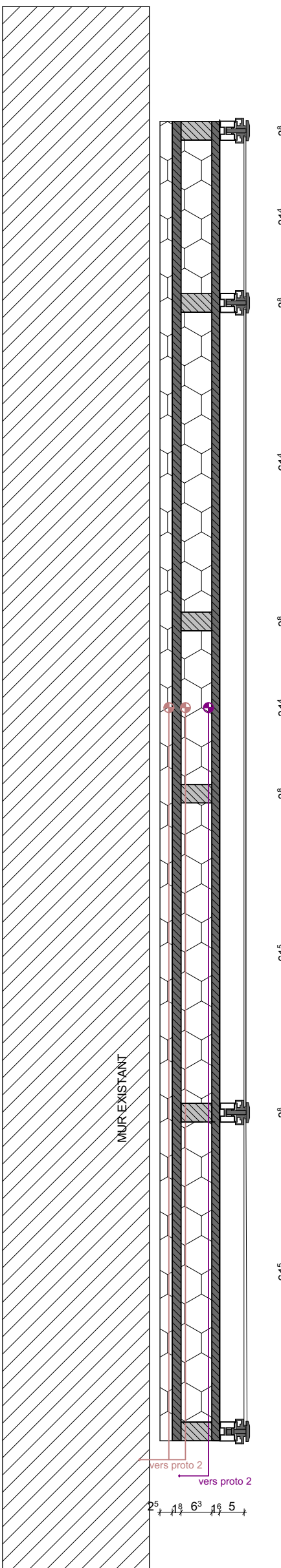
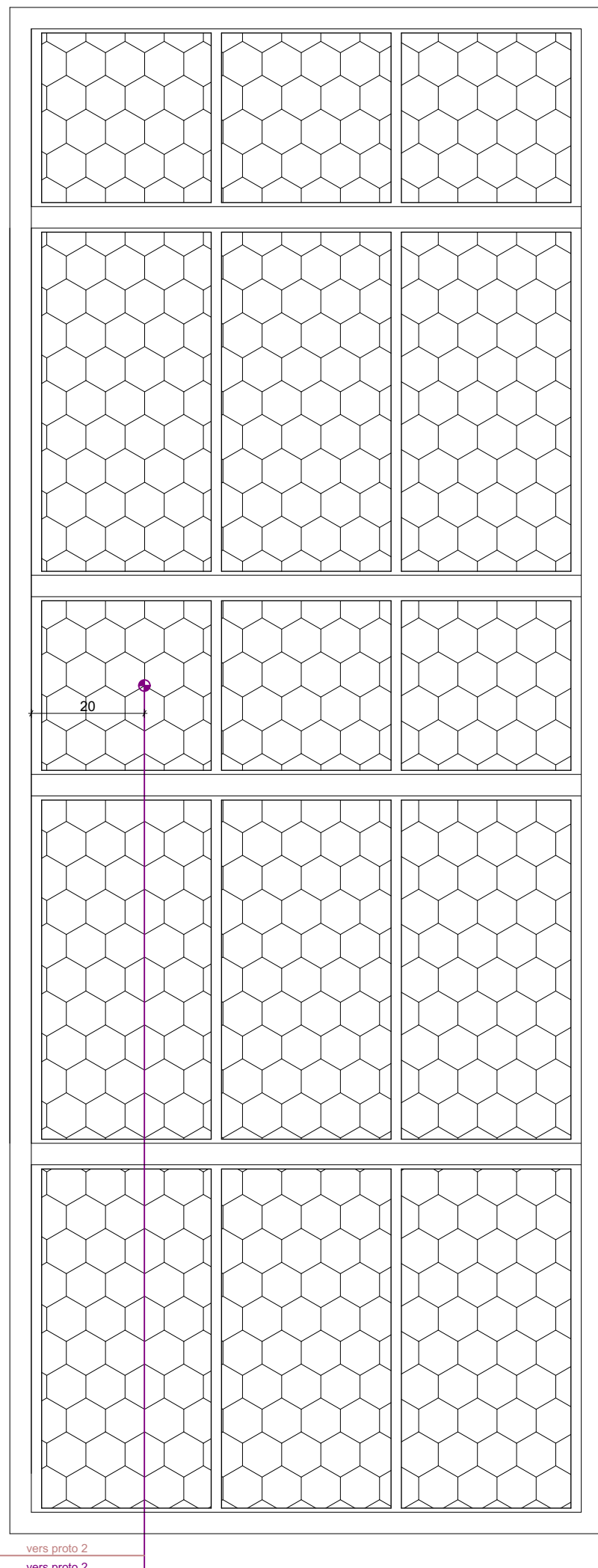
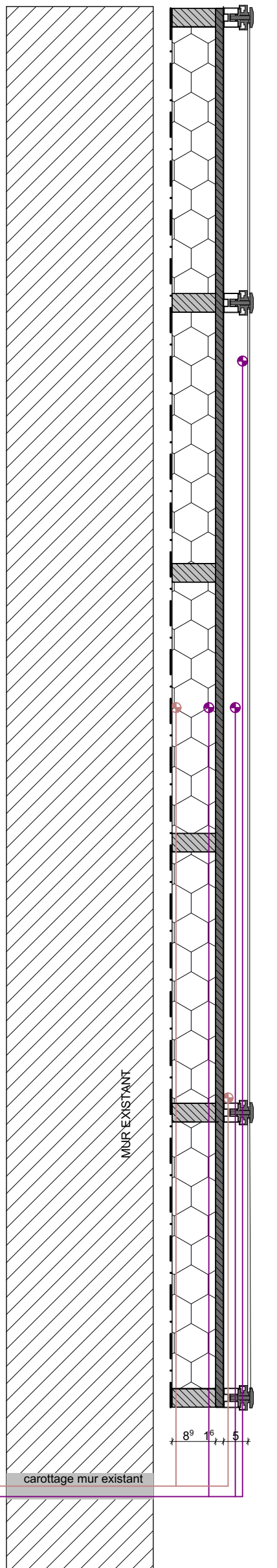
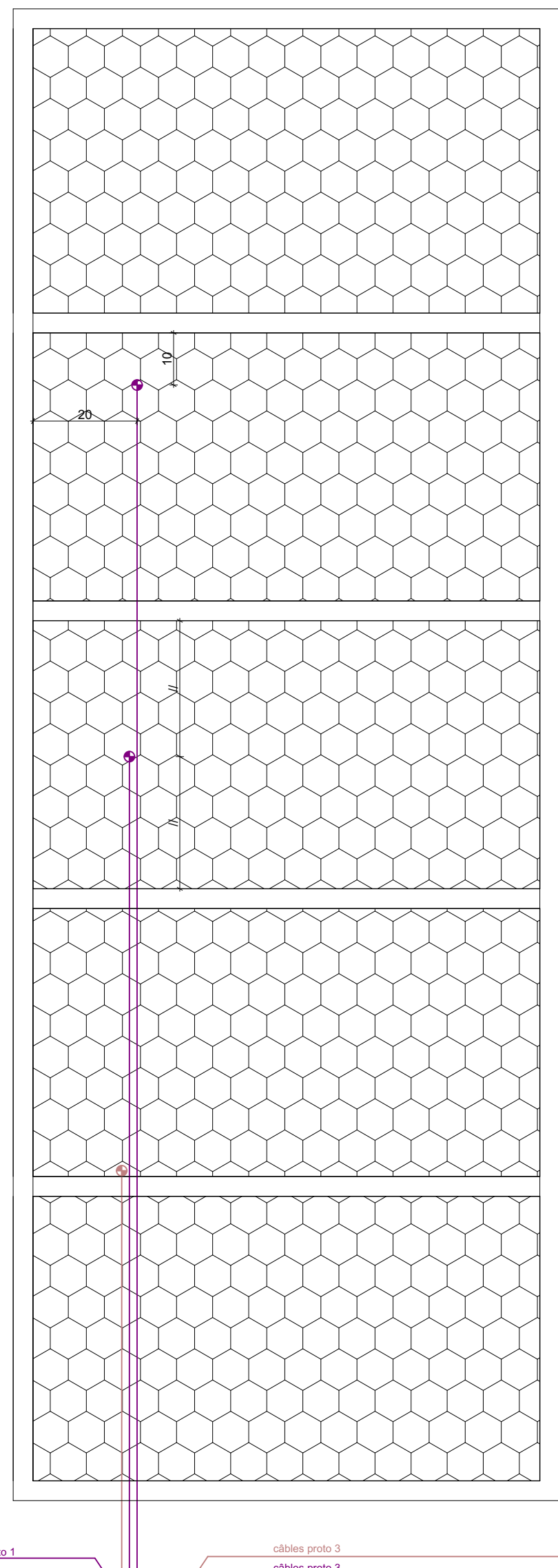
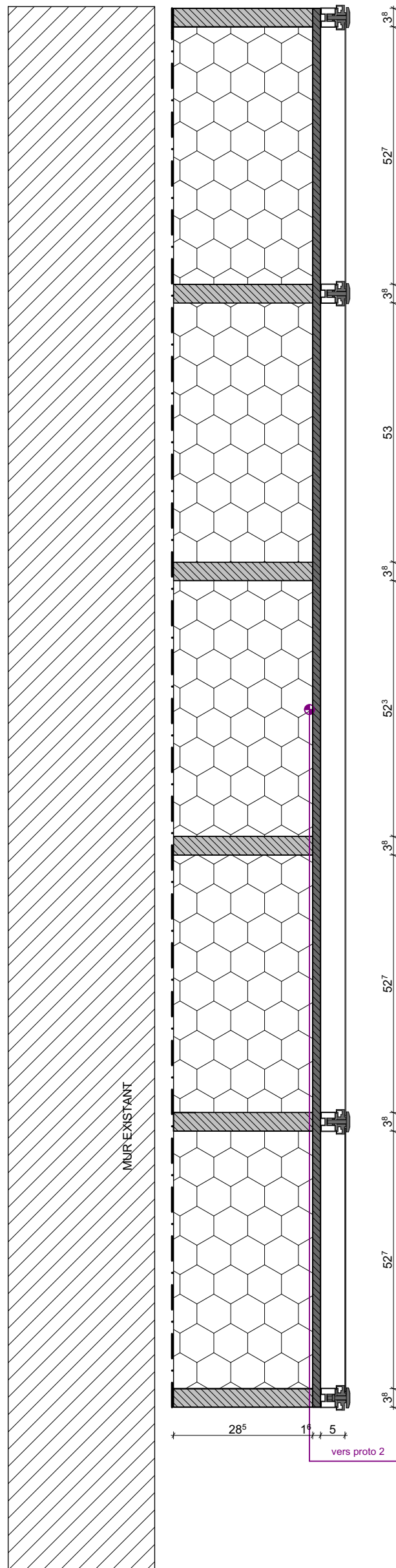
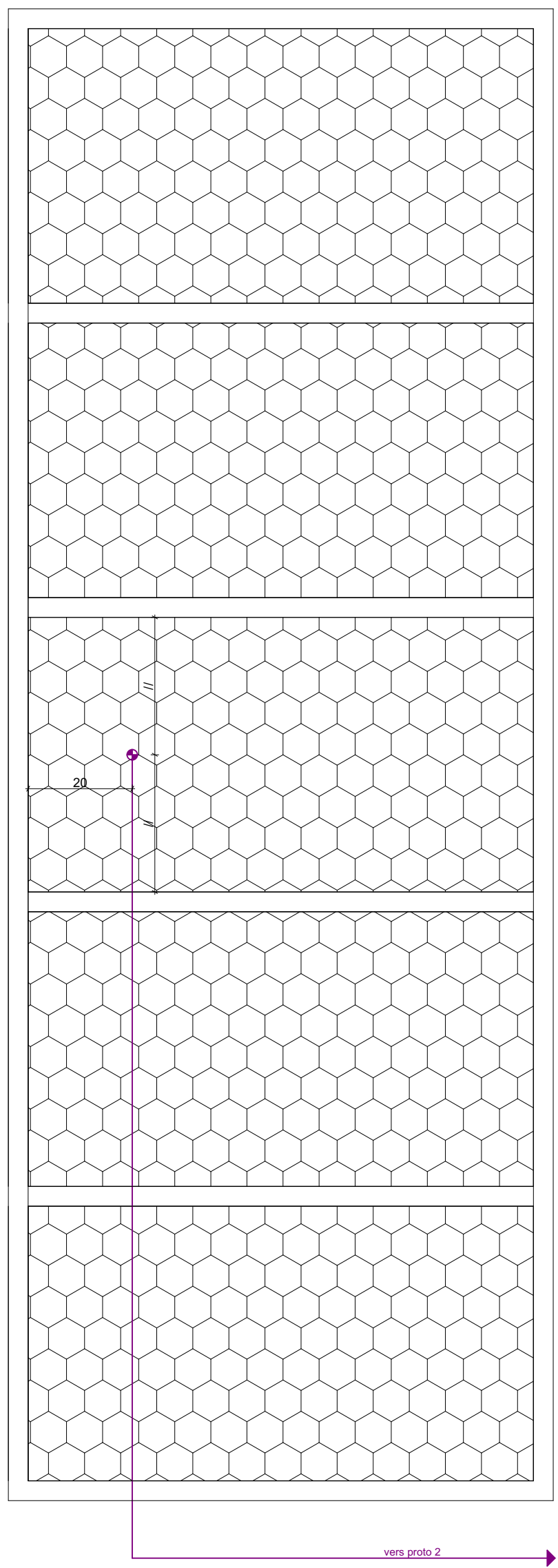


Légende

- a. Adapt. USB/RS485
- b. Connect. 3 pin Fem + mâle
- c. Câble RS485
- d. Câble alimentation DC
- e. Passe-fils 12mm
- f. Passe-fils 6mm
- g. Connecteurs RJ45 à sortir
- h. Câbles ø 6mm
- i. Connecteurs MC4 ø20m
- 1. Boîtier carte microcontrôleur
- 2. Coupleur RJ45
- 3. Splitter RJ45
- 4. Capteur de luminosité
- 5. Capteur de température
- 6. Junction box SolarEdge

- Sonde température UCL
- Sonde combinée UCL

Elevations dans la coulisse d'air



Elevations entre isolant et panneau et coupes verticales